

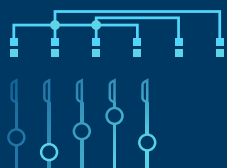
# AUTOMATICA

## XLII JORNADAS DE AUTOMÁTICA: LIBRO DE ACTAS



**JORNADAS 2021**  
[jautomatica.es/2021/](http://jautomatica.es/2021/)

1 a 3 de septiembre, 2021  
Castellón.



### EDITAN:

Universitat Jaume I, Castellón 2021  
Comité Español de Automática, Barcelona  
Servizo de Publicacións da Universidade da Coruña, A Coruña



XLII Jornadas de  
Automática  
Castellón 2021



UNIVERSIDADE  
DA CORUÑA



UNIVERSITAT  
JAUME I



**CEA**

Comité Español de Automática



GENERALITAT  
VALENCIANA

Conselleria de Innovación,  
Universidades, Ciencia  
y Sociedad Digital



Instituto Tecnológico de Veracruz





[Esta página ha sido dejada intencionadamente en blanco]

# **XLII JORNADAS DE AUTOMÁTICA : LIBRO DE ACTAS**

CASTELLÓN, 1 A 3 DE SEPTIEMBRE DE 2021

EDITAN:

Servizo de Publicacións da Universidade da Coruña, A Coruña

Comité Español de Automática, Barcelona

Universitat Jaume I, Castellón

2021



## ORGANIZAN:

Comité Español de Automática  
Universitat Jaume I

## EDITORES:

Alejandro Alonso Muñoz  
Pedro Jesús Cabrera Santana  
Dictino Chaos García  
Óscar Déniz Suárez  
Elisabet Estévez Estévez  
José Luis Guzmán Sánchez  
Raúl Marín Prades  
David Muñoz de la Peña Sequedo  
Ignacio Peñarrocha Alós  
José Luis Pitarch Pérez  
Óscar Reinoso García  
Eduardo Rocón del Lima  
Ildefonso Ruano Ruano  
Jesus Salido Tercero  
Roberto Sanchis Llopis  
Pedro J. Sanz Valero  
Carlos Vilas  
Eduardo Zalama Casanova

## DISEÑO DE CUBIERTA:

David Tur Soler

DOI: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498043>

ISBN: 978-84-9749-804-3

DEPÓSITO LEGAL: C 835-2021

THEMA: TJFM, TJF

CDU: 681.05(063)



© de esta edición: UDC, CEA, UJI

© de los textos: los autores

[Esta página ha sido dejada intencionadamente en blanco]

## PREFACIO

Las Jornadas de Automática constituyen, desde su primera edición en 1977, una cita ineludible en nuestro país para quienes centramos nuestra actividad profesional en la Automática, en todas sus dimensiones, tanto desde el mundo científico y académico como de la empresa. Tras las últimas Jornadas presenciales, Ferrol 2019, debido a las circunstancias sobrevenidas por la actual Pandemia, Castellón no pudo celebrar en 2020 dicho evento como estaba previsto, reduciéndose a una serie de actividades desarrolladas en modo virtual. Así, la presente edición de Castellón 2021, representa un acercamiento a la normalidad, y para ello este Comité Organizador ha planteado las primeras Jornadas híbridas de su historia, donde se compartirán, de manera presencial y virtual, todas y cada una de las actividades planificadas. Este año 2021 las Jornadas se celebran del 1 al 3 de septiembre en la Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales de la UJI. A lo largo de estos tres días contaremos con diversas actividades científicas, entre ellas, tres sesiones plenarias, una mesa redonda sobre Inteligencia Artificial y otra sobre "la mujer en el sector profesional de la automática". Además, tendrán lugar, como es habitual, las reuniones de los diferentes grupos temáticos, las presentaciones de empresas, y como siempre, las comunicaciones presentadas a través de las sesiones de pósteres, entre otras actividades. En esta edición, todas estas actividades se lanzarán online para poder habilitar la interacción con los participante virtuales, habiéndose habilitado un espacio Web para los pósteres digitales. Agradecemos a todos los participantes, virtuales y presenciales, su inestimable contribución en este evento: a los autores de los trabajos presentados, a los ponentes de las sesiones plenarias y las mesas redondas, al Comité Científico y Comité Científico Asesor, así como a las empresas y organismos colaboradores. También queremos dar las gracias a CEA, por confiar en la UJI como sede, por primera vez en su historia, de las dos ediciones consecutivas de 2020 y 2021. Por último, queremos dar la bienvenida a las personas asistentes, presenciales y virtuales, y agradecerles su interés en las Jornadas. Los miembros del Comité Organizador hemos puesto todo nuestro empeño en ofrecer un conjunto de actividades que les aporte una experiencia enriquecedora, no sólo desde una perspectiva profesional, sino también desde una dimensión humanística, esperando que descubran y disfruten nuestra ciudad y sus alrededores, mediante las actividades sociales propuestas. Las actas de las XLII Jornadas de Automática están formadas por un total de 105 comunicaciones, organizadas en torno a los nueve Grupos Temáticos del Comité Español de Automática. Los trabajos seleccionados han sido sometidos a un proceso de revisión por pares, y las actas se editan en formato electrónico a través del Servicio de Publicaciones de la Universidade da Coruña y se alojan para su consulta en acceso abierto en el RUC, el repositorio institucional de la UDC, bajo una licencia Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0. Además del ISBN y del DOI del volumen completo, a cada comunicación aceptada se le ha asignado un DOI, con el fin de facilitar su localización en línea y su citación bibliográfica.

Pedro J. Sanz  
Presidente del Comité Organizador Local de las XLII Jornadas de Automática  
1 de Septiembre de 2021  
Castellón



## COMITÉS

### Comité de Honor

Eva Alcón Soler	Rectora de la Universitat Jaume I
Jesús Lancis Sáez	Vicerrector de Investigación Universitat Jaume I
Amelia Simó Vidal	Directora de la Escola Superior de Tecnologia i Ciències Experimentals
Gloria Serra Isierte	Directora de la Fundació Universitat Jaume I- Empresa

### Comité de Programa

Antonio Adan	Universidad de Castilla La Mancha
Antonio Agudo	Universitat Politècnica de Catalunya
Alejandro Alonso Muñoz	Universidad Politécnica de Madrid
José Domingo Álvarez	University of Almería
Antonio Ama	
Luís T. Antelo	IIM-CSIC
Ernesto Aranda-Escolástico	UNED
Leopoldo Armesto	Universitat Politècnica de València
Deivis Avila	ULL
Josemaría Azorín	Miguel Hernandez University of Elche
Cristina Bayón Calderón	University of Twente
Alfonso Baños	University of Murcia
Manuel Berenguel	Universidad de Almería
Xavier Blasco	Universitat Politècnica de València
Pedro Cabrera	Universidad de las Palmas de gran Canaria
María Del Mar Castilla Nieto	University of Almería
Sergio Cebollada	Universidad Miguel Hernández
Dictino Chaos García	Universidad nacional de Educación a Distancia (UNED)
Deisy Chaves	Universidad de León
Ramon Costa-Castelló	Universitat Politècnica de Catalunya
Arturo De La Escalera	Universidad Carlos III de Madrid
M. Dolores Delcastillo	
Óscar Déniz Suárez	Universidad de Castilla-La Mancha
Jose A. Egea	CEBAS-CSIC
Elisabet Esteévez Esteévez	Universidad de Jaén
Eduardo Fidalgo Fernandez	University of León
Sergio Garcia-Nieto Rodriguez	Universitat Politècnica de València
Guillermo García	Universidade de Vigo
Tomás Jorge García García-Verdier	Universidad de Valladolid
Pablo Gil	University of Alicante
Juan Diego Gil Vergel	Centro Mixto CIESOL, ceiA3, Universidad de Almería
Victor Gonzalez Castro	University of Leon. Department of Electric, Systems and Automatic Engineering
Jaime González	Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Josechu Guerrero	Universidad de Zaragoza
Álvaro Gutierrez	Universidad Politécnica de Madrid
José Luis Guzmán Sánchez	Universidad de Almería
Angela Hernández-López	Universidad de La Laguna
Roberto Hornero	
Ángeles Hoyo Sánchez	Universidad de Almería
Felipe Jimenez	Universidad Politécnica de Madrid
Esteban Jove	UDC
Alejandro Laguna	CIBERDEM
Elena Lazkano	University of Basque Country
Jose Manuel Lopez-Guede	Basque Country University
Maria P. Marcos	Universidad de Valladolid
Nicolás Marichal	Universidad de La Laguna

David Martin Gomez	Carlos III University of Madrid
Raúl Marín Prades	Universitat Jaume I
Juan Albino Mendez	Universidad de La Laguna
Pilar Merchán	Universidad de Extremadura
Daniel Montes	Universidad de Valladolid
Nelson Monzón	ULPGC
Jose Carlos Moreno	University of Almeria
Fernando Morilla	UNED
Ana C. Murillo	University of Zaragoza
David Muñoz de la Peña Sequeda	Universidad de Sevilla
Manuel G. Ortega	University of Seville
Irene Otero Muras	IIM-CSIC Spanish Council for Scientific Research
Pablo Otálora	University of Almería
Gonzalo Pajares	
Alberto Pajares Ferrando	Universitat Politècnica de València
Carlos Gómez Palacín	Universidad de Valladolid
Igor Pataro	Universidad de Almería
Luis Paya	Universidad Miguel Hernandez
Anibal Pedraza	UCLM
Miquel Piera	UAB
José Luis Pitarch	Universitat Politècnica de Valencia
Míriam R. García	IMM-CSIC
Jerónimo Ramos-Teodoro	Universidad de Almeria
Rafael Raya	
Óscar Reinoso García	Universidad Miguel Hernández
Irene Rivas Blanco	University of Malaga
Lidia Roca	PSA-CIEMAT
Eduardo Rocon	Centre for Automation and Robotics (CAR). CSIC
Jerónimo Rodríguez	USC
Enrique Rodríguez Miranda	University of Brescia
Francisco Rodríguez-Díaz	Universidad de Almería
Ildefonso Ruano Ruano	Universidad de Jaén
Jesus Ruiz-Santaquiteria	University of Castilla-La Mancha
Santiago Salamanca Miño	Universidad de Extremadura
Ester Sales-Setién	
Jesus Salido	Universidad de Castilla-La Mancha
Roberto Sanchis Llopis	Universitat Jaume I
Javier Sanchis Saez	Universitat Politècnica de València
Raúl Santamaría Villanueva	Universidad Cardenal Herrera (CEU)
Matilde Santos	Universidad Complutense de Madrid
Daniel Sarabia	Universidad de Burgos
Basilio Sierra	University of the Basque Country
Jesus Enrique Sierra	Universidad de Burgos
Jorge Antonio Sánchez-Molina	Universidad de Almería
Antonio-José Sánchez-Salmerón	Universitat Politècnica de València
Fernando Tadeo	Univ. of Valladolid
Gerardo Tapia	University of the Basque Country UPV/EHU
Jose Luis Torres	Universidad de Almeria
Diego Torriceli	
Javier Turiel	
Francisco Vazquez	Universidad de Cordoba
Alejandro Vignoni	Universitat Politècnica de Valencia
Ramon Vilanova	UAB
Carlos Vilas	Instituto de Investigaciones Marinas (CSIC)
Eduardo Zalama	Universidad de Valladolid

## Comité Científico

Carlos Balaguer Bernaldo de Quirós (UC3M)	CEA Presidente
José Manuel Andujar Márquez (UHuelva)	CEA Vicepresidente
Ramón Costa Castelló (UPC)	CEA Secretario

## Comité Asesor

Carlos Ocampo Martínez (UPC)	Vocal
Jesús Fernández Lozano (UMal)	Vocal
Matilde Santos Peñas (UCM)	Vocal
José Enrique Simó Ten (UPV)	Vocal
Montserrat Gil Martínez (URioja)	Vocal
Jose Luis Calvo Rolle (UDC)	Vocal
Raúl Marín Prades (UJI)	Automar
Eduardo Rocón del Lima (CSIC)	Bioingeniería
Elisabet Esteévez Esteévez (UJaen)	Computadores y Control
Pedro Jesús Cabrera Santana (UPGC)	Control inteligente
David Muñoz de la Peña Sequeda (US)	Educación en Automática
José Luis Guzmán Sánchez (UAL)	Ingeniería de Control
José Luis Pitarch Peérez (UPV)	Modelo, Simulación y Optimización
Oscar Reinoso García (UMH)	Robótica
Oscar Déniz Suárez (UCLM)	Visión por Computador

## Comité Organizador Local

Pedro J Sanz (Presidente)  
Roberto Sanchis (Vicepresidente)  
Raúl Marín  
José V. Martí  
Amparo Tirado  
Alejandro Solís  
Andrea Pino  
Marcos de la Cruz  
Antonio Morales  
Julio A. Romero  
Ignacio Peñarrocha  
Carlos Ariño  
Pedro Balaguer  
Begoña Andrés  
Lledó Museros

## **PATROCINADORES Y COLABORADORES**

### **Patrocinadores**

CONSELLERÍA DE INNOVACIÓN, UNIVERSIDADES, CIENCIA  
Y SOCIEDAD DIGITAL (Generalitat Valenciana)

Fundación CEA

Robotnik Automation S.L.L.

IQUA Robotics SL

Technaid S.L.

IEEE RAS Spanish Chapter

Departamento de Ingeniería y Ciencia de los Computadores (Universitat Jaume I)

Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño (Universitat Jaume I)

### **Colaboradores**

Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales (Universitat Jaume I)

Centro de Investigación en Robótica y TEcnologías SUBacáticas - CIRTESU (Universitat Jaume I)

Fundació Universitat Jaume I-Empresa de la Comunitat Valenciana M.P (FUE-UJI)

### **Patrocinadores de Grupos Temáticos**

Empresarios Agrupados

Idom

Infaimon

ISA Sección Española

Kemtecnica

IQUA Robotics

Mathworks

Prodel

Robotnik

Schneider

Siemens

Springer

Werium

# Índice de Contenidos

<b>Automar</b>	<b>1</b>
ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE UN MODELO DE MANIOBRA NO LINEAL DE UN VEHÍCULO SUBACUÁTICO TELEOPERADO MEDIANTE ENSAYOS EN CANAL <i>Elías Revestido Herrero, José Ramón Llata García, Francisco Jesús Velasco González, José Joaquín Sainz Gutiérrez and Patricia Diaz Torrijos . . . . .</i>	1
DEVELOPMENT OF A SIMULATION ENVIRONMENT FOR THE LEARNING OF AN AUTONOMOUS NAVIGATION ALGORITHM FOR A 2- METER LENGTH SAILBOAT <i>Esteban Chacón Mosquera, Josep Eudald Mesegué Basallo, Rosa Maria Fernández-Cantí and José Antonio Lázaro Villa . . . . .</i>	6
DEVELOPMENT AND INSTRUMENTATION OF A 2 METERS LENGTH AUTONOMOUS SAILBOAT FOR THE COLLECTION OF OCEANOGRAPHIC DATA <i>Esteban Chacón Mosquera, Carles Manich Vallès, Joan Antoni Sastre Caballol, Josep Eudald Mesegué Basallo and Rosa M Fernández-Cantí . . . . .</i>	13
ARQUITECTURA DE SERVICIO DE IMPRESIÓN 3D PARA APOYAR ESTRATEGIAS DE ECONOMÍA CIRCULAR ALREDEDOR DEL RECICLAJE DE PLÁSTICO EN EL ENTORNO MARÍTIMO-PORTUARIO <i>Julio Garrido Campos, Diego Silva Muñiz, Blanca Lekube Gazagaetxeberria, Enrique Riveiro Fernández and Bruno Portela López . . . . .</i>	21
ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE INMERSIÓN PARA PLATAFORMAS DE SENSORES SUBMARINAS <i>Isabel Pilar Morales-Aragon, Fulgencio Soto-Valles, Juan Domingo González-Teruel and Roque Torres-Sanchez . . . . .</i>	29
NUEVA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA LA REDUCCIÓN DE OSCILACIONES EN TURBINAS EÓLICAS FLOTANTES <i>Payam Aboutalebi, Fares M'Zoughi, Izaskun Garrido and Aitor J. Garrido . . . . .</i>	37
UNA PROPUESTA PARA EL CONTROL DE ORIENTACIÓN DE UNA TURBINA WIND-FLOAT <i>Leticia del Horno, José Andrés Somolinos, Eva Segura and Rafael Morales . . . . .</i>	45
ESTABILIZACIÓN DE EÓLICA MARINA FLOTANTE MEDIANTE CONTROL DE FLUJO DE AIRE EN COLUMNAS DE AGUA OSCILANTE <i>Fares M'Zoughi, Payam Aboutalebi, Izaskun Garrido, Aitor J. Garrido and Manuel De La Sen . . . . .</i>	54
DATA ANALYSIS FOR THE DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC VESSEL CONTROL SYSTEM IN A PORT AREA <i>Ezequiel Bernal García, Rosa Maria Fernández-Cantí and Antonio Isalgué Buxeda . . . .</i>	60



HACIA SIMULACIONES REALISTAS DE AGARRE ROBÓTICO SUBMARINO EN EL CONTEXTO DEL PROYECTO TWINBOT <i>Mario Avila, Raul Marin, Alejandro Solis, Pedro J. Sanz and Jose V. Marti</i> . . . . .	66
---	----

## Bioingeniería 75

DISPOSITIVO DE MONITORIZACIÓN POSTURAL PARA PERSONAS DE LA TERCERA EDAD CON ALTO GRADO DE SEDENTARISMO <i>Patrick Vermander, Nerea Perez, Aitziber Mancisidor and Itziar Cabanes</i> . . . . .	75
---	----

APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO PARA LA CLASIFICACIÓN DE ACTIVIDADES MEDIANTE UNA MULETA INTELIGENTE PARA ESCLE- ROSIS MÚLTIPLE <i>Sergio Lucas, Asier Brull, Eva Portillo, Asier Zubizarreta and Itziar Cabanes</i> . . . . .	83
---	----

ESTRATEGIAS PARA LA ASISTENCIA A LA MARCHA DE SUJETOS CON HEMIPARE- SIA A TRAVÉS DE UNA ÓRTESIS ACTIVA DE RODILLA <i>Julio S. Lora-Millan, Juan C. Moreno and Eduardo Rocon</i> . . . . .	91
---	----

DESARROLLO DE BENCHBALANCE: UN SISTEMA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE EQUILIBRIO EN EXOESQUELETOS ROBÓTICOS <i>Cristina Bayón, Gabriel Delgado-Oleas, Nevio L. Tagliamonte, Edwin H.F. van Asseldonk and Eduardo Rocon</i> . . . . .	99
---	----

SISTEMA AMBULATORIO DE MONITORIZACIÓN DE CRISIS EPILÉPTICAS <i>David Zambrana and Jose Maria Sabater-Navarro</i> . . . . .	104
---	-----

APLICACIÓN DE REDES NEURONALES PARA EVALUAR EL ESTADO FUNCIONAL DE PACIENTES CON ESCLEROSIS MÚLTIPLE <i>Janire Otamendi, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes and Eva Portillo</i> . . . . .	111
---	-----

HERRAMIENTA GRÁFICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE CULTIVOS DE MICRO- ALGAS BASADA EN REDES NEURONALES ARTIFICIALES <i>Pablo Otálora, Jose Luis Guzman, Francisco Gabriel Acien and Manuel Berenguel</i> . . . .	119
--	-----

EVALUACIÓN DEL USO DE CORRIENTE ALTERNA EN LA MEDIDA DE LA RESPUES- TA GALVÁNICA DE LA PIEL (GSR) <i>Francisco Javier Verdú-García, José María Catalán, David Martínez-Pascual, Andrea Blan- co, Jesús Álvarez-Pastor and Nicolás García-Aracil</i> . . . . .	126
---	-----

ANÁLISIS DE INTERFACES CEREBRO-MÁQUINA BASADAS EN IMAGINACIÓN MO- TORA DE LA MARCHA <i>Laura Ferrero, Vicente Quiles, Mario Ortiz, Eduardo Iáñez, Jose A. Flores and Jose M. Azorin</i> . . . . .	133
---	-----

ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN ÓPTIMA DE ELECTRODOS PARA LA DETECCIÓN DE ATENCIÓN EN TAREA DE IMAGINACIÓN MOTORA <i>Luis De la Ossa, Javier V. Juan, Mario Ortiz, Eduardo Iáñez and José M. Azorín</i> . . . .	140
--	-----

ESTADO DEL ARTE EN ROBOTS DE ASISTENCIA EN HOSPITALES, EN ENTORNOS INFECCIOSOS (COVID-19) <i>Amparo Tirado-Bou, Raul Marin, Pedro J Sanz and Jose Vicente Marti</i> . . . . .	147
---	-----

SOLUCIÓN INTEGRADA DE CONTROL BASADO EN EMG PARA LA REHABILITACIÓN DE TERAPIAS BILATERALES EN EL EXOESQUELETO DE REHABILITACIÓN DE MANO ROBHAND <i>Ana Císnal, Sierra David, Javier Pérez Turiel and Juan Carlos Fraile Marinero</i> . . . . .	152
MICRORROBOT MANUFACTURING: MEMSLAB AT UNIVERSITY OF EXTREMADURA <i>Paloma Rodríguez, Enrique Mancha, Almudena Bravo, Cristina Nuevo, Inés Tejado and Blas Vinagre</i> . . . . .	160
INSTRUMENTACIÓN DE MULETAS DE ANTEBRAZO PARA USO EN LAMONITORIZACIÓN DE MARCHA Y MOVIMIENTO <i>Marién Narvaez and Joan Aranda</i> . . . . .	168
<b>Control Inteligente</b>	<b>175</b>
COMPRESIÓN DE DATOS DE TIPO REAL BASADA EN UN NOVEDOSO ALGORITMO DE CODIFICACIÓN PARA REDES NEURONALES DE IMPULSOS <i>Sergio Lucas, Ander Arriandiaga, Eva Portillo, Asier Zubizarreta and Itziar Cabanes</i> . .	175
MONITORING INTERFACES FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AND DC MICROGRIDS: BRIEF SURVEY AND APPLICATION CASE <i>Isaías González, Antonio José Calderón, José María Portalo and Manuel Calderón</i> . . . .	183
ETHERNET-BASED MONITORING SYSTEMS FOR RENEWABLE ENERGY-HYDROGEN MICROGRIDS <i>Antonio José Calderón, Isaías González, José María Portalo and Manuel Calderón</i> . . . .	190
CONTROLADOR DE PITCH HÍBRIDO OPTIMIZADO CON ALGORITMO GENÉTICO PARA AEROGENERADORES FLOTANTES <i>Carlos Luis Serrano Barreto, Matilde Santos and Jesús Enrique Sierra-García</i> . . . . .	197
A3C FOR DRONE AUTONOMOUS DRIVING USING AIRSIM <i>David Villota, Montserrat Gil and Javier Rico</i> . . . . .	203
<b>Educación en Automática</b>	<b>210</b>
ADAPTACIÓN DE LA DOCENCIA POR COVID-19: EXPERIENCIA EN LA INGENIERÍA AUTOMÁTICA <i>Oscar Miguel-Escrig, Carlos Díaz-Sanahuja, Ignacio Peñarrocha-Alós and Roberto Sanchis-Llopis</i> . . . . .	210
USO DEL PARADIGMA TAKE-HOME LABS PARA LA ENSEÑANZA DEL CONTROL AUTOMÁTICO EN ESTUDIOS DE INGENIERÍA <i>Ángeles Hoyo, Francisco García-Mañas, Jerónimo Ramos-Teodoro, Jorge Antonio Sánchez-Molina, José Luis Guzmán and Francisco Rodríguez</i> . . . . .	218
PARALLELISM TECHNIQUES APPLIED TO MULTIMEDIA <i>Valentina Romero, Matías García Rivera, Miguel Díaz-Cacho Medina and René Lastra</i> . .	226
LABORATORIO REMOTO PARA EL ROBOT EDUCATIVO DOBOT MAGICIAN <i>Daniela Alejandra Gonçalves López de Medrano, Jesús Chacón, Eva Besada-Portas and Jose Antonio López-Orozco</i> . . . . .	232

MEIA. 4.0 PARA ABORDAR LOS RETOS ACTUALES DE FORMACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN	
<i>Arantzazu Burgos, Nagore Iriondo, María Luz Alvarez and Isabel Sarachaga</i>	240
APRENDE FUNDAMENTOS DE CONTROL CONSTRUYENDO UN PROPIO SIGUELINEAS	
<i>Ignacio Alvarado Aldea, José Antonio Borja Conde, Francisco Salas Gómez and David Muñoz de la Peña Sequeda</i>	248
CONTROL DE VELOCIDAD DE UN VENTILADOR DE UNA CPU	
<i>Ignacio Alvarado Aldea, José Antonio Borja Conde, Richard Haes Ellis and David Muñoz de la Peña Sequeda</i>	254
IMPLEMENTACIÓN VIRTUAL DE PRÁCTICAS DE ASIGNATURAS DE CONTROL COMO ALTERNATIVA A LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO PRESENCIALES	
<i>Francisco Zayas-Gato, Álvaro Michelena, Esteban Jove, José-Luis Casteleiro-Roca, Héctor Quintián and José Luis Calvo-Rolle</i>	259
EVALUACIÓN AUTOMÁTICA DE CÓDIGO PARA PRÁCTICAS DE MODELADO Y CONTROL UTILIZANDO MATLAB GRADER	
<i>Yadira Boada, Lissette Boada Acosta and Alejandro Vignoni</i>	269
REDISEÑO DE UNA PLATAFORMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE BAJO COSTE PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA DE CONTROL	
<i>Javier Rico-Azagra and Montserrat Gil-Martinez</i>	275
UNA INTEGRACIÓN A SISTEMAS DE GESTIÓN DE APRENDIZAJE BASADA EN ESTÁNDARES DE UN SISTEMA BARRA-BOLA	
<i>Elisabet Estévez Estévez, Ildefonso Ruano Ruano, Alicia Montoro Lendínez, Juan Gómez Ortega and Javier Gámez García</i>	282
SOPORTE PARA LA GENERACIÓN DE MAQUETAS VIRTUALES DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL	
<i>Alejandro Sánchez García, Elisabet Estévez Estévez and Ildefonso Ruano Ruano</i>	288
<b>Ingeniería de Control</b>	<b>294</b>
DESARROLLO DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO CON COMPENSACIÓN POR ADELANTO Y GARANTÍA DE ESTABILIDAD: RESULTADOS PRELIMINARES	
<i>Igor M. L. Pataro, Juan D. Gil, Marcus V. Americano-Dacosta, José L. Guzmán and Manuel Berenguel</i>	294
OPTIMIZACIÓN DE TEMPERATURA EN REACTORES RACEWAY PARA LA PRODUCCIÓN DE MICROALGAS MEDIANTE REGULACIÓN DE NIVEL	
<i>José González Hernández, Enrique Rodríguez Miranda, José Luis Guzmán Sánchez, Manuel Berenguel Soria and Francisco Gabriel Acién Fernández</i>	301
FUSIÓN DE SENSORES PARA LOCALIZACIÓN ROBUSTA DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS EN ÁREAS URBANAS	
<i>Kerman Viana, Mikel Díez and Asier Zubizarreta</i>	309
APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE BUCLES Y AJUSTE DE CONTROLADORES MEDIANTE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO	
<i>Victor Huilcapi, Xavier Blasco, Juan Manuel Herrero and Alberto Pajares</i>	317

PRELIMINARY STUDY OF THE EVALUATION METHODS FOR SHARED CONTROL <i>Joseba Sarabia, Mauricio Marcano, Joshué Perez, Sergio Diaz and Asier Zubizarreta . . .</i>	325
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CÁMARA CLIMÁTICA CONTROLADA PARA REPRODUCIR EPISODIOS DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS PERECEDERAS <i>Maria Aranzazu Segado-Fernández, Julio Jose Ibarrola-Lacalle, Jaime Giménez-Gallego and Roque Torres-Sanchez . . . . .</i>	333
EVENT-BASED CONTROL WITH RELATIVE THRESHOLD APPLIED TO CRAZYFLIE 2.1 QUADROTOR ALTITUDE CONTROL <i>Francisco José Mañas-Álvarez, María Guinaldo, Raquel Dormido, Rafael Socas and Sebastián Dormido . . . . .</i>	341
DIMENSIONADO DE SISTEMA DE ALMACENAMIENTO PARA HIBRIDACIÓN CON FV A PARTIR DE PREDICCIONES PROBABILÍSTICAS DE IRRADIANCIA <i>Emilio Pérez, Javier González Barreda, Jorge Segarra Tamarit and Hector Beltran . . . .</i>	349
ESTIMACIÓN DEL ESTADO DE CARGA Y COEFICIENTES DE DIFUSIÓN EN BATERÍAS DE FLUJO REDOX <i>Alejandro Clemente, Andreu Cecilia and Ramon Costa-Castelló . . . . .</i>	357
CONTROL NO LINEAL ADAPTATIVO CON IDENTIFICACIÓN DISPERSA <i>Roger Domingo-Enrich, Andreu Cecilia and Ramon Costa-Castelló . . . . .</i>	365
PLANTA EXPERIMENTAL PARA SISTEMAS DE CALEFACCIÓN DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO <i>María Luisa Delgado Guerrero, Manuel Lara Ortiz and Francisco Vázquez Serrano . . . .</i>	373
MODELOS DE GRAFCET Y APLICACIONES DISTRIBUIDAS EN LA NORMA IEC 61499. UN CASO DE ESTUDIO. <i>Oscar Miguel-Escrig and Julio-Ariel Romero-Pérez . . . . .</i>	380
MODELADO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE FRÍO CON ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA <i>Luis Fernando Acedo Bueno, Manuel Garrido Satue, Manuel Ruiz Arahal, Carlos Vivas Venegas and Manuel Gil Ortega Linares . . . . .</i>	388
<b>Modelado, Simulación y Optimización</b>	<b>395</b>
RENTABILIDAD DE BATERÍAS EN APLICACIONES FV PARA EL SECTOR COMERCIAL BAJO OPERACIÓN BASADA EN MPC <i>Pablo Ayuso Olmeda, Emilio Pérez Soler, Javier Cardo Miota and Héctor Beltrán San Segundo . . . . .</i>	395
IMPLEMENTACIÓN DE CAPAS SUPERIORES DE LA PIRÁMIDE DE AUTOMATIZACIÓN EN UNA PLANTA PILOTO HÍBRIDA <i>Daniel Montes, Jesús María Zamarréño Cosme, José Luis Pitarch, Erika Oliveira-Silva and Cesar de Prada . . . . .</i>	403
MODELO DE PREDICCIÓN DE RESPUESTAS CARDIOVASCULARES DURANTE LA INMERSIÓN EN UN ENTORNO ACUÁTICO <i>David Martínez-Pascual, Manuel Arnau-Papí, José María Catalán, Luís Daniel Lledó, Santiago Ezquerro, Francisco Javier Verdú-García and Nicolás García-Aracil . . . . .</i>	411

<p>ANÁLISIS DE PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS LIBRES DE COLISIONES CON EL OPERADOR HUMANO EN SISTEMAS DE TIPO SUPERNUMERARIO  <i>David Martínez-Pascual, Jesús Álvarez-Pastor, Francisco Javier Verdú-García, Manuel Arnau-Papí, Luís Daniel Lledó, Francisco López-Labrador, Miguel Ángel Bernal and Nicolás García-Aracil</i> . . . . .</p>	419
<p>BIOMASS ESTIMATION MODEL IN ANOXIC-AEROBIC ALGAL-BACTERIAL PHOTO-BIOREACTOR CONFIGURATION FOR WASTEWATER TREATMENT  <i>Irina Bausa Ortiz, Raúl Muñoz Torre, Smaranda Podar Cristea and César de Prada Moraga</i></p>	427
<p>ENTORNO DE SIMULACIÓN PARA VEHÍCULOS AUTOMATIZADOS CON CARLA  <i>Asier Arizala, Daniel Campelo, Asier Zubizarreta and Joshué Pérez</i> . . . . .</p>	435
<p>COMPARATIVA ENTRE MODELOS ESTOCÁSTICOS DE CRECIMIENTO BACTERIANO A DISTINTAS ESCALAS  <i>Nerea Martínez-López, Carlos Vilas and Miriam Garcia</i> . . . . .</p>	442
<p>CRUDE OIL OPERATIONS SCHEDULING IN A MARINE-ACCESS REFINERY  <i>Tomás Jorge García García-Verdier, Gloria Gutiérrez, Carlos Gómez Palacín, Carlos Méndez and César de Prada</i> . . . . .</p>	450
<p>PROPULSIÓN Y DIRECCIÓN DE UN MICRORROBOT TIPO FLAGELO FLEXIBLE UTILIZANDO LA ANALOGÍA DEL COHETE. SIMULACIÓN EN COMSOL MULTIPHYSICS  <i>Enrique Mancha-Sánchez, Paloma Rodríguez, Almudena Bravo, Inés Tejado and Blas M. Vinagre</i> . . . . .</p>	461
<p>MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN AEROGENERADOR DE 5 MW ESCALADO A PARTIR DE UNO DE 7 KW  <i>Laura Olaya Rúa, Jesús Enrique Sierra García and Matilde Santos Peñas</i> . . . . .</p>	469
<p>ESTIMATION OF THE WATER STRESS LEVEL IN FRUIT TREES USING MACHINE LEARNING FOR APPLICATION IN INTELLIGENT IRRIGATION SYSTEMS  <i>Juan D. González-Teruel, Víctor Blanco, Pedro José Blaya-Ros, Rafael Domingo, Fulgencio Soto-Valles and Roque Torres-Sánchez</i> . . . . .</p>	477
<p>GENE VARIANT DESIGN SPACE FOR BIOSENSOR-BASED PATHWAY DYNAMIC REGULATION  <i>María Camarena, Yadira Boada, Jesús Picó and Pablo Carbonell</i> . . . . .</p>	485
<p>COMPARACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA LA ESTIMACIÓN DE ACTITUD EN CONTROLADORA DE VUELO PARA UAV PROFESIONAL  <i>David Gallarta-Sáenz, Javier Rico-Azagra, Montserrat Gil-Martínez and Ramón Rico-Azagra</i></p>	492
<b>Robótica</b>	<b>499</b>
<p>ROBUST CONTROL STRATEGY FOR IMPROVING THE PERFORMANCE OF A SOFT ROBOTIC LINK  <i>Luis Nagua, Jorge Muñoz, Lisbeth Mena, Concepción A. Monje and Carlos Balaguer</i> . . .</p>	499
<p>EVALUACIÓN DE DESCRIPTORES LOCALES EN LOCALIZACIÓN VISUAL CON IMÁGENES OJO DE PEZ  <i>María Flores, David Valiente, Arturo Gil, Adrián Peidró, Oscar Reinoso and Luis Payá</i> .</p>	507



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL DE FUERZA PARA UN ROBOT DE REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR <i>José Vicente García Pérez, Andrea Blanco, José María Catalán, Santiago Ezquerro, Jesús Álvarez Pastor, Manuel Arnau Papí and Nicolás García Aracil</i> . . . . .	515
DESARROLLO DE UN EXOESQUELETO PARA EL ANTEBRAZO Y LA MUÑECA UTILIZANDO UN SOLO ACTUADOR <i>Jesús Álvarez-Pastor, Luis Daniel Lledó, Santiago Ezquerro, Alicia Garrote, Teresa Costa, Andrea Blanco, José Vicente García-Pérez and Nicolás García-Aracil</i> . . . . .	521
ELECTRONICS IMPROVEMENTS FOR LOW-LEVEL CONTROL IN THE HUMANOID ROBOT TEO <i>Juan Miguel Garcia Haro, Edwin Daniel Oña Simbaña, Raul de Santos Rico, Santiago Martínez and Carlos Balaguer</i> . . . . .	528
DETECCIÓN DE AGARRE DE OBJETOS DESCONOCIDOS CON SENSOR VISUAL-TÁCTIL <i>Julio Castaño-Amoros, Pablo Gil, Ines Fernández and Santiago Puente</i> . . . . .	535
UN EXOESQUELETO FLEXIBLE Y TEXTIL PARA ASISTIR LA FLEXIÓN DEL CODO <i>José Luis Samper Escudero, David Cantalejo Escobar, David Pont Esteban, Aldo Francisco Contreras González, Ricardo Ruiz, Fernando Blaya, Santiago Tapia, Miguel Ángel Sánchez-Urán González and Manuel Ferre</i> . . . . .	542
SOCIAL ROBOT AS COOKING ASSISTANT <i>Jaime Gómez Jiménez, Sara Carrasco Martínez, Miguel A. Quispe Flores, Javier Sevilla Salcedo, Fernando Alonso Martín and Miguel A. Salichs</i> . . . . .	550
DYNAMIC SEMANTIC ONTOLOGY GENERATION: A PROPOSAL FOR SOCIAL ROBOTS <i>Javier Sevilla Salcedo, Miguel A. Quispe Flores, Sara Carrasco Martínez, Jaime Gómez Jiménez, José. C Castillo, Álvaro Castro González, María Malfaz and Miguel A. Salichs</i> . . . . .	557
REMOTE COMMUNICATION BETWEEN FAMILY MEMBERS THROUGH SOCIAL ROBOTICS <i>Sara Carrasco Martínez, Miguel A. Quispe Flores, Javier Sevilla Salcedo, Jaime Gómez Jiménez, Fernando Alonso Martín and Miguel A. Salichs</i> . . . . .	565
ACCESSIBLE MUSIC STREAMING APPLICATION FOR SOCIAL ROBOT <i>Miguel A. Quispe Flores, Sara Carrasco Martínez, Javier Sevilla Salcedo, Jaime Gómez Jiménez, Fernando Alonso Martín and Miguel A. Salichs</i> . . . . .	573
SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE RESPALDO MEDIANTE TECNOLOGÍA LORA CON HARDWARE Y SOFTWARE ABIERTO PARA APLICACIONES DE ROBÓTICA DE EMERGENCIAS <i>R.F. Manrique Balmaceda, R. Vázquez Martín, J. Bravo Arrabal, J. Fernandez-Lozano and A. García Cerezo</i> . . . . .	581
INTEGRATION AND EVALUATION OF A MULTI-GNSS SYSTEM IN AN UNMANNED GROUND VEHICLE <i>Edison Patricio Velasco Sánchez, Miguel Ángel Muñoz-bañón, Francisco A. Candelas and Santiago T. Puente</i> . . . . .	588
DESIGN OF A DYNAMIC MOCK-UP BENCH FOR TESTING ROBOTIC INTERVENTIONS <i>Luana Barbosa Pina Pereira, Carlos Veiga Almagro, Luca Rosario Buonocore, Raul Marín Prades, Mario Di Castro and Alessandro Masi</i> . . . . .	593

EXOESQUELETO HÍBRIDO PARA REHABILITACIÓN DE LAS EXTREMIDADES SUPERIORES <i>Aldo Francisco Contreras González, David Pont Esteban, José Luis Samper Escudero, David Cantalejo-Escobar, Miguel Ángel Sánchez-Urán González and Manuel Ferre . . . . .</i>	599
ROBÓTICA COLABORATIVA EN APLICACIONES DE ASISTENCIA EN MÁQUINAS DE ELECTROEROSIÓN <i>Roman Abad, Asier Muñoz, Jose Mari Ramos, Aitziber Mancisidor and Itziar Cabanes . .</i>	606
APLICACIÓN DE UN ROBOT COLABORATIVO DE DOS BRAZOS PARA RESOLVER EL CUBO DE RUBIK <i>Garazi Fernández, Asier Herrán, Aitziber Mancisidor, César Pérez and Itziar Cabanes . .</i>	611
LOCALIZANDO ELEMENTOS DE INTERÉS MEDIANTE VEHÍCULOS OPERADOS REMOTAMENTE PARA LA EXPLOTACIÓN SOSTENIBLE DE GRANJAS ACUÍCOLAS. <i>Fernando Gómez-Bravo, Alejandro Garrocho-Cruz, Juan Carlos Gutiérrez-Estrada, Inmaculada Pulido-Calvo, Jairo Castro-Gutiérrez, Antonio Peregrín-Rubio and Samuel López-Domínguez . . . . .</i>	617
APLICACIÓN DE MATLAB Y SIMULINK PARA ESTACIONES ROBÓTICAS <i>Alberto Herreros López . . . . .</i>	625
HETEROGENEOUS SYSTEM FOR DAILY ACTIVITY MONITORING AT HOME AND WELL-BEING OF ELDERLY PEOPLE ABSTRACT <i>Francisco Miguel Calatrava Nicolás, Francisco José Ortiz Zaragoza, José Alfonso Vera Repullo, Joaquín Roca González, Manuel Jiménez Buendía and Óscar Martínez Mozos . .</i>	632
<b>Visión por Computador</b>	<b>640</b>
ENTRENAMIENTO, OPTIMIZACIÓN Y VALIDACIÓN DE UNA CNN PARA LOCALIZACIÓN JERÁRQUICA MEDIANTE IMÁGENES OMNIDIRECCIONALES. <i>Juan José Cabrera Mora, Sergio Cebollada, Mónica Ballesta, Luis Miguel Jimenez, Luis Payá Castelló and Oscar Reinoso . . . . .</i>	640
A VIDEO SUMMARIZATION APPROACH TO SPEED-UP THE ANALYSIS OF CHILD SEXUAL EXPLOITATION MATERIAL <i>Rubel Biswas, Deisy Chaves, Laura Fernández-Robles, Eduardo Fidalgo and Enrique Alegre</i>	648
ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE SEGMENTACIÓN SEMÁNTICA DE NUBES DE PUNTOS CON REDES NEURONALES <i>Alejandro Espacio Regalado, Santiago Salamanca Miño, María Pilar Merchán García, Emiliano Pérez Hernández and Samuel Punzón Agudo . . . . .</i>	655
PROTOTYPE ROBOTIC CATHETER WITH VISION-BASED HAPTIC SENSOR <i>Almudena Bravo, Blas Manuel Vinagre, Inés Tejado, Enrique Mancha, Paloma Rodriguez and José Emilio Traver . . . . .</i>	663
FUSIÓN DE SERIES TEMPORALES DE NUBES DE PUNTOS PARA SU EXPLORACIÓN EN REALIDAD VIRTUAL <i>Samuel Punzón, Emiliano Pérez, María Pilar Merchán, Santiago Salamanca and Alejandro Espacio . . . . .</i>	671
MICROHIKARI3D: TRANSFORMANDO UNA IMPRESORA 3D EN UN MICROSCOPIO ROBOTIZADO MODERNO <i>Pablo T. Toledano, Gloria Bueno, Noelia Vállez, Oscar Deniz and Jesús Salido . . . . .</i>	678

ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE AUMENTO DE DATOS Y ENTRENAMIENTO EN YOLOV3 PARA DETECCIÓN DE OBJETOS EN IMÁGENES RGB Y TIR DEL UMA-SAR DATASET <i>Álvaro Galán-Cuenca, Ricardo Vázquez-Martín, Anthony Mandow, Jesús Morales and Alfonso García-Cerezo</i> . . . . .	686
CLASIFICACIÓN Y MANIPULACIÓN DE BASURA DOMÉSTICA UTILIZANDO DEEP-LEARNING <i>Santiago Puente, Pablo Gil and Victor De Gea</i> . . . . .	695
<b>Computadores y Control</b>	<b>701</b>
MODEL-BASED DESIGN OF FOG APPLICATIONS AS MICROSERVICE WORKFLOWS <i>Ekaitz Hurtado, Alejandro López, Isabel Sarachaga, Aintzane Armentia, Elisabet Estévez and Marga Marcos</i> . . . . .	701
DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS TO SIMULATE AND INTEGRATE MANUFACTURING ASSETS IN THE INDUSTRY 4.0 <i>Darío Orive, Alejandro López, Elisabet Estévez, Adrián Orive and Marga Marcos</i> . . . . .	709
MANUFACTURING TRACEABILITY BASED ON INDUSTRIAL AGENTS <i>Alejandro López, Elisabet Estévez and Marga Marcos</i> . . . . .	717
SOFTWARE Y COMPUTADOR EMBARCADO BASADO EN COTS PARA EL EXPERIMENTO TASEC-LAB <i>Ángel Grover Pérez Muñoz, Juan Zamorano Flores, David González Bárcena and Juan Antonio De la Puente</i> . . . . .	724
ARQUITECTURA MODULAR PARA LA GESTIÓN AUTOMÁTICA DEL TRÁFICO EN ROTONDAS <i>Adrián Lara Domínguez, Pedro Uribe Chavert, Jose Luis Poza Lujan and Juan Luis Posadas Yagüe</i> . . . . .	731
OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN SISTEMAS DE CONTROL MEDIANTE ENTROPÍA <i>Antonio Ruiz Alba, Khen Sharman and Sergio Sáez</i> . . . . .	739
REVISIÓN DE TECNOLOGÍAS HABILITADORAS PARA EL CONTROL BIOLÓGICO DE PLAGAS EN EL SECTOR HORTOFRUTÍCOLA <i>Cristian Martín, Luis Llopis, Bartolomé Rubio and Manuel Díaz</i> . . . . .	744
ML MODELS FOR REAL-TIME HYBRID SYSTEMS <i>Manuel I. Capel</i> . . . . .	752
<b>Índice de Autores</b>	<b>760</b>

# ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE UN MODELO DE MANIOBRA NO LINEAL DE UN VEHÍCULO SUBACUÁTICO TELEOPERADO MEDIANTE ENSAYOS EN CANAL

Elías Revestido Herrero

E. T. S. de Náutica, c\ Gamazo 1, 39004, Santander, revestidoe@unican.es

José Ramón Llata García

E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Av. de los Castros s/n- 39005 Santander, llataj@unican.es

Francisco Jesús Velasco González

E. T. S. de Náutica, c\ Gamazo 1, 39004, Santander, velascof@unican.es

José Joaquín Sainz Gutiérrez

E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Av. de los Castros s/n- 39005 Santander, josejoaquin.sainz@unican.es

Patricia Díaz Torrijos

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Subdirección General de Sistemas Navales, C/ Adelina Patti S/N, 28048 El Pardo-Madrid, diaztp@inta.es

## Resumen

*En este trabajo, se aplican técnicas de inferencia indirecta para la estimación de parámetros de un modelo de maniobra no lineal de un vehículo subacuático teleoperado (ROV). Para ello, se dispone de datos de diferentes ensayos, que se llevaron a cabo con el citado ROV en las instalaciones del Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo CEHIPAR, Madrid. El modelo obtenido se valida mediante métodos gráficos y estadísticos y las propiedades estadísticas de los parámetros estimados se evalúan mediante un estudio de Monte Carlo.*

**Palabras clave:** modelo de maniobra no lineal; inferencia indirecta; ROV; mínimos cuadrados ordinarios.

## 1 INTRODUCCIÓN

La aplicación de vehículos no tripulados en el ámbito naval se conoce ampliamente en el ámbito científico, uno de los sectores que están impulsando esta tecnología con más fuerza en los últimos años es el militar y de seguridad [9]. La incorporación de vehículos no tripulados en Defensa, han contribuido al estado del arte de los sistemas no tripulados [8] para misiones peligrosas o de alto riesgo, tales como el seguimiento, la detección y neutralización de minas. Hoy en día, los autonomous underwater vehicles-unmanned underwater vehicles (AUV-

UUVs) son de suma importancia, tanto para aplicaciones y procedimientos para la exploración submarina en aplicaciones de defensa y civiles.

Para este tipo de aplicaciones con vehículos no tripulados, en primer lugar es muy habitual, con objeto de desarrollar posteriormente un sistema de control adecuado, la identificación de modelos de maniobra no-lineales de seis grados de libertad (6GDL) obtenidos a partir de ensayos. En la literatura se encuentran diferentes tipos de técnicas para la obtención de estos modelos, ver [2][10] y sus referencias. Sin embargo, existen técnicas que todavía apenas se han aplicado a este cometido como son las técnicas de inferencia indirecta. Estas técnicas se han utilizado ampliamente para el modelado de series temporales en el área de econometría [4].

Posteriormente, las técnicas de inferencia indirecta se adaptaron para incluir sistemas con entradas exógenas y para aplicarlas al problema de identificación de sistemas [12]. Este último enfoque es el que aplica en este trabajo, para la estimación de parámetros de un modelo de maniobra no lineal de un vehículo subacuático teleoperado. En la literatura se encuentran trabajos en los que se aplican estas técnicas de inferencia indirecta a un modelo no lineal de tanques [5] y también a un modelo en el dominio de la frecuencia de una maquina síncrona [1]. Por otra parte, se encuentra un trabajo en la literatura que aplica técnicas de inferencia indirecta a un AUV [13]. Además este método proporciona mejores resultados en lo que se refiere a la exactitud y a la eficiencia de los parámetros estimados, con respecto a otros

métodos existentes en la literatura como pueda ser el método de variables instrumentales [14].

En el presente trabajo se aplican técnicas de inferencia indirecta a la estimación de parámetros de un modelo de maniobra no lineal correspondiente a un vehículo teleoperado. Se proponen dos casos de estudio uno con datos simulados para verificar las propiedades estadísticas del método aplicado y otro con datos reales adquiridos en las instalaciones del Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo CEHIPAR, donde se valida el modelo con métodos gráficos y estadísticos.

## 2 MODELO DE MANIOBRA NO LINEAL

El modelo de maniobra no lineal de 6 GDL se puede expresar de la siguiente forma [3]:

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v$$

donde  $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$  es el vector de posición y ángulos de Euler,  $v = [u, v, w, p, q, r]^T$  son las velocidades lineales y angulares,  $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$  son las fuerzas y momentos  $v$  es el ruido en la medición.  $M$  es la matriz de masa adicional,  $C(v)v$  es el término de Coriolis,  $g(\eta)$  es la matriz de restauración,  $J(\eta)$  es la matriz de rotación y  $D(v)v$  representa el amortiguamiento hidrodinámico, que es una combinación de términos lineales y no lineales. Todos los parámetros de las matrices de la ecuación (1) considerando las simetrías del vehículo objeto de estudio de este artículo (ver figura 1) se pueden encontrar en Fossen [3].

## 3 ENSAYOS EN CANAL

En esta sección se enumeran las pruebas que se realizaron en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR) para la estimación de parámetros del modelo matemático que se ha definido anteriormente. Para ello, se ha utilizado un ROV comercial, cuyas dimensiones son de 1m x 0,6m, 0,62m. En la figura 1 se muestra el montaje del vehículo en el canal de aguas tranquilas del CEHIPAR. Los ensayos consistieron en hacer distintos movimientos controlados del ROV mediante dos actuadores lineales controlados por ordenador y montados en el carro de remolque.

Las pruebas realizadas fueron las siguientes:

- Resistencia y aceleración en longitudinal a 3 velocidades.
- Autopropulsión para cada hélice (velocidad cero y navegación nominal).
- Pitch estático a 3 ángulos (velocidad de navegación nominal).

- Heave dinámico a una frecuencia y tres amplitudes (velocidad cero y navegación nominal).
- Pitch dinámico a una frecuencia y tres amplitudes (velocidad cero y navegación nominal).
- Yaw estático a 3 ángulos (velocidad de navegación nominal).
- Sway dinámico a una frecuencia y tres amplitudes (velocidad cero y navegación nominal).
- Yaw dinámico a una frecuencia y tres amplitudes (velocidad cero y navegación nominal).

(para más detalles sobre este tipo de ensayos ver Revestido [11] y Phillips [7]).

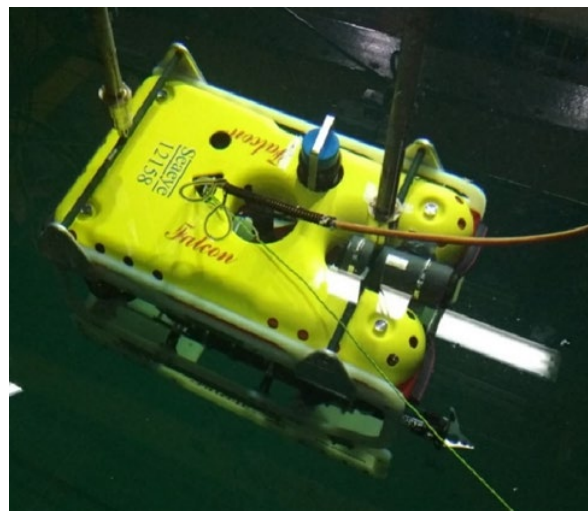


Figura 1: Montaje del ROV en las instalaciones del CEHIPAR

En los distintos ensayos se midieron las aceleraciones transversal y vertical con 2 acelerómetros, uno en cada extremo final de cada cilindro. También se midieron directamente las fuerzas que actuaban en los 2 puntos de unión del ROV con las barras de prolongación de los cilindros, ver Figura 1.

El centro de gravedad y las inercias del ROV se obtuvieron de forma experimental mediante oscilaciones forzadas. Los valores obtenidos se reflejan en la Tabla 1.

Magnitud	Unidad	Valor
<b>Peso</b>	Kg	80.750
<b>Xg</b>	m	0.490
<b>Yg</b>	m	0.288
<b>Zg</b>	m	0.400
<b>Itransversal</b>	kg*m2	5.453
<b>Ilongitudinal</b>	kg*m2	10.499

Tabla 1 Distribución de masas del ROV.



Las inercias están referidas al centro de gravedad estimado. La inercia en guiñada se ha supuesto igual a la longitudinal.

## 4 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

El método de inferencia indirecta utiliza un modelo "mal especificado" cuyos parámetros se pueden estimar mediante datos del sistema verdadero. El método también utiliza un modelo parametrizado cuya estructura es conocida y corresponde a la estructura real del sistema (en este caso el modelo de maniobra ecuación (1)), este modelo se emplea para obtener datos simulados con el modelo real. El objetivo del método es obtener los parámetros del modelo real que minimicen la distancia entre los parámetros obtenidos del modelo mal especificado con datos del sistema verdadero y los parámetros obtenidos con el modelo mal especificado con datos simulados. En la Figura 2 se muestra un diagrama de bloques del método de inferencia indirecta.

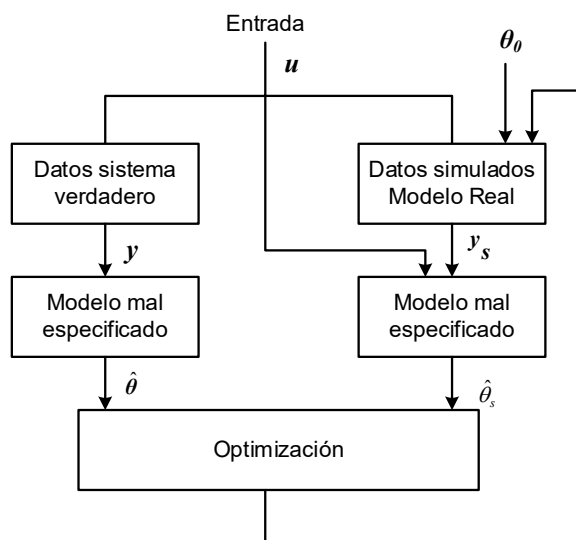


Figura 2: Diagrama de bloques del método de inferencia indirecta.

Para la estimación de los parámetros del modelo mal especificado estimado con datos del sistema verdadero y el modelo mal especificado estimado con dato simulados del modelo real (ver figura 2), se aplica el método de mínimos cuadrados ordinarios.

Todos los parámetros que se han estimado, se refieren a un sistema de coordenadas en el centro de gravedad del vehículo, ver Tabla 1. Para la estimación de los parámetros se ha planteado, el modelo clásico de regresión lineal, que se puede escribir con la siguiente notación [6]:

$$y = \varphi\theta + w \quad (5)$$

donde,

$y = [y_1 \ y_2 \dots y_N] = N \times 1$  vector de mediciones de salida.

$\theta = [\theta_0 \ \theta_1 \dots \theta_n] = n_p \times 1$  vector de parámetros desconocidos,  $n_r = n_p + 1$   $\varphi = [1 \ \varphi_1 \ \varphi_2 \dots \varphi_n] = N \times n_r$  matriz de regresores.

$w = [w_1 \ w_2 \dots w_N] = N \times 1$  vector de errores en la medición.

$N$  = Número de muestras.

$n_p$  = Número de parámetros

donde  $\theta_0$  es el parámetro de sesgo, que se corresponde con el regresor de unos incluido en  $\varphi$ . Es conveniente introducir en el modelo este parámetro, para estimar el posible sesgo que puedan tener los datos, incluso en el caso de que se obtengan valores de  $\theta_0$  próximos a cero.

## 5 RESULTADOS

En este artículo se proponen dos casos de estudio para la estimación de la fuerza de avance de la ecuación (1): uno de ellos con datos simulados y el otro con datos adquiridos en las instalaciones del CEHIPAR. En el primero de ellos se verifican las propiedades estadísticas del estimador basado en inferencia indirecta mediante un estudio de Monte Carlo de 100 realizaciones.

El modelo mal especificado se conforma eliminando el término no lineal de la ecuación de la fuerza de avance. Los datos del sistema verdadero se han generado en base a un modelo estimado con datos del CEHIPAR, el cual se ha simulado y se le añadido niveles de ruido de la instrumentación estándar a bordo de un ROV. En la tabla 1 se muestran los resultados de este estudio para la fuerza de avance, donde se observa como el método de inferencia converge a los parámetros verdaderos con valores de sesgo inferiores al 1%. Además, los valores bajos de desviación estándar de cada uno de los parámetros indican que el método aplicado es eficiente. Por otra parte, en la figura 3 se muestra el histograma y superpuesta la función de densidad de probabilidad de los parámetros de la fuerza de avance para un estudio de Monte Carlo de 100 realizaciones donde se observa una distribución normal. Para la implementación de esta rutina se ha utilizado la función `fminsearch` de la toolbox de optimización de Matlab.

	Xudot	Xu	Xu u
<b>Parámetros Verdaderos</b>	-156.1239	-81.5	-116.325
<b>Media</b>	156.1073	-81.4893	-116.3339
<b>Desviación estándar.</b>	0.42991	0.1115	0.0994

Tabla 2 Estudio de Montecarlo de 100 realizaciones distintas.

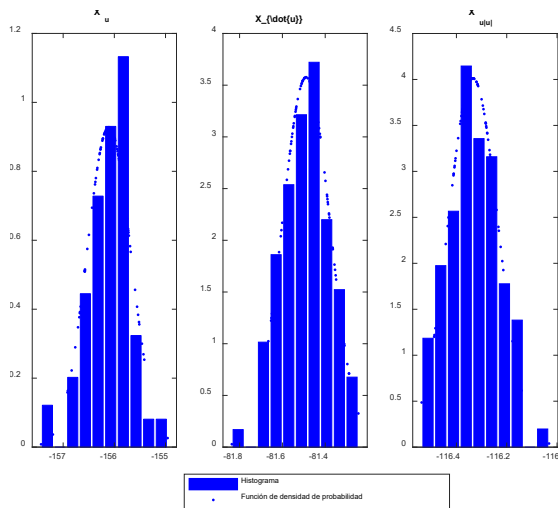


Figura 3: Histograma y función de densidad de probabilidad para un estudio de Monte Carlo de 100 realizaciones.

En el segundo caso se estiman los parámetros utilizando datos adquiridos en los ensayos en canal y se valida el modelo utilizando un conjunto de datos diferente al utilizado en la estimación como es habitual en la aplicación de técnicas de identificación de sistemas. En la figura 4 se muestran los resultados de ajuste a los datos medidos, obtenidos por el método de inferencia indirecta para la estimación de la fuerza de avance.

Otra forma de validar el modelo es mediante el cálculo del coeficiente de determinación, que proporciona información de en qué medida, el modelo que se ha obtenido, es capaz de reproducir los datos medidos, y representa el porcentaje de variaciones de salida reproducidos por el modelo:

$$R_2(\%) = \frac{\sum (\hat{D} - \bar{D})^2}{\sum (\hat{D} - D)^2 + \sum (\hat{D} - \bar{D})^2}$$

Donde  $D$  y  $\bar{D}$  representan los datos medidos y su media respectivamente, y  $\hat{D}$  los datos estimados por el modelo obtenido. Para los datos adquiridos de fuerza de avance se ha obtenido un coeficiente de determinación de 92,3% que corrobora el buen ajuste mostrado en la figura 4.

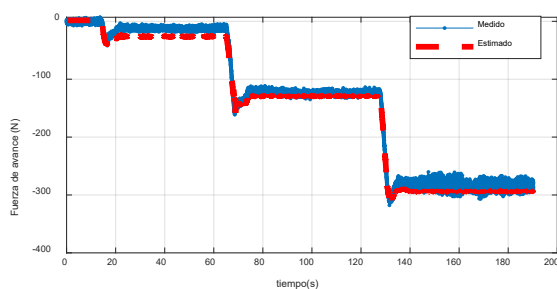


Figura 4: Validación del modelo estimado con datos diferentes a los utilizados en la estimación.

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto la aplicación de técnicas de inferencia indirecta para la estimación de los coeficientes hidrodinámicos pertenecientes a un modelo de maniobra no lineal de un vehículo subacuático. Se ha realizado un estudio de la aplicación del método para la estimación de la fuerza de desplazamiento vertical del vehículo. Los resultados obtenidos con datos simulados indican valores bajos de sesgo y varianza de los parámetros estimados, inferiores al 1%. Por otro lado, los resultados de validación del modelo con los datos adquiridos en el CEHIPAR muestran un buen ajuste con un valor de coeficiente de determinación cercano al 100%.

## Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por la Consejería de Universidades, Igualdad, Cultura y Deporte del Gobierno de Cantabria a través del proyecto ControlFond (Control de Vehículos Subacuáticos No Tripulados para Supervisión de Estructuras para Obras Marítimas Fondeadas). (Code: VP45).

## English summary

## PARAMETER ESTIMATION OF A NONLINEAR MANEUVERING MODEL OF A REMOTE OPERATED VEHICLE BASED ON BASIN TRIALS

## Abstract

*In this work, indirect inference techniques are applied to estimate the parameters of a nonlinear maneuvering model of a remote operated vehicle (ROV). For this purpose, data from different tests are available, which were carried out with the ROV in the facilities of the Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo CEHIPAR, Madrid. The model obtained is validated by means of graphical and statistical methods and the statistical properties of the estimated parameters are evaluated by means of a Monte Carlo study.*

**Keywords:** nonlinear maneuvering model; indirect inference; ROV; ordinary least squares.

## Referencias

- [1] Allingham, D.; Welsh, J. S.; Godoy, B. I. & Tusek, J. On the use of indirect inference in equivalent circuit parameter estimation of a synchronous machine 2009 Australasian

- Universities Power Engineering Conference, 2009, 1-5.
- [2] Garnier, H. & Wang, L. (Eds.) Identification of Continuous-Time Models from Sampled Data 1 Springer, 2008, 1-29.
- [3] Fossen, T.I. Guidance and control of ocean vehicles. En Libro; Editor, F., USA: Wiley; New York, 1994.
- [4] Ghysels E., Khalaf L., and C. Vodounou. Simulation based inference in moving average models. *Annales d'Economie et de Statistique*, 69:85–100, 2003.
- [5] Larsson, C. A.; Hjalmarsson, H. & Rojas, C. R. Identification of nonlinear systems using misspecified predictors 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2010, 7214-7219.
- [6] Ljung, L., 1987. System identification: theory for the user.
- [7] Niyousha Hosseinichimeh & Hazhir Rahmandad & Mohammad S. Jalali & Andrea K. Wittenborn, 2016. "Estimating the parameters of system dynamics models using indirect inference," *System Dynamics Review*, System Dynamics Society, vol. 32(2), pages 154-178, April.
- [8] Yildiz, O. Yilmaz, A. and Gokalp, B. State-of-the-art system solutions for unmanned underwater vehicles. *Radioengineering*, **2009**, pp.590–600.
- [9] Riola, J. La política de I+D en Defensa: Metas y retos tecnológicos. En *Las Tecnologías de Doble Uso: La Investigación y el Desarrollo al Servicio de la Sociedad Civil y Militar*. España: Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier, **2011**, pp. 13-22.
- [10] Refsnes, J.E.; Sorensen, A.J. Design of control system of torpedo shaped ROV with experimental results. *OCEANS '04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04*, **2004**, pp.264,270.
- [11] Revestido E., Velasco F.J., (2012) Two-Step Identification of Nonlinear Manoeuvring Models of Marine Vessels, *Ocean Engineering*, Volume 53, Pages 72-82.
- [12] Revestido Herrero Elías, Velasco Francisco J. and Riola Rodríguez J.M. (2018) Improving parameter estimation efficiency of a non linear manoeuvring model of an underwater vehicle based on model basin data, *Applied Ocean Research* 76, 125-138, doi: 10.1016/j.apor.2018.04.012.
- [13] Revestido Herrero, Elías, Llata García, José Ramón, y Velasco González, Francisco Jesús, Estimación de parámetros de un modelo de maniobra no lineal de un vehículo subacuático no tripulado: un enfoque de inferencia indirecta, DESEI+D 2018 VI Congreso Nacional De I+D En Defensa Y Seguridad, 2018, Valladolid.
- [14] Welsh, J. S.; Agüero, J. C. & Alamir, M. Continuous-Time System Identification Using Indirect Inference IFAC Proceedings Volumes, 2009, 42, 1169 – 1174.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# DESARROLLO DE UN ENTORNO DE SIMULACIÓN PARA EL APRENDIZAJE DE UN ALGORITMO DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA DE UN VELERO DE 2 METROS DE ESLORA

Esteban Chacón Mosquera

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Jordi Girona 31, 08034 Barcelona, [estebanfex@gmail.com](mailto:estebanfex@gmail.com)

Josep Eudald Mesegué Basallo

Facultat de Nàutica de Barcelona (UPC), Pla de Palau 18, 08003 Barcelona, [eudald.mesegue@gmail.com](mailto:eudald.mesegue@gmail.com)

Rosa M. Fernández-Cantí

Facultat de Nàutica de Barcelona (UPC), Pla de Palau 18, 08003 Barcelona, [rosa.mari.fernandez@upc.edu](mailto:rosa.mari.fernandez@upc.edu)

José A. Lázaro Villa

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Jordi Girona 31, 08034 Barcelona, [jose.lazaro@tsc.upc.edu](mailto:jose.lazaro@tsc.upc.edu)

## Resumen

*Se presenta el desarrollo de un entorno virtual de simulación basado en Python Turtle para el entrenamiento de un algoritmo de aprendizaje por refuerzo destinado a la navegación autónoma de un velero de 2 metros de eslora. Este entorno de simulación permite entrenar el pilotaje autónomo en diferentes condiciones de viento y datos de navegación de la embarcación, en ausencia de obstáculos, por medio de la observación causa-efecto y una estrategia de recompensas que permiten al agente decidir las mejores acciones. La generación virtual de situaciones de navegación reduce las horas de pruebas de mar.*

**Palabras clave:** Navegación autónoma, velero de 2m de eslora, entorno de simulación, aprendizaje por refuerzo, Python Turtle

## 1 INTRODUCCIÓN

Dentro del ámbito de la navegación autónoma, uno de los puntos críticos es el algoritmo de navegación, encargado de tomar las decisiones de pilotaje en función de la información que le llega de los diferentes sensores instalados en la embarcación [2].

Un buen algoritmo de navegación autónoma debe ser capaz de llevar la embarcación a su punto de destino tomando la ruta más adecuada, optimizando el consumo energético y tiempo de travesía, y garantizando en todo momento la seguridad de la navegación. Todo ello debe hacerse, además, sin intervención humana externa.

En los últimos años se han producido numerosos avances en el campo de los vehículos autónomos, tanto en el ámbito terrestre como en los ámbitos aéreo y náutico [3], [4]. El entorno marino presenta sus propias particularidades y, en concreto, la maniobra autónoma de veleros presenta dificultades y retos añadidos como son: la interacción entre la posición de la vela y los timones, la influencia de la escora, las maniobras específicas como pueden ser las ceñidas con viento de proa y la menor capacidad de maniobra en comparación con otro tipo de embarcaciones, lo que puede dificultar la evitación de obstáculos, especialmente en situación de vientos débiles. La Figura 1 muestra el velero autónomo Sensailor, el cual ha sido diseñado y construido para estudiar estos temas [1], [6].



Figura 1: Velero Sensailor

En relación a los algoritmos en sí, recientemente se están ensayando muchos enfoques basados en la inteligencia artificial, tanto supervisados como no supervisados [7]. Este trabajo se centra en el algoritmo de aprendizaje por refuerzo, no supervisado, implementado en el velero autónomo Sensailor.

Como todos los algoritmos de este tipo, la fase de entrenamiento es crítica ya que el correcto funcionamiento del algoritmo, una vez puesto en servicio, depende fuertemente del entrenamiento y de la calidad y cantidad de los datos utilizados en este. El entrenamiento debe realizarse con un número suficiente de datos y debe cubrir satisfactoriamente el máximo de situaciones posibles. Ello implica someter repetidamente a la embarcación a diferentes condiciones de navegación. Puesto que en la mayoría de situaciones ello no es viable, porque las pruebas de mar tienen una duración limitada y porque tampoco tenemos control sobre las condiciones de navegación, es necesario contar con herramientas de simulación.

En este artículo se describe el desarrollo de un entorno de simulación basado en Python Turtle [5] para el entrenamiento de algoritmos de aprendizaje no supervisado por refuerzo. Su aplicación al algoritmo de navegación del Sensailor demuestra que este entorno es una herramienta útil para la fase de aprendizaje ya que reduce el tiempo de pruebas y puede presentar variedad de situaciones.

El resto del documento está organizado como sigue: en la Sección 2 se presentan las principales características del velero autónomo Sensailor incluyendo la propulsión y la instrumentación. La Sección 3 presenta brevemente el algoritmo de aprendizaje por refuerzo implementado en el velero. La Sección 4 presenta el entorno de simulación desarrollado y se comentan sus principales características. Finalmente, en la Sección 5 se presentan las conclusiones y líneas futuras de investigación.

## 2 AUTOMATIZACIÓN DEL VELERO

### 2.1 CONSTRUCCIÓN

El casco del velero Sensailor, así como sus apéndices, se han diseñado y construido para satisfacer las especificaciones propias de una embarcación autónoma destinada a la recogida de datos oceanográficos, destacando la autonomía, la capacidad de recuperar la verticalidad en caso de vuelco y la protección de los circuitos y componentes eléctricos y electrónicos.

Para la construcción del casco se ha creado un molde con espuma de poliuretano, a partir del cual se ha laminado el casco. Para el laminado se ha usado resina de poliéster y fibra de vidrio. Los detalles del diseño y la construcción, incluyendo los cálculos y las simulaciones de estabilidad, se pueden consultar en [6].

La Tabla 1 muestra las principales dimensiones del velero.

Tabla 1: Dimensiones del Sensailor

Nombre	Descripción
Eslora $L_H$	2 m
Eslora flotación $L_{WL}$	1.873 m
Manga $B_H$	0.71 m
Desplazamiento $\Delta$	50 kg

#### 2.1.1 Propulsión: vela y alerón

Con el objetivo de mejorar la autonomía y aprovechamiento energético, el tipo de propulsión escogido para esta embarcación es una vela. Para tal propósito, se ha implementado una configuración de vela rígida, orientada mediante un alerón. Dicha vela puede girar libremente sobre el mástil, sin ningún elemento de fijación mecánica, pero sin lograr giros de  $360^\circ$  en su configuración original [6]. La sección transversal de la vela y el alerón corresponden a un perfil aerodinámico de la base de datos NACA, en concreto el perfil simétrico NACA 0015.

Este tipo de configuración logra orientar la vela para conseguir los vientos más propicios para el avance, minimizando el consumo energético para mantener la vela en esta posición. El ángulo del alerón varía mediante un servomotor, y el propio alerón modifica el ángulo de la vela, ahorrando un servomotor de mayores dimensiones que mantenga fijo el ángulo de la vela actuando directamente sobre esta.

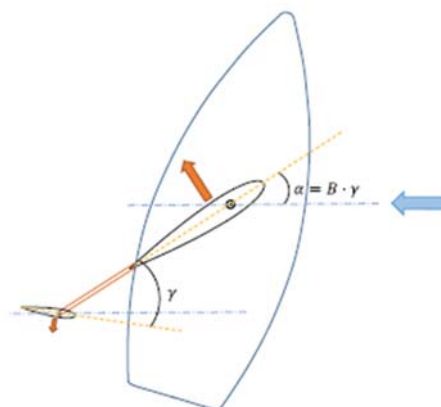


Figura 2: Fuerzas generadas en la vela y el alerón [6]

## 2.2 INSTRUMENTACIÓN

La embarcación dispone de dos tipos de instrumentación: la destinada a permitir la navegación y la que recopila datos oceanográficos para estudios científicos.

Una placa Arduino UNO recoge la información de los sensores que operan a 5V: tanto los destinados a la navegación autónoma (GPS, anemómetro, veleta, magnetómetro), como los de recogida de datos (temperatura, rayos UV). También recoge los datos de un sensor LDR (luminosidad) y enciende la luz de posición cuando la medida del sensor LDR es inferior a un valor umbral.

La información de los sensores conectados al Arduino se transmite a una placa Raspberry Pi mediante una conexión USB. Adicionalmente, esta placa también recibe información de una cámara NoIR, para visión nocturna, y de un sensor LIDAR, para la detección de obstáculos.

La placa Raspberry Pi, además, es la encargada de controlar el ángulo de los timones y del servo del alerón de la vela. Para el control del alerón, se ha añadido un microcontrolador ESP32 en el interior de la vela, que se comunica con la Raspberry Pi mediante Bluetooth, ahorrando una conexión física del interior del casco a la vela.

La Figura 3 muestra la estructura de la instrumentación.

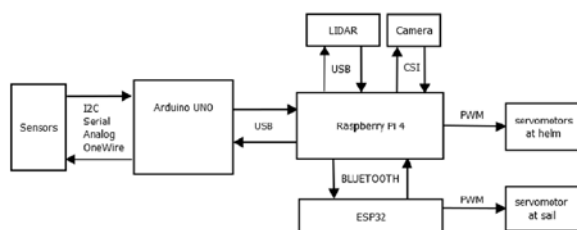


Figura 3: Organización de la instrumentación [1]

## 2.3 MANIOBRA

En la maniobra intervienen dos elementos: los timones y la vela. Los timones marcan el rumbo de la embarcación, y la vela es la encargada de la propulsión. Por lo que atañe a los timones, su funcionamiento es relativamente sencillo: su orientación respecto a la línea de crujía (longitudinal) marca el cambio en el rumbo. La vela, sin embargo, precisa de viento en unas direcciones concretas para generar propulsión.

Como en todas las embarcaciones a vela, la navegación se verá condicionada a que se reciba el

viento en el rango de ángulos útiles para la propulsión (p.ej., no se puede navegar contra el viento). Cada embarcación tiene sus ángulos útiles de viento. La Figura 4 muestra los rangos útiles para la propulsión de nuestra embarcación:

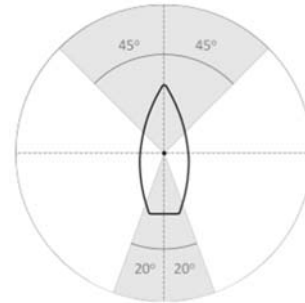


Figura 4: Rango de ángulos útiles [6]

Por otro lado, en el caso concreto de nuestro velero, existe otra restricción: la vela no puede girar 360° [6]. Por lo tanto, la virada es siempre por proa.

La necesidad de recibir vientos que ayuden a la propulsión, junto con la limitación a la hora de hacer las viradas, son factores críticos que se deben tener en cuenta en la programación del algoritmo de navegación del velero. En la Figura 5 se muestra un esquema del recorrido navegado con 4 waypoints y una condición de viento determinada, donde se muestra la posición de la vela en cada situación.

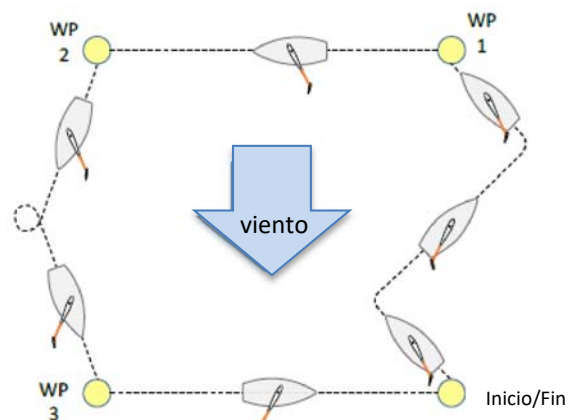


Figura 5: Posición de la vela según el rumbo deseado y dirección del viento

## 3 ALGORITMO DE APRENDIZAJE POR REFUERZO

El algoritmo escogido está basado en el DQN (Deep Q-Network) con descenso de gradiente estocástico desarrollado por el MIT [7].



En este algoritmo de aprendizaje por refuerzo se incluye un agente que interactúa con su ambiente y observa la respuesta del mismo a sus acciones. Según sea la respuesta, el agente recibe una recompensa o una penalización. De esta manera, el agente buscará elegir respuestas que maximicen la recompensa.

### 3.1 DISEÑO DEL AGENTE

El agente elegido es una red neuronal convolucional (CNN) consistente en 6 entradas, 2 capas ocultas de 64 neuronas cada una y 5 salidas. Todas las neuronas están interconectadas entre sí con lo que la red neuronal profunda cuenta con 4933 parámetros a entrenar.

En una primera aproximación al problema se supone que no hay obstáculos, por lo que el algoritmo solo se centrará en llevar la embarcación de un punto a otro en diversas condiciones de viento, de posición inicial de los actuadores de la embarcación, y de orientación de la embarcación.

Por lo tanto, las entradas a la red son la dirección del viento, los ángulos del alerón de la vela y de los timones y el rumbo de la embarcación, así como la distancia a las coordenadas de destino. La salida de la red son las señales de mando a los servomotores de los timones y alerón de vela (ver Figura 6).

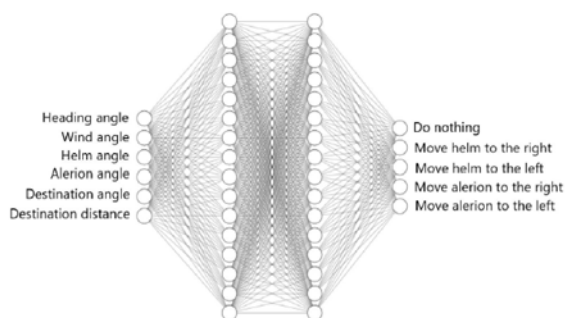


Figura 6: Entradas y salidas de la red neuronal

### 3.2 ENTRENAMIENTO

El agente se entrena interaccionando con su ambiente, del cual puede aprender a partir de las observaciones y recompensas/penalizaciones.

#### 3.2.1 Ambiente de entrenamiento

En este trabajo, el ambiente es generado virtualmente y visualizado con ayuda de la herramienta Turtle codificada en Python [5] (ver Sección 4). Este entorno virtual genera aleatoriamente diferentes situaciones (de condiciones de viento y estado inicial de la embarcación) de manera que, al recibir las acciones del agente sobre los servomotores de timones y alerón,

modifica y muestra el rumbo y la velocidad de la embarcación según un modelo interno.

El estado observado, tanto del viento como de la embarcación, se introduce de nuevo en el agente junto con la distancia al punto de destino. Una política decide si la acción previamente tomada recibe una recompensa o penalización, a fin de que el agente pueda aprender al buscar maximizar la recompensa después de cada interacción. Ver Figura 7.

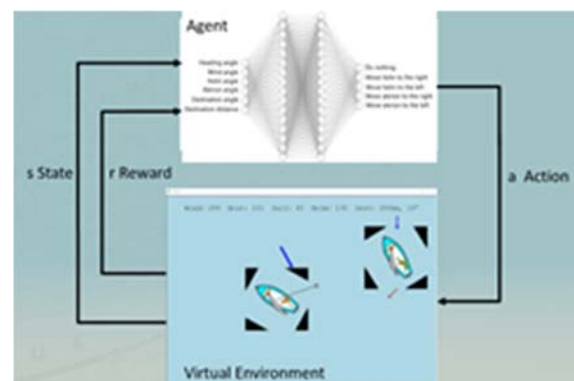


Figura 7: Entrenamiento del agente

El objetivo de cada episodio de entrenamiento es conseguir que la embarcación se oriente conforme al rumbo deseado para llegar al punto de destino y la vela tome un ángulo adecuado para hacer avanzar la embarcación en dicho rumbo, excepto en el caso en que el viento sea de proa, en cuyo caso habrá que realizar ceñidas.

Cada episodio de entreno se considera finalizado cuando la distancia al destino se ha reducido en, al menos, un metro. Durante un episodio de entreno se permite un máximo de 3000 pasos, donde cada paso es la acción de mover un timón cierto ángulo. Si el destino no se alcanza al llegar a este límite, el ambiente se resetea y el modelo no se actualiza. Adicionalmente, la cantidad de pasos (movimientos del timón) para llegar al destino se toma como penalización al resultado de cada episodio a fin de evitar que el modelo entrenado mueva los timones de manera frenética buscando la recompensa.

Para maximizar la recompensa cuando la respuesta es la esperada, la red neuronal busca resolver la ecuación de Bellman

$$Q^*(s, a) = E_{s' \sim \epsilon} [r + \gamma \max_{a'} Q^*(s', a') | s, a] \quad (1)$$

donde  $Q^*(s, a)$  es el valor máximo alcanzable siguiendo una determinada política después de las secuencias de estado  $s'$  y acciones  $a'$  para todas las posibles acciones  $a$ ,  $r$  es la recompensa, y  $\gamma$  es un factor que reduce su valor en cada paso y permite

optimizar el número de acciones requeridas para alcanzar la meta deseada.

### 3.2.2 Políticas de entrenamiento

Para entrenar a la red neuronal se siguen las siguientes políticas:

- La recompensa se incrementa de manera inversamente proporcional a la diferencia entre el rumbo actual y el rumbo destino. Además, se da una recompensa adicional cuando la diferencia de ángulos es menor a 5%.
- La recompensa se incrementa de manera inversamente proporcional a la diferencia de distancia al destino entre un tiempo previo y el tiempo actual, penalizando cuando, por el contrario, la distancia al destino se incrementa. Y se da una recompensa adicional de alta ponderación al llegar al destino.
- Se da una recompensa adicional que es directamente proporcional a la velocidad de la embarcación.

Con las tres políticas mencionadas se busca enrumbar la embarcación y mover la vela para llegar a su destino en el menor tiempo posible.

## 4 DESARROLLO DEL ENTORNO DE SIMULACIÓN

La Figura 8 muestra la pantalla de visualización del ambiente virtual. Si se desea una mayor velocidad de entrenamiento, también es posible realizar el entrenamiento sin la visualización. Adicionalmente, este entorno de entreno puede usarse también en condiciones reales de navegación con lo que las medidas de rumbo, dirección del viento, etc., vendrán directamente de los instrumentos de navegación.

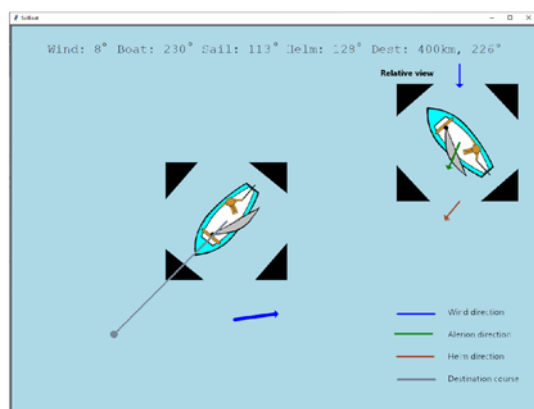


Figura 8: Entrenamiento con el entorno Turtle

La embarcación en el centro muestra el rumbo actual suministrado por el magnetómetro. La rotación de la imagen se realiza dentro de un cuadrado negro para que sea más fácil visualizar la orientación. La flecha azul muestra la dirección del viento aparente medida con la veleta. La línea gris muestra el rumbo a las coordenadas de destino. Puesto que la distancia al punto de destino puede exceder los límites de la pantalla, la travesía se divide en secciones de 10 metros (correspondientes a 40 píxeles).

La embarcación en el ángulo superior derecho muestra la posición relativa de manera que el viento (flecha azul) se sitúa en 270°. En esta vista, el ángulo del alerón (no de la vela) se muestra con la flecha verde y está físicamente limitado de 45° a 135°. Por su parte, el ángulo de los timones se representa con una flecha marrón, donde también se tiene en cuenta la limitación física de 45° a 135°, debida a los servomotores utilizados.

Finalmente, en la parte superior se muestran los valores numéricos de todos estos parámetros y la pantalla muestra el movimiento de todos los actuadores y rumbo. La embarcación, además, se mueve hacia delante cuando se reduce la distancia al destino.

Puesto que las redes neuronales profundas son cajas negras para el entorno, es difícil valorar cómo responde la embarcación a los comandos. Para ello se ha incluido también una interfaz con el usuario (ver Figura 9) que se puede usar para controlar tanto el velero virtual como el real. Esta interfaz ayuda a comprender cómo la recompensa o penalización de ciertas acciones puede agilizar el aprendizaje y se ha utilizado para definir las políticas de entrenamiento ya mencionadas.



Figura 9: Interfaz con el usuario

En lo que respecta a los resultados, para este proyecto se han configurado 100 episodios de entrenamiento de 3000 pasos cada uno para que el velero logre enrumbarse al destino. La Figura 10 muestra la recompensa obtenida después de cada episodio de entrenamiento, donde los picos corresponden al caso en que ha llegado al destino y los valles corresponden al caso en que se completaron los 3000 pasos sin llegar



al destino. La reducción del número de valles a medida que se suceden los episodios, muestra cómo el modelo va aprendiendo la mejor manera de llegar al destino.

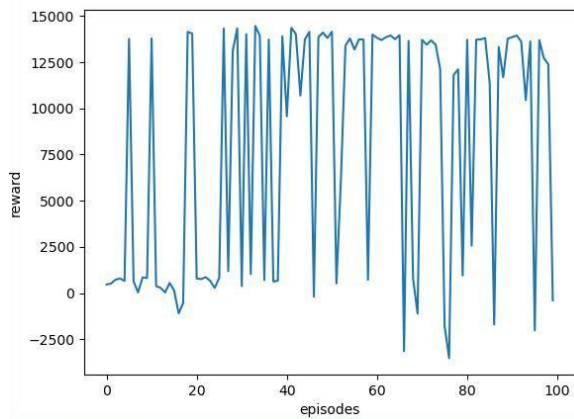


Figura 10: Resultados del entrenamiento

## 5 CONCLUSIONES

Los algoritmos de navegación autónoma basados en aprendizaje reforzado necesitan gran cantidad de datos en su fase de entrenamiento. Este entrenamiento es difícil de realizar únicamente por medio de pruebas de mar puesto que se requiere gran número de horas y diferentes condiciones de navegación para que el aprendizaje sea significativo.

El entorno de entrenamiento presentado en este trabajo permite entrenar al agente del algoritmo de aprendizaje por refuerzo tanto con datos reales (recogidos a partir de los sensores de la embarcación) como con datos virtuales (generados por ordenador).

En el caso virtual objeto de este trabajo, se ha comprobado que con las tres políticas de entrenamiento detalladas el modelo de aprendizaje es capaz de enrumbar el bote y tomar decisiones que lo acerquen a su destino.

Como líneas futuras, se consideran la incorporación de la esquivas de obstáculos en el algoritmo a partir de las lecturas del LIDAR y la comparación de las decisiones tomadas por el algoritmo con las decisiones que tomaría un piloto humano.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultat de Nàutica de Barcelona la ayuda económica para la realización del proyecto Sensailor.

## English summary

### DEVELOPMENT OF A SIMULATION ENVIRONMENT FOR THE LEARNING OF AN AUTONOMOUS NAVIGATION ALGORITHM FOR A 2-METER LENGTH SAILBOAT

#### Abstract

*The development of a virtual simulation environment based on Python Turtle is presented for the training of a reinforcement learning algorithm for the autonomous navigation of a 2 meters long sailboat. This simulation environment enables autonomous piloting to be trained in different wind conditions and navigation data from the vessel, in the absence of obstacles, through cause-effect observation and a reward strategy that allows the agent to decide the best actions. The virtual generation of navigation situations reduces the hours of sea trials.*

**Keywords:** Autonomous navigation, 2m sailboat, simulation environment, reinforcement learning, Python Turtle.

#### Referencias

- [1] Chacón, E. (2021) *Autonomous Sailboat Prototype Sensors and Electronics Implementation with Machine Learning for Navigation*, Master Thesis, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicacions de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [2] Kulbiej E., P. Wolejsza (2017) "Naval Artificial Intelligence", *The International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TRANNAV 2017)*, Maritime University of Szczecin, Szczecin, Poland.
- [3] Liu Z., Zhang Y., Yu, X., Yuan C. (2016) "Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges", *Annual Reviews in Control*, vol. 41.
- [4] Martin B., Tarraf, D.C., Whitmore, T.C., DeWeese, J., Kenney C., Schmid J., DeLuca, P. (2019) *Advancing Autonomous Systems. An Analysis of Current and Future Technology for Unmanned Maritime Vehicles*, Report RAND Corporation, Santa Monica, US.

- [5] Python.org. Disponible en: <https://docs.python.org/3/faq/general.html#general-information>
- [6] Sastre, J., Manich, C., (2020) *Disseny i construcció d'un dron de navegació automàtica a vela*. Trabajo Final de Grado, Facultat de Nàutica de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [7] Sutton R.S. and Andrew G. Barto (2017) *Reinforcement Learning: An Introduction* 1st ed. The MIT Press, Cambridge, MA, US.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# DESARROLLO E INSTRUMENTACIÓN DE UN VELERO AUTÓNOMO DE 2 METROS DE ESLORA PARA LA RECOGIDA DE DATOS OCEANOGRÁFICOS

Esteban Chacón Mosquera

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Jordi Girona 31, 08034 Barcelona, [estebanfex@gmail.com](mailto:estebanfex@gmail.com)

Carles Manich Vallès

Facultat de Nàutica de Barcelona (UPC), Pla de Palau 18, 08003 Barcelona, [carles.manich@gmail.com](mailto:carles.manich@gmail.com)

Joan Antoni Sastre Caballol

Facultat de Nàutica de Barcelona (UPC), Pla de Palau 18, 08003 Barcelona, [crasty9715@gmail.com](mailto:crasty9715@gmail.com)

Josep Eudald Mesegué Basallo

Facultat de Nàutica de Barcelona (UPC), Pla de Palau 18, 08003 Barcelona, [eudald.mesegue@gmail.com](mailto:eudald.mesegue@gmail.com)

Rosa M. Fernández-Cantí

Facultat de Nàutica de Barcelona (UPC), Pla de Palau 18, 08003 Barcelona, [rosa.mari.fernandez@upc.edu](mailto:rosa.mari.fernandez@upc.edu)

## Resumen

*Esta contribución presenta la construcción y automatización de un velero de 2 metros de eslora concebido para navegar de manera autónoma y llevar a cabo mediciones científicas. Se describe la instrumentación y la recogida de información por parte de los distintos sensores. La transmisión de esta información se realiza en forma de trama al procesador principal, el cual ejecuta un algoritmo de control para generar las órdenes a los servos de los timones y al servo del alerón de la vela. El procesador principal también es el encargado de la presentación de los datos en el formato JavaScript Object Notation (JSON). Se comentan aspectos concretos de la maniobra de la vela y se presenta el resultado experimental de las primeras pruebas de mar.*

**Palabras clave:** Navegación autónoma, velero de 2 metros de eslora, Raspberry Pi, instrumentación electrónica.

## 1 INTRODUCCIÓN

Dentro del ámbito de la navegación autónoma, el desarrollo de embarcaciones de pequeña eslora (drones marinos), capaces de operar con total autonomía y transmitir o almacenar los datos, es uno de los campos que más interés está recibiendo por parte de los investigadores [5], [6].

El uso de este tipo de embarcaciones en estudios científicos, como por ejemplo los asociados a aspectos concretos del cambio climático y/o la biodiversidad,

es muy interesante por diversos motivos, destacando entre ellos la seguridad de las personas, el coste económico y la versatilidad que ofrecen este tipo de embarcaciones frente a las tradicionales expediciones en buques oceanográficos [7]. La Figura 1 muestra el velero autónomo Sensailor, objeto de este trabajo.

El desarrollo de las comunicaciones vía satélite y el llamado internet de las cosas permite recibir a distancia información sobre la posición de los artefactos marinos y la lectura de sus sensores (ver, por ejemplo, [2]), mientras que las mejoras en el propio diseño de las embarcaciones, su instrumentación y algoritmos de navegación permiten que estas puedan operar de manera autónoma a más distancia, durante más tiempo y en un rango más amplio de condiciones de navegación, [1], [3].



Figura 1: Velero autónomo Sensailor

El diseño y construcción de este tipo de artefactos marinos es multidisciplinar puesto que incluye áreas tan diversas como la construcción naval, los métodos de propulsión, la instrumentación electrónica, las comunicaciones y la automatización.

Con respecto a la construcción naval, dentro del campo de los drones marinos de superficie podemos encontrar diversos tipos de embarcaciones y diversas configuraciones. Los veleros son un caso particular cuyo sistema de propulsión primario es la fuerza del viento. Los veleros autónomos presentan la ventaja de que la propulsión no consume energía con lo que los medios de captación (p. ej., unas placas solares) y las baterías pueden destinarse exclusivamente a alimentar la instrumentación (sensores de navegación y científicos, actuadores sobre timones y vela).

Con respecto a la instrumentación, la aparición en la última década de tecnologías de bajo coste, prototipado rápido y código libre ha incrementado considerablemente el número de proyectos en este ámbito y ha propiciado la aparición de regatas donde los investigadores pueden optimizar sus diseños e ir mejorando continuamente el comportamiento y las prestaciones de sus embarcaciones [8]. Es el caso de la Microtransat (<https://www.microtransat.org/>) y el World Robotic Sailing Championship (<https://www.roboticsailing.org/>), por citar solo dos de las más conocidas donde pueden participar veleros autónomos de pequeña eslora.

El resto del documento se organiza como sigue: En la Sección 2 se presenta el velero Sensailor y se describen brevemente sus características constructivas y de maniobra. A continuación, en la Sección 3 se describe la instrumentación (sensores y actuadores) y se explica cómo se realiza la transmisión de datos. En la Sección 4 se resumen los resultados experimentales, se discuten algunos aspectos del diseño y se proponen mejoras. Finalmente, en la Sección 5 se extraen las principales conclusiones del trabajo.

## 2 VELERO AUTÓNOMO SENSAILOR

El velero Sensailor [1], [7] (ver Figura 1) es una embarcación de 2 metros de eslora, con sistema de navegación automática y autosuficiencia energética. Está diseñado para navegar en la zona 2 (hasta 60 millas náuticas de la costa) y soportar condiciones meteorológicas de categoría 6 en la escala de Beaufort. La distribución de masas y forma del buque permite recuperar la verticalidad en caso de vuelco. El casco es estanco a fin de proteger la instrumentación interna y el conjunto es fácilmente desmontable y transportable.

### 2.1 CONSTRUCCIÓN

El detalle de la construcción incluyendo los cálculos y simulaciones de estabilidad, se puede consultar en [7].

#### 2.1.1 Casco

Para la construcción del casco se ha creado un negativo del molde con espuma de poliuretano, y de este se ha extraído un molde, a partir del cual se ha laminado el casco. Para el laminado se ha usado resina de poliéster y fibra de vidrio. Antes de pintar se ha aplicado imprimación.

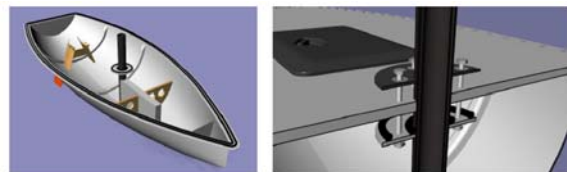


Figura 2: Diseño del casco. Mástil [7]



Figura 3: Construcción del casco [7]

#### 2.1.2 Apéndices

Las Figuras 4 a 6 muestran el diseño de los apéndices. El velero cuenta con dos timones que se mueven a la vez y en el mismo sentido, accionados cada uno por un servomotor independiente. Este diseño añade redundancia al sistema y puede ser útil en situaciones de colisión o arrastre de objetos indeseados tales como plásticos, redes, etc.

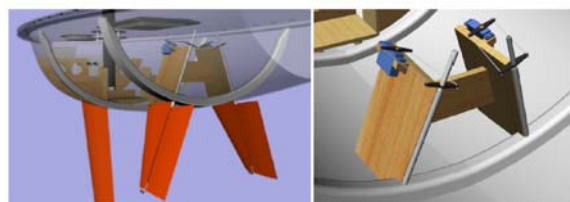


Figura 4: Timones [7]

Por su lado, el bulbo de la orza es un lastre de plomo de 10 kg.

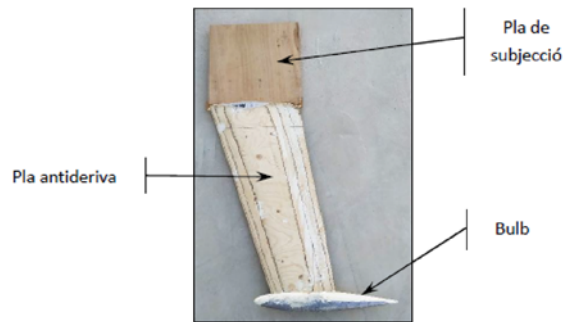


Figura 5: Construcción de la orza [7]

Finalmente, el mástil de la vela sirve también como soporte del anemómetro, veleta y luz de posición, y en su interior se encuentran los cables que conectan estos dispositivos con el interior del casco.

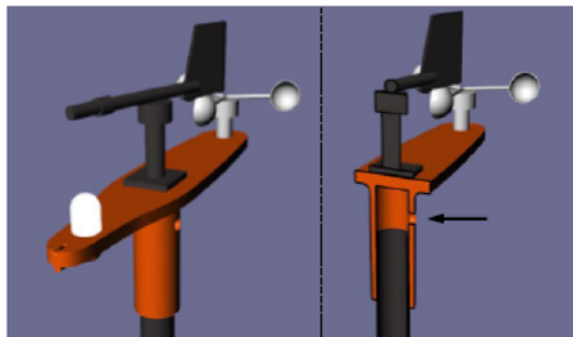


Figura 6: Instrumentación en el mástil [7]

### 2.1.3 Propulsión: vela y alerón

El sistema propulsivo consta de una vela rígida en cuyo interior se encuentra el servo que gobierna el ángulo del alerón por medio de una varilla.

El par de fuerzas generadas por el alerón y la vela logra orientar a esta última con el ángulo de ataque (ángulo respecto al viento) deseado. Este sistema permite ahorrar un elemento que mueva y fije la posición de la vela, reduciendo notablemente el consumo.

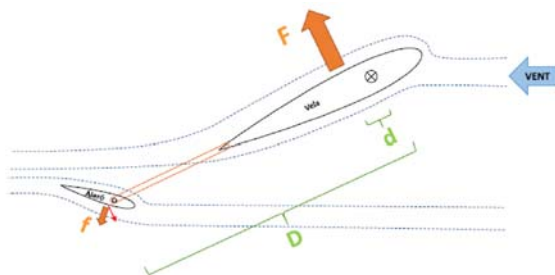


Figura 7: Par de fuerzas de la vela y el alerón

Tanto la vela como el alerón tienen una sección transversal invariable, basada en un perfil aerodinámico de la base de datos NACA, en concreto un perfil simétrico, el NACA 0015.

Dicho perfil, seleccionado para satisfacer las especificaciones de navegabilidad [7], al recibir viento, genera una fuerza que, después de los correspondientes cambios de los ejes de referencia, se puede descomponer en dos (ver Figura 8): la fuerza que contribuye al avance de la embarcación ( $F^L$ ), y la que afecta a su escora ( $F^t$ ). Con la variación del ángulo de ataque de la vela, las fuerzas obtenidas varían.

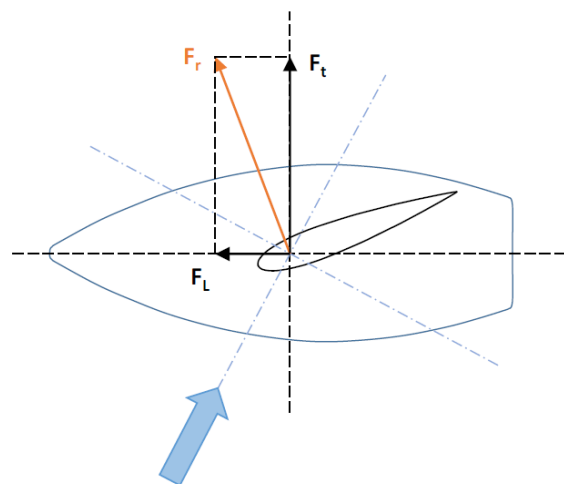


Figura 8: Fuerza resultante de la vela respecto a la embarcación

La fuerza propulsiva  $F^L$  se opone a la fuerza de resistencia al avance del casco. Cuando la resistencia es superada, la embarcación avanza.

Para dimensionar la superficie vélica, debe tenerse en cuenta el concepto de velocidad de diseño. Esta velocidad  $V_{\max}$  es la máxima a la que podrá navegar la embarcación, por las características del casco. Para calcular dicha velocidad, se puede usar:

$$V_{\max} = 2.4\sqrt{L} \quad (1)$$

donde  $L$  es la eslora del barco, en este caso 2m. Así pues, la velocidad máxima de diseño es de 3.34 kn, y se usa este parámetro para calcular el dimensionamiento de la vela, de forma que genere la fuerza necesaria para navegar a esta velocidad.

## 2.2 MANIOBRA

Las condiciones idóneas para el funcionamiento y en las cuales se garantiza su seguridad e integridad están comprendidas entre los 5 y los 20 nudos de viento.



En el primer prototipo, existe una limitación en el giro de la vela, que no puede ser de 360°. Esto se debe a que el cable que alimenta y controla el servo del alerón, que se encuentra en el interior del mástil, podría enrollarse indefinidamente con los giros de la vela. Esta limitación añade complejidad a la navegación, obligando a usar maniobras de acuerdo a ésta, para que el velero reciba el viento necesario para avanzar.

El algoritmo de control tiene por tanto en cuenta tanto la dirección del viento como el rumbo hacia las coordenadas deseadas (*waypoint*, WP), así como el límite de giro de la vela. En función de todas estas entradas, actúa sobre los servos de los timones y alerón de vela.

La Figura 9(b) muestra cuál debe ser la posición de la vela en función del rumbo hacia el *waypoint* deseado y la dirección del viento. Debido a que la vela no puede girar libremente 360°, la virada siempre es por proa.

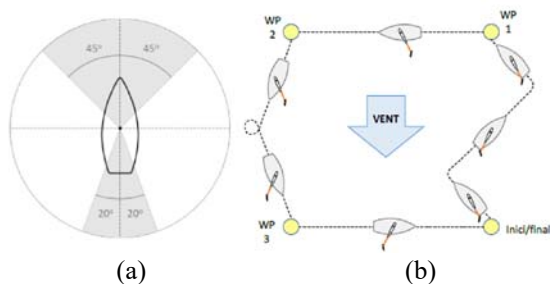


Figura 9: Maniobra [7]

Los grados indicados en la Figura 9(a) representan los ángulos del viento respecto a la embarcación para los que se puede lograr avance.

### 3 INSTRUMENTACIÓN

Para poder navegar de forma totalmente autónoma, el velero incluye tres dispositivos con capacidad de procesamiento. Una placa Arduino UNO, una Raspberry Pi 4 y una ESP32. La Figura 10 muestra a cuál de los tres procesadores van conectados los diferentes sensores y actuadores.

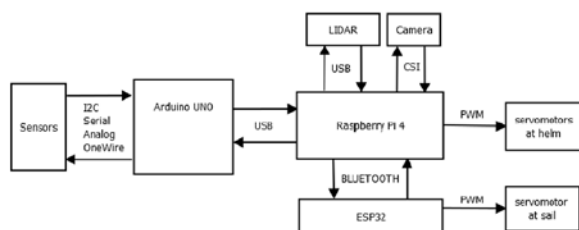


Figura 10: Procesadores, sensores y actuadores

#### 3.1 PROCESADORES

El Arduino UNO es el encargado de recoger la información de los sensores que operan a 5V. Estos incluyen los sensores más relevantes para la navegación autónoma (GPS, anemómetro, veleta, magnetómetro), para la recogida de datos (temperatura, rayos UV) y para decidir cuándo encender la luz nocturna de posición (sensor LDR).

La función de la placa Arduino es recoger todos los datos y transmitirlos a la Raspberry Pi por medio de una conexión USB. También es la encargada de encender la luz de posición cuando la luminosidad detectada por el sensor LDR se sitúa por debajo de un umbral.

La Raspberry Pi a su vez recibe la información de una cámara NoIR que no tiene filtro de luz infrarroja (para visión nocturna) y un sensor LIDAR (para la detección de obstáculos) cuya información también influirá en las señales de mando que operan sobre los servos de los dos timones y alerón de la vela.

La Figura 11 muestra las placas Raspberry y Arduino. Estas van montadas en una caja hermética dentro del casco.

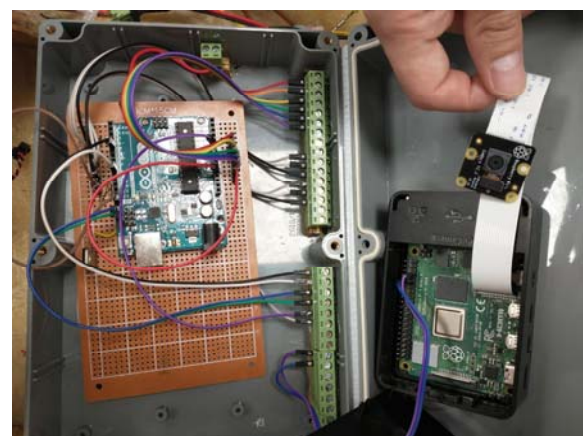


Figura 11: Placas Arduino y Raspberry

La placa Raspberry dispone también de una tarjeta de memoria SD de 32GB antichoque, resistente a bajas y altas temperaturas, impermeable y blindada frente a rayos X.

La información de los diferentes dispositivos se almacena en dos ficheros de texto, uno para la información de navegación y otro para la información científica recogida. El formato escogido para almacenar y visualizar los datos es *JavaScript Object Notation* (JSON), adicionalmente a los datos se les incluye fecha y hora para un registro más completo.

En la Raspberry se ha programado, con ayuda del lenguaje Python, un algoritmo de inteligencia artificial basado en aprendizaje por refuerzo que es el encargado de generar las señales de mando hacia los servos de los dos timones y el servo del alerón, a partir de la información de los sensores.

En el caso del servo del alerón, y para evitar la posible torsión de los cables dentro del mástil de la vela, se ha optado por que la Raspberry 4 transmita la señal de control por Bluetooth hacia el procesador ESP32 situado en la vela (ver Figura 15).

## 3.2 SENSORES Y ACTUADORES

### 3.2.1 Sensores

Los dispositivos sensores de 5V relacionados directamente con la navegación conectados al Arduino son los siguientes:

Un sensor GPS, modelo RCmall FZ2922 transmite los datos en standard NMEA y se comunica con el Arduino mediante una conexión serie. Para ello se han configurado los pines D5 y D8 como Rx/Tx. Este módulo devuelve la posición GPS en tiempo real cada segundo, así como la distancia y rumbo al *waypoint*.

Un magnetómetro, modelo MPU-9250, conectado al puerto I2C (SDA/SDL) del Arduino permite conocer el rumbo del Sensailor para posteriormente compararlo con la información del GPS. Este dispositivo lleva incorporado un acelerómetro, que permitirá, en un futuro monitorizar y controlar la escora de la embarcación.



Figura 12: Detalle del GPS, su antena y el magnetómetro

Un anemómetro, conectado a través de un diodo al pin D2. La salida del anemómetro es un tren de pulsos cuya frecuencia es proporcional a la velocidad del viento. A fin de evitar el efecto de rebote se ha decidido detectar los pulsos por flanco ascendente.

Una veleta HYXC-FX alimentada a 12V para medir la dirección del viento, cuya salida de 5V se conecta al pin A0 del Arduino.

Aparte de estos sensores, la placa Arduino también recibe señal de los siguientes dispositivos:

Un sensor de temperatura, modelo DS18B20, *onewire*, conectado a la placa a través de una resistencia de 4kΩ.

Un sensor LDR simple, conectado mediante un divisor de tensión al pin A1, calibrado de manera que cuando la tensión que mide la luminosidad baje de 700mV se encienda la luz de posición.

Un sensor de rayos UV modelo ML8511 conectado al pin A2.

Finalmente, el velero dispone de dos sensores más para la detección de obstáculos: un LIDAR modelo RPLIDAR A1 y una cámara nocturna modelo RPi NoIR Camera V2. Esta última se muestra en la Figura 11. Ambos sensores envían la señal a la placa Raspberry Pi para el posterior procesamiento de datos.

### 3.2.2 Transmisión y presentación de datos

Para el intercambio de información entre el Arduino (encargado de recibir los datos de los sensores de 5V) y la Raspberry Pi (encargada de generar las señales de control) se ha diseñado una trama específica que se transmite cada segundo por medio de la conexión USB entre las dos placas.

Tabla 1: Campos de la trama de sensores.

Id	Dispositivo
A	Veleta
B	Anemómetro
C	Magnetómetros
D	GPS velocidad
E	GPS latitud
F	GPS longitud
G	Sensor UV
H	Sensor LDR
I	Sensor DS18B20 temperatura
J	Rumbo a destino
K	Distancia a destino

Se trata de una transmisión por multiplexación en el tiempo síncrona de manera que cada dispositivo tiene asignado un slot de tiempo fijo de duración 50 ms. Puesto que la frecuencia de adquisición de datos de cada sensor es diferente, los campos se actualizan solo cuando hay nuevos datos y, mientras estos no se actualizan, mantienen la lectura anterior. La Tabla 1 muestra el campo asignado a cada uno de los sensores instalados actualmente en el velero.

La Figura 13 muestra el diseño de la trama. Notar que se ha dejado margen para la inclusión de nuevos dispositivos.

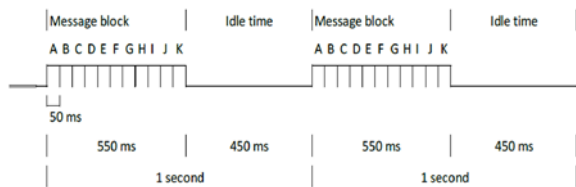


Figura 13: Configuración de trama

### 3.2.3 Presentación de datos y algoritmo de control

Las medidas de los diferentes sensores se almacenan en dos ficheros de texto (uno para navegación y otro para datos oceanográficos) y se presentan en formato JSON.

Por otro lado, el algoritmo de control actualmente implementado es un algoritmo de aprendizaje no supervisado por refuerzo basado en una red neuronal de 2 capas que contienen 64 neuronas densamente interconectadas el cual utiliza como entradas la dirección y posición del Sensailor así como del viento, y como salidas el giro de los servomotores, utilizando como criterio de recompensa la velocidad del bote, la disminución de la distancia a las coordenadas de destino (*waypoint*) y el rumbo correcto hacia dicho *waypoint*. Los detalles pueden consultarse en [1].

### 3.2.4 Actuadores

La navegación se controla por medio de tres servomotores: uno para cada timón y uno para el alerón de la vela.

Aunque cada timón tiene su servo, la orden a los dos servos es la misma. Se ha escogido el modelo RCTecnic-S0150 de 15 kg·cm alimentados a 6V (ver Figura 14).



Figura 14: Servo de timón. Timones [7]

Por su parte, el servomotor del alerón de la vela es un DS-561WP de la marca Corona con un par de 10kg·cm a 6V, ligero y compacto, ideal para su instalación en la vela.

## 3.3 ALIMENTACIÓN

El velero cuenta con dos placas solares y dos baterías. La placa solar principal está situada sobre la cubierta y, a través de un circuito de carga/descarga, alimenta a la batería principal que es la encargada de energizar todos los instrumentos de navegación y medición. Para ello cuenta con dos convertidores de 12V a 5V de 3 amperios. Uno de los convertidores está dedicado exclusivamente a la Raspberry Pi la cual, a su vez, alimenta la placa Arduino por medio de la conexión USB, el LIDAR y la cámara NoIR.

La segunda placa solar está situada en el contrapeso de la vela, está conectada a una batería de litio de 3.7V y su función es alimentar al procesador ESP32 responsable del servo del alerón (ver Figura 15).



Figura 15: ESP32, placa solar y batería (alerón de la vela)

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En las pruebas de mar realizadas el velero ha superado satisfactoriamente todas las pruebas de estanqueidad, flotabilidad y estabilidad. El sistema propulsivo ha sido capaz de aprovechar satisfactoriamente condiciones de viento moderadas (alrededor de 15 nudos) y alcanzar correctamente diversos *waypoints* predefinidos con una precisión razonable dadas las condiciones de viento y oleaje.

Para hacer el seguimiento en las pruebas de mar cerca de la costa, una herramienta muy útil es el Boat Track, de Boat Security, que permite trazar la ruta sobre el Google Maps a partir de las lecturas del GPS. La Figura 16 muestra la ruta de una de las primeras salidas del Sensailor en el puerto de Barcelona.

Con respecto a la maniobra se observa que por debajo de 5 nudos de viento la navegación es lenta y el pilotaje autónomo se puede ver dificultado. A fin de resolver este inconveniente, actualmente se está



trabajando en un nuevo perfil de vela, capaz de responder mejor a bajas velocidades de viento.



Figura 16: Seguimiento con Boat Track

Se ha comprobado que la transmisión Bluetooth entre la Raspberry Pi y el servo del alerón [1] es una solución efectiva al problema de torsión de los cables del interior del mástil del primer prototipo [7]. Por otro lado, se está estudiando la implementación de un mástil que permita el giro de 360°.

En cuanto a la adquisición y transmisión de datos, se ha comprobado que las tramas utilizadas son adecuadas y permiten registrar adecuadamente los datos de navegación y mediciones (ver Figura 17). Notar asimismo que el diseño permite la inclusión de nuevos sensores que permitirán hacer medidas de transparencia, salinidad, etc.

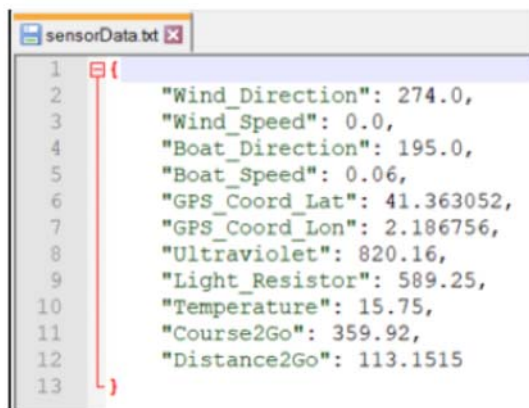


Figura 17: Lecturas de los sensores

## 5 CONCLUSIONES

Las embarcaciones autónomas de pequeña eslora son una opción económica y versátil para la recogida de datos oceanográficos. Los veleros autónomos, al ser propulsados por viento, pueden dedicar la energía captada por placas solares y almacenada en baterías a la alimentación de los sensores y actuadores. En este trabajo se ha descrito la construcción e

instrumentación del velero Sensailor y la gestión de los datos por parte del sistema de control. Los resultados experimentales en pruebas de mar demuestran la viabilidad de la propuesta y apuntan a diversas líneas de mejora, especialmente en la necesidad de conseguir un giro de 360° en el mástil y la posibilidad de usar velas con diferentes perfiles según las necesidades.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultat de Nàutica de Barcelona la ayuda económica para la realización del proyecto Sensailor, así como a todos los patrocinadores que han colaborado aportando equipos y dispositivos.

## English summary

### DEVELOPMENT AND INSTRUMENTATION OF A 2 METERS LENGTH AUTONOMOUS SAILBOAT FOR THE COLLECTION OF OCEANOGRAPHIC DATA

#### Abstract

*This contribution presents the construction and automation of a 2 meters long sailboat designed to autonomously navigate and carry out scientific measurements. The instrumentation and the collection of information by the different sensors are described. The transmission of this information is carried out in the form of a frame to the main processor, which executes a control algorithm to generate the commands to the rudder servos and the wing aileron servo. The main processor is also responsible for presenting the data in the JavaScript Object Notation (JSON) format. Specific aspects of the maneuvering of the sail are discussed and the experimental results of the first sea trials are presented.*

**Keywords:** Autonomous navigation, 2 meters long sailboat, Raspberry Pi, electronic instrumentation.

## Referencias

- [1] Chacón, E. (2021) *Autonomous Sailboat Prototype Sensors and Electronics Implementation with Machine Learning for Navigation*, Master Thesis, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicacions de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

- [2] Fernández Avelino, X. (2021) *Diseño e implementación de un dispositivo de localización de bajo coste para la pesca de palangre: construcción de un prototipo de boya*, Trabajo Final de Grado, Facultat de Nàutica de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- [3] Kulbiej E., P. Wolejsza (2017) “Naval Artificial Intelligence”, *The International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* (TRANNAV 2017), Maritime University of Szczecin, Szczecin, Poland.
- [4] Larsson, L., Eliasson, R. E. (2000) *Principles of Yatch Designs*. 2a ed. TAB Books Inc., Londres, UK.
- [5] Liu Z., Zhang Y., Yu, X., Yuan C. (2016) “Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges”, *Annual Reviews in Control*, vol. 41.
- [6] Martin B., Tarraf, D.C., Whitmore, T.C., DeWeese, J., Kenney C., Schmid J., DeLuca, P. (2019) *Advancing Autonomous Systems. An Analysis of Current and Future Technology for Unmanned Maritime Vehicles*, Report RAND Corporation, Santa Monica, US.
- [7] Sastre, J., Manich, C., (2020) *Disseny i construcció d'un dron de navegació automàtica a vela*. Trabajo Final de Grado, Facultat de Nàutica de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- [8] Valios Arregui, A., (2012) *Diseño de un velero de 60' para regatas oceánicas clase IMOCA 60*. Proyecto Final de Carrera. Universidad de Cádiz, España.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# Arquitectura de servicio de impresión 3D para apoyar estrategias de Economía Circular alrededor del reciclaje de plástico en el entorno marítimo-portuario

Julio Garrido Campos<sup>1\*</sup>, Diego Silva Muñiz<sup>1</sup>, Blanca Lekube Gazagaetxeberria<sup>2</sup>, Enrique Riveiro Fernandez<sup>1</sup> y Bruno Portela López<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Vigo, {jgarri, diego.silva.muniz, enriveiro, bruno.portela}@uvigo.es

<sup>2</sup>Leartiker Polymer R&D, Xemein Etorbidea 12A-1, 48270 Markina-Xemein, Spain, blekube@leartiker.com

## Resumen

*La basura plástica oceánica, proveniente de la actividad terrestre y marina, representa un gran problema del medio ambiente. Anualmente se acumulan más de 12 toneladas en puertos, orillas, en las profundidades del océano, etc. El proyecto europeo CircularSeas aborda esta problemática mediante la combinación de tecnología de impresión 3D y el uso de residuos plásticos generados por las industrias marítimas-portuarias para, aplicando principios de Economía Circular, desarrollar productos, piezas y componentes ecológicos que sean utilizados por estas industrias. El artículo pretende responder a las preguntas de si la tecnología de impresión 3D puede aportar beneficios al sector marítimo-portuario (donde la fabricación, el prototipado y la personalización de productos no ha sido tradicionalmente su actividad de negocio) y cómo la impresión 3D podría acomodar el plástico reciclado de manera viable y orientada al usuario final de estas industrias. Para ello, este trabajo propone un nuevo entorno de impresión 3D integrado y orientado al usuario, independiente del hardware y adaptable a la materia prima plástica reciclada no estándar procedente de residuos marinos.*

**Palabras clave:** Industrias marítimas, reciclaje, basura plástica oceánica, impresión 3D, tecnologías abiertas.

## 1 Introducción

Anualmente se generan más de 368 millones de toneladas de plástico en todo el mundo para su uso en distintos sectores como *packaging*, construcción, automóvil, agricultura, etc. [18]. Se estima que 12 millones de toneladas son desechadas al medio marino anualmente [4]. Todo este plástico tiende a acumularse en distintos entornos como en puertos, en la superficie y profundidades del océano, en las

costas e incluso en el hielo del Ártico [5, 17]. Aproximadamente, el 70-80% de esta basura oceánica procede de fuentes terrestres debido a los residuos plásticos urbanos y costeros mal gestionados, como son las botellas de plástico y los envases, entre otros [8]. Aproximadamente 2 millones de toneladas de residuos plásticos marinos provienen de los ríos, principalmente como resultado de una mala gestión de los residuos almacenados en vertederos o vertidos [20]. El otro 20-30% de basura plástica restante proviene de fuentes marinas, principalmente por aparejos y redes de pesca que son perdidos durante las campañas [19].

Esta gran cantidad de plástico acumulado en el mar representa uno de los problemas más graves en el medio ambiente. Por ello, diversas organizaciones han promovido políticas y recomendaciones para reducir el impacto global del plástico en el medio ambiente [9]. En el marco de la Unión Europea (UE), se han puesto en marcha un gran número de medidas que giran en torno a la reducción de residuos plásticos en el medio marino [11]: en 2020, en el marco de la Estrategia de la UE para los Plásticos en la Economía Circular y la Directiva sobre Plásticos de un solo uso, se publicó un informe sobre la estrategia marina y un plan de acción hacia una economía más limpia y competitiva a través de la transición hacia productos reciclados y funcionales de alta calidad.

Por ello, la Unión Europea, a través de sus programas de financiación, promueve proyectos que reduzcan la basura marina [21]. Entre ellos, el proyecto CircularSeas [2], el cual aborda el problema de los residuos plásticos marinos desde una perspectiva conjunta de las industrias de la CE, la impresión 3D y los puertos. Para reducir los residuos plásticos mediante el uso de este proceso de fabricación aditiva, es necesario conocer el alcance de la impresión 3D en el escenario marítimo. La rentabilidad de la impresión 3D en este entorno se basa en la identificación de productos a producir o reparar utilizando estas tecnologías, o con versiones

nuevas y adaptadas de la misma [3]. De esta manera, el proyecto CircularSeas incluye el estudio de la impresión 3D para evaluar si esta tecnología puede ser habilitadora de la economía circular del plástico en las industrias marítimas, con el fin de reciclar plástico para utilizarlo como materia prima y producir nuevos productos eco-innovadores para este entorno marítimo-portuario.

Sin embargo, las empresas y las autoridades portuarias tienen sus particularidades [7]. Aunque se centran en servicios comunes similares a los que se encuentran en otras industrias, las actividades industriales marítimas giran principalmente en torno a la pesca y la construcción naval [6]. Aunque pueden ser altamente tecnológicas, su actividad no es el de la fabricación, y no ven la tecnología de impresión 3D como estratégicamente prioritaria.

Con todo, este artículo pretende responder a la pregunta de si la tecnología de impresión 3D representa una mejora potencial para estos escenarios industriales y empresariales que no estén orientados principalmente a la fabricación de piezas y productos, incluidas las actividades económicas y comerciales relacionadas con el puerto y el mar. En este escenario, estas potenciales mejoras no son tan obvias y demandadas como en otros sectores. Otra pregunta que pretende responder el artículo es cómo la tecnología de impresión 3D actual puede adaptarse y funcionar de manera factible con filamentos reciclados cuando los usuarios no son expertos, una situación que se encuentra comúnmente en el sector marítimos y portuario.

De las encuestas descritas en la sección 2, se obtiene una serie de requisitos para que la impresión 3D sea introducida en las industrias marítimas. Uno de ellos es el uso de aplicaciones sencillas para el usuario final, generalmente sin nociones de impresión 3D. Por ello, el artículo se centra en resolver el problema de la adaptación de las aplicaciones 3D de forma válida para usuarios no expertos, considerando tanto el uso de las aplicaciones como su mantenimiento y parametrización. El artículo define en la sección 3 un nuevo entorno integrado y orientado al usuario que utiliza tecnologías abiertas y económicamente viables como se muestra en la sección 4. La sección 5 presenta los resultados de los experimentos realizados para evaluar las dos principales estrategias propuestas. El artículo termina con una sección de conclusiones.

## 2 Fase de encuestas

En el marco proyecto CircularSeas se ha realizado una fase inicial de encuestas a una serie de industrias marítimas colaboradoras (*stakeholders*): pesquerías, astilleros, autoridades portuarias, etc. Con ello se

pretende analizar la tipología del plástico generado por estas industrias y evaluar la estrategia para la introducción de la impresión 3D en el sector marítimo. En un área portuaria compleja y amplia, como la estudiada en este artículo, se seleccionaron 35 empresas e instituciones relevantes para colaborar con la investigación. A continuación se presentan los resultados principales.

### 2.1 Identificación de residuo plástico generado

La primera sección de la encuesta se centra en la identificación de los residuos plásticos generados por los grupos de interés. De las empresas encuestadas, la generación anual de plástico total es de 2828,76 toneladas (Tn) de plástico, eliminando los residuos que, por su naturaleza y contaminación, resultan costosos de reciclar, la cantidad final apta para reciclar es de 2519,52 Tn. La Figura 1 especifica las cantidades totales de los principales residuos plásticos identificados y relaciona cada residuo con el tipo de plástico identificado.

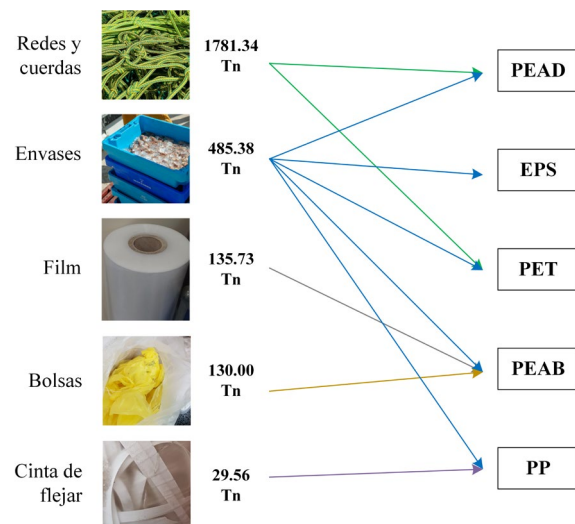


Figura 1: Residuos y tipo de plástico identificado.

Tabla 1: Gestión actual del residuo.

Residuo	Cadena de reciclaje
Redes y cuerdas	Venta a empresa de reciclaje de plástico
Envases	Contrato con empresa privada para recogida, transporte y gestión de los residuos.
Films	RSU o venta a empresa de reciclaje de plástico.
Bolsas	Compactado y gestionado como RSU.
Cinta de flejar	RSU o venta a empresa de reciclaje de plástico.

Actualmente, las empresas llevan a cabo políticas de reciclaje de plásticos en su actividad comercial, en

mayor o menor medida (como se puede ver en la Tabla 1): vendiéndolo, siendo recogido por el puerto o, en último caso, desechándolo como residuo sólido urbano (RSU).

## 2.2 Introducción de la impresión 3D en el entorno marítimo-portuario

La elección de la impresión 3D está en la génesis del proyecto dado que se trata de una tecnología económica en comparación con otras tecnologías de fabricación que utilizan materiales plásticos [13]. Para evaluar la potencial introducción de la impresión 3D en las industrias marítimas, se realizaron las siguientes preguntas:

- P1. ¿Estaría la empresa interesada en el uso de una impresora 3D como soporte de su actividad empresarial?
- P2. ¿Identifica algún producto plástico en su actividad susceptible de ser realizado con plástico reciclado?
- P3. ¿Identifica algún producto no plástico en su actividad susceptible de ser realizado con plástico reciclado?
- P4. Para el reemplazo de estos productos plásticos y no plásticos, ¿se estaría en condiciones de imprimir la pieza mediante recursos propios (diseño, configuración e impresión)?
- P5. Si se considera interesante fabricar piezas en impresión 3D, ¿por qué motivos decidiría utilizar plástico reciclado en lugar de pellets o bobinas comerciales?
- P6. De acuerdo a su actividad commercial, ¿estaría interesado/necesita que la impresión 3D fuese realizada a bordo?

La Figura 2 muestra las repuestas recibidas por parte de los *stakeholders* a las preguntas P1, P4, P5 y P6. Estas industrias, tradicionalmente reacias al cambio [45], acogen con satisfacción la introducción de la impresión 3D para respaldar su negocio (el 70% está de acuerdo), aunque, para determinadas piezas, se escoja una tecnología más apropiada para la fabricación, como moldeo por inyección.

La Tabla 2 resume los principales productos plásticos (P2) o libres de plástico (madera, metal, etc., P3) que podrían ser sustituidos por plástico reciclado. De entre ellos, se identificaron productos como los soportes para rodamientos, tapas, o remaches, susceptibles de ser fabricados por impresión 3D por cuestiones de demanda y tamaños. Para otros, como las botellas, films, etc. la fabricación mediante inyección o extrusión resulta más apropiada. Con las preguntas P2 y P3 se identificaron también otro tipo de producto a fabricar por impresión 3D; prototipos (en general). La cuarta pregunta (P4, Figura 2)

muestra que las empresas descatan la necesidad de un servicio externo (SE) que lleve a cabo la gestión del proceso de fabricación (60% de las respuestas), desde diseño hasta la acción previa a la impresión, ya que no cuentan con personal cualificado en fabricación aditiva. Además, el 80% de los encuestados (SE+SI en P4) apuntan que necesitarían una infraestructura económica y fácil de usar.

Las repuestas a la quinta pregunta (P5, Figura 2) muestra un claro interés de las industrias marítimas por utilizar plástico reciclado (70%), ya sea por obtener ventajas de márketing o por el hecho de utilizar material reciclado para reducir el impacto medioambiental. El otro 30%, o no lo usaría de ninguna manera (20%) o solamente utilizaría plástico reciclado si es por obligación legislativa. Para finalizar, el 20% de las empresas les resultó interesante llevar a cabo la impresión de piezas a bordo (P6, Figura 2).

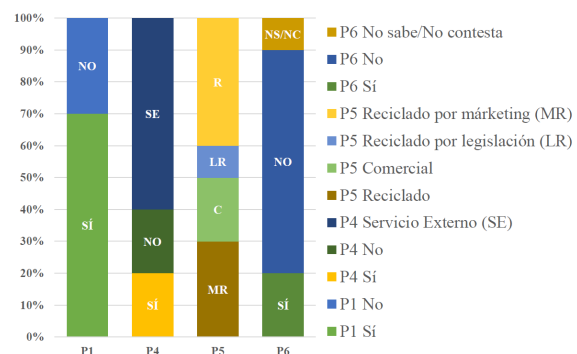


Figura 2: Respuestas a las preguntas P1, P4, P5, P6.

Tabla 2: Principales productos identificados.

P2	P3
Piezas de repuesto Topes de rodillos Tapas Soportes de rodamientos Film y bolsas Gradillas y soportes Botellas y envases	Palé (modular)    Pantalán (modular) Piezas de refuerzo Remaches

## 3 Entorno integrado de impresión 3D

A partir de estas encuestas se puede identificar que la impresión 3D podría ser una tecnología habilitadora para disminuir el uso de plástico que proviene de fuera de la industria marítima, fomentando el reciclaje de plástico, así como la Economía Circular.

Ante una gran variabilidad en el tipo de plástico a reciclar, con diferentes cantidades, diferentes calidades, etc., el proceso de reciclaje puede resultar mucho más complejo y costoso que centrarse



únicamente en un tipo de residuo-material. Ante este escenario, existen varias estrategias.

Una de ella consiste en intentar asimilar las calidades de los filamentos reciclados con los filamentos de plástico comerciales para la impresión 3D [14]. Sin embargo, esto puede conducir a un proceso más caro, en el que se desecha una gran cantidad de residuos plásticos que no cumplen con las propiedades de los plásticos comerciales. Además, los sistemas de software de impresión 3D están preparados para trabajar con un conjunto finito y específico de referencias plásticas.

Otra alternativa es no intentar generar filamentos de plástico con “características estándar” sino permitir una variabilidad ilimitada de calidades o parámetros. Sin embargo, para esto, las aplicaciones de impresión 3D deberían poder trabajar con una variedad ilimitada de calidades plásticas y no con características estándar. Se propone una estrategia basada en estándares abiertos y tecnologías que permiten la “capacidad de adaptación” más universal y rentable posible para lograr ambos requisitos (materiales y aplicaciones económicos y fácilmente desplegables).

Las industrias marítimas y la actividad portuaria presentan desafíos específicos, ya que, como se ha mencionado anteriormente, los usuarios tienen un conocimiento limitado de las técnicas de impresión 3D y existe la necesidad de adaptar el sistema a los plásticos reciclados que provienen de una amplia variedad de fuentes y tienen una variedad de propiedades. Las encuestas destacaron la necesidad de un “procedimiento de usuario” o “servicio” simple e intuitivo para introducir la impresión 3D en el sector marítimo, que, aunque tecnificado, no cuenta con personal cualificado en fabricación aditiva y reciclaje de plástico.

La solución propuesta se basa en: un servicio local donde cada nodo, empresa o entidad puede tener la impresora de su elección, llevando a cabo la impresión 3D en sus instalaciones, y un proveedor de servicios externo, que también produce filamentos reciclados y ajusta la generación del código de fabricación adaptado. El diseño de arquitecturas integradas para gestionar esta variedad de tecnologías, soluciones de aplicación, etc. ya ha sido propuesto en la literatura [10, 15], aunque no tienen en cuenta el problema adicional de tratar con materiales no estándar y su manipulación por usuarios no expertos. Con este enfoque, los usuarios finales solo necesitan una interfaz en sus dispositivos inteligentes (o computadora personal) donde pueden seleccionar la pieza a imprimir (el modelo virtual de la pieza) y el filamento para su impresora local. Luego, el servicio integrado se encarga del resto del

proceso. Como se observa en la Figura 3, la arquitectura propuesta está compuesta por:

1. Servicio local. Realiza la impresión 3D de la pieza. Consiste en una impresora 3D comercial que procese código G Marlin/Reprap y que permita la gestión remota del proceso, pudiendo estar este mecanismo embebido en la impresora 3D o con un elemento externo conectado al puerto USB.
2. Servicio en la nube. Es el encargado de realizar el proceso de trozado de un modelo 3D para la generación de código máquina automática, y de la gestión de los datos del material y el stock de filamentos en el nodo. Servicio *back-end* que el proveedor de servicios ejecuta en la nube.
3. Aplicación de usuario. Interfaz sencilla: selección del modelo a imprimir y los requisitos básicos de impresión (calidad, material y soporte), así como la gestión básica de la operación en la impresora 3D.

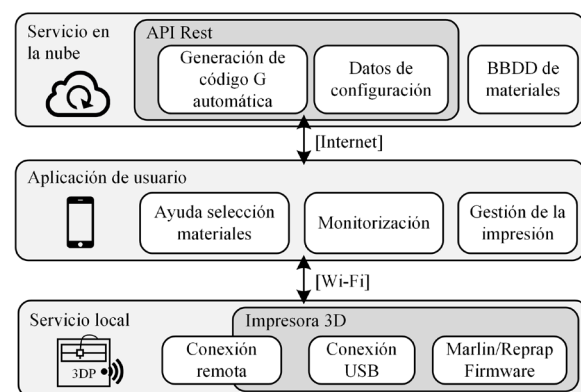


Figura 3: Arquitectura propuesta.

La selección de los modelos virtuales de piezas (en formato STL) a realizar se seleccionará a través de un repositorio local del nodo de usuario, del propio proveedor de servicios o mediante alguna aplicación de escaneo 3D.

#### 4 Implementación del entorno integrado de impresión 3D

En sus respuestas a la encuesta, las empresas del entorno portuario coincidieron en destacar la facilidad de uso como uno de los requisitos para la implementación efectiva de la impresión 3D en el sector. El servicio de impresión debe eximir a los usuarios no expertos de otras responsabilidades, como el mantenimiento de aplicaciones de software, la generación de códigos de máquina, la selección de parámetros de expertos, etc. Dado que la mayoría de las aplicaciones de impresión 3D funcionan con

materiales preestablecidos, cambiar a otro paradigma con muchos tipos diferentes de materiales y calidades requiere realizar cambios en estas aplicaciones. Las aplicaciones abiertas facilitan esta adaptación. Sin embargo, lo más importante es que el proceso es casi transparente para el usuario. La arquitectura integrada y la implementación de un “proceso de guía del usuario” para la selección de materiales como se presenta en esta sección cumplirían con el requisito de traducir las calidades de plástico masivo en servicios de impresión estándar.

#### 4.1 Servicio local

Esta parte del entorno integrado se diseña con el requisito de lograr un proceso compatible con la mayoría de las impresoras 3D comerciales de medio/bajo coste, por lo que se utiliza un protocolo que abierto para la comunicación entre la aplicación del usuario final y las impresoras 3D. Esto es posible con Octoprint, un servicio API-REST (*host*) que permite dotar de conectividad remota a cualquier impresora 3D aprovechándose de la conectividad USB con esta. Para la implementación de la arquitectura presentada, se ha utilizado una impresora 3D Ultimaker 2+. El servicio Octoprint se ejecuta en una Raspberry Pi y actúa como un servidor de impresión en una red local capaz de atender las solicitudes de un cliente y responder en consecuencia. Además, este *host* es el elemento clave en la configuración del servicio local, ya que la impresora, los sensores externos y una aplicación interactúan con él.

Cuando se recibe una solicitud para iniciar un nuevo proceso de impresión con este protocolo, todos los comandos de movimiento (código G) para un archivo seleccionado se envían línea por línea a través de la comunicación USB. Durante este proceso se controlan las trayectorias, la temperatura de la extrusora y el estado actual de fabricación, e incluso se pueden obtener imágenes en streaming de la plataforma de impresión.

#### 4.2 Servicio en la nube

El Servicio en la nube surge de la necesidad de evitar que el usuario final maneje las herramientas y configuraciones necesarias para imprimir, como el troceado de modelos 3D o la construcción de código G. Además, el uso de materiales reciclados aumenta la complejidad de la correcta generación del código G, ya que es necesario manipular parámetros como velocidad, enfriamiento, temperaturas de fabricación, retracciones del extrusor, etc., que dependen de las propiedades del filamento. Es por eso que un proveedor externo tendría que dar este servicio y mantener actualizada la información del material a medida que haya nuevos filamentos disponibles y de

ajustar las propiedades de configuración del filamento para el proceso de corte en consecuencia.

Este servicio propuesto funciona como una API REST y cumple un doble propósito: proporcionar las herramientas para la generación automática y personalizada de códigos G y servir como enlace a la base de datos de materiales donde se almacenan las propiedades de los filamentos estándar y reciclados. Está formada esencialmente de dos elementos: el núcleo de configuración (proceso de creación del archivo de configuración) y el núcleo de troceado/*slicing* (proceso CAM).

Partiendo de los parámetros seleccionados (impresora, filamento y calidad) se buscan en los paquetes de configuración y se genera un único archivo. Este archivo y el modelo STL son posteriormente utilizados por el “núcleo de troceado” para generar el código máquina (archivo de código G). Para realizar la generación de código máquina de manera automática se ha utilizado el CAM de código abierto, PrusaSlicer, el cual habilita su ejecución mediante consola de comandos para configurar las especificaciones de fabricación. Estas especificaciones se componen de datos clave-valor y pueden referirse a tres entidades diferentes: impresora 3D (diámetro de boquilla, volumen de impresión, etc.), filamento (temperatura de la boquilla y de la cama caliente, enfriamiento, etc.) y perfil de calidad (altura de capa, espesor de pared, etc.) [22].

#### 4.3 Aplicación de usuario final

El primer objetivo de la aplicación de usuario es manejar las operaciones básicas del proceso de producción con el servidor de impresión. Además, cuando se va a ejecutar un nuevo trabajo, se solicita al servicio en la nube que genere un nuevo código G, como se mencionó anteriormente. La aplicación al usuario final se ha desarrollado con el framework multiplataforma Xamarin.Forms dentro de NET Standard 2.0 para brindar mayor flexibilidad y adaptabilidad a las industrias marítimas. Dentro del marco de servicio integrado, esta aplicación es un acercamiento al patrón MVVM (Model-View-ViewModel) de arquitecturas de diseño de software [16]. La capa de presentación de la aplicación consta, principalmente, de las siguientes páginas:

- Sección de panel de control: monitorización de proceso y acciones básicas (inicio, parada, etc.).
- Sección de *slicing*: Configuración de preparación de la impresión: se escoge entre los materiales disponibles y perfiles de calidad disponibles para esa impresora. Posteriormente, tras adjuntar el modelo 3D de la pieza, estos datos se envían al servicio en la nube, que retorna el fichero de código máquina a la

aplicación. El Servicio Local es el responsable de realizar la fabricación de la pieza final a partir del código G generado.

- Sección de ayuda a la selección de material: disponible en la página de *slicing*. Lanza un asistente de selección de material para ayudar al usuario a seleccionar el material más adecuado.

La dificultad aumenta cuando se utilizan materiales reciclados, ya que sus propiedades se ven comprometidas incluso por los ciclos de reciclaje que han sufrido [12]. La arquitectura propuesta tiene esto en cuenta a través de un sistema de recomendación basado en el método TOPSIS [1], que permite a un usuario no experto trabajar con una gran variedad de material reciclado y seleccionar el más adecuado para la fabricación de una pieza. Este método establece un ranking entre las alternativas de materiales disponibles tras seleccionar el grado requerido de influencia de una propiedad de material (dureza, acabado, etc.).

## 5 Resultados

En este apartado se presentan los experimentos realizados para evaluar las dos principales estrategias propuestas en el artículo en cuanto al enfoque del reciclaje y la adaptación tecnológica de los sistemas de impresión 3D.

### 5.1 Reciclaje de residuo plástico: flejes

Se realizaron experimentos produciendo filamento con cinta de flejado reciclada con el fin de poder hacer una valoración de las propiedades de este residuo post-consumo.



Figura 4: Desarrollo del experimento.

La cinta de fleje se limpió solo con agua, debido a las impurezas menores, y posteriormente se desmenuzó (Figura 4 paso 1). El resultado es un material con una densidad aparente muy baja, que es difícil de introducir correctamente en la extrusora. Por esta razón, es difícil producir un filamento con un diámetro constante. En este caso, el primer filamento se vuelve a triturar para obtener un mejor granulado para alimentar la línea de filamentos, como se puede ver en la Figura 4, paso 2. Las pruebas de impresión se llevaron a cabo con una geometría estándar (parte central de la muestra de prueba ISO 527). Se detectó un fuerte efecto de deformación (Figura 4, paso 6). Sin embargo, este es un efecto ya conocido para el polipropileno estándar debido a las propiedades intrínsecas de contracción térmica de este material semicristalino. Por tanto, no es un efecto que pueda atribuirse al material reciclado. El uso de aditivos para mejorar la flexibilidad del material y reducir su coeficiente de contracción general puede mejorar la capacidad de impresión del PP (Figura 4, paso 7).

Estos ensayos indican el potencial de utilizar materiales de PP a base de cintas de fleje con alto contenido de reciclaje para la impresión 3D, siempre que se realicen los desarrollos de material adecuados y se ajusten los parámetros del proceso al material, como se propone en el entorno integrado de impresión 3D.

### 5.2 Comparación de entornos de impresión 3D

Tomando el experimento anterior, se hizo la comparación entre utilizar un entorno de impresión clásico y el propuesto en este artículo, imprimiendo ambos la misma pieza con material reciclado no estándar (fleje).

Los pasos a seguir para que un usuario configure la impresión en un entorno clásico serían los siguientes: elegir archivo de pieza, crear una nueva configuración de perfil; establecer, al menos, las configuraciones de temperatura, enfriamiento, velocidad de deposición, retracción, altura de capa, densidad de relleno, ala y velocidad de impresión; generación de código G; guardar el archivo en una memoria flash, insertarlo en la impresora 3D, buscar el fichero e imprimir. Deben establecerse más de 38 variables, las cuales requieren, generalmente, de conocimiento experto. El proceso tuvo una duración aproximada de 15 min para llevar a cabo la primera impresión, sin introducir ninguna variable de manera errónea.

Por otra parte, utilizando ahora el entorno propuesto en este artículo, los pasos consisten en: escoger el archivo de pieza a fabricar, material y calidad para imprimir la pieza, y presionar la acción de imprimir. Las configuraciones de material y calidad son



realizadas por el proveedor de servicios a través del Servicio en la nube, externalizando los pasos más técnicos para el usuario y dejando que este tome solo, aproximadamente, cuatro pasos y 2 minutos para poner en marcha la impresión.

Por lo tanto, el número de operaciones y el tiempo necesario para realizar un trabajo de impresión son mucho menores en el caso del entorno de impresión 3D integrado, como muestra la prueba.

## 6 Conclusiones

Los datos de la encuesta sobre los tipos y la cantidad de residuos plásticos han demostrado que hay mucho plástico para reciclar, aunque en distintos productos y de distintos tipos. Se debe hacer un esfuerzo no solo para aumentar la cantidad total de basura plástica que se recicla, sino también para tratar de reciclar de manera efectiva tantos tipos de plásticos como sea posible. La alternativa podría centrarse en poner el esfuerzo de reciclaje en un solo tipo de plástico, ignorando los demás. Sin embargo, esto no seguiría los principios de la Economía Circular. Es por eso que este trabajo considera importante facilitar, en la medida de lo posible, la inclusión de una mayor gama de plásticos en el esfuerzo de reciclaje. De esta forma se trata de, no solo reciclar tantos tipos diferentes de residuos como sea posible, sino también ofrecer al usuario final una amplia variedad de opciones de materiales reciclados para cubrir sus necesidades.

El artículo responde a la pregunta sobre cómo la tecnología de impresión 3D actual puede adaptarse y funcionar de manera sencilla con filamentos hechos de plástico reciclado con una amplia gama de tipos y calidades, común en entornos de puertos marítimos y oceánicos. Para ello, se propone una nueva estrategia basada en permitir una variabilidad ilimitada de calidades o parámetros en los plásticos reciclados, sin tener que generar filamentos con “características estándar”. De esta forma, las aplicaciones de impresión 3D deben poder trabajar con una variabilidad ilimitada de calidades plásticas y sin características regulares, de una forma transparente y sencilla para usuarios no expertos (no expertos en materiales o tecnología de impresión 3D), donde la tecnología automáticamente se adapta a cualquier plástico.

El entorno presentado implementa esta nueva estrategia y ha sido probado en una implementación de prototipo. Se ha comprobado que se pueden llevar a cabo impresiones con plástico reciclado a partir de basura generada por las industrias marítimas y el número de operaciones y el tiempo necesario para realizar un trabajo de impresión son mucho menores en el caso del entorno de impresión 3D integrado.

## Agradecimientos (10 ptos, negrita)

Esta investigación fue financiada parcialmente por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER): Programa Interreg Atlantic Area, subvención número “EAPA\_117/2018”. Los autores expresan su más sincero agradecimiento a los *stakeholders* del nodo de Vigo por su contribución.

## English summary

### 3D PRINTING ARCHITECTURE TO SUPPORT CIRCULAR ECONOMY STRATEGIES AROUND PLASTIC RECYCLING IN THE MARITIME-PORT ENVIRONMENT.

#### Abstract

*Coming from both on-land and marine activities, marine plastic debris represents a major environmental problem. Annually, more than 12 tons accumulate in ports, on shores, in the depths of the ocean, etc. The European CircularSeas project addresses this problem by combining 3D printing technology, Circular Economy principles and the use of plastic waste generated by the maritime-port industries. The goal is to develop eco-friendly products, parts and components that will be used by these industries. The article aims to answer whether 3D printing technology can bring benefits to the maritime-port sectors, where manufacturing, prototyping and customization of products have not traditionally been its business activity. Another question to answer is how 3D printing could accommodate recycled plastic in a feasible and user-oriented way in these industries. To do this, the article proposes a new integrated 3D printing framework adaptable to recycled plastic feedstock from marine waste and user-oriented.*

**Keywords:** Maritime industries, recycling, marine plastic waste, 3D printing, open-source technologies.

#### Referencias

- [1] Ceballos B, Lamata MT, Pelta D, Sanchez JM (2013) El método tópsis relativo vs. Absoluto. Recta
- [2] CircularSeas (2020) CircularSeas: Turning ocean plastic waste into green products for maritime industries. <https://circularseas.com/>.
- [3] Green Ship of the Future (2018) 3D print in the maritime industry from concept to implementation. GSF, Copenhagen, Denmark.

- [4] IUCN (2020) The marine plastic footprint : towards a science-based metric for measuring marine plastic leakage and increasing the materiality and circularity of plastic
- [5] Kanhai LDK, Gardfeldt K, Krumpfen T, Thompson RC, O'Connor I (2020) Microplastics in sea ice and seawater beneath ice floes from the Arctic Ocean. *Scientific Reports* 10:5004. doi: 10.1038/s41598-020-61948-6
- [6] Kostidi E, Nikitakos N (2017) Exploring the Potential of 3D Printing of the Spare Parts Supply Chain in the Maritime Industry. In: *Safety of Sea Transportation*. CRC Press, London, UK, pp 171–178
- [7] Kostidi E, Nikitakos N (2018) Is It Time for the Maritime Industry to Embrace 3d Printed Spare Parts? *TransNav* 12:557–564. doi: 10.12716/1001.12.03.16
- [8] LI WC, TSE HF, FOK L (2016) Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. *Science of The Total Environment* 566–567:333–349. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.084
- [9] Löhr A, Savelli H, Beunen R, Kalz M, Ragas A, Van Belleghem F (2017) Solutions for global marine litter pollution. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 28:90–99. doi: 10.1016/j.cosust.2017.08.009
- [10] Mai J, Zhang L, Tao F, Ren L (2016) Customized production based on distributed 3D printing services in cloud manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol* 84:71–83. doi: 10.1007/s00170-015-7871-y
- [11] Matthews C, Moran F, Jaiswal AK (2021) A review on European Union's strategy for plastics in a circular economy and its impact on food safety. *Journal of Cleaner Production* 283:125263. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125263
- [12] Mikula K, Skrzypczak D, Izydorczyk G, Warchoł J, Moustakas K, Chojnacka K, Witek-Krowiak A (2020) 3D printing filament as a second life of waste plastics—a review. *Environmental Science and Pollution Research*. doi: 10.1007/s11356-020-10657-8
- [13] Minguela-Canela J, Planas SM, Ayats JRG, López MA de los S (2019) Study and comparison of the different costs' schema associated to geometry, material and processing between 3D printing, injection molding and machining manufacturing technologies. *Procedia Manufacturing* 41:280–287. doi: 10.1016/j.promfg.2019.09.010
- [14] Pakkanen J, Manfredi D, Minetola P, Iuliano L (2017) About the Use of Recycled or Biodegradable Filaments for Sustainability of 3D Printing. In: Campana G, Howlett RJ, Setchi R, Cimatti B (eds) *Sustainable Design and Manufacturing 2017*. Springer International Publishing, Cham, pp 776–785
- [15] Paszkiewicz A, Bolanowski M, Budzik G, Przeszlowski Ł, Oleksy M (2020) Process of Creating an Integrated Design and Manufacturing Environment as Part of the Structure of Industry 4.0. *Processes* 8:1019. doi: 10.3390/pr8091019
- [16] Petzold C (2016) *Creating Mobile Apps with Xamarin.Forms*
- [17] Pham CK, Ramirez-Llodra E, Alt CHS, *et al.* (2014) Marine Litter Distribution and Density in European Seas, from the Shelves to Deep Basins. *PLoS ONE* 9:e95839. doi: 10.1371/journal.pone.0095839
- [18] PlasticsEurope (2020) *Plastics – the Facts 2020*. Plastics Europe: Association of Plastics Manufacturers
- [19] Ritchie H, Roser M (2018) *Plastic Pollution. Our World in Data*
- [20] Schmidt C, Krauth T, Wagner S (2017) Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ Sci Technol* 51:12246–12253. doi: 10.1021/acs.est.7b02368
- [21] SHEPHERD I (2017) European Projects on marine litter. In: *Maritime Forum - European Commission*. <https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/en/node/4025>.
- [22] Slic3r Manual – Command Line Usage. <https://manual.slic3r.org/advanced/command-line>.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE INMERSIÓN PARA PLATAFORMAS DE SENSORES SUBMARINAS

Morales-Aragón, Isabel Pilar; Soto-Valles, Fulgencio; González-Teruel, Juan Domingo; Torres-Sánchez, Roque

Departamento de Automática, Ing. Eléctrica y Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena, Campus de la Muralla s/n 30202 Cartagena.

[isamoralesaragon@gmail.com](mailto:isamoralesaragon@gmail.com); [pencho.soto@upct.es](mailto:pencho.soto@upct.es); [juando.gonzalez@upct.es](mailto:juando.gonzalez@upct.es); [roque.torres@upct.es](mailto:roque.torres@upct.es)

## Resumen

*Las plataformas de sensores son utilizadas como focos de información de ciertos entornos específicos. En el ámbito de los sistemas marítimos y oceanográficos, estas plataformas permiten sensorizar ciertas propiedades del agua a partir de diversas variables, como es el caso del nivel de oxígeno, los niveles de turbidez, clorofila, salinidad, etc. Debido a las diferentes estratificaciones que se producen en este entorno a diferentes profundidades, es necesario realizar la medida a diferentes profundidades. Por ello, este proyecto se va a centrar en el diseño de un algoritmo de control con el fin de gestionar la profundidad de un objeto con capacidad de inmersión, permitiendo así, detener dicha arquitectura sumergible a una profundidad deseada. De manera progresiva se irá analizando el sistema de control, el cual permitirá gestionar la profundidad en función de la posición a la que se encuentren de los actuadores. Para ello, se abordarán diferentes puntos, como es el caso de las consideraciones y características constructivas del modelo, el estudio detallado del comportamiento de cada uno de los principales componentes de sistema, así como de la respuesta de las variables a estudiar. Además, dicho sistema de control se implementará en un microcontrolador con el fin de proporcionar las señales adecuadas en cada instante de tiempo, permitiendo así, que los actuadores introduzcan o desalojen un volumen determinado de agua y, por consiguiente, se logre alcanzar un adecuado y autónomo desplazamiento de la plataforma.*

**Palabras clave:** plataforma de sensores, boya submarina, WSN, control de profundidad, simulación de procesos.

## 1. Introducción

La contaminación del medio marino es un complejo tema de inmensa importancia científica y política. Con el fin de desarrollar una comprensión de los problemas de la contaminación marina, se confía tanto en la investigación como en el seguimiento de los océanos, haciendo así que el medio ambiente oceánico moderno emerja como el próximo reto para el análisis de datos.

Las lagunas costeras se definen como tramos de agua salada o salobre en áreas costeras que están separadas del mar por una lengua de tierra u otra topografía similar. Estos cuerpos de agua pueden conectarse al mar en puntos limitados, ya sea de forma permanente o solo durante parte del año. Una vez que se ha formado una barrera de laguna y está debidamente aislada del mar abierto, los sedimentos más finos pueden depositarse en el área detrás de la barrera, incluidos los sedimentos traídos del continente. Como resultado, las propiedades del agua dentro de la laguna pueden diferir significativamente de las aguas abiertas del mar (por ejemplo, en oxígeno disuelto, carga de sedimentos, salinidad, etc.). Esto permite la generación de ambientes ricos en nutrientes y resguardados (protegidos de la acción de las olas), que pueden desarrollar una flora y fauna singular.

Las lagunas costeras son ambientes comunes en la zona de transición ubicada entre ecosistemas terrestres y mares adyacentes. Estos ecosistemas están controlados por interacciones complejas entre la tierra,

el océano y la atmósfera, lo que resulta en entornos altamente cambiantes y vulnerables. En la mayoría de los casos, las actividades humanas tienen una fuerte influencia en estos procesos e interacciones. El Mar Mediterráneo alberga una importante población humana y es una zona adecuada para la agricultura y el turismo. En la costa mediterránea española, esta presión se ha incrementado drásticamente en las últimas décadas como consecuencia del desarrollo agrícola y turístico descontrolado. Por ello, las lagunas costeras de esta zona presentan con frecuencia alteraciones y fluctuaciones físicas y químicas, considerándose en ocasiones como sumideros de desechos, lo que provoca su degradación ambiental.

La laguna del Mar Menor es una de las singularidades ecológicas más importantes del área mediterránea. Es un área donde se encuentran muchas actividades económicas e industriales, haciendo así que la suma de los impactos de la minería, la agricultura y el desarrollo urbano alrededor de la laguna durante las últimas décadas haya afectado su ecosistema.

Para satisfacer la necesidad de una mejor evaluación del cambio del ecosistema en escalas temporales y espaciales apropiadas, se requieren nuevas estrategias de medición basadas en observaciones continuas o semicontinuas. El objetivo es cuantificar el estado del mar obteniendo datos sobre las temperaturas que se presentan en la superficie, salinidad, nivel de oxígeno, los niveles de turbidez, clorofila, etc. Por ello, se presenta la necesidad de diseñar y fabricar pequeñas arquitecturas flotantes de bajo costo que permitan crear una red de datos oceánicos en tiempo real sobre el estado actual de la laguna del Mar Menor.

De este modo, surge el objetivo de este proyecto, el cual consiste en el diseño de un algoritmo de control y su implementación en un microcontrolador, con objeto de gestionar el ascenso y descenso de una plataforma sumergible mediante la variación del volumen de agua presentado en cada uno de sus tanques de lastre en cada instante de tiempo.

Para ello, se va a llevar a cabo el estudio de una plataforma sensorial real teniendo en cuenta los diferentes principios que afectan a un cuerpo sumergido en un fluido y que su dirección de desplazamiento es únicamente vertical.

## 2. Metodología

Para llevar a cabo este estudio hay que tener en cuenta la geometría exterior de la plataforma. La plataforma consta de dos sistemas de lastre accionados por motores de corriente continua. Dichos sistemas de lastre van a ser los encargados de modificar el peso de

la plataforma mediante el llenado o expulsión de agua de sus respectivos tanques de llenado, los cuales presentan una capacidad de 0,75 litros cada uno.

Teniendo en cuenta estas características que presenta la plataforma, para alcanzar el objetivo marcado se llevarán a cabo las siguientes tareas:

- **Modelado del comportamiento del actuador**

Los actuadores que permiten el desplazamiento vertical de la plataforma se basan en el principio de variación del peso de esta. Ambos actuadores están accionados por motores que son capaces de expulsar agua del interior del tanque de llenado al exterior para hacer que el sistema ascienda o, por el contrario, introducir agua hacia el interior del tanque para hacer que este descienda.

El modelado del comportamiento del sistema de lastre se lleva a cabo a través de la geometría de los depósitos de lastre y de los motores que los accionan, obteniendo así, la función de transferencia en lazo abierto teniendo en cuenta el tiempo que estos necesitan en completar un recorrido completo:

$$\frac{x(s)}{V(s)} = \frac{0,08698}{s^2 - 104,015 \cdot s} \quad (1)$$

- **Obtención del punto de equilibrio**

Se va a denominar punto de equilibrio al peso de la plataforma que permite que esta permanezca estática a una determinada profundidad durante un tiempo para permitir tomar medidas satisfactorias del estado de las variables a esa profundidad.

Partiendo del principio de Arquímedes, se obtiene que el punto de equilibrio es aquel que permite igualar su peso con el empuje que esta sufre debido al volumen de agua que desaloja al ser sumergida.

- **Modelado de la evolución de la posición de la plataforma**

Partiendo del peso de equilibrio, se procede a medir el tiempo transcurrido hasta que la plataforma sumergible alcanza la superficie con respecto a una profundidad determinada.

Esto, junto con tener en cuenta diversos principios que influyen al encontrarse un cuerpo sumergido en un fluido, permite definir la evolución que presenta la profundidad a la que se encuentra la plataforma a lo largo del tiempo:

$$\frac{z(s)}{x(s)} = \frac{1,69}{s^2} \quad (2)$$

### • Construcción de la simulación

La combinación de la evolución de la profundidad con la variación del peso de la plataforma en función del estado del sistema de lastre permite obtener un algoritmo de control, el cual logra que dicha plataforma alcance la profundidad deseada en cada momento. Dicho algoritmo se puede plantear en base a dos tipos de arquitectura: por un lado, una arquitectura que tiene en cuenta el retardo existente entre la acción de control y el desplazamiento de la plataforma, para el que se implementa un Predictor de Smith y, por otro lado, otra arquitectura en la que se considera que el proceso no presenta un tiempo de retardo entre la variación del sistema de lastre y la profundidad a la que se encuentra la plataforma.

### • Implementación del algoritmo en una plataforma hardware

Estudiando ambas arquitecturas comentadas anteriormente, diferenciadas en función del tiempo muerto, se procede a la discretización del algoritmo de control y su posterior implementación en un microcontrolador, con el fin de comprobar la correspondencia que presenta el modelo diseñado con el real.

### • Ensayos de registro de profundidad y posición de los actuadores en la plataforma hardware

Tras la implementación del sistema de control en la plataforma, se procede a la obtención de datos de profundidad a través de ensayos mediante un sensor de profundidad. Esto permite la obtención de datos reales de la evolución de la posición a la que se encuentra la plataforma sumergible en función del volumen de lastre presente en el interior del tanque.

## 3. Resultados

### 3.1. Controladores necesarios para el sistema de control

En primer lugar, en cuanto a la primera etapa del estudio del prototipo a través de simulaciones, se pudo comprobar que al modelar el proceso de la profundidad que alcanza la plataforma en función del volumen de agua que presenten sus tanques de lastre, se obtiene un sistema de segundo orden con sus dos polos en el origen. Esta disposición de los polos implica un proceso al límite de la estabilidad y conlleva una complejidad extra a la hora de modelar el controlador que permitiese estabilizar el sistema. Aun así, se pudo alcanzar un control del proceso con éxito e incluso obtener una dinámica amortiguada.

Dicha gestión del proceso se pudo lograr mediante controladores encargados de determinar el comportamiento del lazo de control y de ajustar la acción del actuador según el error que se obtiene en cada instante de tiempo.

Por un lado, el controlador al que se recurrió para modelar el correcto funcionamiento de los actuadores fue un controlador ON/OFF. Dicho controlador permite, mediante un simple algoritmo, comprobar si la variable realimentada del proceso que se está controlado se encuentra por debajo o por encima de un determinado *setpoint*. De este modo, la señal obtenida por el controlador únicamente toma valores binarios.

Por otro lado, en cuanto al control de la profundidad a la que se encuentra la plataforma en función del volumen de lastre, el sistema presenta una dinámica inestable, por lo que si no se emplease ningún tipo de controlador, la variable sería incontrolable, tal como se muestra en la Figura 1.

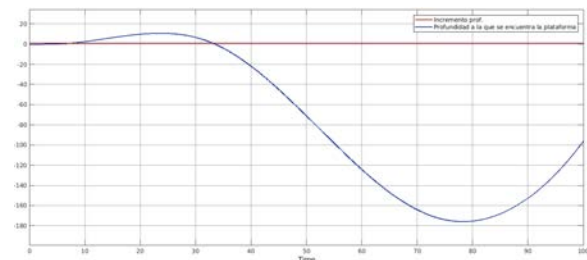


Figura 1. Dinámica de la profundidad en lazo cerrado sin controlador.

Por ello, a diferencia de lo que ocurría con los actuadores, en este caso no sería válido emplear un controlador ON/OFF, puesto que resulta necesario mejorar el comportamiento que presenta dicho sistema para poder obtener la dinámica deseada.

Para permitir el correcto funcionamiento de la plataforma que se encuentra en estudio, se va a emplear un controlador PD. De este modo, la acción proporcional se va a encargar de reducir el error y la acción derivativa mejorará sobre todo el transitorio, haciendo así que la dinámica resultante presente menos sobreoscilaciones. Además, la acción derivativa va a ponderar a la referencia por un factor  $\beta = 0$ , permitiendo así que la dinámica de la salida no dependa de la entrada y, por consiguiente, sea más sencillo su control.

Para tener completamente determinado dicho controlador, únicamente faltaría obtener el valor de la ganancia proporcional y derivativa. Para ello, se estudiaron varios métodos. Uno de ellos es el primer método de Ziegler-Nichols. Este método basado en el estudio del sistema en lazo abierto nos permite

observar que se obtenía una dinámica integradora para una determinada entrada, tal como se muestra en la Figura 2, concluyendo así la invalidez del método para nuestro caso.

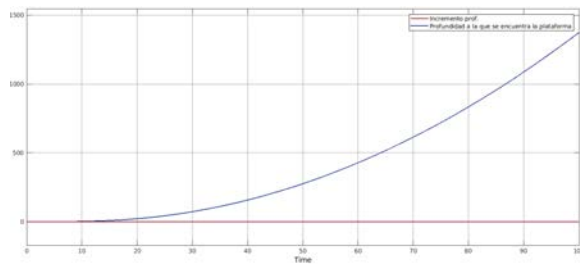


Figura 2. Dinámica de la profundidad de la plataforma ante una entrada escalón en lazo abierto.

Debido a la imposibilidad de emplear el método anterior, se procede a estudiar el comportamiento en lazo cerrado aplicando el segundo método de Ziegler-Nichols. En este caso se pretende llegar a un comportamiento no amortiguado aplicando únicamente una ganancia proporcional. De esta forma, se comprueba que teniendo únicamente un controlador proporcional nunca se llega a alcanzar un comportamiento no amortiguado. Por ello, los valores de ganancia proporcional y derivativa proceden a obtenerse de manera experimental. Además, cabe destacar que este proceso es íntegramente experimental, por lo que únicamente se van a presentar las gráficas que presenten una mayor relevancia y no conlleven a un comportamiento inestable.

Para una ganancia proporcional  $k_p = 0,02$  y una ganancia derivativa  $k_d = 0,2$  se presenta un sistema estable, con una dinámica amortiguada y con un tiempo de establecimiento aproximadamente de 30 segundos (Figura 3).

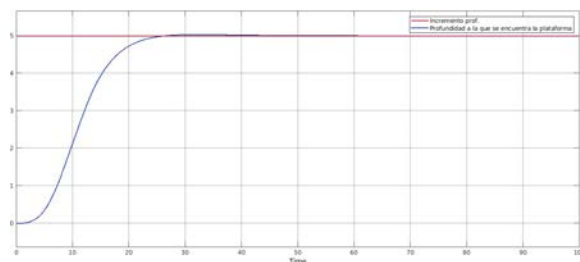


Figura 3. Dinámica que presenta la plataforma para  $k_p = 0,02$ ,  $k_d = 0,2$  y una entrada escalón igual a 5.

Si se reduce la acción derivativa a la mitad y la ganancia proporcional se mantiene constante, se puede observar que el tiempo de establecimiento es mucho más lento y además presenta sobreoscilaciones (Figura 4), por lo que con dichas ganancias se obtiene un comportamiento peor.

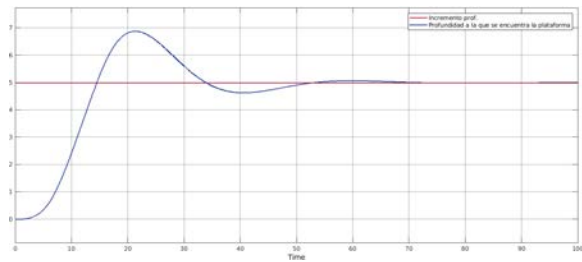


Figura 4. Dinámica que presenta la plataforma para  $k_p = 0,02$ ,  $k_d = 0,1$  y una entrada escalón igual a 5.

Por otro lado, también se podría aumentar la ganancia proporcional y estudiar cómo se comporta el sistema. Para  $k_p = 0,03$  y  $k_d = 0,2$  se puede observar que se obtiene un sistema inestable (Figura 5).

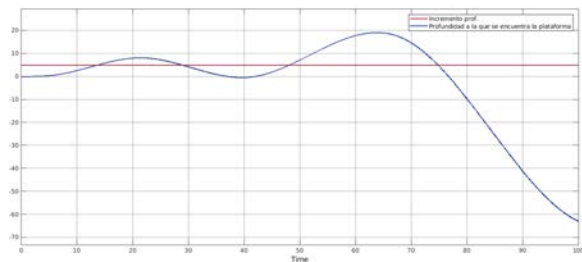


Figura 5. Dinámica que presenta la plataforma para  $k_p = 0,03$ ,  $k_d = 0,2$  y una entrada escalón igual a 5.

Además, si se dejase la ganancia proporcional igual a 0,03 y se incrementa la acción derivativa ( $k_d = 0,3$ ), se obtendría un sistema estable, pero con un comportamiento peor al mostrado primeramente (Figura 6).

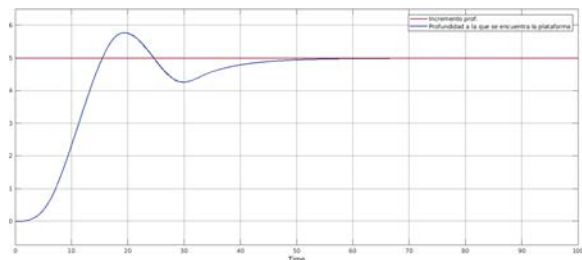


Figura 6. Dinámica que presenta la plataforma para  $k_p = 0,03$ ,  $k_d = 0,3$  y una entrada escalón igual a 5.

Después de este análisis, se puede concluir que el controlador que permite obtener una mejor dinámica del sistema presenta una ganancia proporcional y derivativa igual a 0,02 y 0,2, respectivamente.

Tanto el controlador ON/OFF como el controlador PD, junto con las funciones de transferencia que permiten modelar tanto el comportamiento de los actuadores como de la plataforma, permiten obtener un lazo de control capaz de gestionar la profundidad de dicha plataforma (Figura 7), obteniéndose una



dinámica amortiguada y con un tiempo de establecimiento pequeño (Figura 8).

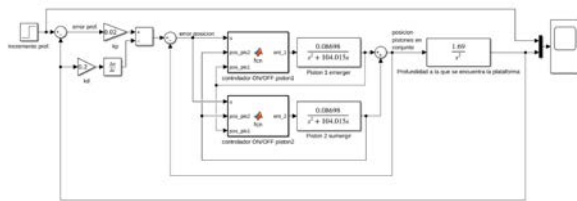


Figura 7. Arquitectura de control sin tiempo muerto.

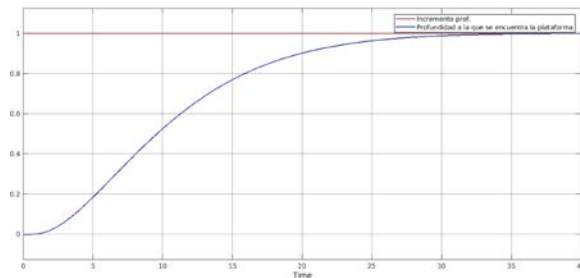


Figura 8. Evolución de la profundidad para un setpoint de 1 metro sin tener en cuenta el tiempo muerto.

### 3.2. Predictor de Smith

Uno de los fenómenos inherentes al sistema es que cuando los tanques de lastre se llenan, la plataforma tarda un tiempo en comenzar a sumergirse. Igualmente, cuando la plataforma se encontraba en movimiento de descenso y los pistones desalojaban lastre, se observa que, aun así, la plataforma continuaba descendiendo hasta un determinado tiempo, en el cual esta comenzaba a emerger. Por ello, se pudo observar que el sistema presentaba un determinado tiempo de retardo entre la acción de los actuadores y la respuesta que presentaba la plataforma. Este tiempo muerto se produjo debido a que dicho proceso necesita un determinado tiempo para transportar energía. Como consecuencia de este fenómeno, se tuvo que estudiar el comportamiento del sistema ante diferentes tiempos de retardo. El sistema no presenta un buen comportamiento ante la presencia de retardos (Figura 9), viéndose así la necesidad de implementar un compensador de tiempo muerto.

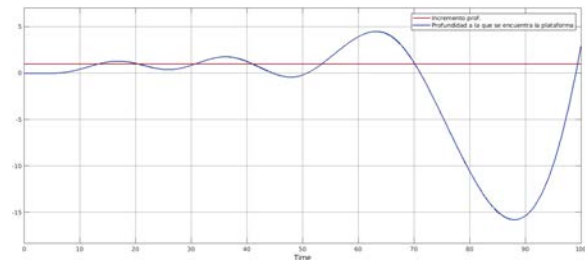


Figura 9. Dinámica de la profundidad ante un delay de 4 segundos.

De todos los compensadores de tiempo muerto, se escogió el Predictor de Smith, el cual es un modelo capaz de lograr que la respuesta que tiene un sistema con un determinado retardo presente la misma dinámica que tendría ese sistema sin retardo, es decir, ante una determinada entrada, presenta la misma dinámica, pero desplazada en el tiempo (Figura 10).

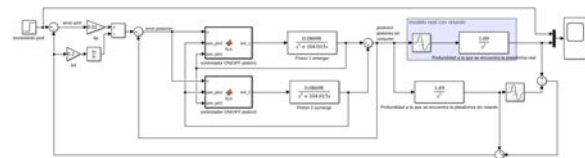


Figura 10. Arquitectura de control con Predictor de Smith.

Una vez implementado dicho compensador de tiempo muerto, se puede observar que la dinámica obtenida presentaba el mismo comportamiento dinámico retrasada en el tiempo (Figura 11).

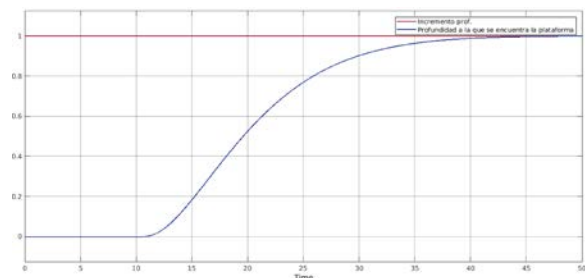


Figura 11. Dinámica de la profundidad ante un delay de 10 segundos aplicando el Predictor de Smith.

### 3.3. Implementación en un microcontrolador

En la última fase de este estudio, la simulación se traslada a la realidad mediante la implementación del sistema de control en un microcontrolador de la serie ESP32 con capacidad de gestión de todo el proceso. Dicho microcontrolador, programado en micropython, tiene capacidad de gestionar 8 ADC para lectura de datos, varias I/O para accionar los sistemas de lastre y un sistema de comunicación Sigfox para el envío de los datos en superficie.

Cabe destacar que hasta ahora se ha trabajado con un sistema de control continuo, pero a la hora de implementarlo en un microcontrolador, es necesario discretizarlo. A diferencia de las señales continuas, las señales discretas únicamente toman valores en una cantidad determinada de puntos evaluados en  $nT$ , donde  $T$  es el periodo de muestreo y  $n$  el número de muestra. Cada muestra aparece ordenada en la posición que se ha ido generando, por lo que las señales ya no se representan en función del tiempo, sino en función del número de muestra.

Existen diferentes aproximaciones para discretizar señales continuas. Por su simplicidad y puesto que es una aproximación que presenta una gran exactitud, se va a emplear una aproximación rectangular y, puesto que se desconocen los valores futuros, se va a emplear una diferencia regresiva. Por ello, el término proporcional y derivativo vendrán dados por las ecuaciones 3 y 4, respectivamente:

$$k_p e(t) = k_p e(n) \quad (3)$$

$$k_d \frac{e(t)}{dt} = k_d \frac{e(n) - e(n-1)}{T} \quad (4)$$

siendo  $e(t)$  el error continuo,  $e(n)$  el error en la muestra actual y  $e(n-1)$  el error en la muestra anterior.

Finalmente, puesto que el controlador que se desea implementar en este caso presenta el término derivativo ponderado a la referencia por un factor  $\beta = 0$ , es decir, la acción derivativa no depende del error, sino de la variable salida del sistema:

$$k_d \frac{z(t)}{dt} = k_d \frac{z(n) - z(n-1)}{T} \quad (5)$$

siendo  $z(n)$  la profundidad a la que se encuentra la plataforma en la muestra actual y  $z(n-1)$  la profundidad en la muestra anterior.

Por otro lado, en el caso de trabajar con señales digitales que posteriormente van a actuar sobre un proceso continuo, es necesario transformar dichas señales a otras prácticamente continuas. Por ello, el funcionamiento de los actuadores se discretizó teniendo en cuenta un retenedor de orden cero. Dicho retenedor o sostenedor permite reconstruir la señal manteniendo el valor de la última muestra de manera constante hasta que se genera la próxima muestra [11]. Puesto que se desea discretizar la acción de los pistones con el fin de poder implementarlo en el microcontrolador, se empleó la transformación ZOH:

$$F(z) = (1 - z^{-1})Z \left[ \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{F(s)}{s} \right) \right] \quad (6)$$

Para discretizar el sistema de forma general, la ecuación 1 se puede expresar en términos generales como:

$$F(s) = \frac{b}{s^2 - a \cdot s} \quad (7)$$

De forma que la función discretizada aplicando la transformación ZOH quedaría:

$$\begin{aligned} F(z) &= \\ &= \frac{b(-1 + aT - e^{-aT})z^{-1}}{a^2(1 - (e^{-aT} + 1)z^{-1} - e^{-aT}z^{-2})} - \\ &\quad - \frac{b \cdot (1 + aTe^{-aT} - e^{-aT})z^{-2}}{a^2 \cdot (1 - (e^{-aT} + 1)z^{-1} - e^{-aT}z^{-2})} \end{aligned} \quad (8)$$

que, sustituyendo los valores, se obtiene la función de transferencia del comportamiento del sistema de lastre discretizado:

$$\begin{aligned} F(z) &= \frac{x(z)}{V(z)} = \\ &= \frac{0,00042345 \cdot z^{-1} + 0,000008 \cdot z^{-2}}{1 - z^{-1}} \end{aligned} \quad (9)$$

Expresando la ecuación anterior en función de las muestras de tensión y el sistema de lastre, queda:

$$x(n) = 4 \cdot 10^{-4} \cdot V(n-1) + 8 \cdot 10^{-6} \cdot V(n-2) + x(n-1) \quad (10)$$

Por último, de manera análoga al caso anterior, se discretiza el modelo de la profundidad, obteniéndose la profundidad en función de las muestras de posición del sistema de lastre y de profundidad:

$$z(n) = 0,2 \cdot x(n-1) + 0 \cdot x(n-2) + 2 \cdot z(n-1) - z(n-2) \quad (11)$$

De este modo, se ha llevado a cabo la puesta en marcha de los ensayos con el fin de estudiar la validez de la arquitectura de control propuesta. Tras dichos ensayos se pudo observar un resultado satisfactorio. En cualquier caso, aunque el algoritmo descrito permite obtener un control de la profundidad a la que se encontraba la plataforma, se pudo observar que se presentaba un punto de funcionamiento muy crítico y, por consiguiente, las variaciones del peso de funcionamiento de la plataforma dificultaban un control óptimo.

#### 4. Conclusiones

En la primera fase del estudio se logró diseñar un algoritmo de control capaz de gestionar la profundidad a la que se encuentra una plataforma sumergible. Este diseño se llevó a una fase de simulación, en la cual se obtuvo una dinámica amortiguada, sin sobreoscilaciones y con un tiempo de establecimiento



aproximado a 30 segundos. Una vez validado el modelo mediante simulaciones, se llevaron a cabo ensayos reales. Para tal fin se procedió a discretizar el sistema de control obtenido y, a su posterior implementación en un microcontrolador.

Tras llevar a cabo ensayos con el sistema real, se llegó a la conclusión de varios aspectos que podrían dificultar la obtención de un control óptimo a largo plazo. Como se ha comentado en el apartado de metodología, el punto de funcionamiento presente en el control es bastante crítico. Esta situación crítica estuvo causada por el método de actuación del sistema de lastre. Estos actuadores permiten el control del sistema a través de una actuación todo/nada y un tiempo de llenado de cada tanque de 20 segundos. La incapacidad de generar un volumen de lastre constante en el tiempo ni una respuesta rápida hace que, al presentar variaciones del punto de funcionamiento, los actuadores no estén capacitados para corregir esta modificación con la presteza necesaria y, por consiguiente, no se logre mantener la plataforma estable a una determinada profundidad de manera efectiva. Las plataformas de sensores sumergidas en el mar, como la planteada en este estudio, son propicias a la acumulación de organismos y partículas en su superficie (fenómeno conocido como *fouling*). Como consecuencia, a medida que va pasando el tiempo, el peso de funcionamiento se vería modificado, lo que daría lugar a un distanciamiento entre el modelo y el sistema real, generando un control insatisfactorio de la profundidad de la plataforma. Por ello, se cree necesario llevar a cabo un rediseño del sistema incidiendo, sobre todo, en la acción de control sobre el sistema de lastre, rediseñando éste para que la proporción entre el volumen del lastre y el peso muerto del sistema sea más elevada, y de ese modo el punto de funcionamiento no sea tan crítico. Por otro lado, es necesario realimentar el estado del sistema de lastre con objeto de reducir el tiempo de establecimiento del sistema y mejorar su dinámica en los procesos de inmersión y subida a superficie.

## English summary

# STUDY AND DESIGN OF AN IMMERSION CONTROL SYSTEM FOR SUBMARINE SENSOR PLATFORMS

## Abstract

*Sensor platforms are used as sources of information for certain specific environments. In the field of maritime and oceanographic systems, these platforms make it possible to sensorize certain properties of the water based on various variables, such as the oxygen level, the levels of turbidity, chlorophyll, salinity, etc. Due to the different stratifications that occur in this environment at different depths, it is necessary to perform the measurement at different depths. Therefore, this project will focus on the design of a control algorithm to manage the depth of an object with immersion capacity, thus allowing the submersible architecture to be stopped at a desired depth. The control system will be progressively analyzed, which will allow the depth to be managed depending on the position of the actuators. For this, different points will be addressed, such as the considerations and constructive characteristics of the model, the detailed study of the behavior of each of the main components of the system, as well as the response of the variables to be studied. In addition, said control system will be implemented in a microcontroller to provide the appropriate signals at each instant of time, thus allowing the actuators to introduce or dislodge a specific volume of water and, consequently, achieve an adequate and autonomous platform movement.*

**Keywords:** sensor platform, underwater buoy, WSN, depth control, process simulation.

## Referencias

- [1] Matlab, «The MathWorks, Inc.» 1 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098.
- [2] Atom, «Atom text editor, v1.55.0.» [En línea]. Available: <https://atom.io/>.
- [3] Fred de Haro & Bettina Rubek Slater, «Pycom, Inc.» Surrey Technology Park 2 Huxley Road Guildford Surrey GU2 7RE, United Kingdom.
- [4] Pycom, «Pycom go invent, Expansionboard 3.0.» [En línea]. Available: <https://docs.pycom.io/datasheets/expansionboards/expansion3/>.
- [5] Pycom, «Pycom go invent, Wipy 3.0.» [En línea]. Available: <https://docs.pycom.io/datasheets/development/wipy3/>.
- [6] T. S. S. Transmisiones, «Catálogo general de productos.» 2016. [En línea]. Available: <https://tercesa.com/wp-content/uploads/2017/12/Catalogo-Motor-DC.pdf>.
- [7] J. C. M. Rios, «Friction. Fluid resistance.» 2015. [En línea]. Available: <https://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2015/11/resistencia-del-fluido.html>.
- [8] «Physical properties of water and seawater.» [En línea]. Available: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leia/maru\\_j\\_ms/apendiceA.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/maru_j_ms/apendiceA.pdf).
- [9] Engel, «Alexander Engel, Inc.» Richard-Wolf-Str. 2, D-75438 Knittlingen, Germany.
- [10] J. M. J. Martínez, «Analog to digital converters».
- [11] «Discrete Time Signal Processing.» [En línea]. Available: [http://dea.unsj.edu.ar/control3/teoría/capitulo2\\_digitalizacionTZ.pdf](http://dea.unsj.edu.ar/control3/teoría/capitulo2_digitalizacionTZ.pdf).
- [12] «Discretization of regulators and plants.» [En línea]. Available: <http://www.ie.tec.ac.cr/einteriano/control/clase/04.DiscretizaciondeControladoresyPlantasyPlantas.pdf>.
- [13] Ó. G. Palencia, «Diseño preliminar de un sumergible turístico para 30 pasajeros».
- [14] «The RC Submarine Shipyard.» [En línea]. Available: <https://www.rcshipyard.com/tech/#6>.
- [15] A. G. Sorribes, «Sistemas dinámicos con retardos temporales.» Octubre 2011. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/79431/Garc%EDa%20-%20Sistemas%20din%Elmicos%20con%20retardos%20temporales:%20contribuci%F3n%20al%20desarrollo%20de%20predictores%20ro...pdf?sessionid=EB6CF117866ADDEA8670F15CF722F4BD?sequence=1>.
- [16] Silke Kröger, Sergey Piletskyb, Anthony P.F. Turner, «Biosensors for marine pollution research, monitoring and control.» United Kingdom.
- [17] Juan A. Campillo, Angel Sevilla, Marina Albentosa, Cristina Bernal, Ana B. Lozano, Manuel Cánovas, VíctorM. León, «Metabolomic responses in caged clams, *Ruditapes decussatus*, exposed to agricultural and urban inputs in a Mediterranean coastal lagoon (Mar Menor, SE Spain).» Murcia, Spain, 2015.
- [18] Alexander Laun & Elizabeth Pittman, «Development of a Small, Low-Cost, Networked Buoy for Persistent Ocean Monitoring and Data Acquisition.» Maryland.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# Nueva Estrategia de Control para la Reducción de Oscilaciones en Turbinas Eólicas Flotantes

Payam Aboutalebi, Fares M'zoughi, Izaskun Garrido, Aitor J. Garrido

Grupo de Control Automático (ACG). Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos. Escuela de Ingeniería de Bilbao. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV / EHU). Pº Rafael Moreno, 3. 48013 Bilbao. España

payam.aboutalebi@ehu.eus; fares.mzoughi@ehu.eus; izaskun.garrido@ehu.eus; aitor.garrido@ehu.eus

## Resumen

*En este trabajo se ha propuesto una nueva estrategia de control para mejorar la estabilidad de turbinas eólicas flotantes (FWT). Al objeto de estudiar la reducción de oscilaciones no deseadas en el sistema, y en particular en los movimientos de cabeceo de la plataforma y de proa-popa de la nacelle, se ha considerado una plataforma tipo barcaza de forma cuadrada y equipada con cuatro columnas de agua oscilantes (OWC) colocadas de manera simétrica. De esta forma, las válvulas de control de flujo de aire de las cámaras de captura permiten operar las citadas columnas de aire para controlar los movimientos de la barcaza causados por la dinámica oscilatoria de la ola incidente. Para ello, se ha efectuado un análisis de los operadores de amplitud de respuesta (RAO) que permite implementar una nueva estrategia de control de conmutación para regular adecuadamente la transición apertura/cierre de las válvulas de control de flujo. Los resultados obtenidos muestran que la topología de plataforma híbrida propuesta, dotada de sistemas controlados OWC, presenta un mejor rendimiento que una plataforma análoga tradicional.*

**Palabras clave:** turbina eólica flotante; columna de agua oscilante; energía de olas; energía eólica; estabilización; operador de amplitud de respuesta; control de conmutación

## 1 Introducción

Los recursos sostenibles de las energías renovables, como la energía eólica y de las olas, están atrayendo cada vez más atención debido al cambio climático y los impactos del calentamiento global. Para luchar contra estos problemas, las turbinas eólicas flotantes están llamadas a desempeñar un papel sin precedentes en la captura de recursos energéticos renovables,

permitiendo una mayor penetración en el mix energético de este tipo de energías limpias.

La estructura de las FWT ofrece la posibilidad de añadir columnas OWC [1], que compone el tipo mejor conocido de convertidores de energía de las olas [2], para aprovechar simultáneamente el recurso eólico y undimotriz. No obstante, una de las ventajas de considerar ambos tipos de dispositivos en una misma plataforma es la posibilidad de utilizar las plantas OWC no solo para producir energía, sino como elemento activo que permita estabilizar la plataforma, evitando rangos de vibración perjudiciales. En este sentido, el objetivo es doble: Estabilizar la FWT aliviando vibraciones no deseadas y generar la máxima energía posible [3]. Estas vibraciones no deseadas reducen la eficiencia aerodinámica, acortan la vida de fatiga de la torre debida a la fatiga de sus materiales y aumentan las tensiones en las palas, el eje del rotor, el cojinete de guiñada y la misma base de la torre [4]. Por tanto, es importante restringir los movimientos oscilatorios de la plataforma a un rango adecuado que evite estos efectos aumentando el rendimiento y en última instancia, el LCoE.

Del estudio del estado del arte del problema, se puede observar que diversos autores han aplicado distintos métodos y estrategias el fin de limitar los movimientos de las FWTs [5]. Por ejemplo, M. Kamarlouei y col. en [6] llevó a cabo un estudio experimental para reducir la amplitud de cabeceo y elevación utilizando cables de amarre de catenaria añadidos, así como la instalación de convertidores de energía de las olas (WEC) en un FWT. Asimismo, varios autores han propuesto el uso de dispositivos pasivos de control tipo inercial sobre plataformas FWT al objeto de controlar los desplazamientos de la torre (ver Y. Zhang et al. en [7] y Y. Hu et al. en [8]).

Menos artículos han ampliado la aplicación de FWT-OWC combinados basados en barcasas con la consideración de ecuaciones de movimiento no lineales completas. En este sentido, J.M. Jonkman

([9]) diseñó una piscina de forma cuadrada ubicada en el centro de la barcaza que ofrece la opción de agregar un dispositivo OWC. No obstante, este sistema híbrido no se ha diseñado con fines de estabilización y no permite tal estudio. Por su parte, P. Aboutalebi et al. ([10]) analizó el rendimiento de sistemas híbridos FWT-OWC tipo barcaza para diferentes estados de la mar con el fin de incrementar la estabilidad de la plataforma. Sin embargo, ninguno de los enfoques introducidos ha propuesto hasta ahora una estrategia de control de las válvulas OWC.

Así, en este artículo se utiliza un modelo no lineal basado en la topología NREL 5-MW tipo barcaza, alojando cuatro sistemas OWC en la misma con el fin de disminuir las oscilaciones, particularmente en los modos de cabeceo y de proa a popa de la torre, en varios estados de la mar. Además, haciendo uso de los operadores de amplitud de respuesta, se ha desarrollado una la estrategia de control de conmutación para la regulación de las válvulas de control de flujo de los OWC. De esta forma, se ha pidi comparar el sistema FWT basado en OWC controlado con el análogo tradicional tipo barcaza para mostrar la bondad de la topología híbrida propuesta.

El resto del artículo está estructurado como sigue: La Sección 2 explica la estructura del sistema híbrido FWT-OWC a partir de sus ecuaciones dinámicas. La Sección 3 estudia el problema y desarrolla los RAOs utilizados en la estrategia de control de conmutación propuesta. La sección 4 presenta analiza la eficiencia del control de conmutación propuesto para diferentes estados de la mar. Y finalmente, en la Sección 5, se presentan las conclusiones oportunas a partir de los resultados obtenidos.

## 2 Descripción del modelo

### 2.1 Descripción de FWT

Se ha considerado la topología de plataforma FWT híbrida OWC representada en la Figura 1. La plataforma está lastrada mediante inundación al objeto de obtener el calado adecuado no vulnerable a golpe de onda continua. La plataforma además se ancla mediante ocho cables de catenaria, con dos de las líneas de esquina de la parte inferior a un ángulo de 45 grados.

Se evalúan ocho grados de libertad (DOF, por sus siglas en inglés), a saber, desplazamientos en el plano, elevación, cabeceo, balanceo, guiñada y desplazamientos babor-estribor y proa-popa de la torre, con el origen del sistema de coordenadas en la línea de flotación. En la Tabla 1 se presentan las características detalladas de la turbina eólica.

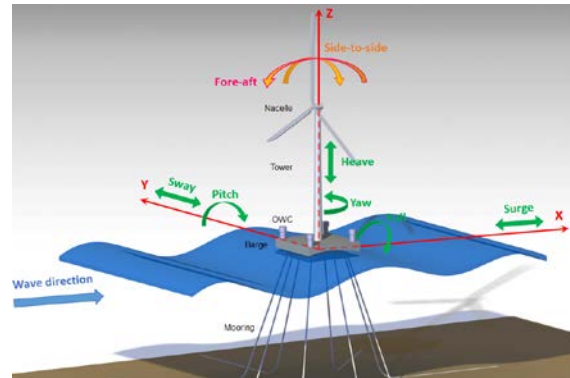


Figura 1. Turbina eólica marina flotante basada en barcazas con cuatro OWC

Tabla I: Características de la barcaza ITI

Parámetro	Valor
Dimensiones plataforma (W × L × H)	40 m × 40 m × 10 m
Dimensiones OWC (W × L × H)	5 m × 5 m × 10 m
Calado	4 m
Desplazamiento de agua barcaza estándar	6400 m <sup>3</sup>
Desplazamiento de agua para barcaza OWC	6000 m <sup>3</sup>
Masa, incluido lastre	5,452,000 kg
CM-Ubicación bajo SWL	0.281768 m
Inercia balanceo sobre CM	726,900,000 kg.m <sup>2</sup>
Inercia cabeceo sobre CM	726,900,000 kg.m <sup>2</sup>
Inercia guiñada sobre CM	1,453,900,000 kg.m <sup>2</sup>
Profundidad del ancla (agua)	150 m
Separación entre anclas opuestas	773.8 m
Longitud de la línea sin tensionar	473.3 m
Longitud de línea neutra sobre lecho marino	250 m
Diámetro de la línea	0.0809 m
Densidad de masa línea	130.4 kg/m
Rigidez línea	589,000,000 N

Se han considerado las ecuaciones dinámicas para una turbina eólica marina de 5 MW instalada en la plataforma híbrida descrita. Las respuestas dinámicas de la FWT se han introducido en FAST al objeto de obtener las correspondientes ecuaciones de movimiento no lineales.

Así, las ecuaciones no lineales completas del movimiento en el dominio del tiempo de la turbina eólica flotante acoplada, el sistema de plataforma de soporte y los OWC son de la forma:

$$M_{ij}(q, u, t) \ddot{q}_j = f_i(q, \dot{q}, u, t) \quad (1)$$

donde  $M_{ij}$  es el componente  $(i, j)$  de la matriz de masa de inercia,  $u$  son las entradas de control,  $t$  es el tiempo,  $\ddot{q}_j$  es la segunda derivada del tiempo del  $j$ -ésimo DOF y  $f_i$  es el componente de la función de fuerza asociada al DOF  $i$ ,  $f_i$  es la fuerza exterior generalizada, incluida la carga aerodinámica sobre las palas y la góndola, la fuerza hidrodinámica sobre la plataforma, las fuerzas elásticas y servo.

Por tanto, el sistema de ecuaciones lineales de movimiento en el dominio de la frecuencia se puede escribir como:

$$I_{FWT}(\omega) \ddot{q} + B_{FWT}(\omega) \dot{q} + C_{FWT} \ddot{q} = \ddot{f}_{FWT}(\omega) \quad (2)$$

donde  $I_{FWT}$ ,  $B_{FWT}$  y  $C_{FWT}$  son las matrices de inercia, amortiguación y rigidez respectivamente, y  $q$  se define como:

$$q = \begin{bmatrix} surge \\ sway \\ heave \\ roll \\ pitch \\ yaw \\ fore - aft \\ side - to - side \end{bmatrix} \quad (3)$$

La matriz de inercia a su vez viene definida como:

$$I_{FWT}(\omega) = A_{Hydro}(\omega) + M_{Platform} + M_{Tower} \quad (4)$$

donde  $M_{Platform}$  y  $M_{Tower}$  son las matrices de masa de plataforma y torre, respectivamente. El acoplamiento de los elementos de los modos de flexión de la torre con la plataforma se integra en la matriz  $M_{Tower}$ . Y por último  $A_{Hydro}(\omega)$  es la masa añadida de la plataforma y OWC calculada a través de WAMIT a partir del análisis de radiación del panel y depende de la frecuencia. La ecuación (3) muestra los modos del sistema con los seis primeros para los movimientos de la plataforma y los dos últimos para los desplazamientos de flexión de la torre.

Por su parte, la matriz de amortiguación se define como:

$$B_{FWT}(\omega) = B_{Hydro}(\omega) + B_{Tower} + B_{viscous}, \quad (5)$$

donde  $B_{Hydro}(\omega)$  es la matriz de amortiguación de la plataforma flotante y OWC que se obtiene mediante WAMIT del análisis de radiación de panel,  $B_{Tower}$  es la matriz de amortiguación de la torre flexible y  $B_{viscous}$  representa el arrastre viscoso no lineal en la plataforma.

Asimismo, la matriz de rigidez se define como:

$$C_{FWT} = C_{Hydro} + C_{Mooring} + C_{Tower} \quad (6)$$

donde  $C_{Hydro}$  se obtiene mediante WAMIT a partir de la matriz de restauración hidrostática de la plataforma y los OWC,  $C_{Mooring}$  contiene los coeficientes de rigidez del resorte de las líneas de amarre y  $C_{Tower}$  representa la matriz de rigidez de la torre.

Por último, el término del lado derecho de la ecuación (2) viene dado por:

$$\ddot{f}_{FWT}(\omega) = \ddot{f}_{Hydro}(\omega) + \ddot{f}_{viscous} \quad (7)$$

donde  $\ddot{f}_{viscous}(\omega)$  es la fuerza viscosa,  $\ddot{f}_{Hydro}(\omega)$  representa la fuerza hidrodinámica de las olas en la plataforma y  $\ddot{f}_{Hydro}(\omega)$  se obtiene mediante el análisis de difracción de panel en WAMIT.

## 2.2 Diseño y cálculo de la plataforma

Mediante el paquete de computación MultiSurf se han diseñado y comparado tres topologías de plataforma diferentes a utilizar posteriormente: Una primera denominada barcaza estándar de forma cuadrada como se muestra en la Figura 2a. Un segundo modelo consistente en una plataforma de barcaza basada en OWC con cuatro dispositivos alojados en las esquinas con válvulas de control de flujo de aire cerradas, como se ilustra en la Figura 2b. La Figura 2c por su parte muestra el tercer modelo, consistente en una plataforma con cuatro dispositivos OWC con válvulas de control de flujo abiertas.

## 3 Planteamiento del problema

Tal como se ha indicado, las oscilaciones en los FWT no son deseables ya que tales movimientos deseados tienen efectos negativos en el sistema, incluida la tensión en los componentes estructurales del sistema y

una reducción drástica de la capacidad de captación de energía eólica y undimotriz. Así como un incremento de los costos de mantenimiento y consiguiente reducción del LCoE. Para hacer frente a este problema, debe analizarse con precisión el comportamiento del sistema frente a diferentes estados de la mar.

### 3.1 Análisis de la dinámica de FWTs mediante operadores de amplitud de respuesta

La utilización de RAO es fundamental para la evaluación del movimiento de sistemas marinos en diferentes escenarios y en particular para en análisis de la dinámica de las FWTs. En esta sección, se presenta el procedimiento utilizado para establecer los RAO para diferentes modos del sistema de entrada-salida en el dominio de la frecuencia, para los estados de traslación y rotación del mismo. Primeramente, se emplean los datos geométricos de la plataforma de barcaza estándar, la plataforma de barcaza basada en OWCs abiertas y la plataforma de barcaza basada en OWCs cerradas para realizar los cálculos de las matrices hidrodinámicas, hidrostáticas, de amortiguación y de masa agregada mediante WAMIT. Las matrices obtenidas se introducen entonces en las ecuaciones de movimiento no lineales con el objetivo de obtener los resultados de cada uno de los sistemas.

Los RAO de cada modo del sistema se calculan entonces mediante la densidad autoespectral de la entrada (elevación de la onda) y la densidad espectral cruzada de la entrada / salida (respuestas del sistema) a través de la siguiente expresión [11]:

$$RAO = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \quad (8)$$

donde  $S_{xy}(\omega)$  y  $S_{xx}(\omega)$  son las densidades espectral cruzada y autoespectral de la entrada  $x(t)$  y la salida  $y(t)$ , en el dominio de la frecuencia, respectivamente.

Para ello, se ha tenido en cuenta una dirección de incidencia de las olas de cero grados con aire en calma. Además, se han considerado las no linealidades debidas a la flexibilidad de la torre, cargas hidrodinámicas, efecto viscoso y líneas de amarre.

De este modo, se obtienen los RAO de los ocho estados del sistema previamente descritos que se muestran en la Figura 3a – h, con un rango de período de RAO entre 2 s y 35 s.

Asimismo, en la Figura 3 se muestran mediante tres curvas en verde, rojo y azul que representan la plataforma de barcaza estándar, la plataforma de barcaza basada en OWC con válvulas abiertas y la

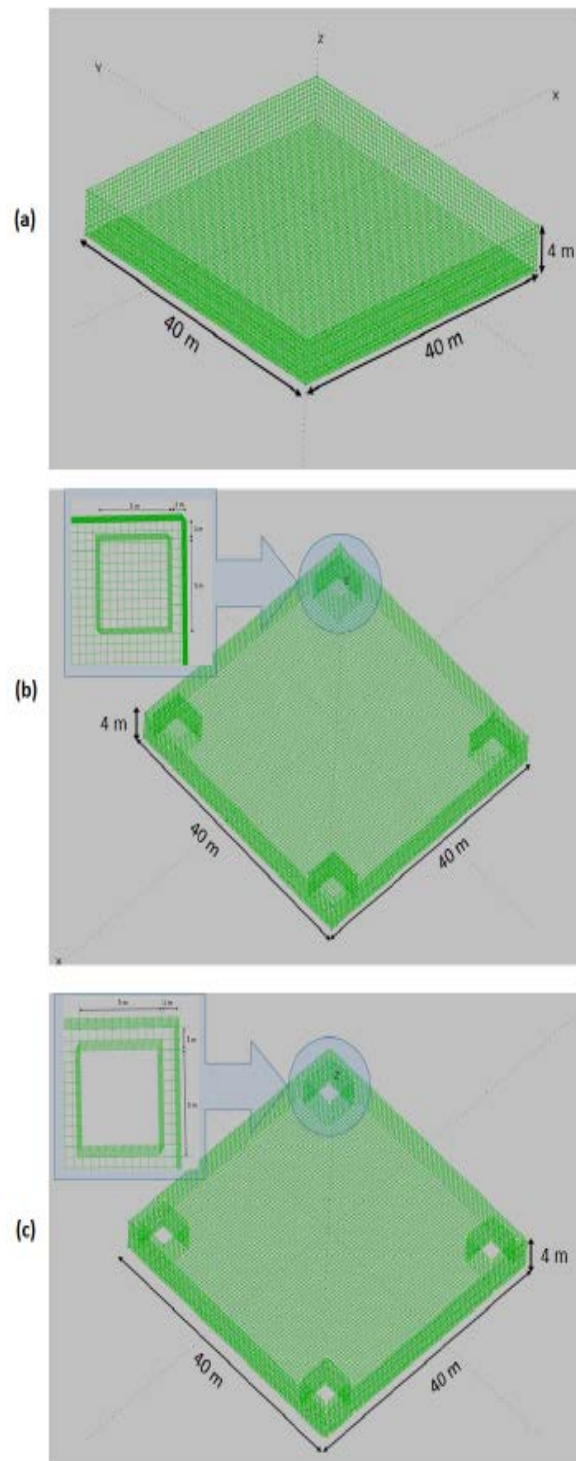


Figura 2. Geometría de plataformas para (a) Plataforma de barcaza estándar. (b) Plataforma de barcazas basada en OWC con válvulas cerradas. (c) Plataforma de barcazas basada en OWC con válvulas abiertas.

plataforma de barcaza basada en OWC con válvulas abiertas, respectivamente. Como cabría esperar, las



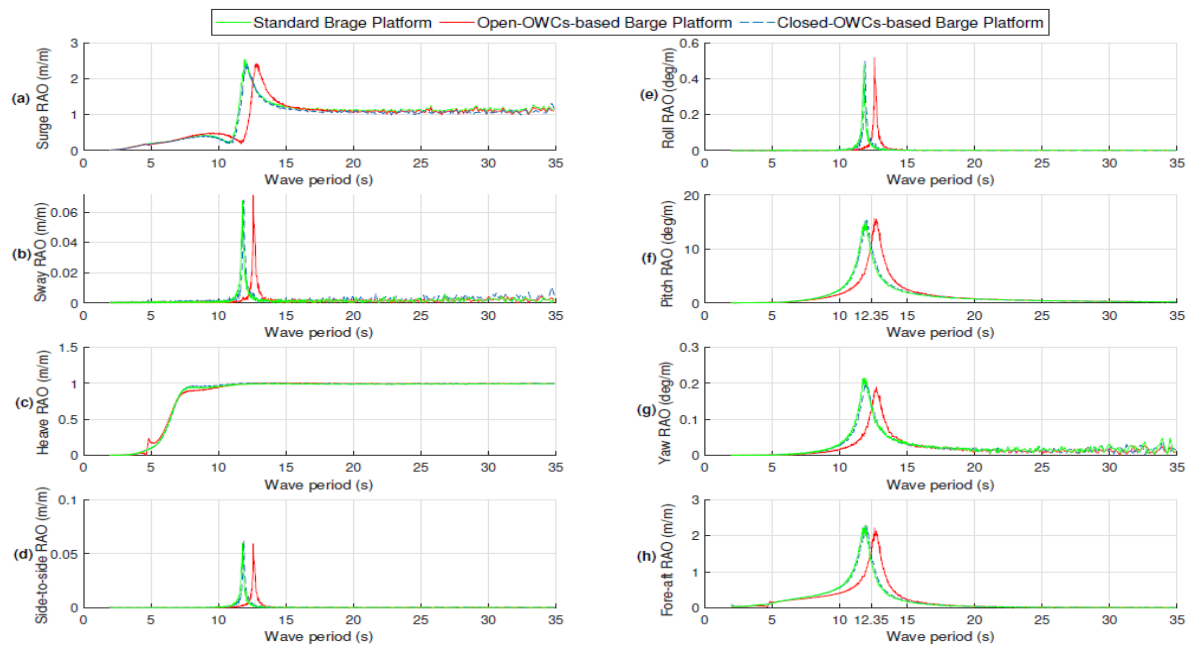


Figura 3. RAO para (a) Desplazamiento en  $x$ . (b) Desplazamiento en  $y$ . (c) Elevación. (d) Torre babor-estribor. (e) Balanceo. (f) Cabeceo. (g) Guiñada. (h) Torre proa-popa

curvas de los RAO para la plataforma de barcaza estándar y la plataforma de barcaza basada en OWC cerradas prácticamente idénticas, significando que el comportamiento ambas es el mismo en los diferentes modos.

Además, debido a las condiciones ambientales consideradas, los estados excitados a lo largo de la dirección de la onda incidente presentan oscilaciones muy leves, como se puede observar en los RAO correspondientes de las figuras 3b, d, e, g.

Asimismo, al analizar el RAO de elevación que se muestra en la Figura 3c, se puede ver que las tres topologías presentan curvas RAO similares, lo cual denota que las tres plataformas oscilan de manera similar al elevarse con la ola.

No obstante, el comportamiento más relevante se extrae del análisis de las figuras 3f, h, correspondientes al cabeceo (pitch - PRAO) y el cabeceo de la torre, es decir, el desplazamiento proa-popa de la misma (fore-aft - FRAO), que da una idea de la estrategia de control propuesta en la Sección 3.2.

Se puede observar además que las curvas PRAO y FRAO para plataformas basadas en barcazas estándar y OWC cerradas son casi idénticas con pequeñas diferencias. Y cuando hay un RAO más alto, la oscilación en ese modo es mayor. Además, los FRAO para las plataformas tienen el mismo comportamiento que los PRAO. Al igual que los PRAO, el FRAO para la plataforma de barcaza abierta con base en OWC es más bajo que la plataforma de barcaza estándar y con plataforma de barcaza cerrada con OWC para períodos

inferiores a 12,25 s y 12,35 s respectivamente. Además, para los períodos de más de 12,25 s y 12,35 s, el FRAO de la plataforma de barcaza basada en OWC abiertas es más alto que los FRAO de las plataformas de barcaza estándar y OWC cerradas, respectivamente.

### 3.2 Diseño de Control

En esta sección se propone una estrategia de control de conmutación al objeto de reducir las oscilaciones del sistema, centrando el objetivo en los dos modos que presentan mayor afectación: cabeceo y torre proa-popa. Para lo cual se tomarán los valores PRAO Y FRAO, de acuerdo con los resultados del desempeño de las diferentes plataformas ante diferentes estados de la mar obtenidos en la subsección anterior. Así, las figuras 4a, b muestran el PRAO y FRAO para las plataformas de barcaza basadas en OWC cerradas y las plataformas de barcaza basadas en OWC abiertas, representadas en azul y rojo, respectivamente.

Puede observarse en la Figura 4a, b que el PRAO y FRAO para la plataforma de barcazas basada en OWCs abiertas tienen valores más bajos en comparación con la plataforma de barcazas basada en OWCs abiertas cuando el período de ola es menor a 12,35 s. Por otro lado, para los períodos de olas superiores a 12,35 s, los PRAO y FRAO para la plataforma de barcaza con base en OWC cerrados son más altos que los de la plataforma de barcaza con base en OWCs abiertas. Esto significa que para períodos de oleaje inferiores a 12,35 s, la plataforma de barcazas basada en OWCs abiertas presenta menor oscilación y por tanto mejor rendimiento que la plataforma de

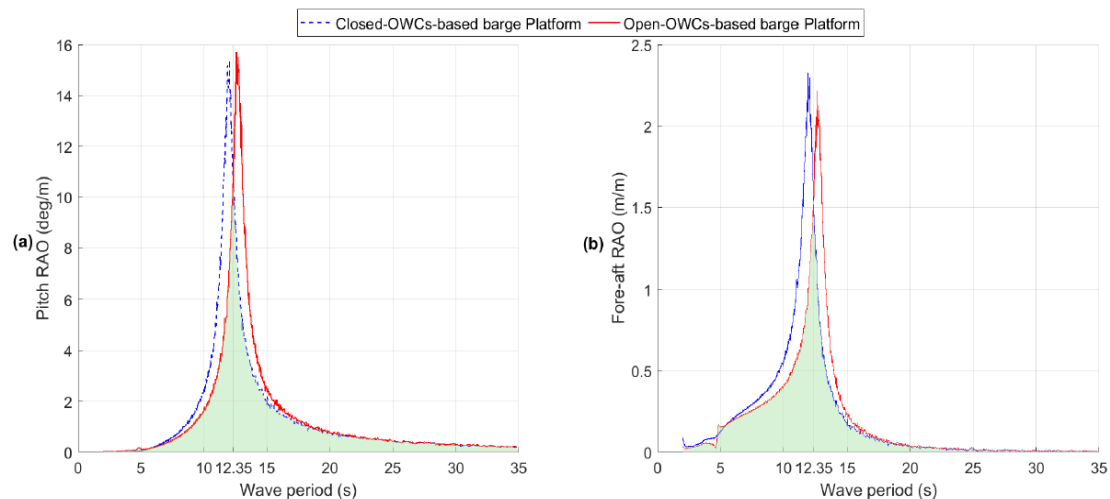


Figura 4. RAO para (a) Cabeceo. (b) Torre proa- popa

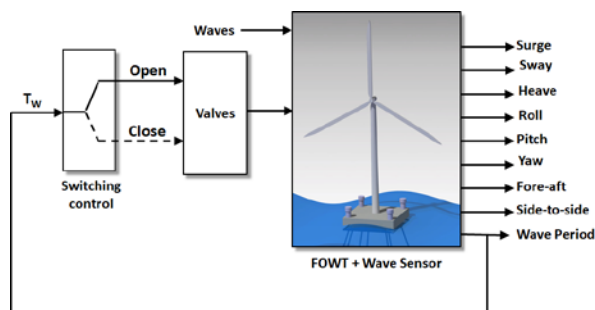


Figura 5. Diagrama de bloques de FWT controlado.

barcaza basada en OWCs cerradas. De igual modo, para períodos superiores a 12,35 s, la plataforma de barcaza basada en OWC cerrados presenta una menor oscilación que la plataforma de barcaza basada en OWC abiertos.

De esta forma, es posible establecer regiones, marcadas en verde en la Figura 4a, b, que representan las regiones operativas óptimas con mejor desempeño.

Utilizando estos resultados, se puede establecer el esquema de control de conmutación representado mediante el diagrama de bloques de FWT controlado que se presenta en la Figura 5 y que permite al sistema permanecer en la zona de rendimiento óptimo para cada uno de los modos seleccionados en función del periodo de la ola incidente.

#### 4 Presentación de Resultados

Al objeto de mostrar la capacidad del sistema de control propuesto para la estabilización de la plataforma FWT, se han seleccionado dos períodos de onda representativos entre aquellos de mayor y menos duración de 12.35 s, de forma que es posible estudiar el comportamiento de la barcaza controlada basada en OWC y la plataforma de barcaza estándar para

diferentes condiciones de estado de la mar. En concreto, se han considerado períodos de ola de 10 s de 0 a 100 s con una amplitud de 0,9 m y de 14 s a partir de 100 a 240 s con una amplitud de 0.9 m, como se muestra en la Figura 6.

Como se puede ver en las Figuras 3f y 4a, el PRAO para la plataforma de barcaza basada en OWC abiertas es más bajo que el de la plataforma de barcasas estándar durante el período de 10 s. Se puede observar que, consecuentemente, el controlador abre las válvulas OWC de control de flujo, disminuyendo las oscilaciones de cabeceo en un 30.8% de 4.106 grados para la plataforma de barcaza estándar a 2.841 grados para la plataforma de barcaza controlada basada en OWC, como se muestra en la Figura 7.

Análogamente, se puede ver en las mencionadas Figuras 3f y 4a que, para un período de ola incidente de 14 s, los PRAO para la plataforma de barcaza con base en OWC cerrados son más bajos que en la plataforma de barcaza con base en OWC abiertas. Se puede observar cómo, consecuentemente, después de 100 s, cuando el período de la ola cambia a 14 s en la Figura 7, el controlador cierra las válvulas OWC para reducir la oscilación.

Por su parte, se puede observar que durante el período de 10 s, los FRAO en las Figuras 4h y 5b para la plataforma de barcaza basada en OWC abiertas son menores que los de la plataforma de barcasas estándar. De modo que es esperable obtener menores oscilaciones en la torre de proa a popa para el caso de la plataforma de barcaza abierta basada en OWC, en comparación con la plataforma de barcaza estándar. Consecuentemente, como se muestra en la figura 8, el controlador abre las válvulas OWC de 0 s a 100 s con período de 10 s. Como resultado, este tipo de oscilaciones disminuyen en un 25% de 0,9241 m para la plataforma de barcaza estándar a 0,69 m para la



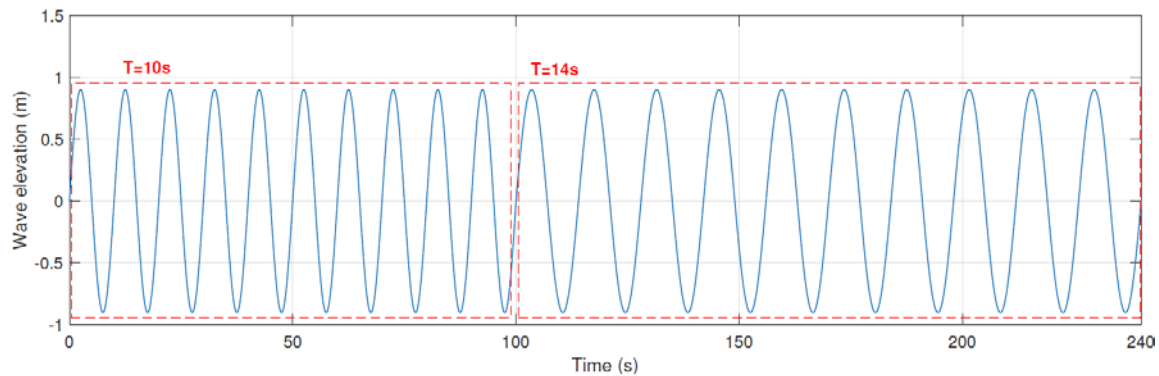


Figura 6. Entrada de ola considerada a las plataformas basadas en barcasas.

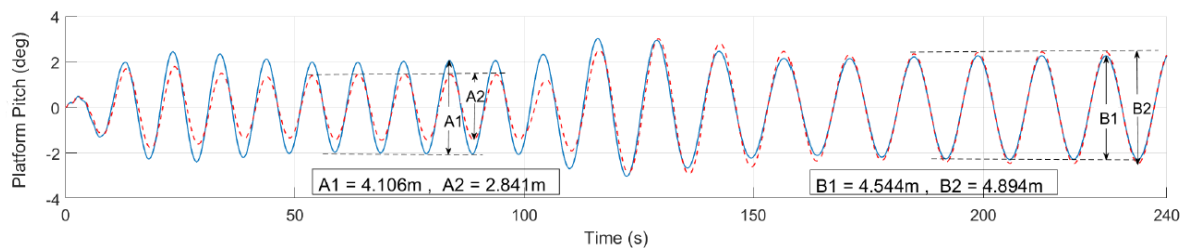


Figura 7. Desplazamientos de pitch

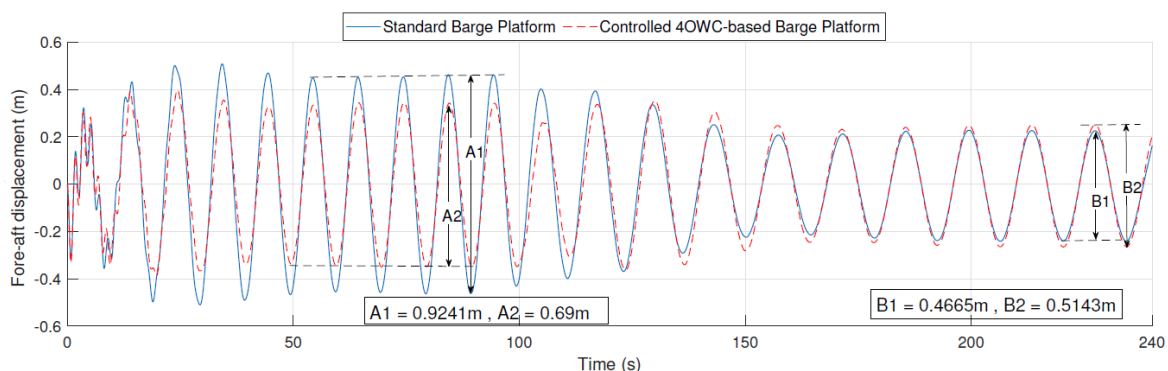


Figura 8. Desplazamientos de proa a popa

plataforma de barcaza controlada basada en OWC, como se muestra la misma Figura 8. De la misma forma, se puede apreciar cómo después de 100 s el controlador conmuta para cerrar las válvulas OWC, como se corresponde con los FRAO computados en las Figuras 3f y 4a para un período de 14 s.

## 5 Conclusiones

En el presente trabajo se ha propuesto un método de control de conmutación con el fin de disminuir las oscilaciones de sistemas FWT en sus diferentes modos de operación, y en particular cabeceo y desplazamiento proa-popa de la parte superior de la torre. Para ello, se ha analizado la dinámica de los diferentes modos de la FOWT mediante funciones RAO en el dominio de la frecuencia. A partir de los resultados obtenidos, se ha propuesto una nueva estrategia de regulación de las

válvulas de control de flujo de aire en los módulos OWC instalados en la plataforma.

Según los RAO, se observó que para los períodos de oleaje más cortos ( $<12,35$  s), la plataforma de barcasas abierta basada en OWC tiene un mejor rendimiento, por lo que el controlador abre las válvulas de los OWC.

Por otro lado, para los períodos de ola más largos ( $>12,35$  s), el rendimiento de las oscilaciones de la barcaza estándar y las plataformas de barcasas basadas en OWC cerradas es mejor que la plataforma de barcaza basada en OWC abiertas.

Como resultado, el controlador cierra las válvulas de los OWC para reducir efectivamente las oscilaciones en el cabeceo y los movimientos de proa a popa de la torre superior.

Al objeto de mostrar el desempeño del esquema de control propuesto, se ha considerado un escenario

representativo con periodos variables de ola incidente. Los resultados muestran que el cabeceo de la plataforma y desplazamiento proa-popa de la torre disminuyen drásticamente para el caso de la plataforma de barcaza controlada basada en OWC, en comparación con la plataforma de barcaza estándar. Es decir, se ha demostrado que la estrategia de control propuesta mejora el rendimiento del sistema al reducir las oscilaciones no deseadas que surgen a frecuencias específicas respecto a plataformas estándar de barcaza no controladas.

### Agradecimientos

Los autores del presente trabajo quisieran agradecer el apoyo del Gobierno Vasco mediante el proyecto IT1207-19 y del MCIU/MINECO a través de los proyectos RTI2018-094902-B-C21 y RTI2018-094902-B-C22 (MCIU/AEI/FEDER, UE).

### English summary

#### A novel Control Strategy for oscillation reduction in Floating Wind Turbines

#### Abstract

*In this work, a new control strategy has been proposed to improve the stability of floating wind turbines (FWT). In order to study the reduction of undesired oscillations in the system, and in particular in the platform pitch and fore-aft nacelle movements. A square-shaped barge-type platform has been considered and equipped with four symmetrically located Oscillating Water Columns (OWCs). In this way, the air flow control valves of the capture chambers allow the aforementioned air columns to be operated so that to control the movements of the barge caused by the oscillatory dynamics of the incident wave. To do so, an analysis of the response amplitude operators (RAO) has been carried out, which in turn allows the implementation of a new switching control strategy to properly regulate the transition of the flow control valves. The results obtained show that the proposed hybrid platform topology, equipped with OWC controlled systems, presents better performance than a traditional analog platform.*

**Keywords:** floating wind turbine; oscillating water column; wave energy; wind power; stabilization; response amplitude operator; switching control.

### Referencias

- [1] Karimirad, M., Koushan, K. (2016) “WindWEC: Combining wind and wave energy inspired by hywind and wavestar”, In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on

Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Birmingham, UK, pp. 96-101.

- [2] Maria-Arenas, A., Garrido, A.J., Rusu, E., Garrido, I., (2019) “Control strategies applied to wave energy converters: State of the art”, *Energies*, p. 3115.
- [3] Lackner, M.A., (2013) “An investigation of variable power collective pitch control for load mitigation of floating offshore wind turbines”, *Wind Energy*, pp. 435-444.
- [4] Matha, D., (2009) “Model Development and Loads Analysis of an Offshore Wind Turbine on a Tension Leg Platform with a Comparison to Other Floating Turbine Concepts”, National Renewable Energy Lab. (NREL): Golden, CO, USA.
- [5] Slocum, A., Kluger, J., Mannai, S., (2019) “WindWEC: Combining wind and wave energy inspired by hywind and wavestar”, In Proceedings of the 2019 Offshore Energy and Storage Summit (OSES), Brest, France, pp. 1-6.
- [6] Kamarlouei, M., Gaspar, J.F., Calvario, M., Hallak, T.S., Mendes, M.J., K, Thiebaut, F., Soares, C.G. (2020) “Experimental analysis of wave energy converters concentrically attached on a floating offshore platform”, *Energy*, pp. 1171-1185.
- [7] Zhang, Y., Zhao, X., Wei, X. (2020) “Robust structural control of an underactuated floating wind turbine”, *Wind Energy*, pp. 2166-2185.
- [8] Hu, Y., Wang, J., Chen, M.Z., Li, Z., Sun, Y., (2018) “Load mitigation for a barge-type floating offshore wind turbine via inerter-based passive structural control”, *Eng. Struct.*, pp. 198-209.
- [9] Jonkman, J.M. (2007) “Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine”, National Renewable Energy Lab. (NREL): Golden, CO, USA.
- [10] Aboutalebi, P., M’zoughi, F., Garrido, I., Garrido, A.J., (2021) “Performance Analysis on the Use of Oscillating Water Column in Barge-Based Floating Offshore Wind Turbines”, *Mathematics*, p. 475.
- [11] Ramachandran, G.K.V., Robertson, A., Jonkman, J.M., Masciola, M.D, (2013) “Investigation of Response Amplitude Operators for Floating Offshore Wind Turbines”, National Renewable Energy Lab. (NREL): Golden, CO, USA.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# UNA PROPUESTA PARA EL CONTROL DE ORIENTACIÓN DE UNA TURBINA WINDFLOAT

Leticia Del Horno  
[l.delhorno@upm.es](mailto:l.delhorno@upm.es)

José A. Somolinos,  
[joseandres.somolinos@upm.es](mailto:joseandres.somolinos@upm.es)

Eva Segura  
[Eva.Segura@uclm.es](mailto:Eva.Segura@uclm.es)

Rafael Morales2  
[Rafael.Morales@uclm.es](mailto:Rafael.Morales@uclm.es)

## Resumen

*La energía eólica marina debe jugar un papel importante en el cumplimiento de los compromisos ambientales asumidos en el Acuerdo de París. El uso de las soluciones flotantes para la energía eólica fuera-costa (offshore) está ganando importancia, ya que permite la expansión a un gran número de regiones en las que esto no ha sido técnicamente factible hasta ahora debido a la profundidad del lecho marino. Uno de los problemas de estas estructuras flotantes son las oscilaciones producidas por las olas y el viento, debiéndose evitar que la inclinación de la estructura supere un determinado valor durante la fase de operación. Este trabajo presenta un modelado dinámico sencillo y un sistema de control multivariable no lineal para una turbina Windfloat. Su función principal es mantener el aerogenerador en las condiciones óptimas requeridas de orientación para un mayor aprovechamiento de la energía del viento.*

**Palabras clave:** Energía Eólica Marina; Turbinas Windfloat; Modelado Dinámico; Control no lineal

## 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente existe un gran interés en reducir los problemas medioambientales eliminando la dependencia de los combustibles fósiles [1][2], sustituyendo éstos por energías renovables para la generación de electricidad [3][4] y, de este modo, reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero. La Unión Europea (UE) ha establecido que más del 80 % de la electricidad de la UE se produzca mediante fuentes de energía renovables para 2050, con el objetivo de lograr una reducción en las emisiones de estos gases de un 80 % [5][6].

De las diversas fuentes de energía renovables disponibles, la energía eólica es hoy en día una tecnología madura, consolidada en numerosos países [7]. Además, las instalaciones offshore permiten aumentar la potencia eólica instalada [8][9] al disponer de una mayor superficie y disfrutar de algunas de las ventajas frente la energía eólica terrestre como: i) vientos más uniformes y ii) mayor velocidad debido a la ausencia de accidentes geográficos. La energía eólica marina ya lidera una gran parte de la transición energética europea. Las empresas europeas representan el 90% del mercado global offshore, cuya capacidad eólica alcanzó los 22.072 MW a finales de 2019, con 110 parques eólicos marinos en 12 países europeos y 5.047 turbinas eólicas conectadas a la red eléctrica [10–12].

Sin embargo, el costo económico asociado con su instalación y mantenimiento es alto, debido a la dificultad que implica llevar a cabo las tareas de construcción y operación en el océano. Además, los espacios apropiados en la plataforma continental son limitados y, por lo tanto, es necesario recurrir a ubicaciones lejos de la costa. Este tipo de estructuras en alta mar están unidas al fondo marino mediante líneas de amarre [13], pudiendo distinguir tres tipos: i) Boyas de mástil, ii) TLP (Tension Leg Platforms), iii) Semisumergibles. Dentro de estas últimas, el WindFloat, es el ejemplo más notable de este último tipo de estructuras [14][15].

Uno de los problemas actuales con estas estructuras eólicas marinas son las oscilaciones producidas por las olas y el viento, debiendo evitarse que la inclinación de la estructura supere los 10° en la fase de operación [16][17]. Si se supera este ángulo la turbina debe desconectarse por razones de seguridad. El peligro principal no está en el riesgo de perder la estabilidad y volcar, sino en la posibilidad de que las palas golpeen a la torre en su movimiento de rotación, ya que la

inclinación aumenta la flexión de éstas, debido a la fuerza gravitatoria y al empuje causado por el viento. En el peor de los casos podría conducirse a la destrucción de la turbina eólica, a pesar de que el eje del rotor se diseña con un ángulo de inclinación predefinido y la distancia entre la torre y las palas sea de varios metros. Por último, cuando las palas están lejos de su orientación diseñada, la eficiencia y el rendimiento de la turbina empeoran y, una carga no deseada en las palas debido al ángulo de ataque no deseado podría causar también problemas estructurales. Teniendo en cuenta estos problemas, el objetivo de este trabajo es aportar soluciones técnicas con las que reducir/eliminar sustancialmente los cambios en la orientación de las estructuras de turbinas en alta mar, a pesar de los efectos indeseables del viento y las olas. La solución propuesta se basa en el diseño y el control activo de orientación de una estructura flotante, que se consigue mediante tres columnas cilíndricas que contienen un sistema interior de lastre de agua cuya función principal es estabilizar la turbina y mantenerla vertical para mejorar su funcionamiento y, ayudar a mantener el aerogenerador marino en las condiciones óptimas necesarias para aprovechar la energía del viento.

## 2 BREVE DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA WINDFLOAT

La figura 1 muestra la vista general CAD de la plataforma estudiada en este trabajo, que fue creada teniendo en cuenta el concepto Windfloat [18] de una turbina DTU de 10 MW [19][20]. El diseño de la plataforma se concibió con márgenes de seguridad para ser capaz de soportar las fuerzas de carga que se pueden esperar de los aerogeneradores con potencias de hasta 10 MW en el mar. Desde la perspectiva de nuestra propuesta en cuanto al control de la orientación, los elementos más importantes del dispositivo dotan a la plataforma de su sistema de flotación, que se logra mediante tres columnas cilíndricas que contienen un sistema de lastre de agua interior cuya función principal es estabilizar la turbina y mantenerla vertical para mejorar su rendimiento. El agua dentro de los tanques de lastre se bombea internamente para compensar las importantes fuerzas y pares que actúan sobre la turbina cuando el viento interactúa con las palas. Cada uno de los tres compartimentos de lastre de agua se ubica en la mitad superior de su columna asociada. La propia turbina eólica está ubicada en la parte superior de una de las columnas, la cual proporciona flotabilidad a todo el peso de la turbina. Las otras dos columnas deben estar parcialmente provistas de lastre sólido fijo para compensar la diferencia de pesos de las tres columnas y obtener el equilibrio hidrostático que sitúa el dispositivo flotante y vertical en ausencia de cualquier tipo de perturbaciones externas. En la parte inferior de las columnas se ubican “heavy plates”, que aumentan

el peso y la amortiguación viscosa, debido a los vórtices que se producen en el borde de éstos. La masa añadida también aumenta debido a un mayor volumen de fluido circundante que debe moverse, lo que proporciona una mayor inercia hidrodinámica [21][22]. La plataforma se fija al fondo del mar con, al menos, tres líneas de fondeo (otros trabajos han propuesto más líneas, como [18], que propone seis).



Figura 1: Vista general del sistema propuesto

## 3 MODELO DINÁMICO

La obtención de un modelo dinámico del dispositivo provisto de dos Grados de Libertad (GdL) de orientación, entra en la categoría de "Modelo de control" [23], y se considera un modelo muy simple, si no el que más. Se basa en los siguientes supuestos:

i) Sólo se consideran tres masas puntuales de idéntico valor, denotadas como  $m_{iCR}$ , donde el subíndice  $i$  indica el número de la masa (y el número de cilindros en el dispositivo como  $i = 1, 2, 3$ ) y el sub-índice CR denota "Cuerpo Rígido".

ii) No se tiene en cuenta el movimiento vertical del generador, ya que el lastre de agua se trasiega únicamente entre los tanques de lastre.

iii) Los desplazamientos del centro de gravedad son insignificantes cuando la manipulación del lastre únicamente mueve agua entre tanques.

iv) Las masas añadidas de la parte sumergida se consideran constantes, bien conocidas y son modeladas como masas puntuales.

v) La fricción viscosa se modela también como constante y se considera totalmente desacoplada entre los dos GDL.

vi) Los efectos de restauración o de computación de empuje se calculan geoméricamente

vii) Sólo se tienen en cuenta pequeñas variaciones de ángulo, ya que la cuestión principal del controlador propuesto es mantener la orientación vertical del generador.

Un nuevo sistema de referencia local  $S$  definido por vectores ortogonales  $\{\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}\}$  se vincula a la turbina y se sitúa en su propio centro de gravedad (CdG). Se definen dos GdL mencionados (solo se calculan las rotaciones alrededor de los ejes  $x$  e  $y$ ) como  $\varphi_x$  y  $\theta_y$ , respectivamente, que permiten el sistema de referencia  $S$  rotar con respecto al sistema fijo  $S_0$ . Estas variables se agrupan como un vector de coordenadas generalizadas  $\mathbf{q} = (\varphi_x \ \theta_y)^T$ . El sistema  $S$  se sitúa únicamente desplazado una distancia vertical  $z_0$  ( $|z_0| > |z_{G0}|$ ) con respecto a  $S_0$  cuando la turbina está dispuesta con orientación nula ( $\mathbf{q} = (0 \ 0)^T = \mathbf{0}$ ), como se muestra en la Figura 2.

Una vez que el lastre fijo (basado en hormigón, balastro u otro) y los tanques de flotabilidad fijos se han ajustado para obtener un buen rendimiento de estabilidad y orientación nula, se consideran los actuadores hidrostáticos activos (una propuesta de actuadores hidrostáticos activos puede verse en [33]), los cuales serán los responsables de crear las fuerzas que accionan el dispositivo, y que se ubican idealmente en las mismas posiciones en las que se consideran colocados cada uno de los tres tanques de lastre de agua asociados a su cilindro. Estos actuadores producirán sólo fuerzas de componentes verticales las cuales se obtienen como diferencias entre las fuerzas de empuje y las fuerzas debidas a la gravedad y causadas por el trasiego del agua entre los cilindros. En aras de la simplicidad, las fuerzas de los actuadores se consideran fuerzas de empuje, lo que está de acuerdo con la simplificación (i) que definió las masas como constantes.

Desde un punto de vista inercial, cada una de las masas puntuales de cada cilindro está formada tanto por su masa considerada rígida  $m_{iCR}$  y por su masa añadida  $m_{ADD_i}$ , que también se considera constante:

$$m_i = m_{iCR} + m_{ADD_i} \quad (1)$$

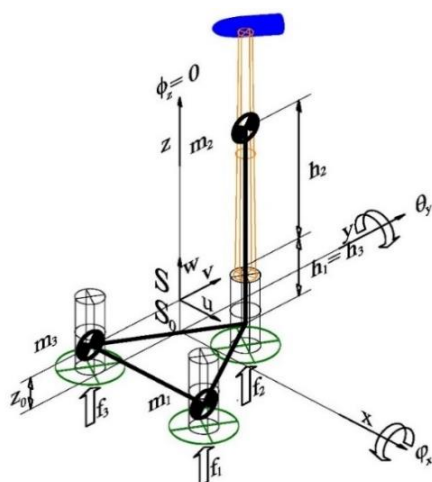


Figura 2: Sistema de referencia y magnitudes principales

La fuerza neta de cada accionamiento sobre cada uno de cilindros se obtiene calculando las siguientes fuerzas: a) la producida por los actuadores (variable de control); b) la pérdida de empuje, calculada como el volumen incremental que emerge fuera del mar debido al movimiento del dispositivo y c) la tensión incremental de las catenarias del fondeo. La  $i$ -ésima fuerza neta producida por cada actuador resulta:

$$f_{ui} = +g \rho \Delta V_{u,i} \quad (2)$$

Dónde  $\Delta V_{u,i}$  denota el volumen incremental del actuador hidrostático  $i$ -ésimo, siendo ésta una variable dependiente del tiempo  $\Delta V_{u,i}(t)$ .

### 3.1 PAR DE CONTROL DE LOS ACTUADORES

Los puntos de aplicación de las fuerzas producidas por cada uno de los actuadores o accionamientos con respecto al sistema de referencia local  $S$  son:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{1L} &= \left( \frac{L}{2} \quad -\frac{1}{2\sqrt{3}}L \quad h \right)^T \\ \mathbf{P}_{2L} &= \left( 0 \quad \frac{1}{\sqrt{3}}L \quad h \right)^T \\ \mathbf{P}_{3L} &= \left( -\frac{L}{2} \quad -\frac{1}{2\sqrt{3}}L \quad h \right)^T \end{aligned} \quad (3)$$

Dónde  $h$  denota la componente vertical de los tanques de lastre con respecto a  $S$ . Cuando se producen rotaciones alrededor de los ejes fijos  $x$  e  $y$ , las posiciones reales de cada uno de estos puntos con respecto a  $S_0$  se calculan utilizando la composición de dos matrices de rotación básicas [24], obteniendo:

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{R}(\mathbf{q}) \cdot \mathbf{P}_{iL} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} c\theta_y & s\theta_y s\varphi_x & s\theta_y c\varphi_x \\ 0 & c\varphi_x & -s\varphi_x \\ -s\theta_y & c\theta_y s\varphi_x & c\theta_y c\varphi_x \end{pmatrix} \quad (5)$$

Para calcular los pares generalizados de los actuadores hidrostáticos, considerando que la transferencia de agua de lastre es interna, resulta una suma de fuerzas nula, es decir:  $f_{u1} + f_{u2} + f_{u3} = 0$ . El vector de par producido por los actuadores es:

$$\boldsymbol{\Gamma} = \begin{pmatrix} \Gamma_x \\ \Gamma_y \\ \Gamma_z \end{pmatrix} = \mathbf{P}_1 \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_{u1} \end{pmatrix} + \mathbf{P}_2 \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_{u2} \end{pmatrix} + \mathbf{P}_3 \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_{u3} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Como la turbina eólica se ubica sobre la segunda columna, se considera que  $f_{u2} = -f_{u1} - f_{u3}$ , lo cual permite obtener los pares sobre el dispositivo completo en función de únicamente dos fuerzas  $f_{u1}$  y  $f_{u3}$ , dando lugar a la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{\Gamma} = \begin{pmatrix} \Gamma_x \\ \Gamma_y \\ \Gamma_z \end{pmatrix} = (\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2) \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_{u1} \end{pmatrix} + (\mathbf{P}_3 - \mathbf{P}_2) \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_{u3} \end{pmatrix} \quad (7)$$



Reordenando, y disponiendo los términos anteriores en forma matricial, se obtiene:

$$\mathbf{\Gamma} = \frac{L}{2} \begin{pmatrix} -\sqrt{3}c\varphi_x & -\sqrt{3}c\varphi_x \\ \sqrt{3}s\varphi_x s\theta_y - c\theta_y & \sqrt{3}s\varphi_x s\theta_y + c\theta_y \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_{u1} \\ f_{u3} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

En la ecuación (8) se puede observar que la componente  $z$  del par es nulo, lo que justifica el hecho de que no es posible causar rotaciones con respecto al eje  $z$  con sólo fuerzas hidrostáticas verticales (Este resultado fue representado previamente en la Figura 6 como  $\phi_z = 0$ ).

Si los pares con respecto a los ejes  $x$  e  $y$  se agrupan como  $\boldsymbol{\tau} = (\Gamma_x \ \Gamma_y)^T$ , y fuerzas  $f_{u1}$  y  $f_{u3}$  se agrupan como  $\mathbf{F} = (f_{u1} \ f_{u3})^T$ , la relación final entre las fuerzas de control y los pares da como resultado la que se denomina “Matriz de Acoplamiento”:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) = \frac{L}{2} \begin{pmatrix} -\sqrt{3}c\varphi_x & -\sqrt{3}c\varphi_x \\ \sqrt{3}s\varphi_x s\theta_y - c\theta_y & \sqrt{3}s\varphi_x s\theta_y + c\theta_y \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

donde esta matriz  $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ , resulta ser no diagonal en la relación de fuerzas y pares involucrados, pudiendo apreciarse que se trata de un sistema fuertemente acoplado, no lineal y dependiente del tiempo.

### 3.2 PARES DEBIDOS A LA PÉRDIDA DE EMPUJE

El volumen sumergido de cada uno de los cilindros del dispositivo no permanece constante cuando la orientación no es nula. La Figura 3 muestra un esquema simple de las columnas semisumergidas de la turbina eólica como cilindros con una rotación con un ángulo intencionalmente exagerado.

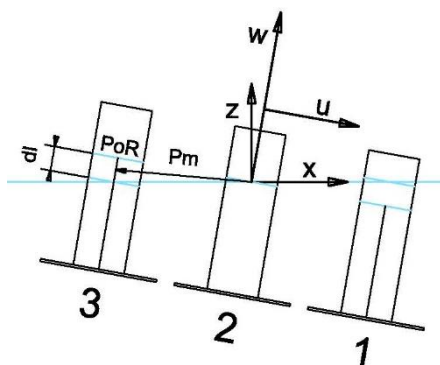


Figura 3: Esquema de la pérdida de flotabilidad del cilindro 3

A partir del gráfico anterior, se obtiene fácilmente el par debido a esta pérdida de empuje:

$$\boldsymbol{\tau}_{Buoy} = \sum_{i=1}^3 \mathbf{P}_{mi} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_{Buoy,i} \end{pmatrix} \quad (10)$$

### 3.3 PAR DEL VIENTO

Para una velocidad del viento dada, el valor de las fuerzas en el eje de la turbina eólica puede estimarse mediante el análisis la siguiente ecuación:

$$F_w = \frac{1}{2} C_T A \rho_{Air} n^2 \quad (11)$$

donde el coeficiente  $C_T$  es función de la relación de velocidad de la punta de pala (TSR) y de la forma geométrica de las mismas,  $A$  es el área circular cubierta por las palas de la turbina,  $\rho_{Air}$  es la densidad del aire y  $n$  denota la velocidad del viento.

Aunque esta fuerza debiera ser considerada como un conjunto distribuido de fuerzas sobre el rotor, a los efectos de este trabajo, puede considerar concentrada sobre el eje del rotor y su valor absoluto se denota como  $F_w$ . En notación matricial, donde  $\alpha$  es el ángulo de incidencia de la fuerza sobre el eje de la góndola con respecto al plano horizontal, resulta:

$$\mathbf{F}_w = (F_w \cdot c\alpha \ F_w \cdot s\alpha \ 0)^T \quad (12)$$

Pudiendo expresarse el par generalizado de los efectos del viento como:

$$\boldsymbol{\tau}_w = \mathbf{R}(\mathbf{q}) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ d \\ H \end{pmatrix} \times \mathbf{F}_w \quad (13)$$

donde las distancias  $d$  y  $H$  determinan la posición del eje del rotor con respecto al sistema  $S$ .

### 3.4 DINÁMICA DE ROTACIÓN

En esta subsección, la formulación de Lagrange permite obtener las ecuaciones de movimiento para el aerogenerador en ausencia de cualquier tipo de perturbaciones y fricciones externas. Las coordenadas generalizadas se toman como antes  $\mathbf{q} = (\varphi_x \ \theta_y)^T$ . Para el cálculo de la función de Lagrange, las energías cinéticas y potenciales se calculan de antemano.

#### 3.4.1 Matriz de inercia local

La matriz de inercia con respecto al sistema de referencia local  $S$  se obtiene de la distribución de masas puntuales propuesta. Bajo la hipótesis de simetría perfecta,  $m_1 = m_2 = m_3 = m$  y  $m_1 + m_2 + m_3 = 3m$ , resultando una matriz de inercia que es simétrica y definida positiva.

$$\mathbf{J} = m \begin{pmatrix} \frac{L^2}{2} + 2h_1^2 + 2h_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L^2}{2} 2h_1^2 + 2h_2^2 & \frac{1}{\sqrt{3}} L(h_1 - h_2) \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} L(h_1 - h_2) & L^2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

### 3.4.2 Cálculo de la energía cinética de rotación

La energía cinética de la turbina eólica viene dada por:

$$\mathbf{K} = \frac{1}{2} (\Omega_x \quad \Omega_y \quad 0) \cdot \mathbf{R}^T(\mathbf{q}) \cdot \mathbf{J} \cdot \mathbf{R}(\mathbf{q}) \cdot \begin{pmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Donde  $\Omega_x$  y  $\Omega_y$  denotan las velocidades angulares sobre los ejes respectivos.

### 3.4.3 Cálculo de la energía potencial de rotación

La mencionada ausencia de cualquier tipo de perturbación, y el equilibrio hidrostático significa que la energía potencial total resulte de valor nulo.

$$\mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (16)$$

### 3.4.4 Formulación de Lagrange

Al emplear las ecuaciones de Lagrange,

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}_j} \right) - \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{q}_j} = \boldsymbol{\tau}_{EXT} \quad (17)$$

Siendo  $\mathbf{L}$  la función de Lagrange,  $\mathbf{L} = \mathbf{K} - \mathbf{U} = \mathbf{K}$   $j = x, y$  y denotando  $\boldsymbol{\tau}_{EXT}$  como la suma de pares externos, se obtiene el modelo final.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{D}(\mathbf{q}) \cdot \mathbf{F} - \boldsymbol{\tau}_{Fric}(\dot{\mathbf{q}}) + \boldsymbol{\tau}_{Buoy}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau}_w(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau}_{wwm} \quad (18)$$

donde el par debido a los términos de fricción se aproxima empleando dos funciones cuadráticas desacopladas con coeficientes de fricción constantes según el supuesto (v) y los términos de velocidad  $\dot{\mathbf{q}}$ :

$$\boldsymbol{\tau}_{Fric} = (v_x \varphi_x^2 \quad v_y \theta_y^2)^T \quad (19)$$

Las variables de control en el lado derecho de la ecuación (17) fueron definidas como pares mecánicos  $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(\mathbf{q}) \cdot \mathbf{F}$  a partir de las fuerzas hidrostáticas de los accionamientos según la ecuación (9). Los pares debido a la pérdida de flotabilidad  $\boldsymbol{\tau}_{Buoy}$  se definieron en función de  $\mathbf{q}$  en la ecuación (10), el par debido a la fuerza horizontal del empuje sobre el rotor  $\boldsymbol{\tau}_w$  se definió como función de  $\mathbf{q}$  en la ecuación (13) y, por último, se ha denotado como  $\boldsymbol{\tau}_{wwm}$  los pares no modelados, los efectos del viento sobre el resto de la estructura, efectos de las olas y de las líneas de fondeo, los cuales también se consideran perturbaciones externas no modeladas.

### 3.4.5 Modelo dinámico propuesto

Agrupando todos los pares modelados, a excepción del par de control, se define  $\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  como:

$$\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \boldsymbol{\tau}_{Fric}(\dot{\mathbf{q}}) - \boldsymbol{\tau}_{Buoy}(\mathbf{q}) - \boldsymbol{\tau}_w(\mathbf{q}) \quad (20)$$

Pudiendo, entonces, reescribir la ecuación (18) en modo matricial de la forma:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{D}(\mathbf{q}) \cdot \mathbf{F} + \boldsymbol{\tau}_{wwm} \quad (21)$$

## 4 CONTROL PROPUESTO

La Figura 4 ilustra el esquema del sistema de control propuesto en este trabajo. Definamos una referencia deseada para ambos ejes  $x$  e  $y$  en forma de funciones temporales:  $\varphi_x^*(t)$  y  $\theta_y^*(t)$ , respectivamente. Se emplea un regulador de realimentación no lineal para lograr el seguimiento de las variables deseadas, que está destinado a mantener su error nulo,  $\mathbf{q}^*(t) = (\varphi_x^*(t) \quad \theta_y^*(t))^T = \mathbf{0}$ , y que viene dada por (se omite la dependencia del tiempo):

$$\mathbf{F} = \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{q}) \cdot [\mathbf{M}(\mathbf{q})\boldsymbol{\Gamma}_u + \mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})] \quad (22)$$

Ecuación en la que la señal de control auxiliar  $\boldsymbol{\Gamma}_u$  queda:

$$\boldsymbol{\Gamma}_u = \ddot{\mathbf{q}}^* - \mathbf{K}_D[\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}^*] - \mathbf{K}_P[\mathbf{q} - \mathbf{q}^*] - \mathbf{K}_I \int [\mathbf{q} - \mathbf{q}^*] dt \quad (23)$$

$\mathbf{K}_P$ ,  $\mathbf{K}_I$  y  $\mathbf{K}_D$  son matrices definidas positivas diagonales que agrupan los parámetros de un regulador multivariable de tipo PID.

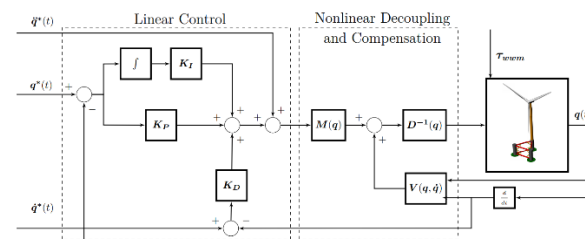


Figura 4: Esquema de control no lineal para los dos GdL Windfloat

Como se observa en la Figura 4, el esquema de control está compuesto por un bucle interno no lineal basado en el modelo dinámico propuesto y el bucle externo basado en controladores PID clásicos que se encargan de obtener la dinámica de circuito cerrado deseada del sistema controlado. El objetivo principal del bucle interno es obtener una relación entrada/salida lineal y desacoplada en ausencia de cualquier tipo de perturbaciones externas, que se denominan  $\boldsymbol{\tau}_{wwm}$ .

El bucle interno requiere el cálculo de la inversa de la matriz de acoplamiento  $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ , que resulta invertible, para el rango de ángulos previsto, con la excepción de los valores de  $c\varphi_x c\theta_y = 0$ , que son inalcanzables.

La dinámica del vector de error del bucle externo  $\mathbf{e}_q = (\mathbf{q}^* - \mathbf{q}) = (\varphi_x \quad \theta_y)^T$  se obtiene después de sustituir las expresiones (22) y (23) en (21). En ausencia de cualquier tipo de perturbación externa:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \ddot{\mathbf{q}}^* - \mathbf{K}_D[\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}^*] - \mathbf{K}_P[\mathbf{q} - \mathbf{q}^*] - \mathbf{K}_I \int [\mathbf{q} - \mathbf{q}^*] dt \quad (24)$$



Este error, evoluciona gobernado por la siguiente ecuación matricial polinómica de tercer orden:

$$\mathbf{e}_q^{(3)} + \mathbf{K}_D \ddot{\mathbf{e}}_q + \mathbf{K}_P \dot{\mathbf{e}}_q + \mathbf{K}_I \mathbf{e}_q = \mathbf{0} \quad (25)$$

Las matrices del regulador  $\{\mathbf{K}_D, \mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I\}$  a diseñar se agrupan de modo que representen una matriz diagonal  $\mathbf{M}(s)$  definida como:

$$\mathbf{M}(s) = \mathbf{I}^{2 \times 2} s^3 + \mathbf{K}_D s^2 + \mathbf{K}_P s + \mathbf{K}_I \quad (26)$$

La dinámica de bucle cerrado deseada se propone entonces de [25][26]:

$$\mathbf{M}^{des}(s) = \mathbf{I}^{2 \times 2} (s^3 + 5as^2 + 8a^2s + 4a^3) \quad (27)$$

La cual puede definirse en función de un único parámetro de diseño  $a$  (en rad/s). Un sistema lineal con un polinomio característico mono-variable proporcionado por la ecuación (27) tiene una respuesta de tiempo similar al conocido sistema de segundo orden con frecuencia natural  $\omega_n = a$  y críticamente amortiguado. Las matrices de diseño  $\{\mathbf{K}_D, \mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I\}$  se obtienen, finalmente, se obtienen directamente igualando las ecuaciones (26) y (27).

## 5 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En este apartado se muestran los resultados de simulaciones del modelo dinámico implantado en OrcaFlex, así como el sistema de control descrito anteriormente para demostrar la bondad del mismo para lograr la orientación deseada a través de las fuerzas obtenidas mediante la gestión del agua de lastre.

### 5.1 PARAMETRO DE DISEÑO -a-

Pueden tomarse varios modelos ambientales para lograr simulaciones realistas de cualquier tipo de dispositivo marino. En este trabajo, se escoge un espectro de ola de Pierson-Moskowitz (PM) [27]  $W(\omega, \psi)$  en función de la frecuencia  $\omega$  y la dirección  $\psi$ . Debido a la dinámica en bucle cerrado esperada para el dispositivo, debido a la presencia del modelo superpuesto de baja frecuencia (LF) y de frecuencia de olas (WF), solo los efectos de LF se considerarán como perturbaciones externas.

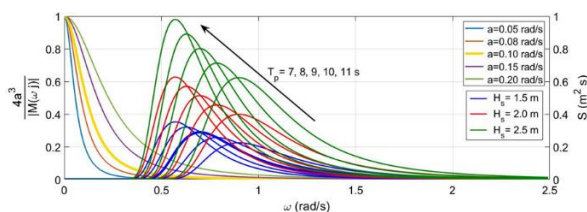


Figure 5: Parámetro de diseño

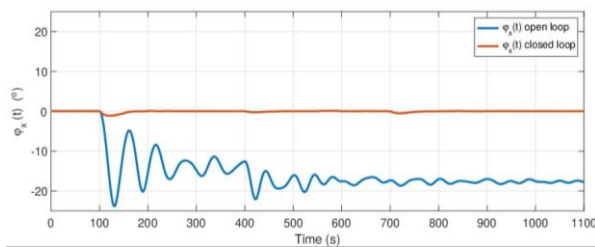
La Figura 5 muestra el espectro PM para una altura de olas significativa de 1.5, 2 y 2.5 m para períodos pico de 7, 8, 9, 10, 11 s, junto con la magnitud de Bode (gráfica lineal en lugar de logarítmica para facilitar la comparación) para la dinámica deseada en bucle cerrado propuesta con parámetros de diseño a diferentes, cuyos valores son 0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2 rad/s. Al observar el gráfico anterior, se aprecia que la interacción con las olas de la dinámica en bucle cerrado deseada con  $a = 0.15$  rad/s y  $a = 0.2$  rad/s, es mayor que la del resto. Por otro lado, las dinámicas correspondientes a reguladores para  $a = 0.05$  rad/s y para  $a = 0.075$  rad/s se consideran demasiado lentas. Se opta, por tanto, por un parámetro de diseño de  $a = 0.1$  rad/s.

### 5.2 PERTURBACIONES EXTERNAS DEL VIENTO

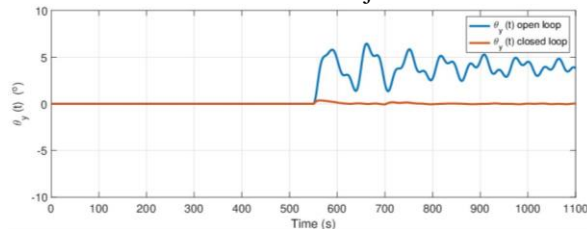
Los resultados de la simulación que se presentan a continuación en la Figura 6 no representan todavía un caso realista, pero este tipo de simulaciones resultan muy útiles para verificar la bondad del controlador propuesto [26]. En esta simulación, el sistema ha sido sometido a perturbaciones del viento con transiciones en escalón tanto en velocidad,  $n(t)$  (m/s), como en orientación,  $\alpha(t)$  ( $^\circ$ ), tomando los siguientes valores en función del tiempo:

$$\begin{aligned} n(t) &= \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 100 \\ 7.5 & 100 \leq t < 400 \\ 15 & 400 \leq t < 700 \\ 10 & 700 \leq t < 1100 \end{cases} \\ \alpha(t) &= \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 550 \\ 22.5 & 550 \leq t < 1100 \end{cases} \end{aligned} \quad (28)$$

La Figura 6.a muestra que la plataforma no puede mantener una orientación nula alrededor del eje x cuando se encuentra en bucle abierto, alcanzando un ángulo de escora máximo de  $-23^\circ$  después del primer escalón en velocidad del viento, además de mostrar una respuesta oscilante. Cuando se produce el segundo escalón en velocidad del viento, la oscilación de la plataforma en el eje y también aumenta. Debido a la orientación del viento inicial, el cambio en la inclinación de la plataforma alrededor del eje y en bucle abierto, (Figura 6.b), es apreciable solamente después del escalón en la dirección del viento, aumentando su ángulo de escora hasta aproximadamente  $6^\circ$ . Las respuestas en bucle cerrado ante las mismas señales se han superpuesto con las anteriores, pudiendo apreciarse cómo el sistema de control propuesto es capaz de compensar los efectos del viento, incluso ante cambios bruscos en escalón, a la vez que se percibe un muy pequeño acoplamiento en las respuestas en ambos GdL.



a.- Respuestas en bucle abierto y en bucle cerrado alrededor del eje x



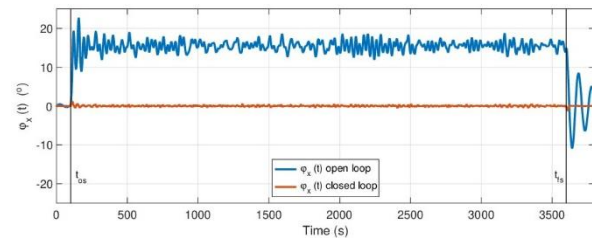
b.- Respuestas en bucle abierto y en bucle cerrado alrededor del eje y

Figura 6: Respuestas en bucle abierto y bucle cerrado bajo variaciones del viento en escalón

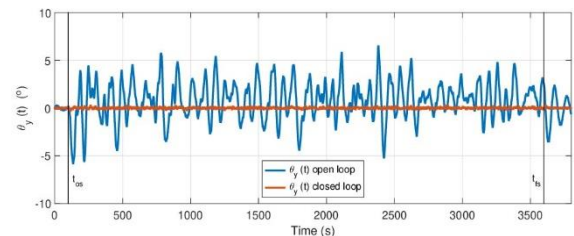
Este desacoplamiento no perfecto apreciable en el comportamiento de la plataforma en bucle cerrado, ante las mismas perturbaciones del viento según (28), se debe a los efectos de los términos no modelados, y por ende, no compensados. Incluso los efectos de los cambios bruscos en la velocidad y orientación del viento en el comportamiento de la plataforma son satisfactorios, mostrando en las Figuras 6.a como en la 6.b, el correcto funcionamiento del término de desacoplamiento definido en la ecuación (9).

Los siguientes resultados temporales (Figura 7) muestran las variables angulares ante la simulación de un caso más realista que el anterior. Las propiedades del modelo de viento utilizado se modelan según una distribución de Weibull, y fueron reconstruidos a partir de los datos reales registrados por la boya de La Langosteira II (43.35N, 8.56W) [28]. A esta señal se le han añadido efectos de las olas como perturbaciones externas, con un período de 9 s y una altura significativa de 1.5 m, según los datos más frecuentes recogidos por la boya.

La orientación de la plataforma en bucle abierto da como resultado variaciones máximas en la inclinación de hasta  $\phi_x(t) = 23^\circ$  y  $\theta_y(t) = 6^\circ$  cuando se encuentra sometida a la acción del viento. El único momento que está cerca del valor nulo para ambos ángulos (aunque oscila debido a las olas), es en la primera y última sección de la simulación donde la acción del viento se anula. Para la respuesta en bucle cerrado, se puede apreciar que el sistema de control implementado mantiene la verticalidad de la plataforma.



a.- Respuestas en bucle abierto y en bucle cerrado alrededor del eje x



b.- Respuestas en bucle abierto y en bucle cerrado alrededor del eje y

Figura 7: Simulación completa de la respuesta de bucle abierto y bucle cerrado del dispositivo bajo datos reales de viento y oleaje tomados de [28]

Con las simulaciones anteriores se ha podido comprobar que el sistema de control propuesto es robusto para compensar parte de los efectos no modelados como los debidos a los cables de fondeo o perturbaciones externas como las olas, obteniendo una muy significativa mejora en el comportamiento de la plataforma.

## 6 CONCLUSIONES

El crecimiento demográfico en el mundo, junto con el cambio climático, subrayan la necesidad de un suministro de energía fiable y sostenible. Una solución viable a los desafíos energéticos actuales pasa por la explotación de la energía eólica marina que, en los últimos años, se ha convertido en el principal pilar de la industria de las energías renovables debido a que no tiene costes asociados a los combustibles, es una energía prácticamente libre de CO<sub>2</sub>, responde a los problemas ambientales del cambio climático y es inagotable. El uso de soluciones flotantes está ganando protagonismo en la energía eólica marina debido a que se multiplica el potencial energético de esta forma de energía varias veces al obtener un mejor uso del viento y factores de capacidad de instalación mucho más altos. Sin embargo, un problema actual en las estructuras eólicas marinas son las oscilaciones producidas por las olas y el viento, debiéndose restringir la inclinación de la estructura a ángulos menores de 10° en la fase de operación.

Este trabajo propone un nuevo modelo dinámico extraordinariamente simple y un algoritmo de control basado en modelo para turbinas Windfloat con el objetivo de reducir/eliminar sustancialmente los cambios en la orientación de la estructura flotante y obtener un aprovechamiento óptimo del viento y factores de capacidad mucho más elevados. El modelo dinámico propuesto se basa únicamente en la definición de tres masas puntuales que permiten convertir las fuerzas de los tres actuadores hidrostáticos en dos pares que son responsables de las rotaciones de la estructura Windfloat. Las principales ventajas del modelo dinámico propuesto son que resulta i) lo suficientemente preciso para describir el movimiento de la turbina Windfloat y ii) lo suficientemente simple como para ser utilizado en el diseño del algoritmo de control. Además, la concepción del sistema de control no lineal puede descomponerse en los siguientes tres términos: i) una matriz denominada de desacoplamiento que es responsable de desacoplar los movimientos de la turbina Windfloat para valores de orientación no singulares; ii) una compensación de los pares centrípetos y de Coriolis por medio de un modelo no lineal basado en el desacoplamiento, y iii) la definición de una acción de control auxiliar clásica del tipo proporcional-integral-derivada (PID). La dinámica de bucle cerrado del sistema se eligió simplemente diseñando ganancias proporcionales, integrales y derivadas, ilustrando así que el algoritmo de control propuesto es simple, computacionalmente eficiente y adecuado para su implementación en un sistema basado en computador.

Se han proporcionado resultados de simulaciones numéricas, en las que se evalúa la eficacia del método de control propuesto con respecto a las incertidumbres paramétricas (por ejemplo, el efecto de los cables de fondeo) en el sistema y las perturbaciones no modeladas. Los resultados obtenidos ilustran que la turbina Windfloat se comporta extremadamente bien con el tiempo de establecimiento deseado y sin sobreoscilación, ante perturbaciones en escalón, logrando una orientación prácticamente nula en ambos ángulos de orientación de la plataforma, con errores minúsculos de aproximadamente  $0.02^\circ$  teóricos. Por último, el estudio de diferentes estrategias de control que mejoren el aprovechamiento del recurso eólico y los factores de mayor capacidad serán los temas de nuestra futura investigación.

### Agradecimientos

Al personal del Grupo de Investigación Tecnológico en Energías Renovables Marinas de la UPM -GIT-ERM-.

### English summary

## A PROPOSAL FOR THE CLOSED-LOOP ORIENTATION CONTROL OF A WINDFLOAT TURBINE SYSTEM

### Abstract

*Offshore wind power is called upon to play an important role in fulfilling the environmental commitments acquired in the Paris Agreement. The use of floating solutions for offshore wind energy is gaining importance as it allows expansion to many regions where this has not been technically feasible until now due to depth. One of the problems of these floating structures is the oscillations produced by the waves and the wind, and the inclination of the structure must be prevented from exceeding a particular value during the operation phase. This work presents a simple dynamic model and a non-linear multivariable control system for a Windfloat turbine. Its principal function is to keep the wind turbine in the optimal conditions required to use wind energy better.*

**Keywords:** Offshore Wind Energy; Windfloat Turbines; Dynamic Modeling; Nonlinear Control.

### Referencias

- [1] C. Stokes et al. "Anticipated coastal impacts: What water-users think of marine renewables and why," *Ocean Coast. Manag.*, vol. 99, no. C, 2014, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2014.04.003.
- [2] F. Dalir et al. "A dynamic quasi comprehensive model for determining the carbon footprint of fossil fuel electricity: A case study of Iran," *J. Clean. Prod.*, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.274.
- [3] M. H. Amrollahi et al. "Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response," *Appl. Energy*, vol. 202, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.116.
- [4] D. Younesian and M. R. Alam, "Multi-stable mechanisms for high-efficiency and broadband ocean wave energy harvesting," *Appl. Energy*, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.04.019.
- [5] European Commission, "A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy," Nov. 2018.

- [6] European Commission, "Offshore Wind Energy: Action needed to deliver on the Energy Policy Objectives for 2020 and beyond" 2008.
- [7] M. Mikati et al. "Electric grid dependence on the configuration of a small-scale wind and solar power hybrid system," *Renew. Energy*, vol. 57, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.02.018.
- [8] D. Y. C. Leung et al. "Wind energy development and its environmental impact: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1. Pergamon, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.09.024.
- [9] A. D. Sahin, "Progress and recent trends in wind energy," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, no. 5. Elsevier Ltd, pp. 501–543, 2004, doi: 10.1016/j.pecs.2004.04.001.
- [10] I. Renewable Energy Agency, *Wind energy: A gender perspective*. 2020.
- [11] W. Europe, "Offshore Wind in Europe Key trends and statistics 2019," 2020.
- [12] REN21., "Renewables 2019 Global Status Report," 2019.
- [13] J. Harrison et al. "Floating Offshore Wind: Installation, Operation & Maintenance Challenges Approval / Revision History Version: A Floating Offshore Wind: Installation Challenges," 2020.
- [14] L. Castro-Santos et al. "Economic feasibility of floating offshore wind farms," *Energy*, vol. 112, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.135.
- [15] "WindFloat Atlantic project | edp.com." <https://www.edp.com/en/innovation/windfloat> (acc. Sep. 15, 2020).
- [16] IEC, "Wind turbines-Part 1: Design requirements," 2005. Accessed: Oct. 13, 2020. [Online]. Available: [www.iec.ch](http://www.iec.ch).
- [17] R. Antonutti et al. "The effects of wind-induced inclination on the dynamics of semi-submersible floating wind turbines in the time domain," *Renew. Energy*, vol. 88, pp. 83–94, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.11.020.
- [18] D. Roddier et al. "WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 3, p. 033104, May 2010, doi: 10.1063/1.3435339.
- [19] "DTU 10MW RWT / dtu-10mw-rwt · GitLab." <https://rwt.windenergy.dtu.dk/dtu10mw/dtu-10mw-rwt> (acc. Sep. 27, 2020).
- [20] M. H. H. Christian Bak, et al. "Description of the DTU 10 MW Reference Wind Turbine", 2013.
- [21] C. Lopez-Pavon et al. "Hydrodynamic coefficients and pressure loads on heave plates for semi-submersible floating offshore wind turbines: A comparative analysis using large scale models," *Renew. Energy*, vol. 81, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.04.003.
- [22] A. Lavrov et al. "Modeling the Heave Oscillations of Vertical Cylinders with Damping Plates. Safe Offloading from Floating LNG Platforms View project MARSTRUCT-Network of Excellence on Marine Structures", 2016, doi: 10.3940/rina.ijme.2016.a3.365.
- [23] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. 2011.
- [24] B. Siciliano et al. *Robotics: Modelling, Planning and Control* (2nd edition). 2010.
- [25] M. Espín, "Modelado dinámico y control de maniobras de dispositivos submarinos," 2015.
- [26] M. P. De La Portilla et al. "Modelado Dinámico y Control de un Dispositivo Sumergido Provisto de Actuadores Hidrostáticos," *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 15, no. 1, pp. 12–23, 2018, doi: 10.4995/riai.2017.8824.
- [27] A. J. Sørensen, *Marine Control Systems Propulsion and Motion Control of Ships and Ocean Structures*. 2013.
- [28] "Páginas - Estadística Mensual." [http://www.puertos.es/es-es/estadisticas/Paginas/estadistica\\_mensual.asp](http://www.puertos.es/es-es/estadisticas/Paginas/estadistica_mensual.asp) (acc. May 11, 2018).



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# ESTABILIZACIÓN DE EÓLICA MARINA FLOTANTE MEDIANTE CONTROL DE FLUJO DE AIRE EN COLUMNAS DE AGUA OSCILANTE

Fares M'zoughi<sup>1</sup>, Payam Aboutaleb<sup>1</sup>, Izaskun Garrido<sup>1</sup>, Aitor J. Garrido<sup>1</sup> and Manuel De La Sen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Automatic Control Group—ACG, Institute of Research and Development of Processes—IIDP, Department of Automatic Control and Systems Engineering, Faculty of Engineering of Bilbao, University of the Basque Country—UPV/EHU, Po Rafael Moreno no3, 48013 Bilbao, Spain  
fares.mzoughi@ehu.eus; payam.aboutaleb@ehu.eus; izaskun.garrido@ehu.eus; aitor.garrido@ehu.eus

<sup>2</sup> Automatic Control Group—ACG, Institute of Research and Development of Processes—IIDP, Department of Electricity and Electronics. Faculty of Science and Technology, University of the Basque Country—UPV/EHU, Sarriena s/n 48940 Leioa, Spain  
manuel.delasen@ehu.eus

## Resumen

*En este artículo se presenta un nuevo tipo de control aplicado a una plataforma flotante multipropósito tipo barcaza capaz de aprovechar la energía eólica y undimotriz de manera simultánea. Además, los captadores de energía undimotriz se componen de columnas de agua oscilante (OWC) que ayudarán a estabilizar la plataforma y la turbina eólica flotante (FOWT) reduciendo el desplazamiento longitudinal de la parte superior de la torre. Para ello se implementa una estrategia de control de flujo de aire actuando sobre las válvulas de la cámara de captura de los dispositivos OWC. El estudio comparativo entre una FOWT estándar y la FOWT sobre la plataforma dotada de dispositivos controlados OWC propuesta, muestra una considerable mejora en la estabilidad del sistema.*

**Palabras clave:** control del flujo de aire; plataforma tipo barcaza; turbina eólica marina flotante; columna de agua oscilante; energía undimotriz; energía eólica.

## 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el impulso a las renovables está impulsando el uso de turbinas eólicas marinas como plataformas multipropósito para un mejor uso, eficiencia y reducción de costes.

La plataforma más estudiada son las plataformas mixtas que combinan turbinas eólicas y convertidores de energía de las olas (WEC) para aprovechar la energía undimotriz y eólica [1-3]. En este artículo se propone el uso de OWC con una turbina eólica marina flotante tipo barge y se han mostrado

resultados prometedores. J.M. Kluger y col. [4] investigó el uso de una matriz WEC con FOWT tipo spar del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) llamado OC3-Hywind FOWT. Posteriormente, A. Slocum et al. [5] discutió el uso de absorbedores puntuales internos y externos a una FOWT. M. Kamarlouei y col. [6] llegó a la conclusión de que la instalación de una matriz de WEC puede disminuir los movimientos de la plataforma de la FOWT en elevación y cabeceo. Sin embargo, los enfoques introducidos no han utilizado OWC en plataformas FOWT tipo barcaza.

Aunque las OWC se han aplicado en diferentes FOWT para disminuir desplazamientos, especialmente aquellas de tipo spar, aún no se ha analizado la aplicación de OWC para la estabilización de FOWT tipo barcaza. Este trabajo tiene como objetivo combinar una turbina eólica marina flotante con una columna de agua oscilante para aprovechar tanto la energía undimotriz como la eólica y estudiar la estabilización de la FOWT utilizando los OWC. La FOWT considerada es el aerogenerador NREL de 5 MW montado en la plataforma ITI Energy tipo barcaza. La barcaza ITI Energy es un concepto que fue desarrollado por el Departamento de Arquitectura Naval e Ingeniería Marina de las Universidades de Glasgow y Strathclyde a través de un contrato con ITI Energy (consulte [7] para obtener una explicación detallada sobre este tema). La idea es integrar OWCs dentro de la barcaza ITI Energy para ayudar a reducir los movimientos no deseados de la plataforma. Esto se puede lograr controlando las válvulas de aire de cada OWC usando una estrategia de control de flujo de aire [8-10] para ajustar el flujo de aire y la presión dentro de las cámaras de captura.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: En la Sección 2 se presenta el Modelo FOWT y sus ecuaciones. Luego, se propone en la Sección 3 un control de flujo de aire, implementado para regular el flujo de aire y la presión en las cámaras con el fin de estabilizar la FOWT. En la Sección 4 se realiza un estudio comparativo del FOWT entre la barcaza ITI Energy estándar y la barcaza basada en OWC. Finalmente, la Sección 5 cierra el documento con algunas observaciones.

## 2 MODELO DE PLATAFORMA FOWT BASADO EN OWC

La turbina a considerar es de tres palas, de velocidad variable y de paso controlado con un diámetro de rotor de 126 m. Las palas accionan un generador instalado en la parte superior de la torre en la góndola a una altura de buje de 90 m. La turbina eólica está montada sobre una plataforma tipo barcaza lastrada, amarrada por líneas de catenaria para reducir la deriva y mejorar la estabilidad. Las especificaciones detalladas de la turbina eólica de 5 MW y la plataforma de barcaza ITI se pueden encontrar en [11], aunque algunos parámetros básicos se proporcionan en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del aerogenerador NREL 5 MW y la plataforma de barcaza ITI.

Feature	Value
Potencia nominal	5MW
Control	Velocidad variable
Velocidad del viento cut-in, rated, cut-out	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Velocidad del rotor Cut-in, rated	6.9 rpm, 12.1 rpm
Masa de la torre	347, 460 kg
Diámetro del rotor	126 m
Altura del buje	90 m
Tamaño de la plataforma	40 m x 40 m x 10 m
Masa de la plataforma	5,452,000 kg
Número de líneas de amarre	8
Profundidad del ancla	150 m
Diámetro de la línea	0.0809 m
Densidad de masa lineal	130.4 kg/m

Según numerosos estudios, a pesar de que las plataformas flotantes tienen un gran desplazamiento en la vertical, es bien sabido que el movimiento de cabeceo de la barcaza que más contribuye a la flexión de la torre [12]. Este cabeceo de la barcaza alrededor del eje Y, afecta el desplazamiento de la parte superior de la torre en la dirección del eje X, por lo que el desplazamiento longitudinal también es muy importante en la estabilidad de FOWT. Por lo tanto,

solo habilitamos el modo de cabeceo. Se ha demostrado que este enfoque es suficientemente eficaz para el control de la vibración estructural de los FOWT [13-15]. Por lo tanto, el modelo del sistema considera dos modos de la turbina eólica, que son el movimiento de inclinación de la plataforma y el modo de flexión de la torre en primer lugar. Además, el trabajo de este artículo se centra en las dinámicas de vibración de las FOWT que están más relacionadas con las olas. Asimismo, se ha omitido el efecto viento sobre la turbina con el fin de obtener un modelo simplificado y diseñar el control adecuado.

### 2.1 MODELO DINÁMICO DE UN FOWT BASADO EN OWC

Para el FOWT de tipo barcaza, los grados de libertad más importantes que afectan las cargas de la torre de la estructura de la turbina eólica son el movimiento de inclinación de la plataforma y el primer modo de flexión longitudinal de la torre [16,17]. Por lo tanto, ambos se utilizan en el diseño del modelo simplificado de turbina eólica de orden reducido, y su esquema se muestra en la Figura 1.

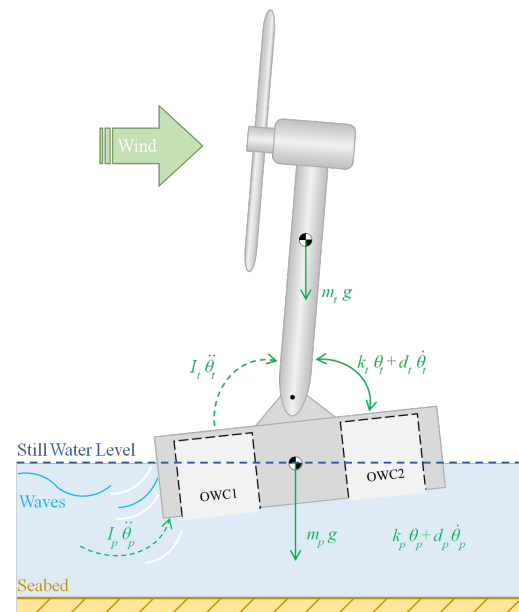


Figura 1: Modelo simplificado de turbina eólica marina flotante.

Las ecuaciones de Euler-Lagrange de un sistema no conservador con  $n$  coordenadas generalizadas se describen mediante (1) y (2):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$L = T - V \quad (2)$$



donde  $T$  y  $V$  son la energía cinética total y la energía potencial total del sistema, respectivamente.  $L$  es el operador de Lagrange. La energía cinética total y la energía potencial total de la turbina eólica flotante tipo barcaza se pueden expresar como:

$$T = \frac{1}{2} I_t \dot{\theta}_t^2 + \frac{1}{2} I_p \dot{\theta}_p^2 \quad (3)$$

$$V = \frac{1}{2} k_t (\theta_t - \theta_p)^2 + \frac{1}{2} k_p \theta_p^2 + m_t g R_t \cos \theta_t - m_p g R_p \cos \theta_p \quad (4)$$

donde  $k$  es el coeficiente de rigidez del resorte equivalente,  $\theta$  es el ángulo de rotación alrededor del eje vertical  $z$ ,  $I$  es el momento de inercia alrededor del centro de masa.  $m$  es la masa,  $g$  es la aceleración gravitacional y  $R$  es la distancia desde el centro de masa hasta la sujeción de la torre. Los subíndices  $p$  y  $t$  representan la plataforma y la torre, respectivamente.

Las fuerzas generalizadas consisten en la fuerza de amortiguación y las cargas de viento y oleaje externas expresadas como:

$$\begin{cases} Q_{\theta_t} = -d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) + M_{wind} \\ Q_{\theta_p} = -d_p \dot{\theta}_p + d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) + M_{wave} \\ \quad - R_{owc1} f_{owc1} + R_{owc2} f_{owc2} \end{cases} \quad (5)$$

donde  $d$  es el coeficiente de amortiguamiento equivalente,  $M_{wind}$  y  $M_{wave}$  son los momentos flectores causados por el viento externo y las cargas de las olas que actúan sobre la base de la torre y la parte superior de la plataforma, respectivamente.  $F_{owc1}$  y  $F_{owc2}$  son las fuerzas inducidas por las presiones en las cámaras de captura de OWC1 y OWC2, respectivamente.

Sustituyendo (3)-(5) en (1) y (2) y considerando aproximaciones de ángulo pequeño porque ninguna de las excede los 10 grados de inclinación, incluso en las cargas de viento y oleaje más fuertes y asumiendo que ambos OWC están a la misma altura distancia desde la bisagra de la torre ( $R_{owc} = R_{owc1} = R_{owc2}$ ) el modelo dinámico no lineal de contacto de la turbina eólica flotante de barcaza se expresa por (6).

$$\begin{cases} I_p \ddot{\theta}_p - k_t (\theta_t - \theta_p) + m_p g R_p \theta_p + k_p \theta_p = -d_p \dot{\theta}_p \\ \quad + d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) + M_{wave} - R_{owc} (f_{owc1} - f_{owc2}) \\ I_t \ddot{\theta}_t + k_t (\theta_t - \theta_p) - m_t g R_t \theta_t = -d_t (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) \\ \quad + M_{wind} \end{cases} \quad (6)$$

El viento y las olas interactúan con la estructura FOWT de una manera aeroelástica e hidroelástica compleja. Además, existe un acoplamiento inherente entre las respuestas estructurales inducidas por el viento y las olas [18].

Para obtener un modelo lineal, se asume que las cargas de viento y oleaje  $M_{wind}$  y  $M_{wave}$  se han obtenido linealmente por la velocidad del viento a la altura del eje  $V_{wind}(t)$  y la elevación de la ola  $Z(t)$ , por lo que  $M_{wind}$  y  $M_{wave}$  están representadas con una dinámica de primer orden como:

$$\dot{M}_{wind}(t) = -\alpha_{wind} M_{wind}(t) + \beta_{wind} V_{wind}(t) \quad (7)$$

$$\dot{M}_{wave}(t) = -\alpha_{wave} M_{wave}(t) + \beta_{wave} Z(t) \quad (8)$$

## 2.2 LAS COLUMNAS DE AGUA OSCILANTES

Suponiendo que la superficie libre interna dentro de la cámara del OWC se comporta como un pistón y la presión es uniforme, la fuerza se puede definir como [19,20]:

$$f_{owci} = -p_i(t) S \quad (i=1,2) \quad (9)$$

donde  $p_i(t)$  es la presión de la cámara y  $S$  es la superficie libre interna de la cámara, que es la misma para ambos OWC. El subíndice  $i = 1,2$  se refiere a OWC1 o OWC2.

Considerando el aire como un gas ideal y el sistema es adiabático y las transformaciones son lo suficientemente lentas como para ser reversibles, pueden entonces considerarse isentrópicas y la densidad del aire se define como:

$$\rho_i(t) = \rho_a \left( \frac{p_i(t)}{p_a} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (i=1,2) \quad (10)$$

donde  $p_a$  y  $\rho_a$  son la presión atmosférica y la densidad.  $\gamma$  es la proporción de calor.

Al linealizar la relación isentrópica entre densidad y presión, obtenemos:

$$\rho_i(t) = \rho_a \left( \frac{p_i(t)}{p_a} \right) \quad (i=1,2) \quad (11)$$

$$\dot{\rho}_i(t) = \frac{\rho_a}{p_a \gamma} \dot{p}_i(t) \quad (i=1,2) \quad (12)$$

El caudal de masa dentro de las cámaras se puede definir como:

$$\dot{\rho}_i(t) = \frac{\rho_a}{p_a \gamma} \dot{p}_i(t) \quad (i=1,2) \quad (13)$$

donde  $V_0$  es el volumen de aire en la cámara y  $V_{owc}(t)$  es el volumen de aire instantáneo.

El volumen de aire oscilante  $V_{owc}(t)$  depende de la geometría de las cámaras de captura OWC y se define como:

$$V_{owci}(t) = V_0 - S Z_i(t) \quad (14)$$

donde  $S = l_{c.wc}$  es la superficie libre interior de la cámara y  $Z_i$  es el desplazamiento vertical del agua en forma de pistón, que aumenta en dirección ascendente.



Por tanto, la presión dentro de las cámaras depende del caudal de masa y del volumen de aire oscilante:

$$\dot{p}_i(t) = \frac{p_a \gamma}{\rho_a V_0} \dot{m}_i(t) - \frac{p_a \gamma}{V_0} \dot{V}_i(t) \quad (i=1,2) \quad (15)$$

### 3 CONTROL DE FLUJO DE AIRE COMPLEMENTARIO PROPUESTO

Para ayudar a estabilizar el sistema FOWT, se han integrado dos OWC en la estructura de la plataforma de barcaza ITI Energy. Ambas OWC son idénticas y se han colocado a ambos lados de la torre (frontal y posterior) a la misma distancia para mantener la simetría. Al utilizar una estrategia de control de flujo para ajustar el flujo de aire y la presión dentro de las cámaras de captura, la OWC ayuda a oponerse a algunas de las fuerzas hidrodinámicas.

Debido a que las OWC están integrados en la plataforma barcaza ITI Energy y tienen momentos opuestos en ella, la estrategia de control de flujo de aire propuesta se basa en el paso de la plataforma como se explica en la Figura 2. En la práctica, la entrada al sistema FOWT es la elevación de la ola  $Z(t)$  que se puede registrar la altura de ola en el centro de la plataforma con un Analizador de Corriente Doppler Acústico (ADCP) montado en la parte inferior de la barcaza. En cuanto a los DOF de FOWT, tanto el cabeceo de la plataforma  $\theta_p$  como la escora superior de la torre  $x_t$  pueden medirse con dos acelerómetros colocados en la base y la parte superior de la torre, respectivamente [1].

La estrategia de control propuesta utiliza dos controladores PID para abrir y cerrar la válvula de mariposa de acuerdo con el paso de la plataforma como se muestra en la Figura 2. La entrada de los controladores PID es el error de paso de la plataforma y la salida es la señal de control de las válvulas de aire. Cuando las válvulas atrapan o liberan el aire en las cámaras, aumentan o disminuyen la presión y consecuentemente las fuerzas que actúan sobre la barcaza del sistema FOWT.

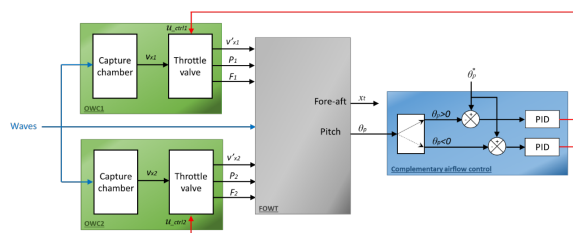


Figura 2: Control de flujo de aire complementario propuesto para la estabilización FOWT.

### 4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este estudio, se comparan ambas estructuras para comprender su respuesta y cómo se amortiguan las perturbaciones sin ninguna excitación. En este sentido, no debe haber ninguna carga aerodinámica en el rotor y ninguna carga de olas en la estructura de soporte, por lo tanto, tanto la velocidad del viento a la altura del buje  $V_{wind}(t)$  y la elevación de las olas  $Z(t)$  deben ser omitido. A continuación, se proporciona una perturbación inicial al sistema en forma de un ángulo de inclinación inicial de la plataforma de 5 grados. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 3 y 4.

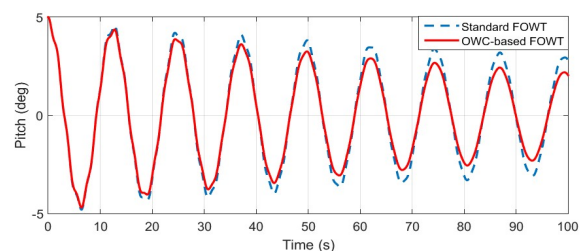


Figura 3: Respuesta de caída libre para el tono de la plataforma en FOWT estándar y FOWT basado en OWC.

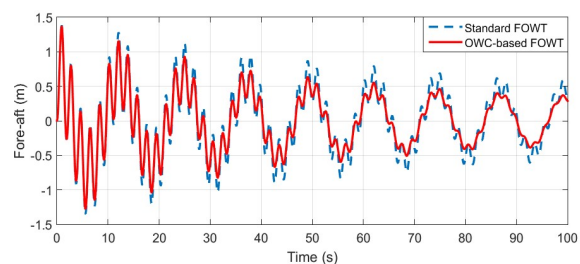


Figura 4: Respuesta de decaimiento libre para el desplazamiento longitudinal de la parte superior de la torre en el FOWT estándar y el FOWT basado en OWC.

La Figura 3 muestra la respuesta de amortiguación del cabeceo de la plataforma para ambas estructuras y se puede observar que ambas comienzan en 5 grados, que es la perturbación inicial, introducida en ambos sistemas. Se puede ver que, durante la simulación con el tiempo, el cabeceo de la plataforma se amortigua, pero con el FOWT propuesto basado en OWC, el cabeceo se reduce en comparación con el FOWT estándar.

En la Figura 4, se ilustra el desplazamiento longitudinal de la torre superior para ambas estructuras y se puede deducir el mismo; las oscilaciones del desplazamiento longitudinal se reducen en el FOWT basado en OWC en comparación con el FOWT estándar.

## 5 CONCLUSIONES

En este documento, se han integrado columnas de agua oscilantes en la plataforma de tipo barcaza ITI Energy de una turbina eólica marina flotante y se ha propuesto un control de flujo de aire complementario para las OWC con el fin de ayudar a estabilizar la plataforma al reducir el movimiento de inclinación no deseado de la plataforma y la torre.

Para ello se ha desarrollado un modelo FOWT lineal simplificado que modela el cabeceo de la plataforma y la escora en la parte superior de la torre. A partir de este modelo se han integrado las presiones y fuerzas de los dispositivos OWC al objeto de estudiar la capacidad de las cámaras OWC para oponerse a las fuerzas hidrodinámicas que sufre la plataforma. Para ello se ha implementado un esquema de control que, a partir del ángulo de inclinación, establece la señal de control adecuada mediante el uso de controladores PID, que a su vez actúan sobre la válvulas de control de flujo de las cámaras OWC de manera que se regulan las presiones dentro de las cámaras.

Los resultados muestran que la respuesta de amortiguamiento del FOWT propuesto basado en sistemas OWC presenta mayor caída en comparación con la plataforma FOWT estándar basada en barcasas.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado en parte por el Gobierno Vasco a través del proyecto IT1207-19 y por el MCIU/MINECO a través de los proyectos RTI2018-094902-B-C21 y RTI2018-094902-B-C22 (MCIU / AEI / FEDER, UE).

### English summary

#### AIRFLOW CONTROL STRATEGY OF OSCILLATING WATER COLUMNS FOR FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE STABILIZATION

### Abstract

*This paper presents the idea of incorporating oscillating water columns (OWCs) into the barge platform of a floating offshore wind turbines (FOWT) to make it a multi-purpose platform for harnessing both wind and wave energies. Moreover, the OWCs will help stabilize the FOWT platform by means of an airflow control strategy used to reduce the platform*

*pitch and tower top fore-aft displacement. This is achieved by a proposed airflow control strategy to control the valves within the OWCs. The comparative study between a standard FOWT and the proposed OWC-based FOWT shows an improvement in the platform's stability.*

**Keywords:** airflow control; barge platform; floating offshore wind turbine; oscillating water column; wave energy; wind energy.

### Referencias

- [1] Hu, J., Zhou, B., Vogel, C., Liu, P., Willden, R., Sun, K., Zang, J., Geng, J., Jin, P., Cui, L. and Jiang, B., (2020) "Optimal design and performance analysis of a hybrid system combining a floating wind platform and wave energy converters", *Applied Energy*, 269, p.114998.
- [2] Sarmiento, J., Iturrioz, A., Ayllón, V., Guanche, R. and Losada, I.J., (2019) "Experimental modelling of a multi-use floating platform for wave and wind energy harvesting", *Ocean Engineering*, 173, pp.761-773.
- [3] Yu, J., Li, Z., Yu, Y., Hao, S., Fu, Y., Cui, Y., Xu, L. and Wu, H., (2020) "Design and Performance Assessment of Multi-Use Offshore Tension Leg Platform Equipped with an Embedded Wave Energy Converter System", *Energies*, 13(15), p.3991.
- [4] Kluger, J.M., Slocum, A.H. and Sapsis, T.P., 2017, July. "A first-order dynamics and cost comparison of wave energy converters combined with floating wind turbines", In *The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers*.
- [5] Slocum, A., Kluger, J. and Mannai, S., 2019, July. "Energy Harvesting and Storage System Stabilized Offshore Wind Turbines", In *2019 Offshore Energy and Storage Summit (OSES)* (pp. 1-6).
- [6] Kamarlouei, M., Gaspar, J.F., Calvário, M., Hallak, T.S., Mendes, M.J., Thiebaut, F. and Soares, C.G., (2020) "Experimental analysis of wave energy converters concentrically attached on a floating offshore platform", *Renewable Energy*, 152, pp.1171-1185.
- [7] Vijfhuizen, W.J.M.J. 2006, September. "Design of a Wind and Wave Power Barge", Master's Dissertation, Department of Naval Architecture and Mechanical Engineering, Universities of Glasgow and Strathclyde, Glasgow, Scotland.

- [8] M'zoughi, F., Garrido, I., Bouallègue, S., Ayadi, M. and Garrido, A.J., (2019) "Intelligent Airflow Controls for a Stalling-Free Operation of an Oscillating Water Column-Based Wave Power Generation Plant", *Electronics*, 8(1), p.70.
- [9] M'zoughi, F., Garrido, I., Garrido, A.J. and De La Sen, M., (2020) "ANN-based airflow control for an oscillating water column using surface elevation measurements", *Sensors*, 20(5), p.1352.
- [10] M'zoughi, F., Garrido, I., Garrido, A.J. and De La Sen, M., (2020) "Self-adaptive global-best harmony search algorithm-based airflow control of a wells-turbine-based oscillating-water column", *Applied Sciences*, 10(13), p.4628.
- [11] Jonkman, J.M., (2007) "Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine", (No. NREL/TP-500-41958). *National Renewable Energy Lab.(NREL)*, Golden, CO (United States).
- [12] Jonkman, J., 2008, January. "Influence of control on the pitch damping of a floating wind turbine", In *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (p. 1306).
- [13] Lackner, M.A. and Rotea, M.A., (2011) "Passive structural control of offshore wind turbines", *Wind energy*, 14(3), pp.373-388.
- [14] Stewart, G. and Lackner, M., (2013) "Offshore wind turbine load reduction employing optimal passive tuned mass damping systems", *IEEE transactions on control systems technology*, 21(4), pp.1090-1104.
- [15] Si, Y. and Karimi, H.R., (2014) "Gain scheduling H<sub>2</sub>/H<sub>∞</sub> structural control of a floating wind turbine", *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), pp.6788-6793.
- [16] Lackner, M.A. and Rotea, M.A., (2011) "Structural control of floating wind turbines", *Mechatronics*, 21(4), pp.704-719.
- [17] Aboutaleb, P., M'zoughi, F., Garrido, I. and Garrido, A.J., (2021) "Performance Analysis on the Use of Oscillating Water Column in Barge-Based Floating Offshore Wind Turbines", *Mathematics*, 9(5), p.475.
- [18] Hu, Y., Wang, J., Chen, M.Z., Li, Z. and Sun, Y., (2018) "Load mitigation for a barge-type floating offshore wind turbine via inerter-based passive structural control", *Engineering Structures*, 177, pp.198-209.
- [19] Aubault, A., Alves, M., Sarmiento, A.N., Roddier, D. and Peiffer, A., 2011, January. "Modeling of an oscillating water column on the floating foundation WindFloat", In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 44373, pp. 235-246).
- [20] Henriques, J.C.C., Sheng, W., Falcão, A. and Gato, L.M.C., 2017, June. "A comparison of biradial and wells air turbines on the Mutriku breakwater OWC wave power plant", In *ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# ANÁLISIS DE DATOS PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE EMBARCACIONES EN UN ÁREA PORTUARIA

Ezequiel Bernal García

Facultat de Nàutica de Barcelona (UPC), Pla de Palau, 08003 Barcelona, [ezequiel.bernal@upc.edu](mailto:ezequiel.bernal@upc.edu)

Rosa M. Fernández-Cantí

Facultat de Nàutica de Barcelona (UPC), Pla de Palau, 08003 Barcelona, [rosa.mari.fernandez@upc.edu](mailto:rosa.mari.fernandez@upc.edu)

Antoni Isalgú Buxeda

Facultat de Nàutica de Barcelona (UPC), Pla de Palau, 08003 Barcelona, [antonio.isalgue@upc.edu](mailto:antonio.isalgue@upc.edu)

## Resumen

*Según el último informe de la Agencia Europea de Seguridad Marítima (EMSA), un gran número de incidentes de navegación con víctimas se producen en instalaciones portuarias. Para minimizar el número de accidentes es necesario contar con algoritmos de control eficientes que permitan decidir acciones en tiempo real por parte del operador. Se presentan las principales fuentes de los datos que permiten un control efectivo del control portuario. Se discuten las ventajas e inconvenientes de los datos suministrados por los sistemas AIS y RADAR. A partir de los requerimientos de seguridad para evitar colisiones, se analizan los principales datos relacionados con la embarcación y su entorno que son relevantes para un algoritmo eficiente del control de tráfico en puertos.*

**Palabras clave:** VTS (Vessel Traffic Service), AIS (Automatic Identification System), RADAR (Radio Detection and Ranging), simulación, seguridad marítima.

## 1 INTRODUCCIÓN

La IALA (*International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities*) es una organización de ámbito internacional, no gubernamental y con fines exclusivamente técnicos sin ánimo de lucro [4]. Está integrada por tres clases de miembros: nacionales (servicios de ayudas a la navegación de diversos países), asociados (centros de investigación y consultores) e industriales (fabricantes y distribuidores de equipos y servicios). El máximo órgano de la Asociación es la Asamblea General, cuyas reuniones se celebran coincidiendo con las Conferencias Internacionales que tienen lugar cada cuatro años. Durante las Asambleas se elige,

entre los miembros nacionales, a los 21 que constituirán el Consejo y, en votación entre los Consejeros, a su Presidente y Vicepresidente. España forma parte del Consejo desde el año 1994 y durante el periodo 2014-2018 ostentó la Presidencia de esta Asociación Internacional.

Para el desarrollo de los trabajos técnicos existen cuatro comités y un foro:

- Comité de e-Navegación (e-NAV)
- Comité de Servicios de Tráfico Marítimo (VTS)
- Comité de Ingeniería (ENG)
- Comité de Gestión y Requisitos de las Ayudas a la Navegación (AMR)

En todos los Comités pueden tomar parte los miembros de la Asociación que lo deseen y colaborar en la realización de estudios y redacción de informes o recomendaciones sobre los diferentes temas que cada uno de los Comités tiene en su programa de trabajo.

A pesar de las recomendaciones de la IALA que incluyen la formación de los controladores y el equipamiento técnico necesario para el control del tráfico, la Agencia Europea de Seguridad Marítima (EMSA) publicó, en su último informe de junio del 2020, que en el año 2019 en aguas europeas se produjeron 3062 incidentes, incluyendo 256 colisiones y 228 varadas [2].

Se ha observado un aumento continuo en relación con los buques pesqueros desde el 2014. Más de 1382 buques de carga y 933 de pasaje (un 8% más que en 2018) estuvieron involucrados en accidentes que resultaron en 60 muertes en 2019. Con un total de casi 120, los buques pesqueros siguen siendo la categoría de buques con mayor número de barcos perdidos durante el periodo 2011-2019. Ver Figura 1.

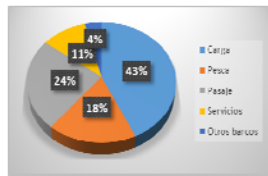


Figura 1: Barcos implicados en incidentes por categoría en aguas europeas en 2019 [2]

Por otro lado, 85 barcos calificados como “otros” estuvieron involucrados en algún accidente marítimo. A pesar del número limitado de tales barcos, esto resultó en un aumento de muertes y lesiones, principalmente en embarcaciones de recreo con motor o vela. La mitad de las víctimas estaban relacionadas con cuestiones de carácter de navegación. Lo más curioso de este informe es que indica que los incidentes ocurrieron principalmente en áreas de aguas interiores y puertos, donde el 44% de los incidentes desde 2014 fueron debidos a colisiones, contacto o varadas [2].

También cabe destacar el número de barcos implicados en la salidas, llegadas y fondeos en puerto. En el año 2019 los incidentes a la llegada (406) casi doblan a los incidentes en la salida (240) [2].

En el caso de España, según el reporte CIAIM (que incluye accidentes graves o muy graves, pérdida de vidas, heridos graves, pérdida o hundimiento de embarcaciones, daños graves), entre 2000 y 2016, de 346 buques implicados en total, 197 eran de pesca [12].

Las Autoridades Portuarias cuentan con diferentes programas informáticos y simuladores de soporte al control del tráfico como, por ejemplo, el software VTS NAVI HARBOUR 4.6 de Wärtsilä (ver Figura 2).



Figura 2: Software VTS NAVI HARBOUR 4.6 (imagen cedida por Wärtsilä)

Este tipo de programas se revelan muy útiles y han aumentado considerablemente la seguridad, especialmente en puertos con mucho tráfico. Sin embargo, todavía ocurren accidentes debido, en muchas ocasiones, a la fiabilidad de los datos con los

que opera el centro de control y a los algoritmos de decisión empleados. En este sentido, interesa combinar las lecturas de los diferentes dispositivos a fin de mejorar la robustez de las medidas, así como desarrollar nuevos algoritmos que permitan extraer el máximo de información de los datos suministrados e incorporar datos complejos como son las simulaciones de la dinámica de los buques.

Así pues, el objetivo de este trabajo es establecer la base para un control efectivo del tráfico dentro de las instalaciones portuarias que permita aumentar la seguridad. La Figura 3 muestra las diferentes etapas del sistema de control de tráfico portuario.

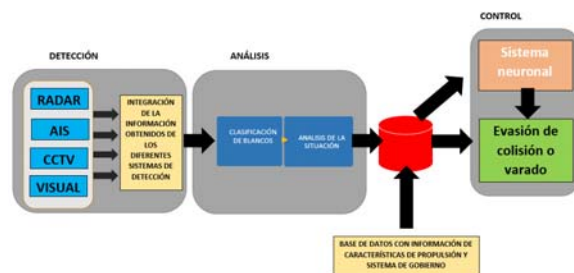


Figura 3: Etapas del sistema de control de tráfico

Los puntos clave del sistema son: los datos en tiempo real (tanto de las embarcaciones como del centro de control), modelos del comportamiento dinámico de los buques (obtenidos a partir de simuladores), y el algoritmo encargado de tomar las decisiones e interactuar con el operador. Esta contribución se centra en el primer paso, es decir, en la selección de los datos relevantes.

La organización del resto del documento es la siguiente: En la Sección 2 se discuten los pros y contras el uso de los blancos AIS (*Automatic Identification System*) y RADAR (*Radio Detection and Ranging*) en el control del tráfico portuario. En la Sección 3 se analizan los principales datos/parámetros que tienen relevancia en la evitación de colisiones. Finalmente, en la Sección 4 se presentan las conclusiones y apuntan líneas futuras de investigación.

## 2 OBTENCIÓN DE BLANCOS PARA GESTIÓN DEL TRÁFICO

Los actuales medios de localización de blancos se clasifican según si el blanco interviene o no.

Los medios en los que no interviene la embarcación dependen exclusivamente del equipamiento instalado en la estación de control de tráfico, o puntos estratégicos del puerto o zona portuaria para la

localización del blanco. En este grupo podemos incluir:

- Sistemas RADAR (*Radio Detection and Ranging*), que detectan los blancos y miden distancias por radio, con su ayuda ARPA (*Automatic Radar Plotting Aid*),
- Sistemas Radiogoniómetros, que permiten detectar la posición del blanco siempre y cuando transmitan en un canal de VHF,
- Cámaras de CCTV (Circuito cerrado de televisión),
- y por qué no incluir la visión directa del operador (nunca hay que subestimar el uso de nuestros sentidos).

Dentro del grupo donde intervienen los equipos instalados en el barco encontramos diferentes tecnologías que, en forma de señal radio, nos pueden transmitir su posición para localizar la embarcación. A continuación, se señalan los más importantes, aunque cabe mencionar que no todos los barcos poseen todo este equipamiento, ya que ello depende del tipo de barco, su carga, tonelaje, etc.

- LRIT (*Long Range Identification and Tracking*, Identificación y seguimiento de largo alcance). Regulación 19-1 de SOLAS [3], Capítulo V, accesible a la bandera y autoridades
- AIS (*Automatic Identification System*, Identificación automática). Regulación 19 de SOLAS, Capítulo V
- SSAS (*Ship Security Alert System*, Sistema de Alerta de Seguridad del Buque). Regulación 6 de SOLAS Capítulo XI-2, accesible a la bandera, armador y autoridades
- VHF DSC (*Digital Selective Call*, Llamada Selectiva Digital), SOLAS, Capítulo IV
- Otros equipos como algunos modelos de ECDIS (*Electronic Chart Distribution and Information System*, Sistemas de Información y Visualización de cartas Electrónicas), VSAT (*Very Small Aperture Terminal*, Terminal de apertura muy pequeña), Inmarsat C.

Los medios más usados para la adquisición de datos más utilizados en el Control de Tráfico son:

- Estaciones base de AIS
- RADAR (siguiendo recomendación IALA, ya sean Básico, Estándar o Avanzado, o combinación de radares de menos prestaciones)
- Radiogoniómetro
- Cámaras de CCTV

## 2.1 FIABILIDAD DE LOS BLANCOS AIS

Se han publicado numerosos estudios después de la aparición de los AIS, analizando los desplazamientos

de diferentes embarcaciones en un área o ruta determinada [5], [8], [10]. Las principales características del AIS son las siguientes:

- Permite el seguimiento de embarcaciones ya que intercambia automáticamente información sobre la identidad, el tipo, la posición, el rumbo, la velocidad y el estado de navegación de la embarcación con estaciones en tierra y otras embarcaciones
- Contribuye a la seguridad marítima mediante la identificación de amenazas a las fronteras soberanas de un país
- Ayuda a evitar colisiones trazando el rumbo y la velocidad de los buques dentro de un rango
- Mejora el tráfico portuario de monitoreo ya que permite la transferencia eficiente de embarcaciones entre puertos
- Mejora la comunicación directa de barco a barco

Sin embargo, los accidentes causados por la confianza de los navegantes en el AIS se producen cuando los buques no están equipados con sensores fiables de rumbo y posición, el equipo no está certificado o la instalación/configuración del equipo es incorrecta. Hoy en día, la mayoría de los capitanes no están familiarizados con la tecnología AIS y pueden utilizar la información de AIS en detrimento de la información de RADAR [8]. La conclusión es que un gran número de buques transmiten datos AIS incorrectos.

Lamentablemente, en el Control del Tráfico Marítimo realizado por las Autoridades Portuarias se atribuye bastante importancia desmerecida a los blancos recibidos de los terminales AIS, sin tener una seguridad plena de su fiabilidad, menospreciando otras fuentes como pueden ser el RADAR o la imagen de los CCTV. Este interés por los blancos de AIS se debe principalmente a la necesidad de obtener datos (Nombre, Número IMO, Distintivo de llamada, etc...) para alimentar la base de datos del PMS (*Port Management System*, Sistema de Gestión del Puerto) de la Autoridad Portuaria correspondiente. Existen puertos importantes con escenarios complejos que pasan por alto que hay embarcaciones exentas por regulación de llevar AIS, como son los barcos de índole militar y pequeños barcos de recreo. Otros barcos como los de pesca se aventuran a desconectarlo a pesar de la posible sanción, para evitar la competencia de la zona de pesca [1]. En otros casos, hay embarcaciones que simplemente tienen el equipo defectuoso.

## 2.2 FIABILIDAD DE LOS BLANCOS RADAR

Los sistemas RADAR tienen también sus limitaciones. El blanco se obtiene gracias a la



emisión de una señal de microondas que se ve “reflejada” en el blanco y se recibe de vuelta para ser tratada en el mismo equipo y obtener información de posición referente al transmisor y otros datos después de varios segundos como: rumbo, velocidad y, dependiendo del equipo, tamaño del blanco. Esto ocurre siempre que el blanco esté en la zona de cobertura del barrido de la antena RADAR y no haya por tanto elementos que se interpongan.

La ventaja de este equipo es que, tanto instalado a bordo de una embarcación como en una zona costera, su fiabilidad y la confianza del operador es mucho mayor que frente a los datos de AIS que recibe de un barco, donde es más una “prueba de fe” que tanto los datos de posición, rumbo e información del mismo barco como nombre, ETA (*Estimated Time of Arrival*, hora estimada de llegada), etc... sean correctos.

Los tipos de radares que podemos encontrar en el mercado son diferentes en lo que a tecnología se refiere (por ejemplo, apertura del haz) y dimensiones de la antena, determinante para la discriminación de blancos cercanos. No obstante, para uso de control de tráfico la recomendación IALA se debería anteponer a cualquier otro estándar marino o especificación de un fabricante.

La tecnología de los radares también sufre el avance tecnológico, provocando un constante goteo en el mercado de nuevos equipos o actualizaciones de los existentes, tanto en *hardware* como en *software*.

La integración de ambas fuentes RADAR y AIS se antoja necesaria para un buen Control de Tráfico de una zona o puerto [11]. Pero debemos contar con un tercer actor para que ambas tecnologías nos sean útiles: la capacidad del operador de tratar toda esta información, por lo que dependemos de la capacidad cognitiva del operador para predecir riesgos en el tráfico antes de que ocurran o que posea experiencia suficiente para la ordenación del tráfico en la zona, disminuyendo riesgos.

### 3 ANÁLISIS DE DATOS

En el caso de las colisiones, numerosos estudios se han publicado respecto a la prevención automática de estas y se han propuesto varios algoritmos [3], [9].

El proceso de toma de decisiones para prevención de colisiones de buques se comenzó a investigar a partir del estudio cualitativo del Reglamento internacional para prevenir colisiones en la mar (COLREGs) y al estudio cuantitativo del riesgo de colisión de buques en años precedentes a esa norma [6].

El riesgo de colisión se determina según el rumbo del barco y distancia, determinando el tiempo y la distancia de aproximación para evitar colisiones, según la distancia del punto más cercano de aproximación (DCPA) y tiempo hasta el punto más cercano de aproximación (TCPA).

Por otro lado, la EMSA (Agencia Europea de Seguridad Marítima) está actualmente debatiendo sobre los buques marítimos automáticos de superficie (MASS) por lo que se utilizan sistemas de análisis similares a los que se pueden usar en control de tráfico, pero dirigidos a la actuación directa sobre el gobierno de la embarcación.

A continuación, se analizan los diferentes parámetros a tener en cuenta para que el control automático de detección de la colisión sea lo más fiable posible.

#### 3.1 PARÁMETROS RELATIVOS A LA EMBARCACIÓN

Los principales datos que hay que tener en cuenta son los siguientes:

##### 3.1.1 Tipo de propulsión

La embarcación que se encuentra involucrada en una inminente colisión es dependiente del sistema de gobierno y por lo tanto de sistema de propulsión y condiciones en el momento de la detección del peligro. Los sistemas azimutales, por ejemplo, poseen mayor margen de reacción que un motor de 2 tiempos para realizar un cambio de sentido de la dirección.

##### 3.1.2 Nivel de carga, tipo de carga

Es evidente que la respuesta de una embarcación frente a una maniobra de evasión de abordaje dependerá del nivel de carga que tenga la embarcación, si la carga es líquida o sólida. Las diferencias de calado del buque afectan también a sus condiciones de maniobra, teniendo los buques en carga, en general, una curva evolutiva de mayores dimensiones que cuando están en lastre.

##### 3.1.3 Tonelaje, eslora y manga

Tanto las dimensiones del buque como su peso influyen en su comportamiento dinámico y en la inercia de las maniobras.

##### 3.1.4 Velocidad y rumbo

Para un mismo ángulo de timón la duración de la evolución disminuye al aumentar la velocidad. Para igual velocidad el tiempo se reduce al incrementar el ángulo de timón. Para completar una caída en el



menor tiempo posible se debe usar todo el timón a la banda y máxima velocidad.

### 3.2 PARÁMETROS EXTERNOS A LA EMBARCACIÓN

Los siguientes parámetros deben obtenerse en tiempo real.

#### 3.2.1 Fuerza y dirección del viento

El viento deforma la curva evolutiva típica y la modificación que sufre depende de la fuerza y dirección del viento con respecto al rumbo inicial del buque antes de iniciar la caída.

#### 3.2.2 Corrientes superficiales y marea

Cuando el buque se desplaza sobre una masa de agua animada de velocidad uniforme, su curva evolutiva conserva la forma típica sobre el fluido, pero varía con respecto al fondo, alargándose en el sentido en que la corriente fluye. La corriente variará la posición de la embarcación del lugar en que inicia la caída

#### 3.2.3 Posición y velocidad de otros blancos o áreas de peligro

La referencia del rumbo que poseen los otras embarcaciones y su velocidad permite conocer el vector de dirección y tiempos de contacto o varado.

### 3.3 SIMULACIÓN

Todos estos parámetros se pueden analizar con ayuda de simuladores. En concreto, el simulador NT PRO 5000 de Wärtsilä (ver Figura 4) emula el gobierno del barco en diferentes condiciones de navegación y el TECHSIM ERS5000 de Wärtsilä (ver Figura 5) emula la respuesta de un barco con varios modelos de propulsión y potencia.

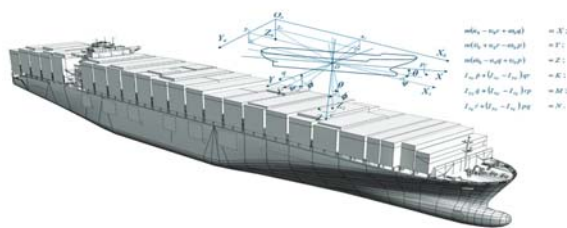


Figura 4: Software NT PRO 5000 (Imagen cedida por Wärtsilä)

El objetivo es conocer la respuesta ante diferentes escenarios y calcular los tiempos de reacción de los diferentes modelos. Esta información la tendrá en cuenta el algoritmo de control para predecir las

situaciones de peligro y poder proponer las acciones más adecuadas.



Figura 5: Modelos del Simulador ERS5000 TECHSIM de Wärtsilä

En la Figura 6 se observa la señal del RADAR y AIS a tiempo real. La información obtenida en pantalla permite al operador realizar un control del tráfico portuario aceptable, pero siempre dependerá del estado de estrés al que se vea sometido el operador y de las situaciones que se den en la zona portuaria.



Figura 6: Control portuario (imagen cedida por Prácticos de Valencia)

## 4 CONCLUSIÓN

La generación de modelos de la respuesta de diferentes embarcaciones, junto con la información en tiempo real, tanto meteorológica como del estado de los blancos obtenido por una combinación de dispositivos de ayuda a la navegación, son los elementos que permiten a los algoritmos de control de tráfico adelantarse a los acontecimientos que suponen riesgos a la vida humana y al medio ambiente, permitiendo:

- Aviso premonitorio de un peligro de abordaje.
- Recomendación de maniobra en caso de que el abordaje sea inminente para minimizar los daños.
- Obtención de tiempos de actuación a las autoridades (despliegue de barrera, *skimmers*, etc...) en caso de abordaje o varado para

minimizar daños al medio ambiente por derrame de hidrocarburo.

- Estimar los remolcadores necesarios para una maniobra dada en el puerto

Como líneas futuras de investigación se está trabajando en el desarrollo de un sistema neuronal de aprendizaje que nos permita, además de la información mencionada, tener en cuenta situaciones concretas como, por ejemplo, la pérdida de propulsión en una embarcación.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a Wärsilä y a Prácticos de Valencia la cesión de las imágenes.

### English summary

## DATA ANALYSIS FOR THE DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC VESSEL CONTROL SYSTEM IN A PORT AREA

### Abstract

*According to the latest report from the European Maritime Safety Agency, a large number of boating incidents with casualties occur at port facilities. To minimize the number of accidents, it is necessary to have efficient control algorithms that allow the operator to decide actions in real time. The main sources of data that allow an effective control of port control are presented. The advantages and disadvantages of the data supplied by the AIS and RADAR systems are discussed. Based on the safety requirements to avoid collisions, the main data related to the vessel and its environment that are relevant for an efficient algorithm of traffic control in ports are analyzed.*

**Keywords:** VTS (Vessel Traffic Service), AIS (Automatic Identification System), RADAR (Radio Detection and Ranging), simulation, maritime safety.

### Referencias

- [1] Abuín, E., “Pesqueros gallegos denuncian que hay barcos que navegan con el AIS apagado”, (2017), *La voz de Galicia*.
- [2] Agencia Europea de Seguridad Marítima (EMSA). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents* (2020)
- [3] Huang, Y., Linying, C., Negenborn, R.R., van Gelder, P.H.A.J.M (2020) “Collision Avoidance Systems for Maritime Autonomous Surface Ships Considering Uncertainty in Ship Dynamics”, *IFAC-PapersOnLine*, 53(2).
- [4] International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA) <https://www.iala-aism.org>
- [5] Last, P. (2016) *Analysis of Automatic Identification System Data for Maritime Safety*, PhD Thesis, Jacobs University, Bremen.
- [6] Organización Marítima Internacional (OMI), Convenio sobre el Reglamento internacional para prevenir los abordajes, 1972 (Reglamento de abordajes)
- [7] Organización Marítima Internacional (OMI), Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar, 1974 (Convenio SOLAS)
- [8] Ramsvik, H. (2001) “AIS as a tool for Safety of Navigation and Security - Improvement or not?” *Maritime Technology and Production Centre, Det Norske Veritas*
- [9] Silveira, P.A.M. Teixeira, A.P. and Soares C.G.. (2013) “Use of AIS Data to Characterise Marine Traffic Patterns and Ship Collision Risk off the Coast of Portugal”, *Journal of Navigation* 66(06).
- [10] Sotirov, S, Alexandrov, C. (2017) “Improving AIS reliability”, *IAMU Annual Conference*, Varna, Bulgaria
- [11] Stateczny, A., Lisaj, A., (2006) “Radar and AIS Data Fusion for the Needs of the Maritime Navigation”, *Radar Symposium*.
- [12] Torné, A., Martínez de Osés, F.X., Isalgué, A. pendiente de publicación.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# Hacia simulaciones realistas de agarre robótico submarino en el contexto del proyecto TWINBOT

Mario Ávila, Alejandro Solis, Raúl Marín-Prades, Pedro J. Sanz, José V. Martí  
 Universitat Jaume I de Castellón  
 al409457, asolis, rmarin, sanzpj, vmarti@uji.es

## Resumen

*El uso de tecnologías de videojuegos en las aplicaciones robóticas está siendo de gran ayuda tanto en el diseño de interfaces de usuario como en la implementación de servidores de simulación, que permitan un mayor realismo en las imágenes generadas por computador. Así mismo, cuando se procura realizar una simulación donde existe contacto de un brazo manipulador, como por ejemplo en tareas de peg-in-hole, estas tecnologías no están todavía suficientemente avanzadas. En este artículo describimos el estado actual de uno de los experimentos de simulación del proyecto TWINBOT, donde se procura realizar tareas de manipulación con tuberías, incluyendo recuperación, transporte e inserción. El sistema utiliza la nueva versión de la física de Unity, a través del objeto Articulation Body, el cual da un mayor grado de precisión en el cálculo de fuerzas tras una interacción robótica con un objeto. El escenario de la simulación es submarino, pudiendo apreciar el nivel actual alcanzado con este tipo de sistemas.*

**Palabras clave:** Simulaciones, Robótica Submarina, Manipulación, Interacción

## 1 INTRODUCCIÓN

El proyecto TWINBOT [5] tiene como uno de sus objetivos la exploración de nuevas técnicas de agarre, transporte y ensamblado cooperativo de tuberías con vehículos submarinos autónomos supervisados manipuladores. Para llevar a cabo los experimentos que den pie al cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto se dispone de dos vehículos G500 [4] y dos brazos manipuladores Reach Bravo 7 de Blueprint Robotics. Se trata de experimentos complejos, donde poner en marcha cada uno de los robots G500 de forma cooperativa conlleva un gran esfuerzo científico y humano.

El contar con un entorno de simulación es de gran importancia hoy en día en el ámbito de la robótica ya que puede ayudar a reducir la complejidad de los problemas que uno puede encontrar al hacer un experimento en un escenario real. Realizando

pruebas simuladas antes de pasar a un experimento real se pueden mitigar pérdidas económicas y de tiempo. En el campo de la robótica submarina existen algunos ejemplos de entornos de simulación. Uno de ellos, UWSim[3], es una herramienta de software abierto que sirve para simular y visualizar misiones de intervención submarinas. Otro ejemplo es el UUV Simulator[2], el cual es una extensión de Gazebo para escenarios subacuáticos que permite la simulación de múltiples vehículos submarinos y tareas de intervención utilizando manipuladores robóticos.

Recientemente los entornos de simulación actuales han ido avanzando enormemente gracias al esfuerzo de la industria de los videojuegos. Aún así, esta tecnología todavía no estaba pensando en potenciales aplicaciones de interacción y simulación con sistemas físicos. Poco a poco estas empresas han empezado a trabajar en esta línea, permitiendo entornos de simulación realista que puedan dotar de datos al aprendizaje de comportamientos autónomos, especialmente en la línea de la automoción.

A modo de ejemplo, Unity ha ofrecido el repositorio de código abierto "Unity Robotics Hub", el cual incluye la integración con ROS (Robot Operating System), importación de ficheros URDF, y su integración con la nueva versión de la física interna, la cual ya proporciona un objeto especialmente diseñado para la simulación de brazos robóticos, el ArticulationBody.

El propósito de esta publicación es mostrar la manera en que se puede utilizar la plataforma para desarrollo de videojuegos Unity para crear un entorno de simulación que pueda complementar/apoyar las tareas que se han llevado a cabo en el proyecto TWINBOT.

En la figura 1 se puede apreciar una escena simulada del escenario inicial del experimento.

## 2 ARQUITECTURA

El sistema que estamos presentando en este artículo sigue la arquitectura mostrada en la figura 2. Como podemos apreciar el sistema de simu-



Figura 1: Escenario inicial de simulación en el ámbito de la robótica cooperativa submarina (proyecto TWINBOT)

lación ofrece servicios via TCP, tanto a través de TCP como UDP.

Esta interfaz de comunicación permite la interacción con los scripts de la interfaz de usuario, que permite interactuar con el sistema de forma supervisada, recibiendo las imágenes de las cámaras, y creando nuevas trayectorias.

Precisamente, la planificación de las trayectorias es realizada a través del sistema MoveIt de ROS. MoveIt recibe la posición de las articulaciones de los brazos robóticos y calcula las nuevas posiciones articulares para poder ejecutar la trayectoria que lleve al efector final a la posición deseada. Finalmente, el nodo de la interfaz se encarga de enviar estas nuevas posiciones a los brazos a través de comandos TCP.

### 3 INTERFAZ DE USUARIO

La interfaz de usuario del sistema que se presenta en este artículo está implementada con Python, usando la librería de widgets gráficos TKinter, e interactuando con el simulador y planificador de trayectorias MoveIt a través del sistema ROS y TCP/IP.

Como podemos apreciar en la figura 3, el sistema permite monitorizar el estado de las cámaras remotas, controlar el robot de forma manual, y establecer las coordenadas del efector final del manipulador.

La supervisión y control del planificador MoveIt puede realizarse también haciendo uso del visualizador ROS Rviz, tal cual se puede apreciar en la figura 4. Este permite establecer de forma manual la posición deseada del efector final o de las distintas articulaciones del robot y visualizar la

trayectoria calculada antes de que esta sea ejecutada.

### 4 SIMULACIÓN

En este apartado se presentan los pasos realizados por el sistema robótico semi-autónomo, desde la posición inicial, los primeros movimientos del robot manipulador, la aproximación, y el agarre final.

Para llevar a cabo el agarre de la tubería es necesario realizar un aproximamiento inicial que sitúe al robot móvil sobre el centro de gravedad de la misma. Para ello se ha implementado un servocontrol visual encargado de realizar una primera aproximación a la tubería. Con el fin de realizar este control, es necesario extraer la tubería de la imagen y tras esto, obtener características necesarias para el control.

Dado que es conocido el color de la tubería, a partir de la imagen capturada por la cámara del manipulador, se extrae el canal de saturación de esta, ya que es el que presenta un mayor contraste entre el objeto y el fondo de la escena (imagen 5 b)). Tras esto se realiza una umbralización del canal S y se descartan todas las regiones buscando al de mayor excentricidad (5 c)). De este modo se eliminan las regiones parasitas asegurando que el único objeto identificado sea la tubería. A pesar del ruido introducido en la imagen por la simulación del entorno marino, este algoritmo permite extraer la tubería a una distancia de hasta 7,5 metros de altura. Para asegurar la facilidad de uso, la interfaz gráfica resalta con un rectángulo rojo la tubería una vez detectada. Es responsabilidad del operario manipular al robot de forma manual hasta que se encuentre a distancia sufi-

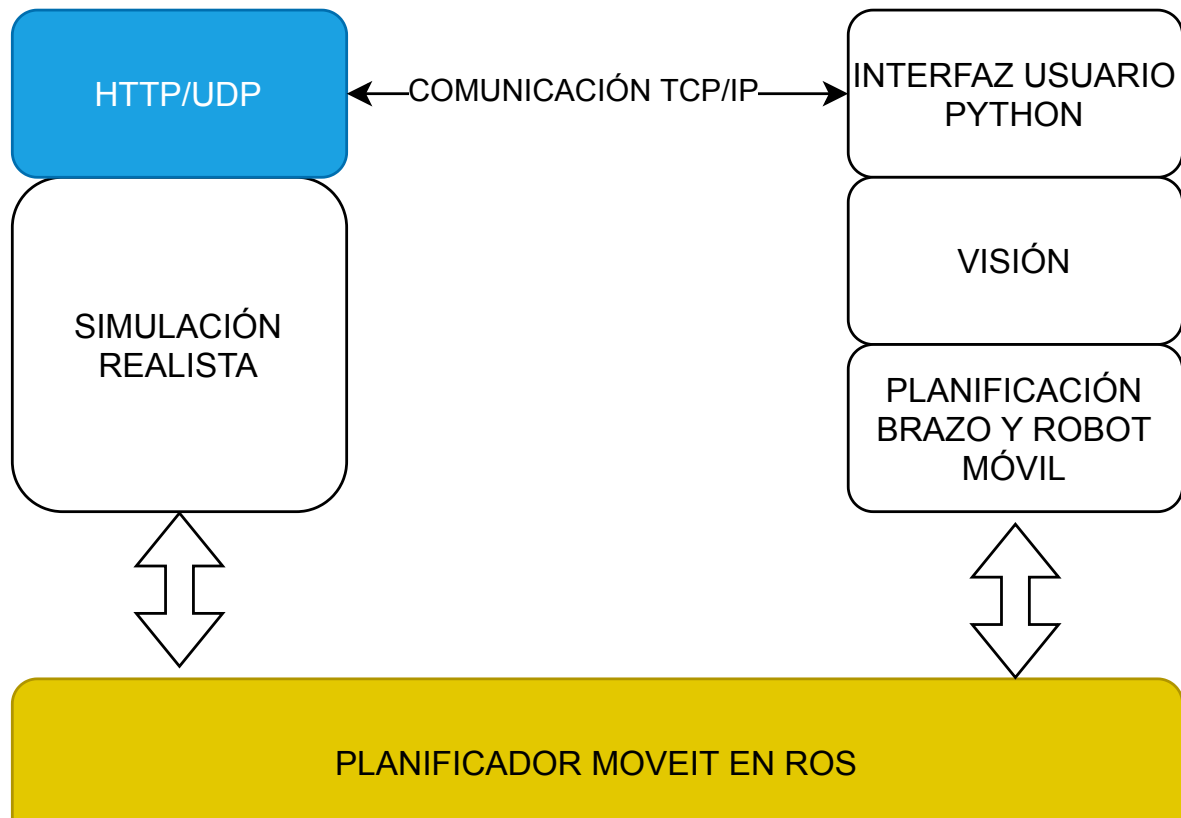


Figura 2: Arquitectura del Experimento de simulación

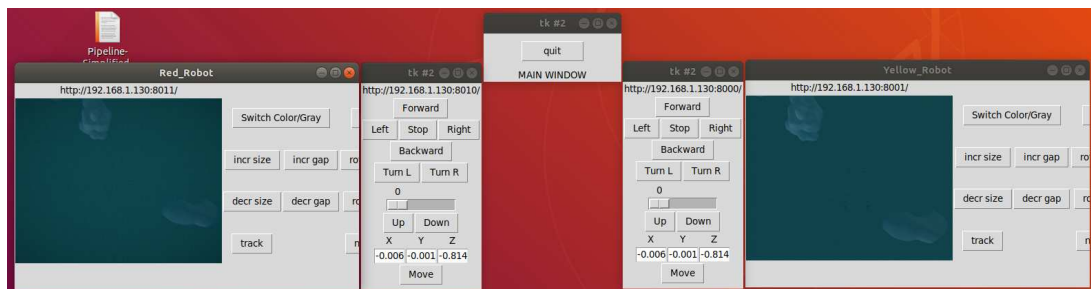


Figura 3: Interfaz de control de la planificación del robot manipulador móvil y la supervisión del estado de las cámaras



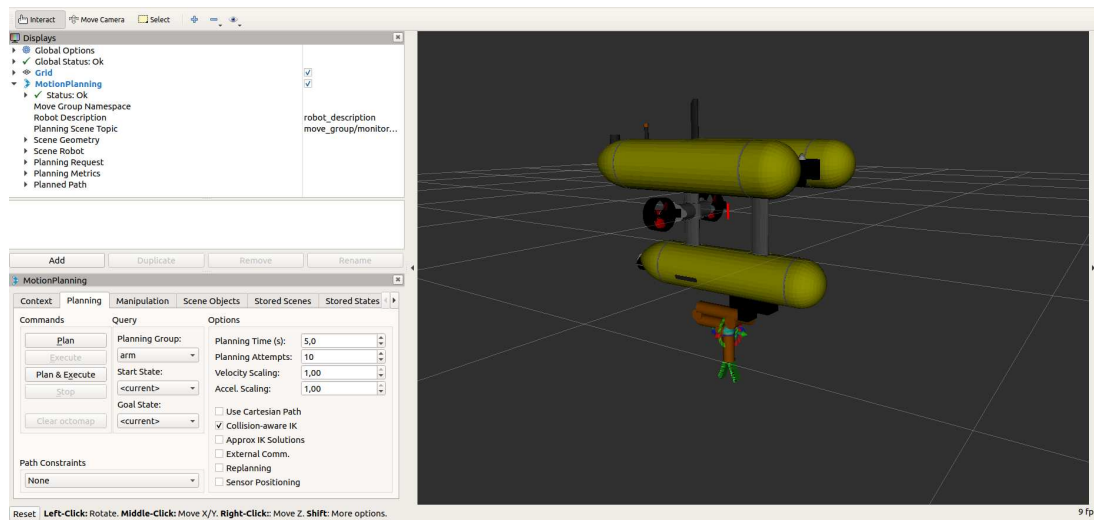


Figura 4: Escenario inicial de simulación en el ámbito de la robótica cooperativa submarina (proyecto TWINBOT)

ciente como para detectar la tubería.

Conocidas las dimensiones y el color de la tubería, puede extraerse de la imagen las características necesarias para el control tal y como se muestra en la imagen 5 d). A través de librerías de visión artificial como OpenCv, puede extraerse las coordenadas del centroide de esta. Este centroide se utilizará como aproximación del centro de masas del objeto y como punto de referencia para la tarea de servocontrol. A partir del primer autovector del eje de mínima inercia de la tubería, puede obtenerse el ángulo que forma la tubería con el eje x de la cámara.

La última característica necesaria para realizar el control por visión, es la distancia Z entre la cámara y el objeto. Si bien no es posible obtener la posición exacta del objeto con una única cámara, conociendo los parámetros intrínsecos de esta y las dimensiones del objeto, puede estimarse la distancia por triangulación, tal y como se explica en la ecuación 1.

$$Z(mm) = \frac{f(mm) * rl(mm) * height(pxls)}{ol(pxls) * sensheight(mm)} \quad (1)$$

Siendo  $rl$  el largo real del objeto,  $im$  la altura de la imagen en píxeles,  $ol$  la longitud del objeto en píxeles de la imagen y  $sens height$  la altura del sensor de la cámara.

Para el control de aproximación a la tubería se ha decidido realizar un servocontrol visual 2-1/2D ya que tal y como se explica en [1], esta forma de servocontrol permite desacoplar el control de posición lineal del control de posición angular. Además, este algoritmo soluciona las principales desventa-

jas de las técnicas de servocontrol 2D y 3D, presentando un mayor ratio de convergencia que los controles basados en la imagen y una menor posibilidad de perder el objetivo que los controladores espaciales. La librería Visp facilita el diseño de la ley de control, siendo necesario únicamente extraer la posición del objeto relativo a la cámara en el plano imagen, la orientación y la distancia del objeto a la misma, y especificar la posición final deseada. Si bien el sistema de control calcula la velocidades necesarias para alcanzar la tubería respecto al sistema de referencia de la cámara. Es conocida la relación entre la cámara y el centro de gravedad de los Girona500 en cada momento, por lo que puede aplicarse un cambio en el sistema de referencia (ecuación 2).

$$\dot{r} = \begin{bmatrix} {}^G V \\ {}^G W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^G R_c V_c - {}^G R_c W_c \times {}^G T_c \\ {}^G R_c W_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

De esta forma, se obtienen las velocidades lineales y angulares necesarias para mover la cámara del robot a la posición deseada respecto al objeto.

Debido a las dimensiones del objeto, el servocontrol visual no puede aproximar al Girona 500 a menos de 2 metros de distancia de este, ya que no se podría captar la tubería en su totalidad en la imagen y se perdería la referencia. Por ello, una vez situado perpendicularmente sobre la tubería una corta distancia, se desactiva el servocontrol y se realiza un desplazamiento descendente con el Girona500 hasta que la tubería entre en el espacio de trabajo efectivo del robot. Esto se comprueba a través de un sensor laser situado en el efector final. Al realizarse el movimiento en una distancia tan corta (de menos de 2 metros)

se supone que el robot no se desviará lo suficiente del punto de referencia como para imposibilitar el agarre.

Una vez en el espacio de trabajo efectivo del manipulador, se realiza un movimiento del efector final hacia el objeto y se realiza el agarre de la tubería.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado por el equipo del CIRTESU, "Centro de Investigación en Robótica y Tecnologías Subacuáticas" de la Universidad Jaume I, y financiado por los proyectos DPI2017-86372-C3 (TWINBOT), IDIFEDER/2018/013 (GV), UJI-B2018-34 (NEPTUNO), PID2020-115332RB-C31 (COOPERAMOS), y el proyecto H2020-Peacetolero-NFRP-2019-2020-04.

### English summary

## TOWARDS REALISTIC SIMULATIONS OF UNDERWATER ROBOTIC GRASPINGS IN THE CONTEXT OF THE TWINBOT PROJECT

### Abstract

*The use of video game technologies in robotic applications is being of great help both in the design of user interfaces and in the implementation of simulation servers, which allow greater realism in computer-generated images. Likewise, when trying to perform a simulation where there is contact of a manipulator arm, such as in peg-in-hole tasks, these technologies are not yet sufficiently advanced. In this article we describe the current state of one of the simulation experiments of the TWINBOT project, which attempts to carry out handling tasks with pipes, including recovery, transport and insertion. The system uses the new version of Unity physics, through the Articulation Body object, which gives a greater degree of precision in the calculation of forces after a robotic interaction with an object. The simulation scenario is underwater, being able to appreciate the current level reached with this type of system.*

**Keywords:** Simulations, Marine

## Robotics, Manipulation, Interaction

### Referencias

- [1] E. Malis, F. Chaumette, and S. Boudet. 2 1/2 d visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(2):238–250, 1999.
- [2] M. M. M. Manhães, S. A. Scherer, M. Voss, L. R. Douat, and T. Rauschenbach. Uuv simulator: A gazebo-based package for underwater intervention and multi-robot simulation. In *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, pages 1–8, 2016.
- [3] M. Prats, J. Pérez, J. J. Fernández, and P. J. Sanz. An open source tool for simulation and supervision of underwater intervention missions. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2577–2582, 2012.
- [4] D. Ribas, P. Ridao, L. Magí, N. Palomeras, and M. Carreras. The girona 500, a multi-purpose autonomous underwater vehicle. In *OCEANS 2011 IEEE - Spain*, pages 1–5, 2011.
- [5] R. Pi, P. Cieslak, P. Ridao, and P. J. Sanz. Twinbot: Autonomous underwater cooperative transportation. *IEEE Access*, 9:37668–37684, 2021.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



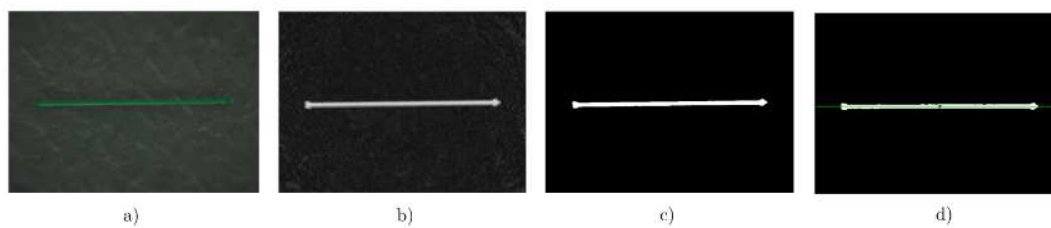


Figura 5: Proceso de segmentación y extracción de características de la tubería. a) Imagen original; b) Canal de saturación; c) Binarización y eliminación de regiones parasitas; d) obtención del centroide y el eje de mínima inercia

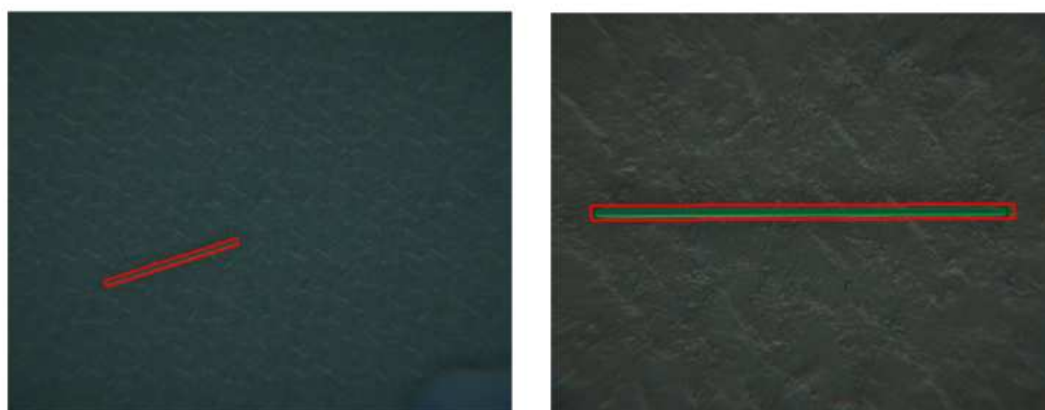


Figura 6: (Izquierda) Posición inicial del control visual. (Derecha) Posición final del control visual.

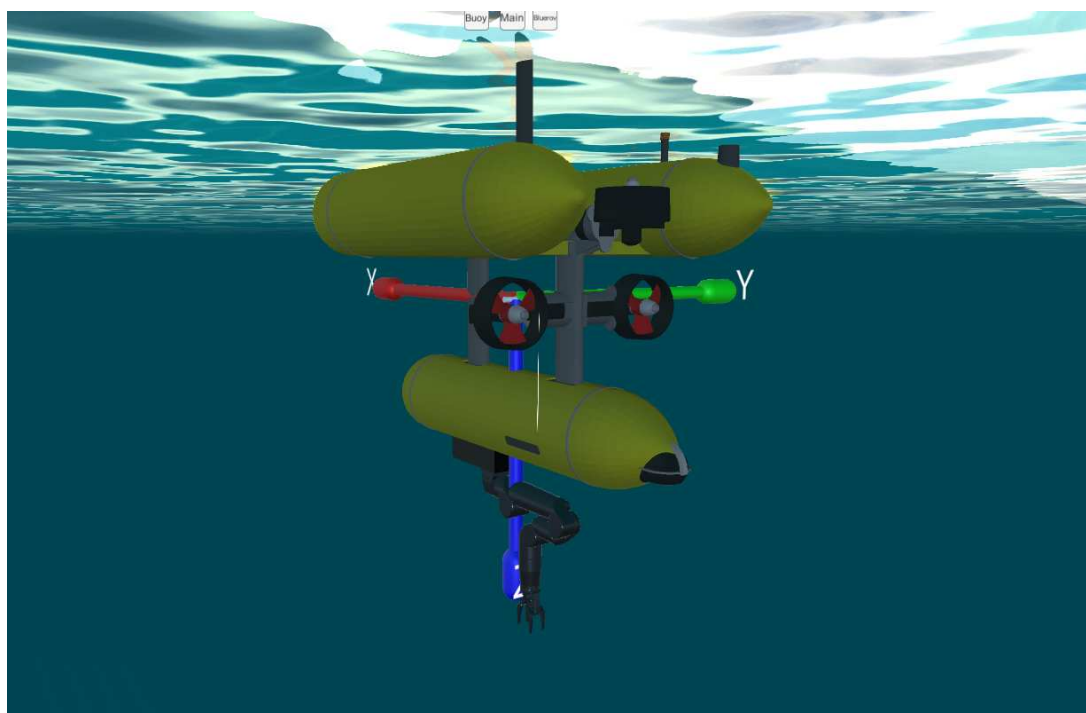


Figura 7: Posición inicial del robot como preparación del experimento de agarre de la tubería

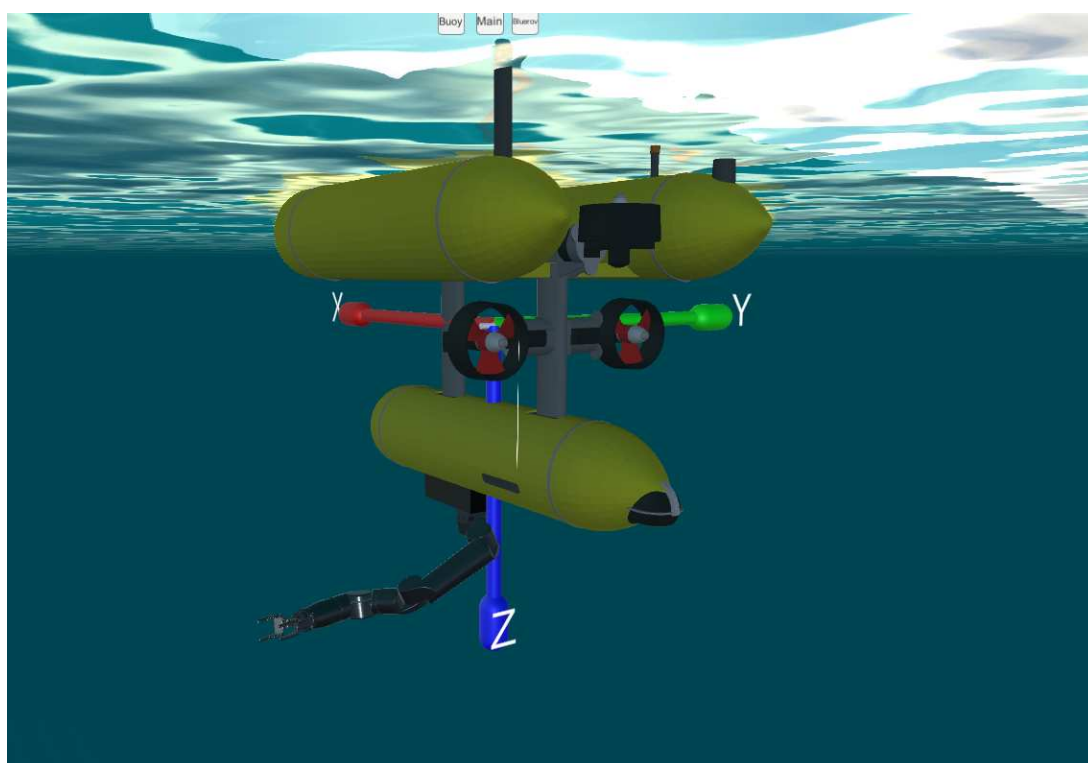


Figura 8: Primera prueba de planificación de movimiento del brazo manipulador



Figura 9: Aproximación a la tubería



Figura 10: Contacto con la tubería: Vista Superior



Figura 11: Contacto con la tubería: Vista Frontal



Figura 12: Agarre realizado correctamente

# DISPOSITIVO DE MONITORIZACIÓN POSTURAL PARA PERSONAS DE LA TERCERA EDAD CON ALTO GRADO DE SEDENTARISMO

Patrick Vermander Nerea Perez Aitziber Mancisidor Itziar Cabanes  
{patrick.vermander, nerea.perez, aitziber.mancisidor, itziar.cabanes }@ehu.eus

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,  
Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU

## Resumen

*La monitorización postural en personas de la tercera edad es fundamental para evitar la aparición de problemas músculo-esqueléticos, así como la prevención de situaciones de riesgo y caídas. En este trabajo, se presenta un dispositivo de monitorización compuesto por 16 sensores FSR (Force Sensitive Resistor), colocados de forma discreta a lo largo del asiento y respaldo de una silla. La selección de la ubicación de estos sensores se ha llevado a cabo mediante un estudio previo, donde se han identificado los puntos más significativos. Para validar el dispositivo de monitorización, se han realizado diferentes ensayos experimentales donde se han comparado los resultados obtenidos mediante el dispositivo propuesto con los medidos con una malla de presión comercial. Los resultados muestran que las posturas presentadas quedan correctamente caracterizadas mediante el sistema propuesto, reduciendo el coste del sistema y aumentando su autonomía.*

**Palabras clave:** Análisis Postural; Monitorización; Sedentarismo; Sensores de Fuerza.

## 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas se ha producido un fenómeno de envejecimiento de la población a nivel mundial, donde las personas con una edad superior a 65 años suponen ya una décima parte de la población total [19]. En el caso de la población española, el número de mayores se ha duplicado en menos de 30 años [1]. Las perspectivas de futuro son aún más pesimistas, y sitúan en 2050 a España como el país más envejecido del mundo, debido entre otros factores, a la cada vez mayor esperanza de vida, y a la baja tasa de natalidad.

Junto con el aumento de la población envejecida y el impacto que ésta supone, aparece implícitamente un aumento de los comportamientos sedentarios [7]. Se estima que el 67% de la población mayor de 65 años pasa una media diaria de 8.5 horas en actitud sedentaria [18]. Esta actitud sedentaria afecta negativamente en el estado físico

y mental de las personas mayores, empobreciendo su calidad de vida [4].

El debilitamiento muscular a causa del sedentarismo y la edad, puede provocar la adopción de malas posturas en sedestación [5]. Lo que puede llevar a generar dolores de espalda, hombros y cuello, tensión muscular, caídas y problemas nerviosos como ciática entre otros [21, 20]. Es por ello necesario, mantener una correcta salud postural con el fin de prevenir posibles trastornos músculo esqueléticos, especialmente en un colectivo físicamente tan vulnerable.

En la actualidad, dada la imposibilidad de que los especialistas sanitarios realicen un seguimiento continuado, la monitorización y diagnóstico postural se lleva a cabo mediante cuestionarios específicos a rellenar por el paciente. Tratando de eliminar el componente subjetivo característico de estos cuestionarios, en los últimos años, ha crecido el interés entorno al desarrollo de dispositivos de monitorización postural que permitan cuantificar de forma objetiva el estado postural de un paciente. Estos dispositivos se pueden clasificar en tres grupos en función de cuan invasiva es la tecnología utilizada para la medición: sensores vestibles, sensores de visión y sensores de presión o fuerza.

Los dispositivos de monitorización basados en sensores vestibles hacen uso de sensores incorporados sobre la vestimenta o el propio cuerpo para recopilar información de una forma continua a lo largo del día. Dentro de este grupo, destaca la utilización de sensores inerciales IMU (Inertial Measurement Unit) para la medición de diferentes ángulos de desviación de la espina dorsal, tanto en el plano sagital como en el plano coronal [5, 6, 8]. Sin embargo, este tipo de sensores, además de resultar muy invasivos para el usuario, pueden sufrir interferencias debido al contacto entre el sensor y la ropa o el sensor y el cuerpo humano.

Es por ello, que otros autores han optado por la utilización de cámaras de visión para la monitorización postural [2, 16, 12]. Con el uso de las cámaras se busca hallar la localización de puntos de referencia del cuerpo humano que den idea de la disposición general de la postura adoptada. Pese



a no tratarse de un sistema invasivo para el usuario, presenta una serie de limitaciones que hacen que su uso no proporcione la información suficiente para la caracterización postural. Entre estas limitaciones destacan su rango de acción limitado, así como las imprecisiones debidas a oclusiones en la imagen tomada.

En último lugar, se encuentran los sensores de presión o fuerza, que, ya sean conductivos en formato textil [14, 10] o resistivos [13, 11], se disponen a lo largo de la superficie de apoyo tanto en asiento como respaldo, permitiendo cuantificar la presión ejercida sobre ellos. Este tipo de sensores no son invasivos al estar situados sobre una superficie externa, y permiten una cierta portabilidad. Existen en la actualidad mallas de presión comerciales, que permiten monitorizar la actividad postural, como el sistema BPMS de Tekscan Inc [3] o el Seating Mat Dev Kit de Sensing Tex [17]. Sin embargo, estas soluciones disponen de un número excesivo de sensores, lo que hace que sean caros y de un tiempo de uso limitado. Además, al tratarse de soluciones cerradas, el almacenamiento y acceso de datos es limitado.

Ante esta situación, y con la idea de reducir el número de sensores utilizados, en este artículo se presenta un dispositivo de monitorización postural de bajo coste. En este dispositivo, con el fin de realizar una caracterización postural adecuada, se han colocado 16 sensores de fuerza FSR (Force Sensitive Resistor) en puntos significativos del asiento y respaldo de una silla.

El resto del artículo se organiza de la siguiente forma. En la sección 2, se realiza un análisis postural para detectar los puntos significativos donde se colocarán los sensores FSR. En la sección 3, se describe el dispositivo de monitorización postural desarrollado. En la sección 4, se detalla la validación del dispositivo. Por último, en la sección 5, se resumen las ideas más importantes extrayendo las conclusiones más relevantes.

## 2. ANÁLISIS POSTURAL

Con el fin de monitorizar la postura del usuario de forma adecuada, en esta sección se realiza un análisis postural que permita detectar los puntos más relevantes donde se colocarán los sensores de fuerza FSR.

Con el objetivo de realizar este análisis, se han seleccionado 12 posturas que se dan con frecuencia durante la vida diaria [15] (Tabla 1). En la figura 1 se muestra una representación visual de cada una de estas posturas, de cara a facilitar la comprensión de las mismas.

Tabla 1: Numeración de posturas de sedestación

Nº	Postura
1	Postura correcta
2	Inclinación hacia la derecha
3	Inclinación hacia la izquierda
4	Inclinación hacia adelante
5	Inclinación hacia atrás
6	Pierna derecha cruzada sobre izquierda
7	Pierna izquierda cruzada sobre derecha
8	Postura 6 + Glúteos adelante
9	Postura 7 + Glúteos adelante
10	Hipercifosis
11	Sentarse en el borde del asiento
12	Borde del asiento, espalda atrás

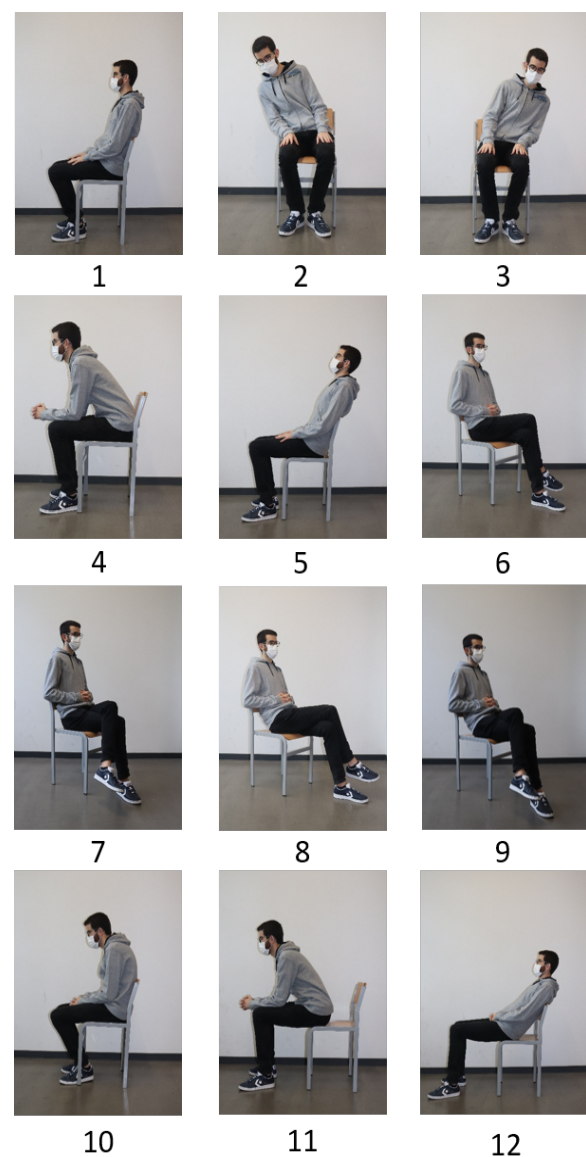


Figura 1: Representación visual de posturas de sedestación objeto de estudio

Para la selección de los puntos significativos, se han realizado ensayos con diferentes personas sanas y jóvenes en las 12 posturas de sedestación detalladas en la tabla 1. Para monitorizar los ensayos, se han usado dos mallas comerciales Seating Mat Dev Kit de Sensing Tex que se han colocado tanto en el asiento como en el respaldo una silla. Se trata de un mallado comercial, compuesto por 256 sensores de presión distribuidos en una matriz de 16x16 [17]. Estas mallas vienen equipadas con su propio software de interpretación de datos que se utiliza para la selección de puntos de interés.

Una vez realizado los ensayos, para cada una de estas posturas, y mediante el software de la malla comercial, se han determinado los puntos más significativos. Se consideran como puntos significativos, por una parte, aquellos puntos en los que la presión ejercida aumenta con respecto a la postura correcta (Postura 1), y por otro lado, aquellos puntos donde la presión disminuye en gran medida con respecto a la postura correcta.

Este software representa mediante una escala de colores el rango de presiones que se miden en ella, dibujando en azul los puntos donde menor presión se detecta, posteriormente en verde las zonas con una presión superior, para acabar con un amarillo y naranja en las zonas donde más presión se ejerce.

A continuación, se muestran alguna de estas posturas para ilustrar el procedimiento llevado a cabo, donde se han representado mediante cruces rojas aquellos puntos donde la presión es más significativa para esa postura, y mediante puntos verdes, aquellos puntos donde se detecta una ausencia de presión con respecto a la postura correcta.

El punto de partida es la denominada postura correcta (Postura 1). Se trata de la postura que se desea que el usuario mantenga durante una mayor parte del tiempo, con ligeras modificaciones para evitar la aparición de úlceras.

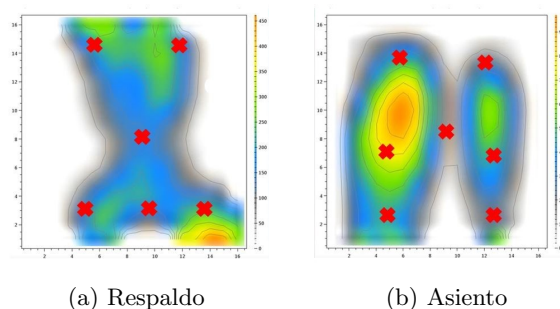


Figura 2: Distribución de presiones Postura 1: Postura correcta

En las figuras 2a y 2b se representa la distribución de presiones de respaldo y asiento en la posición correcta (Postura 1). Tal y como se aprecia la es-

palda se mantiene recta, con los hombros echados hacia atrás, y apoyado sobre la zona lumbar. Por lo general, se trata de una postura en la que no se alcanzan grandes distribuciones de presión sobre el respaldo. Además, en el asiento, se distribuye el peso entre ambas caderas, con tendencia a apoyar más sobre un muslo que en otro. Esta postura no aporta excesiva información de la localización donde se tienen que ubicar los sensores, dado que la distribución de peso es uniforme a lo largo de las superficies de apoyo, pero sirve como base de partida para el posterior análisis del resto de posturas.

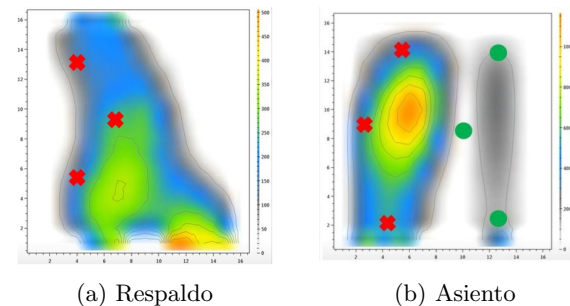


Figura 3: Distribución de presiones Postura 2: Desplazamiento lateral.

Por otra parte, en las figuras 3a y 3b se muestra la distribución de presiones para la simulación de una caída lateral (Postura 2). De estos ensayos, se deduce que se produce un aumento de presión en la zona de los muslos hacia el lado donde se está realizando la caída, mientras que se reducen en el lateral opuesto. Es necesario, colocar sensores en los laterales del asiento, que permitan monitorizar esos desplazamiento laterales. Estos sensores laterales deben colocarse a la altura de los isquiones, para monitorizar la zona donde se acumula la mayor presión sobre el asiento.

En el respaldo, se produce un comportamiento similar, los puntos de presión iniciales se encuentran en el centro del respaldo. A medida que se desplaza la espalda, los puntos de presión se concentran en el lateral hacia donde se está produciendo la caída. Además, es necesario que estos sensores laterales se encuentren situados a diferentes alturas, puesto que a medida que esta inclinación se hace más pronunciada, el peso se concentra en la esquina inferior izquierda del cuadrante. Esta diferencia de alturas, permite conocer el grado de inclinación de la caída. Es imprescindible, por tanto, disponer de al menos dos sensores a cada lado, dispuestos a diferentes alturas para monitorizar estos desplazamientos laterales.

Al igual que se analizan las caídas laterales, se hace un estudio de los desplazamientos frontales (Postura 4). Para ello, en las figuras 4a y 4b, se



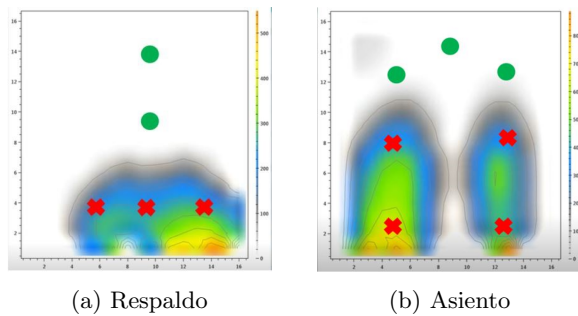


Figura 4: Distribución de presiones Postura 4: Inclinación hacia adelante.

representan la distribución de presiones obtenida al realizar una inclinación frontal. En estas distribuciones se observa como el participante deja de realizar presión (representado mediante puntos verdes en la imagen) a lo largo de los glúteos y ésta se traslada a las piernas, concentrándose a la altura de los bíceps femorales. En consecuencia, es necesario monitorizar esta variación de presión mediante la colocación de sensores a la altura de los isquiones y coxis.

En cuanto al respaldo, la presión se concentra en la zona inferior del respaldo. Es necesario mantener al menos un sensor en esa zona lumbar, que permita distinguir una inclinación frontal y una ausencia de contacto en el respaldo.

### 3. DISPOSITIVO DE MONITORIZACIÓN POSTURAL

A partir del análisis realizado en el apartado anterior, y extendido para el resto de posturas, se ha concluido que para la monitorización de las 12 posturas definidas es suficiente con el uso de 8 sensores en el asiento y 8 sensores en el respaldo, sumando un total de 16 sensores de fuerza distribuidos de forma discreta.

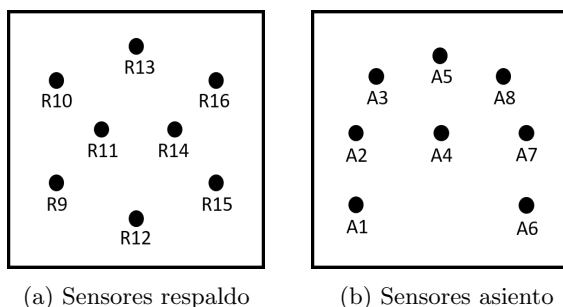


Figura 5: Distribución de sensores del Dispositivo de Monitorización Postural

El diseño del respaldo se muestra en la figura 5a. La mayor parte de los sensores se disponen en la

zona central, para la monitorización de la espina dorsal. Se disponen a diferentes alturas para monitorización de diversas partes de la espalda. De esta forma, el sensor R12 se encarga de monitorizar la lumbar, los sensores R11 y R14 la zona dorsal inferior y el sensor R13 la zona dorsal superior y cuello. Además, tal y como se ha comentado, se disponen de cuatro sensores adicionales, dos a cada lado, para la monitorización de desplazamientos laterales. Estos sensores son, concretamente, los sensores R9 y R15 para monitorizar las desviaciones sobre la zona lumbar y los sensores R10 y R16 para monitorizar las inclinaciones a la altura de los omoplatos.

El diseño del asiento se muestra en la figura 5b. Los sensores A1 y A6 están ubicados de forma que se lleve a cabo la monitorización de los bíceps femorales, y conjuntamente con el sensor A4, situado sobre el perineo, permite la detección de desplazamientos frontales sobre el asiento. Los sensores A2 y A7, ubicados sobre los glúteos mayores, junto con los sensores A3 y A8, colocados sobre los isquiones, permiten monitorizar los desplazamientos tanto laterales como longitudinales. Por último, el sensor A5, permite monitorizar la zona junto al coxis.

Con la localización de los sensores definida, se ha diseñado un prototipo de bajo coste para monitorización postural, utilizando para ello 16 sensores FSR 400 del fabricante Intelink Electronics [9]. La adquisición de los datos de estos sensores se ha realizado mediante una placa de control inalámbrica Arduino MEGA 2560, alimentada por una batería externa que proporciona un uso superior a las 24 horas. De esta forma, los datos se envían a través de bluetooth a un ordenador externo, donde se aloja una interfaz intuitiva que representa en tiempo real la presión ejercida sobre cada uno de los sensores, facilitando la visualización.

### 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para validar el diseño del prototipo propuesto, se han llevado a cabo ensayos experimentales con personas sanas, a los que se les ha vuelto a pedir que realizaran cada una de las posturas definidas en la tabla 1. Por tanto, se trata de un ensayo similar al anterior, pero en esta ocasión, además del uso de las mallas comerciales Seating Mat Dev Kit, se hace uso del prototipo de monitorización postural basado en sensores FSR. De esta forma, se puede realizar un análisis comparativo entre ambos sistemas de medición, permitiendo así, demostrar la efectividad del método de monitorización postural de bajo coste propuesto.

De cara a analizar la validación realizada, se presentan a continuación en más detalle la comparativa realizada para las posturas 1, 5, 4 y 3 definidas en la tabla 1.

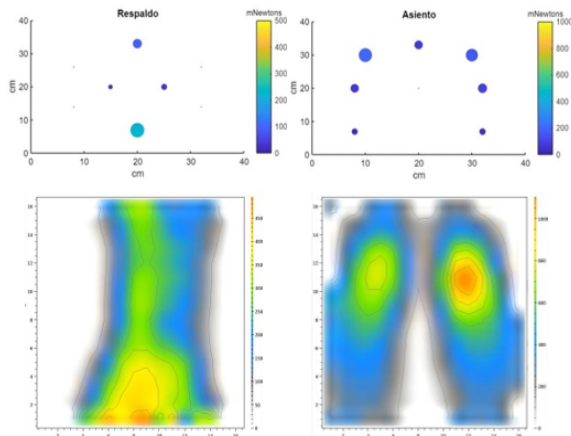


Figura 6: Postura 1: Postura correcta

En la figura 6 se muestran los resultados de la postura correcta (Postura 1). En la zona superior de la figura se representan los resultados obtenidos mediante el prototipo propuesto, y en la zona inferior la distribución de presiones obtenida mediante las mallas de presión comerciales. Para facilitar la interpretación de los datos obtenidos mediante el prototipo presentado, se ha incluido una variación en tamaño de los puntos mostrados, proporcional a la fuerza aplicada. Además, se aplica una escala de colores que abarca desde un azul oscuro para las fuerzas más bajas, hasta un amarillo para las mayores fuerzas medidas.

En la postura correcta, tal y como se ha explicado previamente, se mantiene la espalda recta apoyada en el respaldo. Esta rectitud se ve plasmada en el dispositivo presentado, distribuyéndose el peso sobre los cuatro sensores del respaldo situados en el eje de simetría, R11, R12, R13 Y R14. Además, reparando la atención a la magnitud de las presiones, se puede concluir que corresponden con las medidas tomadas por la malla comercial, e indican cierto arqueamiento de la columna, siendo la zona lumbar donde mayor fuerza se realiza.

Por otra parte, el peso se distribuye uniformemente a lo largo de los sensores del asiento. Se observa, cómo la ubicación de los sensores A3 y A8 se ha hecho de forma óptima, ya que, se buscaba colocarlos sobre los isquiones, zona donde se producen mayores fuerzas. Tal y como se comprueba, esta zona se ha caracterizado correctamente mediante estos sensores. El resto de sensores, van disminuyendo la fuerza medida a medida que se alejan de estos dos puntos.

En la figura 7, se presentan los resultados obteni-

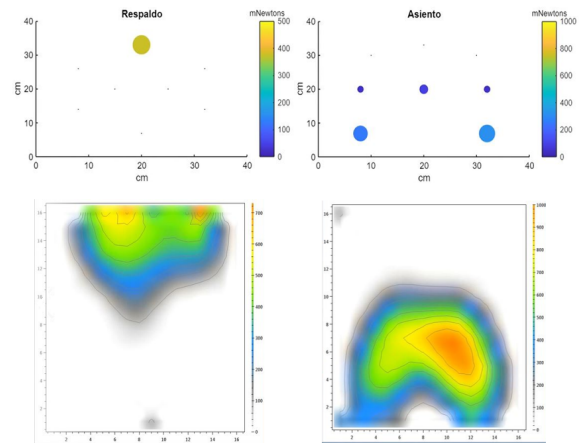


Figura 7: Postura 5: Inclinación hacia atrás

dos para la Postura 5. En esta postura, se inclina la espalda hacia atrás, apoyando el peso en la zona superior del respaldo, aumentándose por tanto, la fuerza medida en esa zona. Además, para facilitar esta inclinación, se desplazan los glúteos en el asiento ligeramente hacia adelante.

Esta postura, queda representada correctamente mediante los sensores discretos. En el asiento, existe un desplazamiento de la fuerza hacia la mitad delantera, mientras que la zona trasera se queda sin presión. La colocación de los sensores A3, A5 y A8, que permiten percibir esta ausencia de fuerza, conjuntamente con el sensor A2, A4 y A7 permiten caracterizar el desplazamiento en el asiento. La magnitud de este último grupo de sensores permite, además, cuantificar el grado de desplazamiento, llegando a una situación en la que no devuelven ningún valor de fuerza. Se trata de la situación en la que el usuario realiza la postura 12 de la tabla 1, y está completamente reclinado hacia adelante.

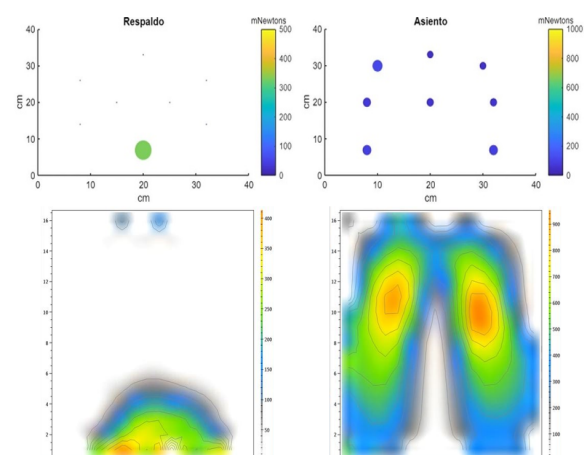


Figura 8: Postura 4: Inclinación hacia adelante

La caracterización del asiento de la postura 4, representada en la figura 8, es similar a la de la pos-

tura correcta, con ligeros cambios. Se mantiene una distribución uniforme a lo largo de todo el asiento, pero en esta ocasión la fuerza ejercida sobre los sensores A3 y A8 no es tan pronunciada, dado que el centro de masas de la espalda se desplaza hacia adelante. Esta es la misma razón, por la cual, el sensor A4, colocado a la altura del perineo y que en la postura correcta no realiza ninguna lectura, pasa a medir fuerzas. Este sensor sirve, por lo tanto, como indicador para monitorizar la inclinación delantera de la espalda.

La información del asiento viene acompañada por la del respaldo, donde el único sensor que mide fuerza es el R12 sobre la zona lumbar. Se recalca la importancia de la ubicación de este sensor, puesto que, de no ubicarse ahí, no se podría diferenciar un desplazamiento de los glúteos de una inclinación frontal de la espalda.

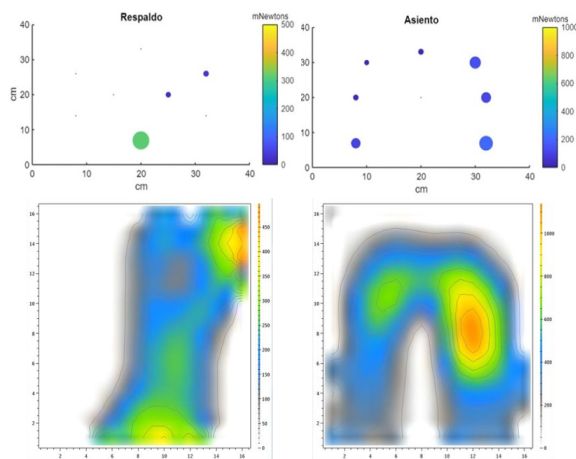


Figura 9: Postura 3: Inclinación hacia la izquierda

En último lugar, en la figura 9 se presentan los resultados para la Postura 3. En esta postura, se pretende caracterizar un desplazamiento hacia la izquierda de la espalda, para prevenir caídas laterales. La curvatura de la espalda queda perfectamente definida por los sensores R12, R14 y R16, quedando definida la dirección del desplazamiento. Además, mediante el sensor R15, situado en la zona lumbar izquierda, se puede monitorizar cuan pronunciada es la inclinación realizada.

En cuanto a la situación del asiento, la posición de los glúteos no varía con respecto a la posición correcta. Sin embargo, a medida que se inclina la espalda hacia una lateral, el centro de masas de estas se modifica, y queda reflejado en el asiento, mediante un aumento generalizado de las fuerzas medidas mediante los sensores de dicho lado.

Resumiendo, tras un estudio individualizado para cada una de las 12 posturas definidas, se puede concluir que cada una de ellas queda correctamente caracterizada por 16 sensores dispuestos en po-

siciones relevantes identificadas en este artículo. Por lo tanto, se concluye que es posible monitorizar estas posturas sin necesidad de hacer uso de un elevado número de sensores, consiguiendo simplificar el dispositivo de medición, reduciendo los costes y aumentando su autonomía.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha presentado un dispositivo de bajo coste para monitorizar la postura en sedestación, enfocado a personas de la tercera edad. En este dispositivo se hace uso de sensores de fuerza, dejando al margen las mallas de presión.

Con el fin de reducir el número de sensores utilizados, pero sin que ello repercuta en una pérdida de información, se ha realizado un análisis postural con personas jóvenes y sanas. Este análisis ha permitido definir un total de 16 puntos relevantes, 8 en el asiento y 8 en el respaldo.

Sobre estos puntos, se ha desarrollado un primer prototipo compuesto por 16 sensores FSR ubicados en los puntos óptimos previamente identificados. Mediante la realización de nuevos ensayos, se ha validado el diseño propuesto y se ha concluido que el conjunto de puntos seleccionados permite caracterizar de forma adecuada cada una de las posturas definidas.

Por lo tanto, el dispositivo de monitorización postural propuesto permite llevar un seguimiento eficiente, en tiempo real, del estado postural de los pacientes, reduciendo el coste del hardware, así como aumentando su autonomía. Además, al trabajar con un número menor de datos, se simplifica el almacenamiento y análisis de los mismos. Esto, permitirá dar soporte a los especialistas sanitarios, proporcionándoles información objetiva del estado de los pacientes, así como detectar patrones de comportamiento, situaciones anómalas y caídas.

En trabajos futuros se pretende seguir trabajando en la línea de monitorización y diagnóstico postural. Así, se pretenden realizar ensayos experimentales de mayor duración, que permitan entre otras cosas, comprobar la robustez del sistema ante cambios de temperatura. Además, se pretende incorporar técnicas inteligentes que permitan la detección de posturas, así como patrones de comportamiento postural de los usuarios, que permitan dar idea del estado de éstos, todo ello mediante las mediciones realizadas con el dispositivo propuesto.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por: FEDER/Ministerio de Ciencia e Innovación - Agencia Estatal de Investigación/Proyecto PID2020-

112667RB-I00, la Universidad del País Vasco UPV/EHU (GIU19/045), así como por el contrato predoctoral PRE-2020-1-0073 del Gobierno Vasco.

## English summary

## POSTURAL MONITORING DEVICE FOR ELDERLY WITH A HIGH DEGREE OF SEDENTARISM

### Abstract

*Postural monitoring in the elderly is essential to avoid the appearance of musculoskeletal problems, as well as to prevent risky situations and falls. In this work, a monitoring device composed of 16 FSR (Force Sensitive Resistor) sensors is presented, discreetly placed along the seat and back of a chair. The selection of the location of these sensors has been carried out through a previous study, where the most significant points have been identified. To validate the monitoring device, different experimental tests have been carried out where the results obtained by the proposed device have been compared with those measured with a pressure mat. The results show that the positions presented are correctly characterized by the proposed system, being able to reduce the cost of the hardware and increase its autonomy.*

**Keywords:** Postural Analysis; Monitoring; Sedentary lifestyle; Force Sensors.

### Referencias

- [1] A. Abellán García, P. Aceituno Nieto, J. Pérez Díaz, D. Ramiro Fariñas, A. Ayala García, and R. Pujol Rodríguez. Un perfil de las personas mayores en España, 2019. indicadores estadísticos básicos. *Informes Envejecimiento en red*, (22):38, 2019.
- [2] A. Abobakr, M. Hossny, and S. Nahavandi. A skeleton-free fall detection system from depth images using random decision forest. *IEEE Systems Journal*, 12(3):2994–3005, 2018.
- [3] B. Arnrich, C. Setz, R. La Marca, G. Tröster, and U. Ehlert. What does your chair know about your stress level? *IEEE Transactions*

*on Information Technology in Biomedicine*, 14(2):207–214, 2010.

- [4] A. Biswas, P. I. Oh, G. E. Faulkner, R. R. Bajaj, M. A. Silver, M. S. Mitchell, and D. A. Alter. Sedentary time and its association with risk for disease incidence, mortality, and hospitalization in adults: a systematic review and meta-analysis. *Annals of Internal Medicine*, 162(2):123–132, 2015.
- [5] S. Chopra, M. Kumar, and S. Sood. Wearable posture detection and alert system. *Proceedings of the 5th International Conference on System Modeling and Advancement in Research Trends, SMART 2016*, pages 130–134, 2017.
- [6] A. Cristina, F. Geraldo, and A. M. Kuasne. Prototype of Wearable Technology Applied to the Monitoring of the Vertebral Column. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, 16(01):34–50, 2020.
- [7] A. Edjolo, C. Proust-Lima, F. Delva, J.-F. Dartigues, and K. Pérès. Natural history of dependency in the elderly: a 24-year population-based study using a longitudinal item response theory model. *American journal of epidemiology*, 183(4):277–285, 2016.
- [8] B. El-Sayed, N. Farra, N. Moacdieh, H. Hajj, R. Haidar, and Z. Hajj. A novel mobile wireless sensing system for realtime monitoring of posture and spine stress. *2011 1st Middle East Conference on Biomedical Engineering, MECBME 2011*, pages 428–431, 2011.
- [9] I. E. FSR 400. Available online: <https://www.interlinkelectronics.com/fsr-400>, accessed 2021-06-02.
- [10] M. Kim, H. Kim, J. Park, K. K. Jee, J. A. Lim, and M. C. Park. Real-time sitting posture correction system based on highly durable and washable electronic textile pressure sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 269:394–400, 2018.
- [11] G. Liang, J. Cao, and X. Liu. Smart cushion: A practical system for fine-grained sitting posture recognition. In *2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PerCom Workshops 2017*, pages 419–424, 2017.
- [12] B. Liu, Y. Li, S. Zhang, and X. Ye. Healthy human sitting posture estimation in RGB-D scenes using object context. *Multimedia Tools and Applications*, 76(8):10721–10739, 2017.

- [13] C. Ma, W. Li, R. Gravina, J. Cao, Q. Li, and G. Fortino. Activity level assessment using a smart cushion for people with a sedentary lifestyle. *Sensors (Switzerland)*, 17(10):1–19, 2017.
- [14] J. Meyer, B. Arnrich, J. Schumm, and G. Troster. Design and modeling of a textile pressure sensor for sitting posture classification. *IEEE Sensors Journal*, 10(8):1391–1398, 2010.
- [15] B. Mutlu, A. Krause, J. Forlizzi, C. Guestrin, and J. Hodgins. Robust, low-cost, non-intrusive sensing and recognition of seated postures. *UIST: Proceedings of the Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 4(1):149–158, 2007.
- [16] H. Pazhoumand-Dar. FAME-ADL: a data-driven fuzzy approach for monitoring the ADLs of elderly people using Kinect depth maps. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(7):2781–2803, 2019.
- [17] S. S. Sensing Mat Dev Kit. Available online: <http://sensingtex.com/product/seating-mat-dev-kit/>, accessed 2020-02-24.
- [18] M. Tremblay. Letter to the editor: Standardized use of the terms sedentary and sedentary behaviours. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*, 37(3):540–542, 2012.
- [19] P. D. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. World Population Prospects: The 2019 Revision, Key Findings and Advance Tables. 2019.
- [20] W. J. Yi, O. Sarkar, S. Mathavan, and J. Sannié. Wearable sensor data fusion for remote health assessment and fall detection. *IEEE International Conference on Electro Information Technology*, pages 303–307, 2014.
- [21] Y. Zhang, S. Markovic, I. Sapir, R. C. Wagenaar, and T. D. Little. Continuous functional activity monitoring based on wearable tri-axial accelerometer and gyroscope. *2011 5th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare and Workshops, PervasiveHealth 2011*, pages 370–373, 2011.

under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication

# APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO PARA LA CLASIFICACIÓN DE ACTIVIDADES MEDIANTE UNA MULETA INTELIGENTE PARA ESCLEROSIS MÚLTIPLE

Sergio Lucas, Asier Brull, Eva Portillo, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU)  
slucas004@ikasle.ehu.eus

## Resumen

*El nivel de actividad física diaria que un paciente de Esclerosis Múltiple es capaz de realizar se ha demostrado que es una importante fuente de información para el seguimiento de la enfermedad y la adaptación individualizada de las terapias. Así, en este trabajo se propone el diseño de un clasificador de actividades de la vida diaria, realizado mediante la combinación de dos técnicas de Inteligencia Artificial (RandomForest y Redes Neuronales Artificiales), el cual podría facilitar información de valor a las y los terapeutas.*

**Palabras clave:** Esclerosis Múltiple, clasificador, RandomForest, Redes Neuronales Artificiales

## 1 Introducción

Dentro de las diferentes afecciones neurológicas la Esclerosis Múltiple (EM) es una de las que ocasiona mayor deterioro físico y psíquico. Publicaciones recientes [7] han estimado que en el mundo hay aproximadamente 2.8 millones de personas que padecen EM, de las cuales 700.000 se encuentran en Europa y 50.000 pertenecen a España.

Aproximadamente, el 85% de los pacientes de EM padecen el tipo evolutivo conocido como Remitente-Recurrente (EMRR) [9], el cual se caracteriza por ataques imprevisibles o brotes. Como consecuencia de uno de estos brotes, pueden quedar secuelas en forma de dificultad a la hora de ejecutar ciertas tareas o funciones. De hecho, al cabo de 15 años un elevado porcentaje de las personas afectadas requiere de elementos de ayuda técnica, como muletas y bastones, para mantener su autonomía [8].

Debido a que la EM es una enfermedad actualmente sin cura, de carácter crónico y que la media de edad se sitúa en 30 años, esta enfermedad ocasiona un gran coste sanitario. Dependiendo del estadio de la enfermedad estos costes pueden variar desde los 20.000 euros anuales hasta los 70.000 en la fase más severa [3]. La inmensa mayoría de estos costes se centran en ralentizar la enfermedad y paliar las secuelas. Una de las soluciones actuales

para mejorar la calidad de los pacientes es la rehabilitación, ya que con un par de sesiones semanales supervisadas por expertos se puede incrementar la fuerza y la capacidad física del paciente [2].

Con el objetivo de proporcionar una rehabilitación óptima, es necesario una correcta y actualizada evaluación y caracterización del estado funcional del paciente. Para ello, actualmente se hace uso de escalas clínicas normalizadas o de soluciones invasivas que requieren de un entorno clínico para el diagnóstico. Sin embargo, estas caracterizaciones son puntuales y no tienen en cuenta aspectos relevantes de la enfermedad como la fatiga. Por tanto, la capacidad para definir terapias precisas se ve limitada de manera significativa al no realizarse una monitorización continua del paciente.

Se ha demostrado que el nivel de actividad física diaria que el paciente es capaz de realizar es una importante fuente de información para el seguimiento de la enfermedad y la adaptación individualizada de las terapias [5]. Dentro de las soluciones propuestas para el diagnóstico del estado del paciente EM, destacan aquellas basadas en dispositivos pasivos para el análisis de la marcha [5].

En este trabajo se presenta una combinación de técnicas de Inteligencia Artificial (IA), más concretamente la combinación de un RandomForest con Redes Neuronales Artificiales (ANN), para desarrollar un clasificador capaz de diferenciar entre distintas actividades físicas diarias realizadas, ofreciendo a los terapeutas una forma de conocer el avance y el estado de la enfermedad de forma continua. La información que se va caracterizar es la extraída de una Contera Inteligente (CI) emplazada en una muleta, la cual es capaz de obtener los parámetros más importantes del patrón de marcha de los pacientes EM de forma no invasiva y continua.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente forma. En la sección 2, se presenta una breve descripción de la CI. En la sección 3 se define la metodología, comenzando por la obtención de la base de datos experimental, para luego centrarse en el empleo de las dos técnicas de IA. En la



sección 4 se presentan los resultados y, por último, en la sección 5 se recogen las principales conclusiones del trabajo.

## 2 Contera Inteligente

La CI utilizada para extraer los datos del patrón de marcha es una contera diseñada y desarrollada por el grupo de investigación *Sensorización Virtual para Bioingeniería (UPV/EHU)* [1], el cual lleva trabajando desde el año 2017 en la monitorización continua y no invasiva del estado del paciente EM.

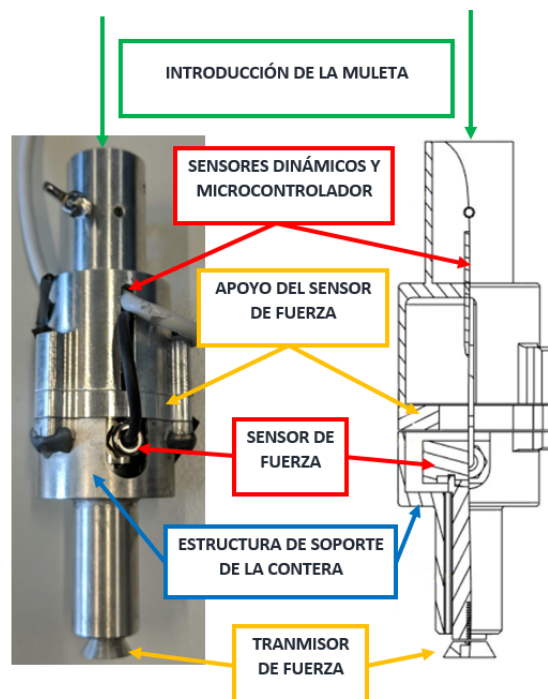


Figura 1: Distribución sensores en la contera

El prototipo de la CI se muestra en la Figura 1. Se trata de una contera fabricada en aluminio que es adaptable a diferentes elementos de ayuda técnica, bastones y muletas.

Debido a los sensores que lleva incorporada la CI [1] es posible capturar las variables básicas necesarias tanto para la caracterización de la marcha como del equilibrio de los pacientes EM [4]. En total se capturan las siguientes variables:

- Velocidad angular en los tres ejes.
- Aceleración lineal en los tres ejes.
- Campo magnético en los tres ejes.
- Ángulos de Euler (Roll, Pitch, Yaw).
- Presión atmosférica.

- Fuerza axial.

El procesamiento de los datos de los sensores se realiza con un circuito integrado BLE nano v2, que permite enviar los datos de forma inalámbrica mediante bluetooth a otro dispositivo con una frecuencia de muestreo de 50 hercios y con un bajo consumo de energía.

## 3 Metodología

### 3.1 Base de Datos experimental

En el caso del presente trabajo, el clasificador va a diferenciar entre cinco actividades que se pueden realizar diariamente: 1) andar recto lento; 2) andar recto rápido; 3) subir escaleras; 4) bajar escaleras; 5) posición estática.

#### 3.1.1 Metodología experimental

Para alcanzar un correcto nivel de generalización en la ANN es imprescindible realizar una correcta etapa de entrenamiento. Para ello, se necesita obtener una base de datos experimental significativa y representativa. Así, se define una metodología experimental basada en recrear las actividades que se quieren clasificar mediante cinco pruebas: a) recorrer tres veces una distancia de treinta metros a una velocidad normal para el participante; b) recorrer tres veces la misma distancia, pero con una velocidad 30% superior; c) subir cuatro veces quince escalones; d) bajar cuatro veces quince escalones; e) mantener una posición estática durante diez segundos. Tanto las repeticiones como la distancia a recorrer se ha definido para lograr una base de datos balanceada.

Debido a que las personas que padecen EM son una población vulnerable y por motivos de la situación sanitaria que se está viviendo derivada de la COVID19, estas pruebas se han realizado con seis personas sanas.

#### 3.1.2 Creación de *features*

Dentro de este campo de investigación es muy común definir una serie de indicadores o *features* que permitan caracterizar el patrón de marcha. En el caso de estudio, estas *features* se calculan mediante la aplicación de estadísticos (media, varianza, kurtosis, percentiles, etc.) a cada una de las series temporales obtenidas con la contera por cada participante y por cada prueba. Para calcularlas de forma adecuada, se segmentan las series temporales en paquetes más pequeños de información mediante técnicas de ventana (ver Figura 2). Para las actividades que requieran movimiento (andar, subir y bajar escaleras) se aplican técnicas

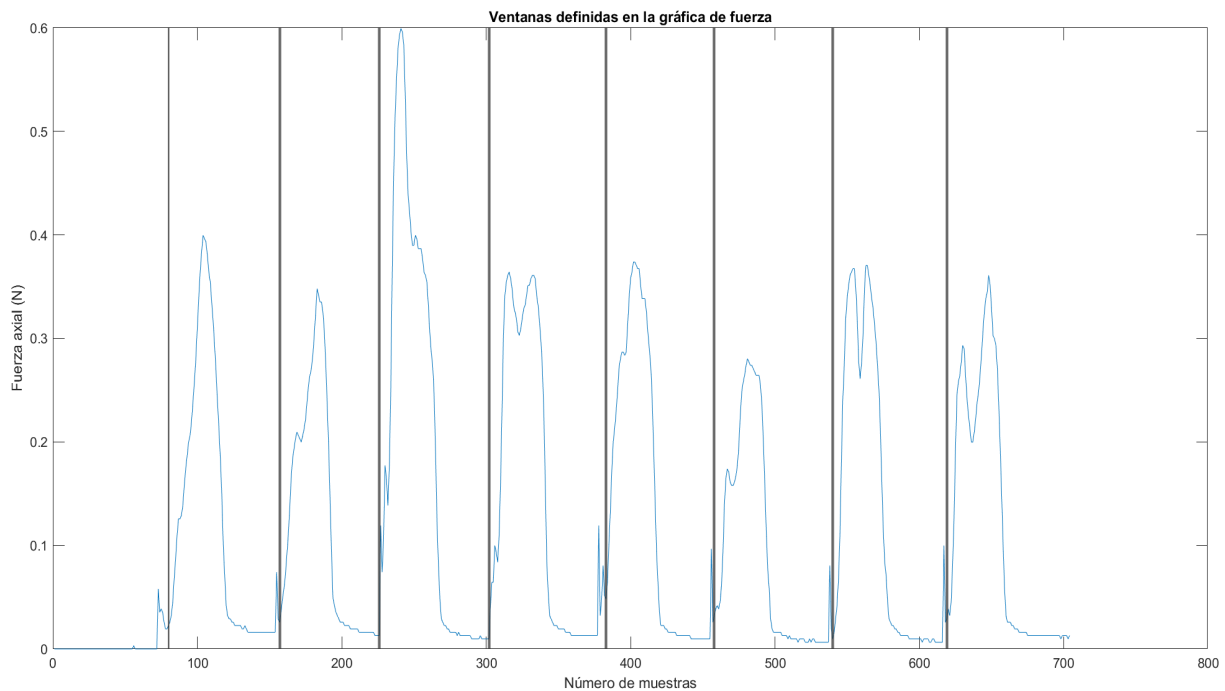


Figura 2: Segmentación variables

de ventana por evento, el cual será el inicio del apoyo en el paso, por tanto, en estos casos los segmentos se corresponderán a cada paso dado por el participante. En el caso de la actividad de mantenerse en estático, la segmentación se realiza mediante ventanas deslizantes. Una vez calculadas todos los segmentos, se aplica a cada uno de ellos los estadísticos elegidos, conformando así las features.

A la base de datos se le debe someter a un proceso de balanceo, de tal forma que, la base de datos final de la que se dispone está formada por 671 muestras o pasos, repartidos tal y como aparece en la Tabla 1, y 177 features por cada muestra. Mencionar que la etiqueta estar quieto se ha introducido en este caso de estudio debido a que el tiempo que los pacientes de EM emplean en sedestación es importante para inferir su estado y, por tanto, se considera que el clasificador debe distinguir este tipo de actividad.

### 3.2 Reducción de la dimensión mediante RandomForest

A la ANN se le introducen como variables de entrada las diferentes features calculadas en el paso anterior, sin embargo, se tiene un número excesivo de features (177) en comparación con el número de muestras (671), lo cual podría derivar en un modelo sobre-ajustado. Para solventar este inconveniente, se decide reducir la dimensión de las variables de entrada mediante la estimación de sus importancias relativas, usando para ello una técnica

consolidada como el RandomForest (RF). Una vez estimadas las importancias, se escogen las 20 features más importantes como entradas a la ANN (eje X en Figura 3).

El resultado del RF es un factor de gran influencia en el entrenamiento de las ANN, debido a que define qué features son las variables de entrada a la red. Por tanto, la base de datos se divide de forma balanceada mediante la habitual división 70-30 en el conjunto de entrenamiento-validación y el conjunto de test, respectivamente, y sólo se introduce el conjunto entrenamiento-validación en el RF. A su vez el conjunto de entrenamiento-validación también se divide mediante la división 70-30 en el conjunto de entrenamiento y conjunto de validación (conjuntos requeridos en la ANN). Se han escogido estos valores para las divisiones ya que se han utilizado con anterioridad en la literatura en problemas de esta índole.

Para la correcta implementación del método RF también se deben tener en cuenta una serie de hiperparámetros, entre los que se destacan los siguientes:

- Número de features para cada árbol= raíz cuadrada del número total de features de la base de datos.
- Tamaño de las muestras para cada árbol = Número total de muestras,  $N$ .
- Número de árboles: este hiperparámetro será objeto de estudio, ya que se deberá escoger un

Tabla 1: **Base de datos experimental balanceada**

Participantes	Muestras				
	Andar Lento	Andar Rápido	Subir Escaleras	Bajar Escaleras	Estar Quieto
1	24	23	24	24	16
2	24	23	24	24	15
3	24	25	24	24	17
4	24	25	23	24	18
5	24	23	24	24	14
6	24	25	23	24	17
Total etiqueta	144	144	142	144	97
Muestras totales	671				

valor con el cual los resultados se hayan estabilizado y el coste computacional sea asumible. Para ello, se van a valorar diferentes números de árboles y se van a analizar los resultados.

### 3.3 Diseño del clasificador mediante Redes Neuronales Artificiales

Se decide escoger el modelo de Perceptron Multicapa (MLP) entrenado mediante el algoritmo de retropropagación y la técnica de regulación *Early Stopping*.

El modelo MLP se plantea para que sólo disponga de una capa oculta. Los hiperparámetros que van a ser objeto de estudio son: a) número de neuronas en dicha capa oculta; b) número de features como variables de entrada. En este segundo hiperparámetro se comienza introduciendo sólo la feature más importante a la red y, posteriormente, se añaden de una a una el resto, según su orden de importancia, hasta que haya un máximo de 20 features. Este número máximo de 20 no es una restricción definitiva en el problema, sino que es el número de partida, si en los resultados se observa que la red debe ser más compleja, se aumentará dicho número.

Para la selección de la red a implantar como clasificador se realiza un ajuste grueso y fino tanto del número de neuronas como del número de features. Para lograr una correcta selección se decide utilizar como criterio el *Principio de Parsimonia*, que establece que en igualdad de condiciones con el enfoque más sencillo se reduce la varianza del modelo, haciendo que la solución ante un nuevo conjunto de datos sea más robusta que la que se obtiene con modelos más complejos. Es decir, con este criterio se premia el poder de generalización de la red y la reducción del consumo de recursos. Esto es algo positivo a futuro, ya que se tiene intención de empotrar este clasificador en un sistema móvil.

## 4 Resultados

### 4.1 Número definitivo de árboles del RF

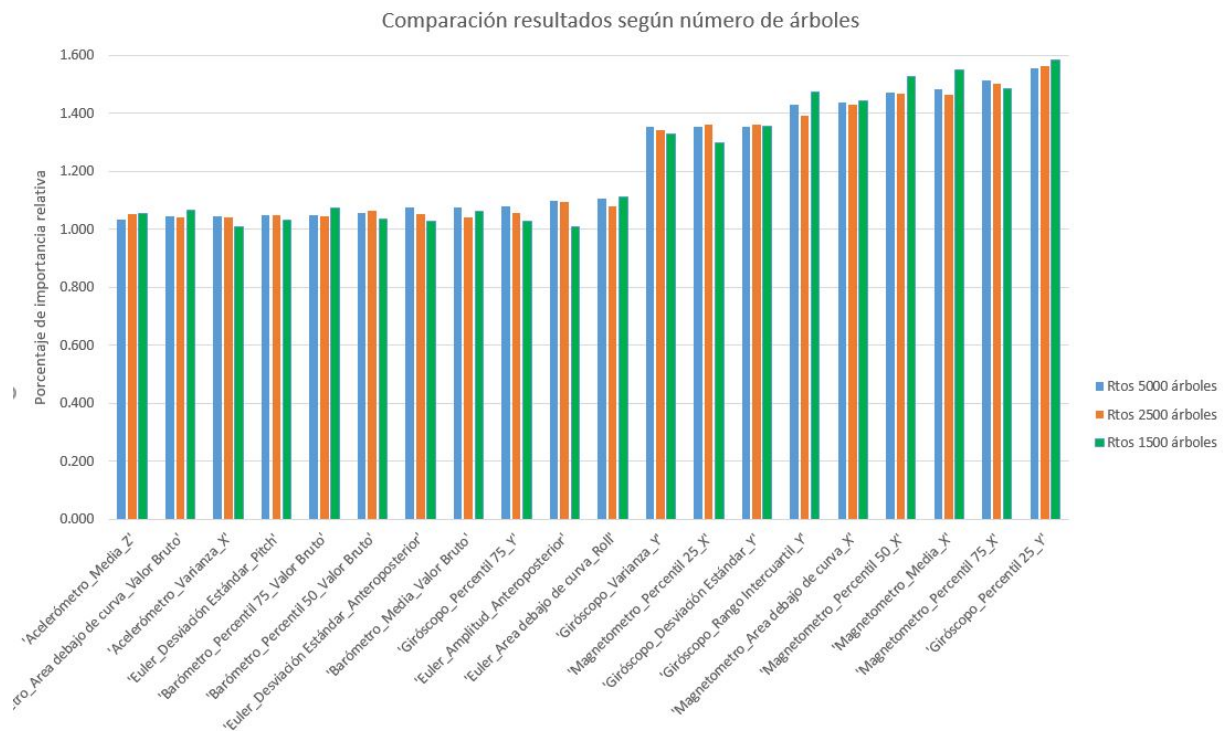
Para seleccionar el número de árboles a implementar en el RF y en concordancia con la literatura [6], se define realizar un estudio con 5000, 2500 y 1500 árboles para barrer un amplio espectro del espacio de posible resultados de este hiperparámetro. Los resultados de este primer estudio para las veinte features más importantes se muestran en la Figura 3.

La Figura 3 muestra que con 1500 árboles existe mayor variabilidad en los resultados que con los obtenidos con 2500 y 5000, verificándose así que a mayor número de árboles, mayor precisión en los resultados. Para la selección definitiva de este hiperparámetro, se decide analizar para 2500 y 5000 las variaciones que existen entre dos RF del mismo número de árboles, es decir, se comprueba la robustez de los resultados del RF, ya que para el presente caso de estudio es de suma importancia que los resultados sean robustos para tener garantías en cuanto a las features seleccionadas. Para realizar este estudio se utiliza como métrica el coeficiente tau de Kendall, el cual se suele utilizar para comparar clasificaciones o rankings, adquiriendo un valor de 1 cuando las clasificaciones son iguales.

Tabla 2: **Coficiente de Kendall**

Num.árboles	Coef. Kendall
5000-5000	1
2500-2500	0.7789

Los resultados de la Tabla 2 muestran que con 5000 árboles los resultados han convergido, sin embargo, en el caso de 2500 existen diferencias en el orden de importancia de las features entre los dos RFs. Por ello, se decide escoger 5000 árboles como número de árboles definitivo.



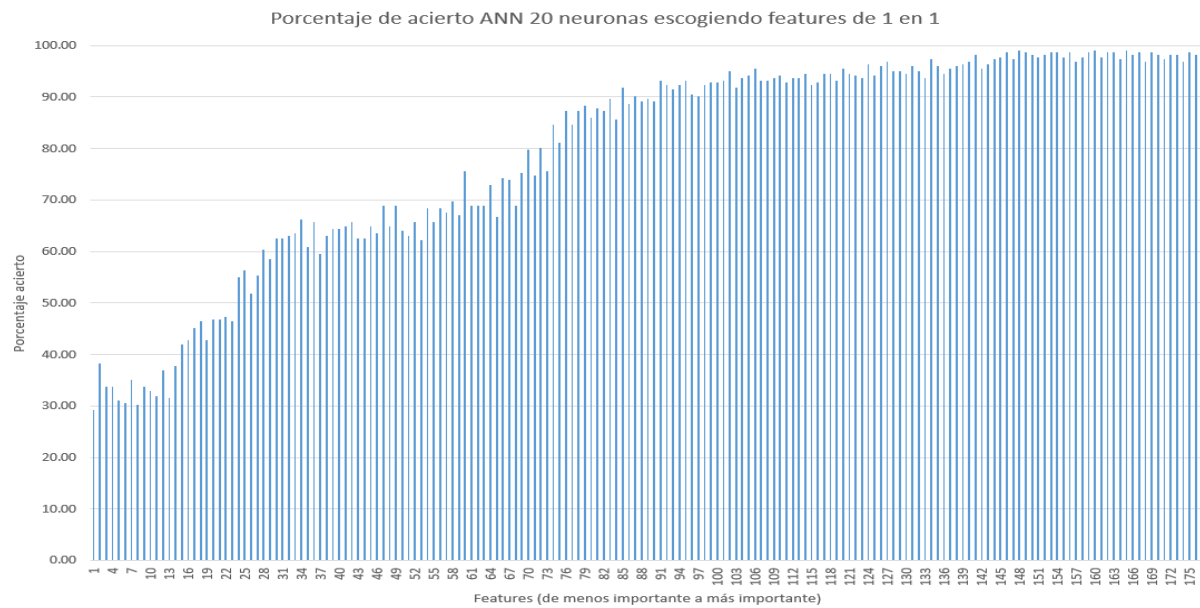


Figura 4: Porcentajes de acierto desde features menos importantes a las más importantes

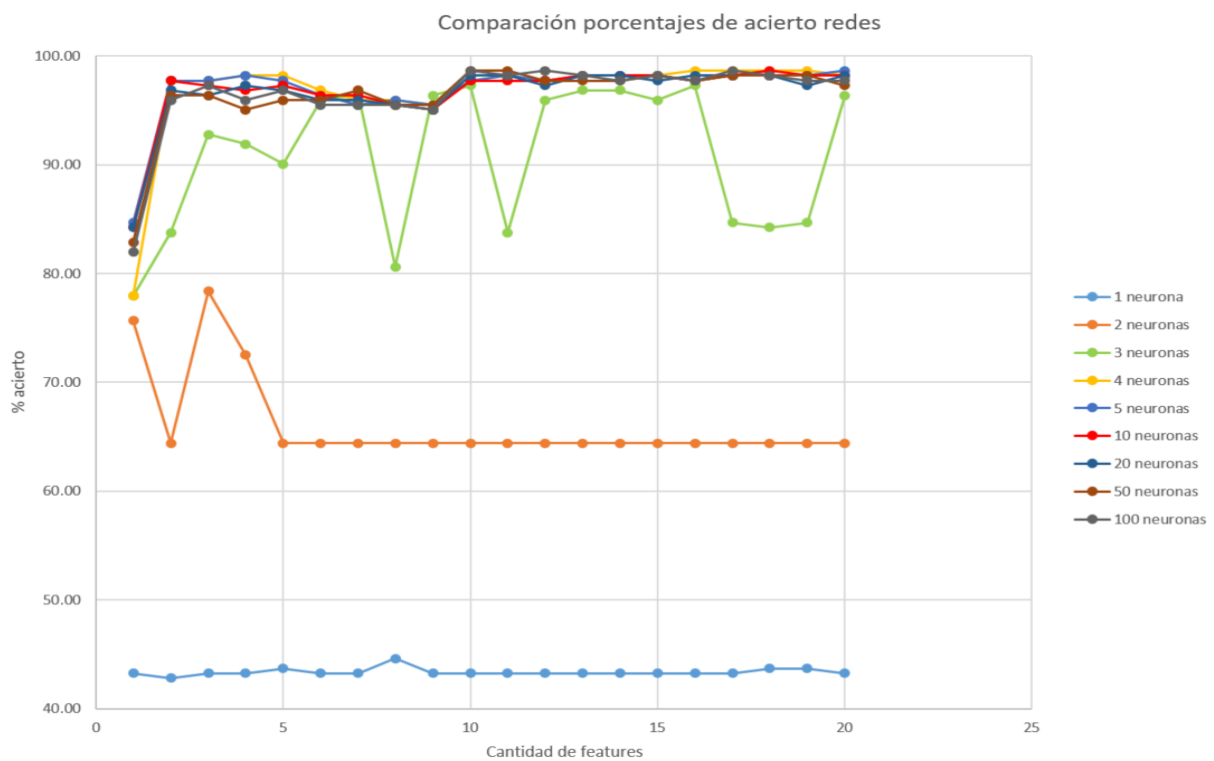


Figura 5: Comparación acierto redes con distintos números de neuronas

Tabla 3: Porcentajes de acierto desglosados red elegida

Numero de features	Porcentajes acierto					
	Andar Recto Lento	Andar Recto Rápido	Subir Escaleras	Bajar Escaleras	Estar Quiero	Global De La Red
2	89.58	100.0	100.0	100.0	100.0	<b>97.75</b>

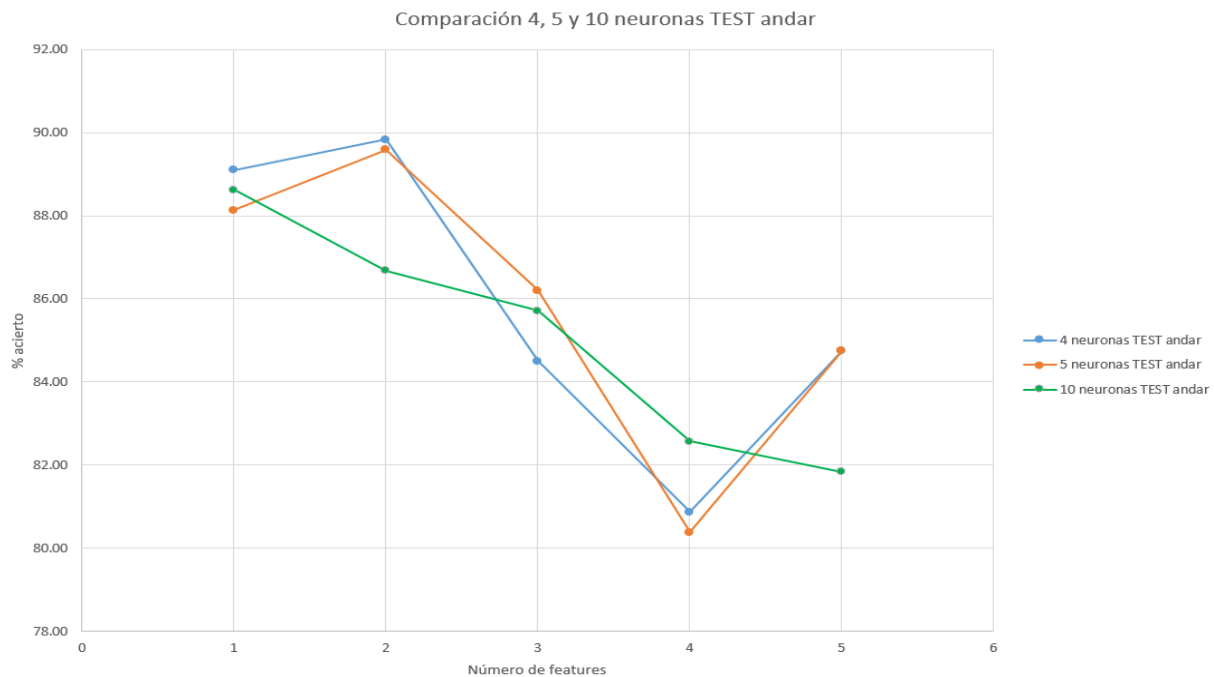


Figura 6: Comparación acierto redes con nuevo conjunto de test

rápido, que se trata de las únicas etiquetas donde falla el clasificador. Los porcentajes de acierto de las redes entrenadas ante este nuevo conjunto de test se muestran en la Figura 6.

Se puede visualizar cómo con 4 neuronas y 2 features se consiguen los mejores resultados. Así, se ha decidido escoger esta red como la red a implantar como clasificador de actividades. Esta red con el conjunto de datos de test inicial presenta los porcentajes descritos en la Tabla 3.

Para complementar toda la información acerca de este red, a continuación en la Tabla 4 se adjunta la matriz de confusión obtenida.

**Tabla 4: Matriz de confusión**

Actividades	ARL	ARR	SE	BE	EE
ARL	43	5	0	0	0
ARR	0	48	0	0	0
SE	0	0	47	0	0
BE	0	0	0	47	0
EE	0	0	0	0	31

Siendo la primera columna, la etiqueta andar recto lento (ARL); la segunda columna, andar recto rápido (ARR); la tercera, subir escaleras (SE); la cuarta, bajar escaleras (BE); y la quinta, estar estático (EE)

En la Tabla 4 se puede ver que los únicos errores que comete el clasificador son las 5 muestras de andar recto lento que las confunde con andar recto rápido, lo cual se puede explicar debido a la incertidumbre en la velocidad de los pasos durante la realización de las pruebas, si bien por otro lado

cierta variabilidad en las velocidades resulta deseable para entrenar las redes.

## 5 Conclusiones

La mejora en las monitorizaciones del estado de los pacientes EM es fundamental para que se puedan adecuar las terapias de forma efectiva y personalizada. En este sentido, una monitorización continua y no invasiva del patrón de marcha junto a una clasificación de las actividades de la vida diaria que realizan, podría facilitar información de valor a las y los terapeutas para lograr dicho objetivo.

Así, en este trabajo se propone una combinación de dos técnicas de Inteligencia Artificial, como son el RandomForest y las Redes Neuronales Artificiales, para diseñar un clasificador que permita distinguir entre las actividades andar recto lento, andar recto rápido, subir escaleras, bajar escaleras y estar quieto.

Los resultados que se han conseguido son muy satisfactorios, habiéndose logrado porcentajes de acierto globales con las muestras de test cercanos al 98%. Por tanto, se puede concluir que la metodología propuesta es coherente y válida con los resultados obtenidos, y se estaría en disposición de validar el funcionamiento del clasificador en personas con patología EM cuando la situación sanitaria lo permita. En este sentido, debido a las diferencias en los patrones de marcha de los pacientes EM, donde existe mayor variabili-



dad incluso para pacientes con mismas patologías, la estrategia que se abordará será particularizar este clasificador para cada persona, es decir, realizar una estrategia individual y personalizada para cada paciente, siendo la estrategia que se ha utilizado en este artículo el punto de partida.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad del País Vasco UPV/EHU (GIU19/045), FEDER/Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades – Agencia Estatal de Investigación/DPDPI2017-82694-R y Universidad del País Vasco UPV/EHU (PIF18/067).

### English summary

## APPLICATION OF MACHINE LEARNING TECHNIQUES FOR ACTIVITY CLASSIFICATION USING AN INTELLIGENT CRUTCH FOR MULTIPLE SCLEROSIS

### Abstract

*The level of daily physical activity that a Multiple Sclerosis patient is able to perform has been shown to be an important source of information in order to monitorise the disease and adapt therapies in a personalised way. Consequently, in this work a novel desing of a daily physical activity classifier is proposed by the combination of two Artificial Intelligence techniques (a RandomForest and Artificial Neural Networks), which can provide an useful information for the therapists.*

**Keywords:** Multiple Sclerosis, classifier, RandomForest, Artificial Neural Network.

### Referencias

- [1] A. Brull, A. Zubizarreta, I. Cabanes, and A. Rodriguez-Larrad. Sensorized tip for monitoring people with multiple sclerosis that require assistive devices for walking. *Sensors (Switzerland)*, 20(15):1–20, 2020.
- [2] P. Flachenecker. Clinical implications of neuroplasticity - the role of rehabilitation in multiple sclerosis. *Frontiers in Neurology*, 6(MAR):1–4, 2015.
- [3] G. Kobelt, A. Thompson, J. Berg, M. Gannedahl, and J. Eriksson. New insights into the burden and costs of multiple sclerosis in Europe. *Multiple Sclerosis*, 23(8):1123–1136, 2017.
- [4] A. B. Mesanza, S. Lucas, A. Zubizarreta, I. Cabanes, E. Portillo, and A. Rodriguez-Larrad. A Machine Learning Approach to Perform Physical Activity Classification Using a Sensorized Crutch Tip. *IEEE Access*, 8:210023–210034, 2020.
- [5] O. R. Pearson, M. E. Busse, R. W. Van Deursen, and C. M. Wiles. Quantification of walking mobility in neurological disorders. *QJM - Monthly Journal of the Association of Physicians*, 97(8):463–475, 2004.
- [6] P. Probst, M. N. Wright, and A. L. Boulesteix. Hyperparameters and tuning strategies for random forest. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 9(3):1–15, 2019.
- [7] P. Ra and P. A. Rte. Atlas de EM, 2020.
- [8] A. Souza, A. Kelleher, R. Cooper, R. A. Cooper, L. I. Iezzoni, and D. M. Collins. Multiple sclerosis and mobility-related assistive technology: Systematic review of literature. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 47(3):213–224, 2010.
- [9] F. P. Thomas. Multiple Sclerosis. *Pathy's Principles and Practice of Geriatric Medicine: Fifth Edition*, 1(3):823–833, 2012.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# ESTRATEGIAS PARA LA ASISTENCIA A LA MARCHA DE SUJETOS CON HEMIPARESIA A TRAVÉS DE UNA ÓRTESIS ACTIVA DE RODILLA

Julio S. Lora-Millan<sup>1</sup>, Juan C. Moreno<sup>2</sup>, Eduardo Rocon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Automática y Robótica, Consejo Superior de Investigaciones Científicas – Universidad Politécnica de Madrid (CSIC-UPM), Madrid

<sup>2</sup>Grupo de Neuro-Rehabilitación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid.

Correspondencia: julio.lora@csic.es

## Resumen

*La hemiparesia es una de las consecuencias motoras más comunes del accidente cerebrovascular. La marcha hemiparética está caracterizada por una fuerte asimetría, y los pacientes que la sufren desarrollan mecanismos de compensación para lograr una marcha funcional; no obstante, estos pacientes siguen requiriendo de dispositivos que asistan su marcha. En este documento proponemos dos estrategias para generar patrones de asistencia que sean implementados por una órtesis activa de rodilla. Ambas estrategias están basadas en la cinemática de la extremidad no afectada del usuario y se coordinan con su movimiento gracias a la estimación en tiempo real de la fase de la marcha. La generación de estos patrones de asistencia ha sido validada con datos experimentales de tres sujetos sanos. Los resultados obtenidos demuestran que la asistencia generada es acorde al movimiento del lado no afectado y está sincronizada con el movimiento del usuario.*

**Palabras clave:** Asistencia de la marcha, Hemiparesia, Oscilador de Frecuencia Adaptativo, Órtesis activa de rodilla.

## 1 INTRODUCCIÓN

El accidente cerebrovascular es una de las causas principales de invalidez en la sociedad moderna [1]. En Europa, su incidencia alcanza los 1,1 millones de pacientes al año [2], de los cuales un 80% desarrolla problemas de movilidad [3]. La hemiparesia es uno de los principales efectos del ictus y conlleva una marcha fuertemente asimétrica debido a la pérdida de movilidad en un lateral del cuerpo [4]. Como consecuencia, los pacientes desarrollan mecanismos de compensación para lograr una marcha funcional [5]. Así mismo, estos pacientes tienden a ralentizar la velocidad de su marcha [6] y les supone un gran consumo metabólico [7].

A pesar de las recientes terapias de rehabilitación, los pacientes no suelen restaurar al completo su movilidad y requieren de dispositivos que asistan su marcha [8]. Recientemente, numerosos exoesqueletos robóticos y órtesis activas tratan de ayudar a estos usuarios en sus actividades de la vida diaria [9].

Sin embargo, aún no se conoce cómo los usuarios responden a la asistencia proporcionada por estas órtesis activas, especialmente cuando esta asistencia se basa en el propio movimiento del usuario. Por otro lado, a la hora de valorar la asistencia prestada por el robot, también se busca poder analizar tanto el efecto directo que tiene sobre la extremidad impedida, como los efectos indirectos que tiene sobre la dinámica global de la marcha.

En el marco del proyecto REFLEX (*symmetRy rEinForcer uniLateral powEred eXoskeleton*), hemos diseñado una órtesis activa de rodilla para sujetos hemiparéticos para mejorar la simetría de su marcha. Nuestro objetivo es utilizar la propia cinemática del lateral no afectado para generar la asistencia que debe prestar el dispositivo. Para ello se han propuesto dos estrategias de control, la primera replica directamente el movimiento de la pierna sana sobre la impedida, mientras que la otra utiliza el movimiento de la pierna sana para aplicar un patrón sano normalizado sobre la pierna afectada. Trabajos anteriores se han basado en máquinas de estados finitos para imponer un patrón de marcha sano [10], [11], o han replicado directamente el movimiento de la pierna sana sobre la impedida basándose en el cálculo del tiempo que se han de retrasar ambos movimientos [12].

Este trabajo utiliza el dispositivo ya presentado en [13] para implementar nuevos controladores que proporcionen asistencia al usuario. La originalidad de esta aportación radica en basar el controlador en la estimación en tiempo real de la fase de la marcha obtenida a través de un Oscilador Adaptativo de Frecuencia (*Adaptive Frequency Oscillator – AFO*) para generar la asistencia requerida en la pierna afectada en base al movimiento de la pierna no parética, en lugar de las máquinas de estados finitos reportadas

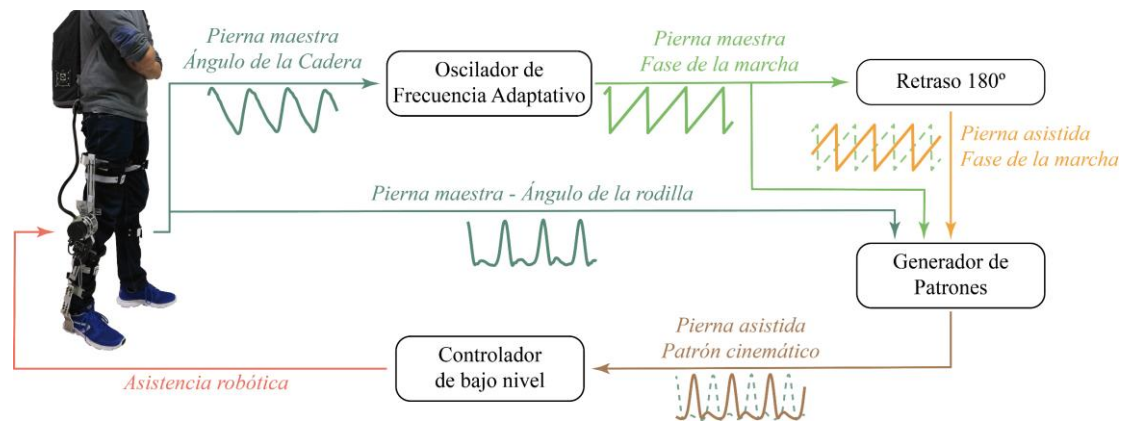


Figura 1: Estrategia de control del dispositivo REFLEX: La asistencia proporcionada por el exoesqueleto robótico se sincroniza con el movimiento de la pierna maestra. El ángulo de la cadera de esta pierna alimenta un oscilador de frecuencia adaptativo (AFO) para estimar en tiempo real la fase de la marcha de la pierna maestra. Esta fase es retrasada  $180^\circ$  para obtener la fase de marcha para la pierna asistida. La fase de la marcha estimada para ambas piernas y el movimiento de la rodilla de la pierna maestra se utiliza para generar el patrón a seguir por el exoesqueleto de manera que asista el movimiento de la otra extremidad.

previamente. En el presente documento se presentan las estrategias de asistencia siguiendo los dos paradigmas planteados, así como una primera validación de los patrones de asistencia con tres sujetos sanos.

## 2 ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA LA ASISTENCIA DE LA MARCHA HEMIPARÉTICA

El objetivo principal de REFLEX es prestar asistencia a la pierna parética de sujetos con hemiparesia de acuerdo con el movimiento de su pierna no afecta (también llamada pierna maestra). De acuerdo con este paradigma, la Figura 1 representa el funcionamiento global del controlador de este dispositivo. Dicho controlador utiliza la información cinemática de la pierna maestra para sincronizar la asistencia que se debe prestar a la pierna parética.

Esta sincronización se basa en la estimación de la fase de la marcha en tiempo real que es calculada por el AFO. Esta herramienta matemática, aprovecha la forma de onda cuasi senoidal del ángulo de flexión de la cadera para estimar la fase de la marcha de la pierna maestra. Dado que los movimientos de ambas piernas están desfasadas  $180^\circ$  en una marcha sana [14], la fase de la marcha en la pierna asistida se estima retrasando  $180^\circ$  la fase de marcha calculada en tiempo real por el AFO. Esta fase deseada, junto con la cinemática y la fase de la pierna maestra, son utilizadas por el generador de patrones para calcular la cinemática deseada para la pierna asistida.

### 2.1 ESTIMACIÓN DE LA FASE DE LA MARCHA EN TIEMPO REAL.

Como ya se ha mencionado, REFLEX utiliza un AFO para estimar en tiempo real la fase de la marcha de la pierna maestra. En este contexto, la fase es una variable que aumenta monótonamente en el rango  $[0, 2\pi]$  y se restablece cuando se completa el ciclo de la marcha.

Los AFOs son sistemas dinámicos que se pueden sincronizar con señales periódicas aprendiendo sus características como variables de estado [15]. Siendo  $\theta_m$  el ángulo de flexión de la cadera de la pierna maestra, un AFO puede estimar su fase  $\varphi_m(t)$  de acuerdo con el siguiente sistema dinámico [16]:

$$\varepsilon(t) = \theta_m(t) - \hat{\theta}_m(t) \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = -\nu_\omega \varepsilon(t) \sin \varphi_m \quad (2)$$

$$\dot{\varphi}_m = \omega - \nu_\varphi \varepsilon(t) \sin \varphi_m \quad (3)$$

$$\dot{\alpha}_k = \eta \cos(k\varphi_m) \varepsilon(t) \quad (k = 0, \dots, N_f) \quad (4)$$

$$\dot{\beta}_k = \eta \sin(k\varphi_m) \varepsilon(t) \quad (k = 0, \dots, N_f) \quad (5)$$

$$\hat{\theta}_m = \sum_{k=0}^{N_f} \alpha_k \cos(k\varphi_m) + \beta_k \sin(k\varphi_m) \quad (6)$$

Donde  $\varphi_m$  y  $\omega$  son la fase y la frecuencia del oscilador sincronizado con la pierna maestra;  $\alpha_k$  y  $\beta_k$  son los coeficientes de Fourier utilizados para estimar  $\hat{\theta}_m$  y  $\varepsilon(t)$  es el error en dicha estimación.  $\nu_\omega$  y  $\nu_\varphi$  son constantes de aprendizaje y  $\eta$  es un factor de

acoplamiento que determinan la respuesta dinámica del error  $\varepsilon(t)$ . En cada instante de ejecución, se considera una nueva entrada  $\theta_m$  que permite la actualización de todas las variables involucradas.

De cara a otorgar significado fisiológico a la fase estimada por el AFO, es necesario introducir un factor de corrección de manera que el inicio del contacto del pie con el suelo coincida con la fase cero de la marcha ( $\varphi_m = 0$ ). Siguiendo el método propuesto por [17], la fase estimada se corrige mediante un offset  $\rho$ , el cual es actualizado cada vez que se detecta el evento de inicio de la fase de apoyo.

$$\rho = \varphi_{m_{\text{Contacto}}} \quad (7)$$

$$\hat{\varphi}_m = \varphi_m - \rho \quad (8)$$

donde  $\hat{\varphi}_m$  es la fase de la marcha corregida. Para evitar que la corrección de la fase provoque cambios bruscos en la estimación, el factor de corrección es filtrado mediante un filtro Butterworth paso bajo de primer orden con frecuencia de corte de 0.5Hz.

Una vez que se ha adquirido la fase de la pierna maestra, esta se retrasa  $\pi$  rad para estimar la fase de la pierna asistida  $\varphi_a$  de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\varphi_a = \text{mod}((\hat{\varphi}_m + \pi), \pi) \quad (9)$$

Se han realizado los siguientes cambios de variable, de manera que estas pasen a tener significado para el análisis de la marcha.

$$\phi_m(t) = \frac{\hat{\varphi}_m(t)}{2\pi} \cdot 100 \quad (10)$$

$$\phi_a(t) = \frac{\varphi_a(t)}{2\pi} \cdot 100 \quad (11)$$

$$f(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi} \quad (12)$$

De esta manera, las fases de la marcha  $\phi_m(t)$  y  $\phi_a(t)$  están en el rango 0-100 y se refieren al porcentaje dentro del paso. Del mismo modo, la frecuencia de la marcha  $f(t)$  es la frecuencia en tiempo real en pasos por segundo.

## 2.2 ESTRATEGIAS PARA LA ASISTENCIA A LA MARCHA HEMIPARÉTICA

Una vez que el sistema ha estimado la fase del movimiento de ambas piernas, el algoritmo es capaz de generar un patrón de asistencia según el movimiento medido en la pierna maestra. Para ello, se han desarrollado dos estrategias de asistencia diferentes. La primera de ellas tiene como objetivo replicar el movimiento promedio de la pierna maestra, mientras que la segunda pretende aplicar un patrón sano estándar de manera síncrona con el movimiento del lateral no afecto.

### 2.2.1 Estrategia de replicación

Siguiendo el paradigma introducido por Wang et al. [12], se ha desarrollado una estrategia de asistencia que pretende replicar el movimiento de la pierna maestra del usuario. El concepto de esta estrategia está representado en la Figura 2

En una primera etapa, se considera el movimiento de flexión / extensión de la rodilla de la pierna maestra, el cual se mapea sobre la fase de la marcha estimada para esta pierna. Mediante interpoladores lineales, el sistema reconstruye la cinemática del paso en 50 puntos, separados regularmente un 2% del paso. Esta información es almacenada en un búfer que contiene la cinemática de los últimos cinco pasos; calculándose el patrón promedio como la media del contenido de este buffer. Este patrón promedio será utilizado como patrón de asistencia en función de la fase estimada para la pierna asistida ( $\theta_{ref}(\phi_a)$ ).

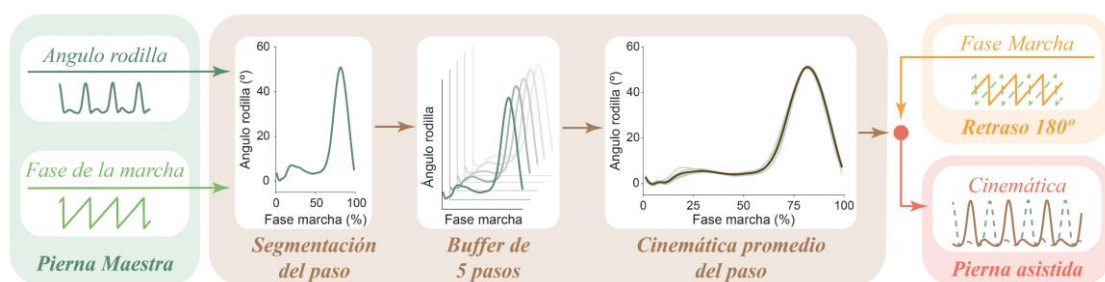


Figura 2: Estrategia de replicación para el control del dispositivo: la cinemática de los últimos cinco pasos se almacena en un *buffer* para calcular el movimiento promedio en función de la fase de la marcha. Este patrón promedio será aplicado por el exoesqueleto de acuerdo con la fase estimada para la extremidad asistida.

Para mejorar el control del dispositivo, no sólo se genera el patrón de valores angulares, sino que también las trayectorias de velocidad y aceleración angulares que debe seguir la articulación. Para ello se parte del patrón promedio, suavizado por un filtro Butterworth paso bajo (quinto orden, frecuencia de muestreo de 50Hz y frecuencia de corte de 10Hz), el cual es derivado respecto la fase para obtener los patrones de velocidad y aceleración, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\dot{\theta}_{ref}(\phi_a) = \frac{d\theta_{ref}(\phi_a)}{dt} = \frac{d\theta_{ref}(\phi_a)}{d\phi_a} \frac{d\phi_a}{dt} \quad (13)$$

$$\ddot{\theta}_{ref}(\phi_a) = \frac{d^2\theta_{ref}(\phi_a)}{dt^2} = \frac{d^2\theta_{ref}(\phi_a)}{d\phi_a^2} \cdot \left(\frac{d\phi_a}{dt}\right)^2 \quad (14)$$

Los valores instantáneos de  $\theta_{ref}$ ,  $\dot{\theta}_{ref}$  and  $\ddot{\theta}_{ref}$  se calculan interpolando linealmente los puntos que definen los tres patrones cinemáticos teniendo en cuenta la fase estimada para la pierna asistida, así como su derivada.

### 2.2.2 Estrategia de sincronización de patrón normalizado

Esta segunda estrategia se basa en la aplicación de las trayectorias para asistencia robótica de la marcha publicadas por Koopman et al. [18]. Esta estrategia utiliza la información de la pierna maestra para adaptar el patrón estándar al movimiento del usuario, representándose esquemáticamente en la Figura 3.

En una primera etapa, esta estrategia analiza el patrón cinemático de la pierna maestra para extraer el rango de movimiento y la fase en la que se produce la máxima flexión de la rodilla en cada paso. Estas características se almacenan en un búfer de cinco pasos, utilizándose el promedio de los cinco últimos pasos para escalar y

desplazar el patrón de referencia. Para evitar cambios bruscos, filtros Butterworth paso bajo de primer orden y frecuencia de corte de 0,5Hz suavizan estos factores antes de su aplicación.

Al igual que la estrategia anterior, también se generan referencias en velocidad y aceleración. En este caso, se han calculado previamente las derivadas del patrón angular con respecto a la fase de la marcha para, posteriormente, escalarlas y desplazarlas por los mismos factores que la referencia angular. Mediante la aplicación de las ecuaciones (13) y (14), estas derivadas con respecto a la fase de la marcha se pasan al dominio del tiempo, para utilizarse como referencias de velocidad y aceleración en la pierna asistida. Una vez que estos patrones de referencia están completamente definidos, se utilizan splines cúbicos para interpolar los valores de  $\theta_{ref}$ ,  $\dot{\theta}_{ref}$  y  $\ddot{\theta}_{ref}$  de acuerdo con la fase estimada para el movimiento asistido.

## 3 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

En esta sección, se va a detallar la validación experimental que se ha realizado sobre la generación de las trayectorias de asistencia. Para ello, se reclutaron tres sujetos sanos (varones, edad:  $24,67 \pm 3,79$  años, altura:  $1,78 \pm 0,02$ m, media  $\pm$  desviación estándar) cuya marcha fue adquirida para simular la acción de los controladores y validar su funcionamiento. Estos sujetos vistieron sensores inerciales en las extremidades inferiores y sensores de presión en las plantillas para monitorizar la cinemática y eventos de la marcha mientras andaban sobre una cinta rodante. Los sujetos realizaron dos tareas diferentes: (1) caminar durante dos minutos a una velocidad constante que fue seleccionada por ellos mismos para resultar confortable; y (2) caminar a velocidad variable en el rango entre 1km/h y 3km/h (la velocidad se varió aleatoriamente en saltos de 0.2km/h cada 15s). Puesto

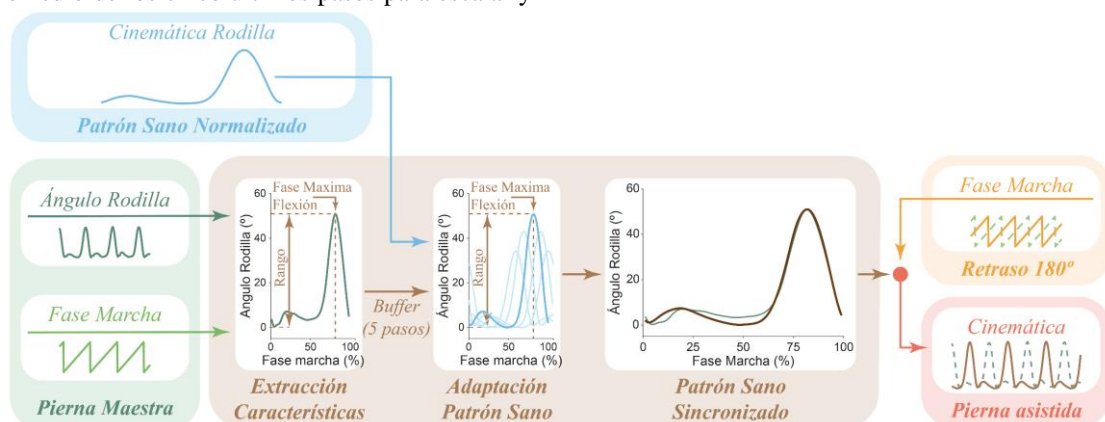


Figura 3: Estrategia de sincronización de un patrón normalizado. Dicho patrón es escalado y desplazado en función de las características de los últimos cinco pasos completados por la extremidad no afecta. Este nuevo patrón adaptado a la marcha del paciente será aplicado por el exoesqueleto de acuerdo con la fase estimada para la extremidad asistida.



que se trata de sujetos sanos, el objetivo de la validación es comparar los patrones generados por ambas estrategias con el movimiento de la pierna derecha (pierna equivalente) de los sujetos cuando se utiliza el movimiento de la pierna izquierda (pierna maestra) como base de los algoritmos.

### 3.1 ESTIMACIÓN DE LA FASE DE LA MARCHA EN TIEMPO REAL

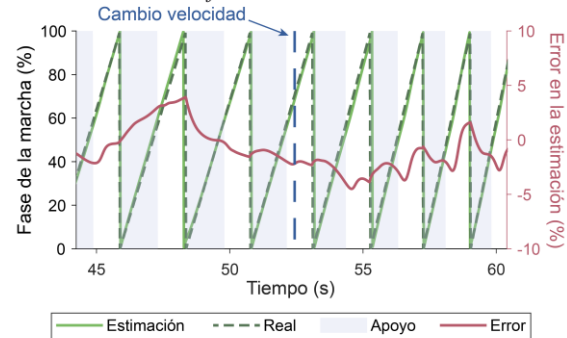
Para evaluar el rendimiento del AFO, se utilizaron los datos de los ensayos a velocidad variable; concretamente, utilizamos el ángulo de la cadera izquierda y el contacto del talón izquierdo como entradas del AFO para estimar la fase en tiempo real. Esta fase estimada ha sido comparada con la fase real de la marcha calculada en base a los eventos de contacto del pie, considerando cada inicio del contacto como el comienzo de un nuevo paso.

La Figura 4 representa la fase estimada por el AFO durante un ensayo; nótese cómo el AFO se adapta a los cambios de velocidad manteniendo válidas las estimaciones. El error medio obtenido en la estimación de la fase es de  $0.28 \pm 2.36\%$ , con un valor RMS de  $2.37\%$ .

### 3.2 GENERACIÓN DE LOS PATRONES DE ASISTENCIA

Para evaluar la generación del patrón de asistencia, se han utilizado los datos experimentales para simular la acción del controlador. Se ha considerado la pierna izquierda como la pierna maestra por lo que el patrón generado debe estar sincronizado con el movimiento de la pierna derecha (pierna equivalente). La Figura 4 muestra el patrón generado por ambas estrategias

#### A. Estimación de la fase de la marcha



#### B. Promedio de la fase de la marcha estimada

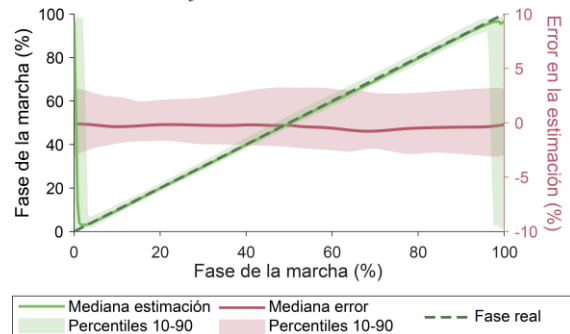


Figura 5: Ejemplo de los resultados de la estimación de la fase de la marcha durante un ensayo a velocidad variable. El panel A compara la fase estimada por el AFO con la fase real durante un intervalo del ensayo. El panel B muestra la mediana y percentiles 10-90 de la estimación y el error obtenido. En ambos paneles el error se representa respecto el eje derecho.

durante una porción de un ensayo a velocidad variable; nótese cómo el controlador reacciona al cambio en la velocidad de la marcha con una pérdida mínima de sincronía.

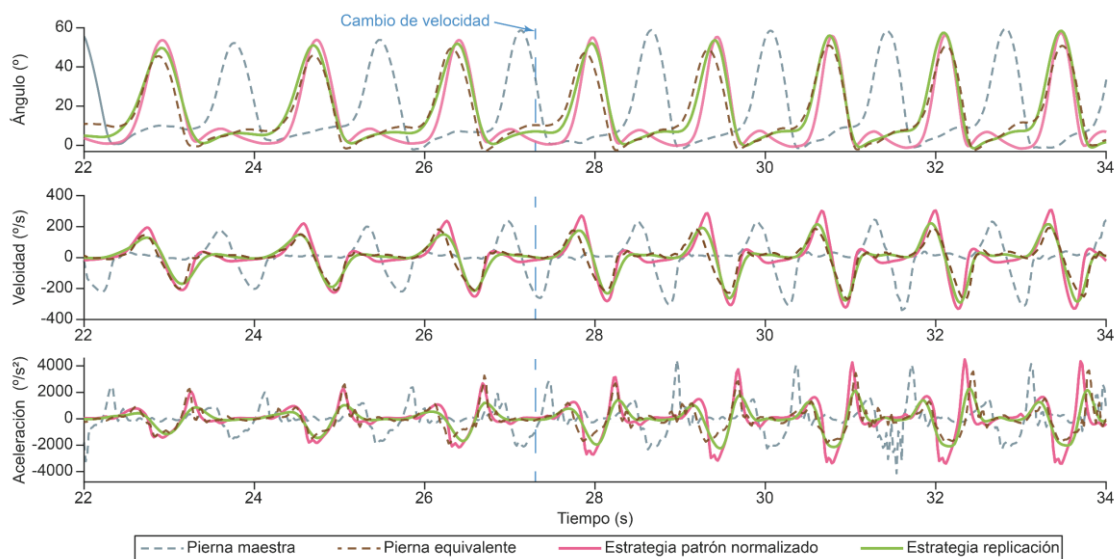
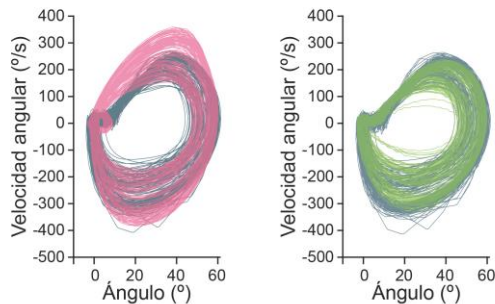


Figura 4: Ejemplo de la generación del patrón de asistencia en base a los datos experimentales de un sujeto sano. Se muestra un ejemplo de las referencias calculadas de acuerdo con las dos estrategias de asistencia y se comparan con el movimiento de la pierna maestra y de la pierna equivalente.



Con el fin de validar el patrón generado por las estrategias de asistencia, se evalúan tanto la forma de onda del patrón generado como su temporización. Para valorar la forma de onda, se utiliza la representación en *phase portraits* de los patrones cinemáticos (representación del ángulo de flexión frente a la

#### A. Velocidad de marcha variable



#### B. Velocidad de marcha constante

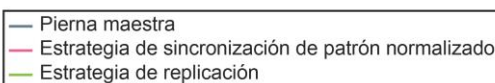
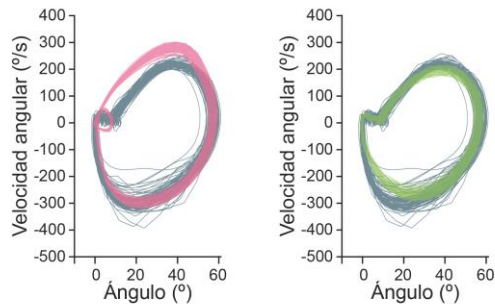


Figura 6: *Phase portraits* para la comparación del movimiento de la pierna maestra con las referencias generadas por ambas estrategias. Se muestran los resultados de un sujeto bajo las condiciones de velocidad de marcha variable (panel A) y velocidad constante (panel B)

velocidad angular, Figura 6) que describen la dinámica del movimiento[19]. La similitud se evalúa de acuerdo con la siguiente métrica:

$$\text{Similitud}(\%) = \frac{P1 \cap P2}{P1 \cup P2} \cdot 100 \quad (15)$$

Donde  $P1$  y  $P2$  son las áreas encerradas por ambos *phase portraits*, siendo  $P1 \cap P2$  el área común a ambos y  $P1 \cup P2$  la unión de ambas áreas. El panel A de la Figura 7 muestra la distribución de esta métrica en función de la estrategia de asistencia y la velocidad de la marcha.

En cuanto a la validación de la temporización del patrón generado, se ha comparado este movimiento con el realizado por la pierna equivalente, es decir, la pierna que no fue utilizada como base de la generación. Esta temporización se ha evaluado a través de dos métricas: la correlación entre ambos movimientos (Figura 7, panel B) y el retraso en la flexión máxima de rodilla (Figura 7, panel C)

La similitud promedio del patrón de asistencia con el movimiento de la pierna maestra es del  $77.5 \pm 5.92\%$  para la estrategia basada en el patrón normalizado y del  $84.31 \pm 8.43\%$  para la estrategia de replicación. En cuanto a la temporización de la asistencia, la correlación promedio es de  $R=0.9 \pm 0.1$  y el retardo promedio es de  $-0.021 \pm 0.060s$  para la estrategia basada en el patrón normalizado mientras que la estrategia de replicación obtuvo una correlación de  $R=0.95 \pm 0.08$  y un retraso promedio de  $-0.012 \pm 0.053s$ .

Después de comprobar la no normalidad de los datos en algunas de las distribuciones (test de Kolmogorov-Smirnov,  $P < 0.01$ ) se han buscado diferencias significativas entre estrategias así como el efecto de

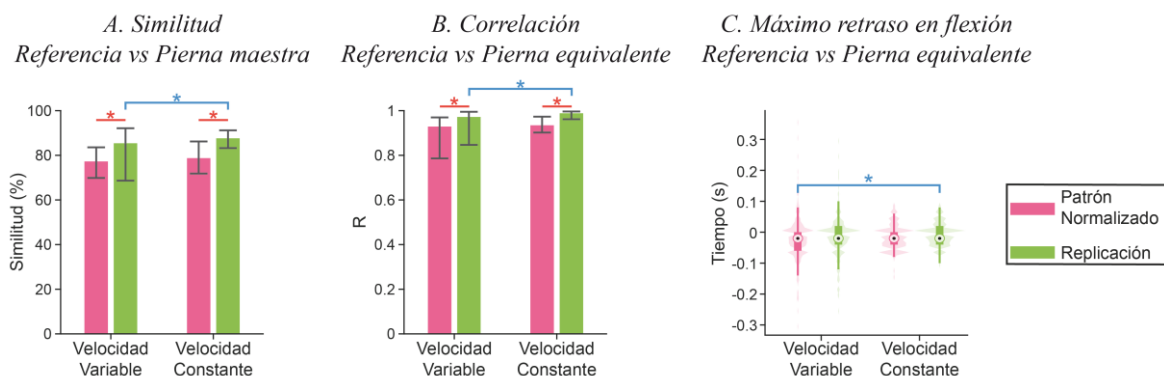


Figura 7: Evaluación de la referencia generada por las dos estrategias de asistencia. El panel A muestra la similitud del *phase portrait* entre la referencia y el movimiento de la pierna maestra. El panel B muestra la correlación entre la referencia y el movimiento de la pierna equivalente. La longitud de las barras indica la mediana de la métrica y los bigotes los percentiles 10-90. El panel C muestra el retraso en la flexión máxima de rodilla entre la referencia y la pierna equivalente; la distribución está representada por su *violin plot* (boxplot junto al histograma en forma de área). Los marcadores (\*) indican diferencias significativas entre las distribuciones

variaciones en la velocidad de la marcha; están representadas por los marcadores de la Figura 7 (test de Kruskal-Wallis,  $P < 0.01$ ).

## 4 DISCUSIÓN

En este documento se presentan dos estrategias para generar patrones de referencia para asistencia unilateral de la marcha en pacientes hemiparéticos. Ambas estrategias se basan en la estimación en tiempo real de la fase de la marcha mediante un AFO y en la medición de la cinemática de la pierna maestra, es decir, la extremidad sana, del paciente. Ambas estrategias generan un patrón de asistencia que está sincronizado con el propio movimiento del paciente, una de ellas mediante la replicación del movimiento de la pierna no afecta y la otra mediante la sincronización de un patrón sano estándar que se adapta al movimiento del usuario.

La estimación en tiempo real de la fase de la marcha ha demostrado ser capaz de adaptarse a los cambios de velocidad de la marcha, manteniendo un error RMS inferior a 2.4%. Esto está en línea con los resultados publicados por otros trabajos que también utilizan un AFO para la estimación en tiempo real de la fase de marcha: Zheng et al. obtuvieron errores RMS del 3% mediante el uso de sensores capacitivos [20] y Yan et al. reportaron errores RMS del 2% en base a medidas de la fuerza de reacción del suelo, y del 1.4% en base al ángulo de la cadera medida a través de un encoder [21].

En cuanto a la generación de los patrones de asistencia, cabe destacar que la estrategia de replicación obtiene mejores métricas que la estrategia basada en el patrón normalizado, reportando similitudes promedio con la pierna maestra sobre el 84% y el 77% y correlaciones del 0.95 y 0.9 respectivamente. Estas discrepancias son debidas a la diferencia existente entre el patrón normalizado y el propio patrón del sujeto, siendo, lógicamente, más similar la asistencia a su propio patrón cuando se utiliza la estrategia de replicación.

Por otra parte, si bien la estrategia basada en el patrón normalizado no muestra cambios ante variaciones de velocidad de la marcha, la estrategia de replicación obtiene mejores resultados a velocidad constante. Esto es debido a que, el cálculo del patrón promedio es más consistente cuando el sujeto camina a velocidad constante pues supone una mejor estimación de la fase de la marcha por parte del AFO y el propio patrón de la pierna sana es más repetitivo si no existen cambios de velocidad.

Comparadas con las estrategias de control reportadas previamente para el prototipo REFLEX, esta metodología se basa en la estimación de la fase de la marcha realizada por el AFO, la cual es una señal

continua y robusta ante cambios de velocidad. Frente a las estrategias basadas en retrasos y máquinas de estados finitos [13] esta nueva metodología permite un cálculo más robusto del patrón de asistencia y permite cerrar el lazo de control, no sólo en posición sino también en velocidad y aceleración para un mejor seguimiento de trayectorias.

## 5 CONCLUSIÓN

En este documento se han introducido dos nuevas estrategias de control para una órtesis activa de rodilla que tienen por objeto asistir la marcha de sujetos hemiparéticos en base al movimiento de su pierna no afecta. Las estrategias presentadas han sido evaluadas en base a datos experimentales obtenidos de sujetos sanos y han sido validadas tanto desde el punto de vista de la dinámica del movimiento y como de la sincronía con la propia marcha de los sujetos.

Las estrategias presentadas en este trabajo permitirán la asistencia de la marcha de sujetos con hemiparesia y permitirán llevar a cabo nuevas terapias de rehabilitación que busquen aumentar la simetría de la marcha y la reducción de mecanismos de compensación. Así mismo, se abre la posibilidad a realizar nuevos estudios para analizar el efecto que tiene la asistencia robótica sobre estos pacientes y estudiar cómo el movimiento de los propios pacientes se adapta a la asistencia prestada por el dispositivo.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y los Fondos Estructurales de la Unión Europea (Robocity, S2018/NMT-4331). El autor Julio S. Lora Millán ha recibido financiación del programa de Formación de Profesorado Universitario del Ministerio de Universidades del Gobierno de España (ref. FPU16/01313).

### English summary

## STRATEGIES FOR HEMIPARETIC GAIT ASSISTANCE THROUGH AN ACTIVE KNEE ORTHESIS

### Abstract

*Hemiparesis is one of the most common consequences of stroke. Hemiparetic gait is characterized by a strong asymmetry and patients usually develop compensation mechanism to achieve a functional gait; however, these patients still need devices that assist their gait. In this document, we propose two strategies*

to generate assistive gait patterns for an active knee orthosis. Both strategies are based on the kinematics of the unimpaired limb and use a real-time gait phase estimation to synchronize the generated pattern with the movement of the user. We have validated these pattern generation with experimental data from three healthy subjects. Results point out that generated assistance is in accordance with the motion of the sound limb and it is synchronized with the movement of the user.

**Keywords:** Gait assistance, Hemiparesis, Adaptive Frequency Oscillator, Active Knee Orthosis.

## Referencias

- [1] G. Morone *et al.*, “Robot-assisted gait training for stroke patients: Current state of the art and perspectives of robotics,” *Neuropsychiatr. Dis. Treat.*, vol. 13, pp. 1303–1311, 2017.
- [2] Y. Béjot, H. Bailly, J. Durier, and M. Giroud, “Epidemiology of stroke in Europe and trends for the 21st century,” *Press. Medicale*, vol. 45, no. 12, pp. e391–e398, 2016.
- [3] S. Li, G. E. Francisco, and P. Zhou, “Post-stroke hemiplegic gait: New perspective and insights,” *Front. Physiol.*, vol. 9, no. AUG, pp. 1–8, 2018.
- [4] S. J. Olney and C. Richards, “Hemiparetic gait following stroke. Part I: Characteristics,” *Gait Posture*, vol. 4, no. 2, pp. 136–148, Apr. 1996.
- [5] S. Schmid, K. Schweizer, J. Romkes, S. Lorenzetti, and R. Brunner, “Secondary gait deviations in patients with and without neurological involvement: A systematic review,” *Gait Posture*, vol. 37, no. 4, pp. 480–493, 2013.
- [6] N. E. Mayo *et al.*, “Disablement following stroke,” *Disabil. Rehabil.*, vol. 21, no. 5–6, pp. 258–268, Jan. 1999.
- [7] D. J. Farris, A. Hampton, M. D. Lewek, and G. S. Sawicki, “Revisiting the mechanics and energetics of walking in individuals with chronic hemiparesis following stroke: From individual limbs to lower limb joints,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–12, 2015.
- [8] L. E. Skolarus, J. F. Burke, and V. A. Freedman, “The role of accommodations in poststroke disability management,” *J. Gerontol. B. Psychol. Sci. Soc. Sci.*, vol. 69 Suppl 1, no. Suppl 1, pp. S26–34, Nov. 2014.
- [9] M. F. Bruni, C. Melegari, M. C. De Cola, A. Bramanti, P. Bramanti, and R. S. Calabrò, “What does best evidence tell us about robotic gait rehabilitation in stroke patients: A systematic review and meta-analysis,” *J. Clin. Neurosci.*, vol. 48, pp. 11–17, Feb. 2018.
- [10] L. N. Awad *et al.*, “A soft robotic exosuit improves walking in patients after stroke,” *Sci. Transl. Med.*, vol. 9, no. 400, p. eaai9084, Jul. 2017.
- [11] W.-Y. Lai, H. Ma, W.-H. Liao, D. T.-P. Fong, and K.-M. Chan, “HIP-KNEE control for gait assistance with Powered Knee Orthosis,” in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2013, pp. 762–767.
- [12] W. J. Wang, J. Li, W. Da Li, and L. N. Sun, “An Echo-Based Gait Phase Determination Method of Lower Limb Prosthesis,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 706–708, pp. 629–634, Jun. 2013.
- [13] J. S. Lora-Millan, J. C. Moreno, and E. Rocon, “Assessment of gait symmetry, torque interaction and muscular response due to the unilateral assistance provided by an active knee orthosis in healthy subjects,” in *2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 2020, vol. 2020-Novem, no. 688175, pp. 229–234.
- [14] M. Plotnik, N. Giladi, and J. M. Hausdorff, “A new measure for quantifying the bilateral coordination of human gait: Effects of aging and Parkinson’s disease,” *Exp. Brain Res.*, vol. 181, no. 4, pp. 561–570, 2007.
- [15] R. Ronsse, S. M. M. De Rossi, N. Vitiello, T. Lenzi, M. C. Carrozza, and A. J. Ijspeert, “Real-Time Estimate of Velocity and Acceleration of Quasi-Periodic Signals Using Adaptive Oscillators,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 29, no. 3, pp. 783–791, Jun. 2013.
- [16] G. Aguirre-Ollinger, A. Narayan, and H. Yu, “Phase-Synchronized Assistive Torque Control for the Correction of Kinematic Anomalies in the Gait Cycle,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 27, no. 11, pp. 2305–2314, Nov. 2019.
- [17] W. van Dijk, C. Meijneke, and H. van der Kooij, “Evaluation of the Achilles Ankle Exoskeleton,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 25, no. 2, pp. 151–160, Feb. 2017.
- [18] B. Koopman, E. H. F. van Asseldonk, and H. van der Kooij, “Speed-dependent reference joint trajectory generation for robotic gait support,” *J. Biomech.*, vol. 47, no. 6, pp. 1447–1458, Apr. 2014.
- [19] Y. Hurmuzlu, C. Basdogan, and J. J. Carollo, “Presenting joint kinematics of human locomotion using phase plane portraits and Poincaré maps,” *J. Biomech.*, vol. 27, no. 12, pp. 1495–1499, Dec. 1994.
- [20] E. Zheng, S. Manca, T. Yan, A. Parri, N. Vitiello, and Q. Wang, “Gait phase estimation based on noncontact capacitive sensing and adaptive oscillators,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 64, no. 10, pp. 2419–2430, 2017.
- [21] T. Yan, A. Parri, V. Ruiz Garate, M. Cempini, R. Ronsse, and N. Vitiello, “An oscillator-based smooth real-time estimate of gait phase for wearable robotics,” *Auton. Robots*, vol. 41, no. 3, pp. 759–774, 2017.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# Desarrollo de BenchBalance: un sistema para la evaluación de la capacidad de equilibrio en exoesqueletos robóticos

Cristina Bayón<sup>1,2</sup>, Gabriel Delgado-Oleas<sup>1</sup>, Nevio L. Tagliamonte<sup>3</sup>, Edwin van Asseldonk<sup>2</sup>, Eduardo Rocon<sup>1</sup>  
c.bayon@upm.es

<sup>1</sup>Centro de Automática y Robótica, CSIC-UPM; <sup>2</sup>University of Twente; <sup>3</sup>Università Campus Bio-Medico di Roma

## Resumen

*Avances recientes en el control de exoesqueletos se están centrando en mejorar la asistencia de equilibrio y disminuir la dependencia de las muletas. Sin embargo, métodos apropiados para cuantificar la estabilidad de estos exoesqueletos (y de sus usuarios) aún son escasos. Una evaluación del equilibrio cuantitativa es fundamental para enriquecer el desempeño de los exoesqueletos y su interacción con los seres humanos. En este trabajo presentamos el sistema BenchBalance, una solución para realizar evaluaciones comparativas y reproducibles de equilibrio en exoesqueletos y sus usuarios. Al integrar dos elementos clave (perturbador manual y prenda inteligente), BenchBalance es una herramienta portátil y de bajo coste que proporciona una evaluación cuantitativa relacionada con la reacción y la capacidad de los exoesqueletos portátiles y sus usuarios para responder a perturbaciones externas controladas.*

**Palabras clave:** Equilibrio; Evaluación; Exoesqueletos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los exoesqueletos robóticos de extremidades inferiores han ganado un gran interés en las últimas décadas, demostrando la capacidad de ayudar a personas con distintas discapacidades motoras a permanecer erguidas y poder desplazarse. Investigaciones recientes sobre estos dispositivos avanzan hacia el desarrollo de controladores que permitan mantener el equilibrio durante la bipedestación o la locomoción. Estos controladores, destinados a mejorar la estabilidad del usuario con el exoesqueleto, pueden variar en complejidad y van desde (1) extender el uso de estrategias de control desarrolladas en humanoides [2, 9, 11, 3], (2) utilizar enfoques bioinspirados [10, 13, 1] o (3) implementar métodos heurísticos no complejos [6, 8, 4]. Sin embargo, hay una necesidad en la elaboración de procedimientos y métricas para cuantificar, comparar y evaluar adecuadamente la estabilidad de los diferentes controladores, exoesqueletos y sus usuarios.

El objetivo principal de esta contribución es mejorar los métodos actuales para evaluar las capacidades de equilibrio y estabilización de exoesqueletos de miembro inferior. Para ello, presentamos una nueva solución de benchmarking que permite realizar evaluaciones cuantitativas y reproducibles: BenchBalance (Figura 1). Nuestra solución es capaz de proporcionar y medir perturbaciones externas efectuadas manualmente por un experimentador, en términos de magnitud, orientación y ubicación, a sujetos que llevan un exoesqueleto. Las perturbaciones proporcionadas se pueden generar en cualquier grado de libertad de los tres planos de movimiento. Esta herramienta puede usarse para derivar métricas que cuantifiquen las capacidades de equilibrio del usuario que use (o no) un exoesqueleto. Para la fabricación y el desarrollo de BenchBalance se utilizaron componentes básicos existentes y materiales impresos en 3D, por lo que su reproducción está asegurada para aquellos grupos de investigación interesados en la evaluación comparativa del equilibrio perturbado.

## 2. SISTEMA BENCHBALANCE

Para poder proporcionar una evaluación de equilibrio precisa y derivar métricas cuantitativas de las capacidades de equilibrio de un humano vistiendo un exoesqueleto, nos centramos en tres factores clave: primero, era necesario cuantificar la perturbación aplicada en términos de magnitud y orientación de la fuerza; en segundo lugar, era fundamental realizar una estimación correcta de dónde se aplica la perturbación, ya que las estrategias de equilibrio podrían diferir dependiendo de la ubicación de dicha perturbación; y tercero, era necesario evaluar la sincronización de la perturbación con la respuesta del usuario. En base a eso, el sistema BenchBalance (Figura 1) está compuesto por (1) un perturbador portátil de mano equipado con diferentes sensores, utilizado para proporcionar y cuantificar perturbaciones bien definidas en la parte superior del cuerpo humano; y (2) un detector de sistema de posición (prenda inteligente), utilizado para determinar la ubicación de la perturbación generada en relación con el ser humano que lleva el exoesqueleto. La información de

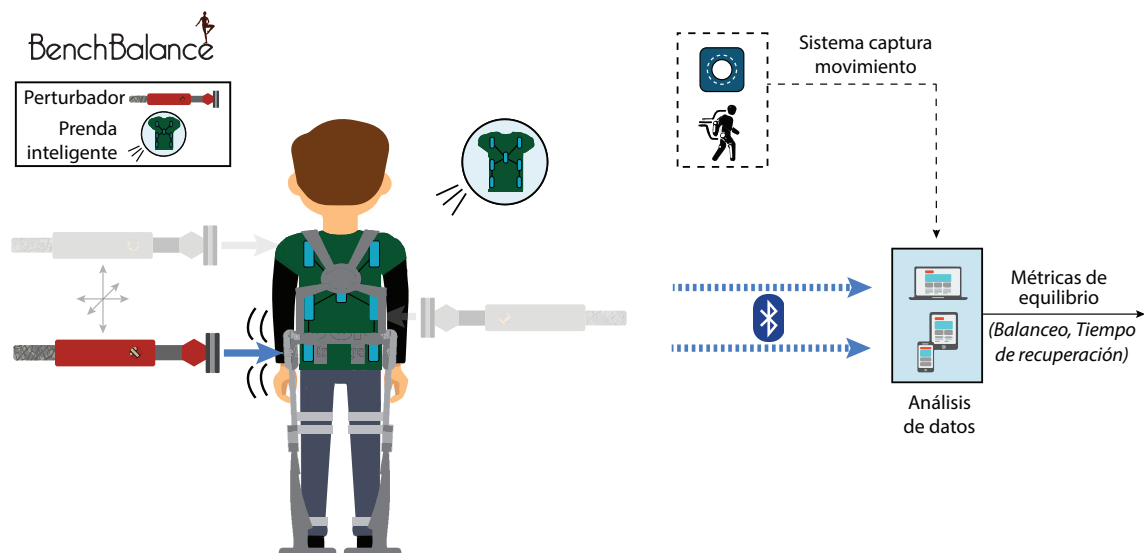


Figura 1: Esquema general del sistema BenchBalance. La información del perturbador y de la prenda inteligente se transmite por bluetooth, y se combina con la proporcionada por un sistema de captura de movimiento para su procesamiento

la fuerza externa proporcionada (magnitud, dirección y ubicación) se combina posteriormente con los datos cinemáticos del exoesqueleto o de un sistema de captura de movimiento (Mo-Cap) para generar las métricas de evaluación del equilibrio. En la evaluación, la reacción del usuario y exoesqueleto se relacionan con el tiempo empleado para recuperar la postura natural después de la perturbación y con la magnitud del balanceo corporal inducido.

## 2.1. PERTURBADOR MANUAL

El perturbador (Figura 2-(a)) fue diseñado para ser manipulado fácilmente por un operador, por lo que la versatilidad del dispositivo es muy alta en términos de usabilidad. Dicho sistema está equipado con los siguientes sensores:

- Sensor de fuerza (ME Systeme - ME-K3D60a), que cuantifica la fuerza de tal perturbación aplicada al usuario en los 3 ejes
- Sensor inercial (Xsens-Mti-3 AHRS), para medir la orientación relativa de la perturbación con respecto al humano

## 2.2. PRENDA INTELIGENTE

Un chaleco textil fue diseñado y equipado con fibras ópticas poliméricas (Figura 2-(b)), con el fin de detectar el área de aplicación de la perturbación en el usuario. Esta prenda inteligente ofrece una solución robusta, mínimamente invasiva y multiplexada para controlar la presión de la perturbación sobre la parte superior del cuerpo humano. Está equipado con los siguientes sensores:

- Sensores de fibra óptica (PMMA-HFBR-EUS100Z, Broadcom Limited) distribuidos para cubrir el área frontal y posterior del tronco, el área debajo de los brazos y los hombros. En total, treinta sensores componen la prenda, cada uno con una lámpara flexible. Su funcionamiento está basado en la variación de la intensidad de la luz, convirtiendo esta intensidad en voltaje [7]. Así, se puede determinar la zona de presión de la perturbación
- Un sensor inercial similar al del perturbador (Xsens - MTi-3 AHRS), el cual se usa para calcular la orientación relativa del perturbador con respecto al cuerpo humano

## 2.3. ANÁLISIS Y CAPTURA DE DATOS

### 2.3.1. Registro y sincronización

Para facilitar la utilización del sistema BenchBalance, se desarrolló una interfaz de usuario. Esta interfaz recibe los datos del perturbador y la prenda inteligente a través de Bluetooth 5.0, y guía al experimentador a lo largo de los pasos necesarios para realizar perturbaciones reproducibles en el cuerpo humano. La interfaz está programada en Python (Python Software Foundation, Delaware, Estados Unidos), e incluye propiedades anónimas (altura, masa total) de los sujetos de prueba. Antes de iniciar las mediciones, se requiere calibrar el sistema. Esto también se hace a través de la interfaz, la cual indica al experimentador cómo colocar el perturbador y la prenda inteligente en la posición de calibración y durante cuánto tiempo, hasta

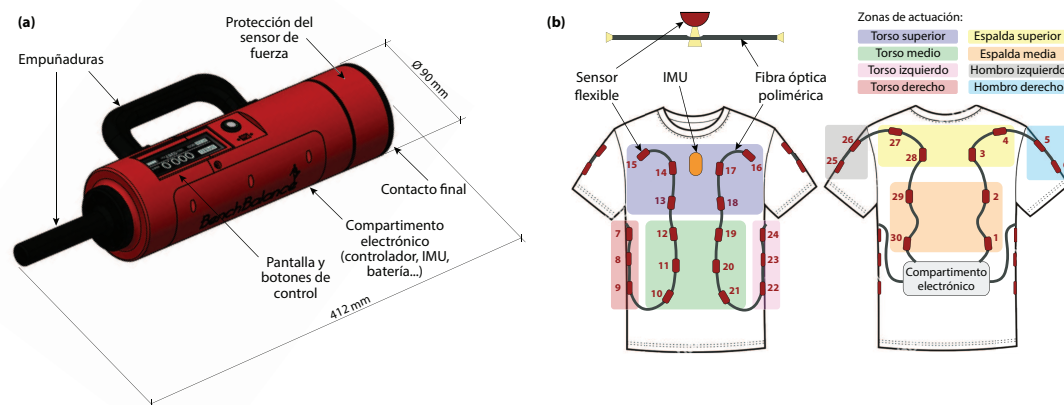


Figura 2: Subsistemas de BenchBalance: (a) perturbador manual y (b) prenda inteligente

que se hayan eliminado los valores de compensación. Después de calibrar el sistema, el experimentador tiene la opción de registrar libremente o de seguir un protocolo predefinido de perturbaciones.

Los datos registrados con la interfaz se envían a una computadora host para su posprocesamiento, sincronizándose correctamente mediante “timestamp”.

### 2.3.2. Métricas

El objetivo de las métricas generadas es la cuantificación de la respuesta a la perturbación aplicada en condiciones de bipedestación, expresando el análisis en función de variables como la magnitud del balanceo corporal y el tiempo de recuperación del usuario+exoesqueleto. Para poder generar estas métricas, es necesario obtener variables controladas del sistema en las que se incluyen:

- Magnitud de la perturbación: amplitud máxima de la fuerza aplicada al sujeto expresada en Newtons (magnitud del vector resultante de los tres ejes)
- Tipo de Perturbación: nivel de perturbación que depende del peso del sujeto. Se definieron dos niveles: “Débil” ( $8 \pm 2\%$  peso del usuario+exoesqueleto) y “Fuerte” ( $16 \pm 2\%$  peso del usuario+exoesqueleto)
- Duración de la perturbación: tiempo de aplicación de la fuerza. Se definió un nivel aceptable entre 0.2 y 0.5 segundos
- Orientación: ángulo relativo entre el cuerpo del sujeto y el perturbador. Se requiere una orientación lo más perpendicular posible al

tronco humano, con una tolerancia de  $\pm 15$  grados

- Ubicación: zona de la prenda inteligente donde se provoca la perturbación al sujeto
- Exoesqueleto: valor booleano representando si el usuario viste o no el exoesqueleto

Con dichas variables controladas se calculan posteriormente los indicadores o métricas de equilibrio:

- Balanceo del Cuerpo: representa el ángulo máximo del cuerpo en respuesta a una perturbación proporcionada. Un valor alto del balanceo del cuerpo indica una menor capacidad del sujeto para mantener el equilibrio
- Tiempo de recuperación: representa el tiempo empleado para recuperarse de una perturbación (el centro de masa, CoM, vuelve a la posición de reposo). Se considera que la posición se ha recuperado si la velocidad de oscilación del CoM es menor que un umbral de 0.015 rad/s después del inicio de la perturbación

Para calcular las métricas de equilibrio, en BenchBalance consideramos un modelo del ser humano (y el exoesqueleto) compuesto por un sistema de cuerpo rígido de cinco segmentos (Figura 3). Las articulaciones entre segmentos se consideran como articulaciones rotativas puras. Se supone que los pies no pueden despegarse del suelo y, por lo tanto, no están incluidos en el modelo (i.e. la articulación del tobillo se supone virtualmente conectada directamente con el suelo).



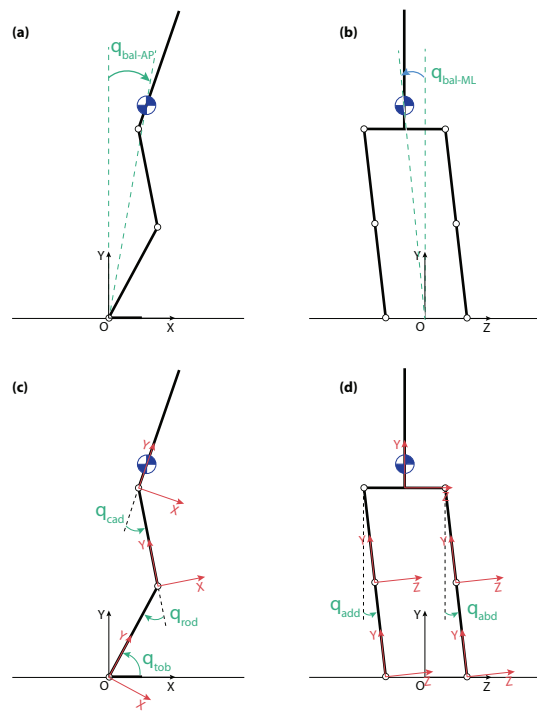


Figura 3: Convención de ángulos articulares ( $q_{cad}$ ,  $q_{rod}$ ,  $q_{tob}$ ,  $q_{add/abd}$ ) y ángulo de balanceo ( $q_{bal}$ ) en las direcciones antero-posterior (AP) y medio-lateral (ML)

Como parámetros de entrada para los algoritmos de BenchBalance, se requiere: (1) la longitud de los segmentos considerados (pantorrilla, muslo y tronco [5]), lo cual se puede medir directamente en el cuerpo del sujeto; (2) las masas de cada segmento, que se calculan a partir de la masa total del sujeto utilizando la aproximación de Winter [12]. Si el exoesqueleto está presente, las masas y propiedades del dispositivo robótico se deberán proporcionar a través de un archivo en formato “Unified Robot Description Format”(urdf); y (3) el CoM de cada segmento, calculado en base a [12] con respecto a la articulación distal.

En el modelo, se toman algunas simplificaciones para los planos sagital y frontal (Figura 3):

- Para el plano sagital, las piernas izquierda y derecha se consideran idénticas y colocadas simétricamente. Además, solo se consideran los ángulos puros de flexión y extensión de cadera, rodilla y tobillo ( $q_{cad}$ ,  $q_{rod}$ ,  $q_{tob}$ )
- Para el plano frontal, la adducción-abducción de la cadera ( $q_{add/abd}$ ) se considera igual para las articulaciones de cadera izquierda y derecha

El CoM total (exoesqueleto + humano) de un segmento  $i$  ( ${}^iCoM_{HE}$ ), se calcula del siguiente modo:

$${}^iCoM_{HE} = \frac{{}^iCoM_H {}^iM_H + {}^iCoM_E {}^iM_E}{{}^iM_H + {}^iM_E} \quad (1)$$

donde  ${}^iCoM_H$  y  ${}^iCoM_E$ ,  ${}^iM_H$  y  ${}^iM_E$  corresponden al CoM y masa del segmento  $i$  del ser humano (H) y el exoesqueleto (E), respectivamente.

### 3. CONCLUSIONES

BenchBalance aporta a la comunidad científica la posibilidad de obtener métricas estándar para evaluar la estabilidad y el control de equilibrio con exoesqueletos robóticos, siendo también posible su extensión a robots humanoides. Además, con BenchBalance, se abren diversas posibilidades para evaluar sistemas en los que sean necesarias perturbaciones conocidas, tanto en magnitud como en orientación. A su vez, la prenda inteligente puede ser utilizada en diferentes escenarios en los que sea necesario conocer zonas de presión en el cuerpo del usuario.

Las métricas de equilibrio derivadas (ángulo de balanceo y tiempo de recuperación) aportan un novedoso enfoque para evaluar de forma objetiva la estabilidad de una persona con o sin exoesqueleto. Esto, a su vez, puede aportar grandes beneficios para la comparación de controladores de equilibrio en exoesqueletos robóticos.

El sistema BenchBalance ha sido desarrollado para el consorcio EUROBENCH y se incorporará como un banco de pruebas en sus laboratorios para futuros experimentos de comparación de exoesqueletos portátiles.

#### Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto europeo EUROBENCH2020 (eurobench2020.eu), número de subvención n779963.

#### English summary

#### BenchBalance: a system to assess benchmarking balance capabilities of wearable robots

#### Abstract

*Recent advances on the control of exoskeletons are being centered on improving balance support and decreasing the reliance on crutches. However, appropriate methods to quantify the stability of these exoskeletons (and their users) are still under development. A reliable and reproducible balan-*

*ce assessment is critical to enrich exoskeletons' performances and their interaction with human beings. In this work we present the BenchBalance system, a benchmarking solution to conduct reproducible balance assessments of exoskeleton and users. Integrating two key elements (manual perturber and smart garment), BenchBalance is a portable and low-cost tool that provides a quantitative assessment related to the reaction and capacity of wearable exoskeletons and their users to respond to controlled external perturbations.*

**Keywords:** Balance; Assessment; Exoskeletons; Benchmarking.

## Referencias

- [1] Maarten Afschrift y col. "Mechanical effort predicts the selection of ankle over hip strategies in nonstepping postural responses". En: *Journal of Neurophysiology* 116.4 (2016), págs. 1937-1945. ISSN: 15221598. DOI: 10.1152/jn.00127.2016.
- [2] Ayush Agrawal y col. "First Steps Towards Translating HZD Control of Bipedal Robots to Decentralized Control of Exoskeletons". En: *IEEE Access* 5 (2017), págs. 9919-9934. ISSN: 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2690407.
- [3] C. Bayón y col. "Can Momentum Based Control Predict Human Balance Recovery Strategies?". En: *IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering* 28.9 (2020), págs. 2015-2024. DOI: 10.1109/TNSRE.2020.3005455.
- [4] C. Bayón y col. "Cooperative ankle-exoskeleton control can reduce effort to recover balance after unexpected disturbances during walking". En: *submitted to Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* (2021).
- [5] EUROBENCH. *Eurobench framework documentation*. 2021. URL: [https://eurobench.github.io/software\\_documentation/latest/data\\_format.html#EurobenchDataFormat](https://eurobench.github.io/software_documentation/latest/data_format.html#EurobenchDataFormat) (visitado 10-05-2021).
- [6] Rachel W Jackson y Steven H Collins. "Heuristic-Based Ankle Exoskeleton Control for Co-Adaptive Assistance of Human Locomotion". En: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* PP.c (2019), pág. 1. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2936383.
- [7] Arnaldo G. Leal-Junior y col. "Multiplexing technique for quasi-distributed sensors arrays in polymer optical fiber intensity variation-based sensors". En: *Optics and Laser Technology* 111 (2019), págs. 81-88. ISSN: 00303992. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.09.044.
- [8] V. Monaco y col. "An ecologically-controlled exoskeleton can improve balance recovery after slippage". En: *Scientific Reports* 7.May (2017), págs. 1-10. ISSN: 20452322. DOI: 10.1038/srep46721.
- [9] Carlotta Mummolo y col. "Stability of Mina V2 for robot-assisted balance and locomotion". En: *Frontiers in Neurobotics* 12.October (2018), págs. 1-16. ISSN: 16625218. DOI: 10.3389/fnbot.2018.00062.
- [10] Nitish Thatte y Hartmut Geyer. "Toward Balance Recovery with Leg Prostheses using Neuromuscular Model Control". En: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* (2015), págs. 1-10.
- [11] Barkan Ugurlu y col. "Variable ankle stiffness improves balance control: experiments on a bipedal exoskeleton". En: *IEEE Transactions on mechatronics* 21.1 (2016), págs. 79-87.
- [12] D.A. Winter. "Anthropometry". En: *Biomechanics and Motor Control of Human Movements*. 4.<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons Inc., 2009, págs. 82-106. ISBN: 9780470398180.
- [13] Guoping Zhao y col. "Bio-Inspired Balance Control Assistance Can Reduce Metabolic Energy Consumption in Human Walking". En: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 27.9 (2019), págs. 1760-1769. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2929544.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# SISTEMA AMBULATORIO DE MONITORIZACIÓN DE CRISIS EPILÉPTICAS

D. Zambrana-Vinaroz, J.M. Sabater-Navarro  
Universidad Miguel Hernández, Elche-España, dzambrana@umh.es

## Resumen

*La epilepsia es una enfermedad crónica con un importante impacto social. Los afectados y sus familiares suelen vivir condicionados por la posibilidad de una crisis epiléptica y sus posibles consecuencias como accidentes, lesiones e incluso la muerte súbita inexplicable (SUDEP). Por ello, en este artículo se propone el diseño de un dispositivo electrónico y portátil que integra y guarda la información recogida por diferentes sensores (EEG, ECG y PPG) con el fin de calcular ciertos parámetros que aportan información acerca del sistema nervioso y cardiovascular. Además, dicho dispositivo puede ser utilizado para estudiar de manera ambulatoria las crisis epilépticas y servir como instrumento de apoyo a la hora de tomar decisiones clínicas.*

**Palabras clave:** Epilepsia, monitorización portátil, ECG, EEG, PPG, PTT.

## 1 INTRODUCCIÓN

La epilepsia es una enfermedad crónica de enorme impacto sociosanitario. La tasa de prevalencia global en España es de 14,87 casos por 1.000 habitantes [9] y su incidencia global en el mundo oscila alrededor de los 50 casos por 100.000 habitantes y año [1], [11]. Aunque disponemos de una gran cantidad de fármacos antiepilépticos y de otros tratamientos más selectivos como la cirugía o la estimulación cerebral, un porcentaje considerable de pacientes (alrededor del 30%) no están controlados y continúan teniendo crisis epilépticas, por lo que es necesario optimizar la atención de la epilepsia en toda Europa y continuar con los esfuerzos de investigación actuales.

La tasa de mortalidad de los pacientes con epilepsia es de 2 a 3 veces mayor a la de la población general y son relativamente frecuentes los suicidios, los accidentes y la muerte súbita inexplicable [1], [11], [2]. La muerte súbita inexplicable en epilepsia (SUDEP) hace

referencia a la muerte inesperada de una persona con epilepsia por lo demás sana, sin que se encuentre una causa clara [6]. Los mecanismos exactos son desconocidos, aunque se considera que una disfunción cardiorrespiratoria provocada por cambios directos en el control autonómico respiratorio y cardíaco (apnea, bradicardia postictal y parada cardíaca) durante o en los momentos inmediatamente posteriores a una crisis generalizada tónico-clónica podría ser la responsable de este fatal desenlace [13].

En este contexto, podemos decir que la falta de previsibilidad de las crisis y sus posibles y graves consecuencias constituye una importante limitación de la independencia de las personas epilépticas y condiciona enormemente su calidad de vida.

Por ello, es necesario llevar a cabo una monitorización ambulatoria de ciertas variables bioeléctricas que permitan llevar a cabo un análisis del estado de salud de las personas [14].

La variabilidad del ritmo cardíaco (HRV heart rate variability) es el fenómeno fisiológico de la variación en el intervalo de tiempo entre cada latido cardíaco, es decir, el tiempo entre un pico R y el siguiente pico R de la señal de electrocardiograma (ECG) [15]. Como muchos otros sistemas (sistema renal, sistema digestivo, etc.), el sistema cardiovascular está vinculado con el sistema nervioso central. La fotopletomografía (PPG) [5] es una técnica óptica, no invasiva, que es usada para detectar cambios en el volumen de la sangre en la capa microvascular del tejido. La señal del voltaje de PPG es proporcional a la cantidad de sangre que atraviesa los vasos sanguíneos, por lo que es capaz de detectar la onda de pulso que se transmite por los vasos sanguíneos.

La frecuencia cardíaca está bajo control del sistema nervioso autónomo, que tiene una rama simpática y parasimpática. En una condición de estrés o de enfermedad surge una predominancia del sistema nervioso simpático que hace que el sistema eléctrico del corazón se vuelva inestable. Por lo tanto, es un marcador del estado de activación relativa del eje simpático-parasimpático [12],[4].

El tiempo de tránsito del pulso (PTT) es el tiempo que tarda la forma de onda de la presión del pulso (PP) en

propagarse a lo largo del árbol arterial. En concreto, el dispositivo que se propone es capaz de medir el tiempo transcurrido desde que se produce la onda R del electrocardiograma hasta que la onda de pulso captada por el sensor de fotopletimografía (situado en el dedo índice de la mano izquierda) llega a su valor máximo. El parámetro PTT es usado como un indicador de cambio de la presión arterial [3]. Dicho parámetro es inversamente proporcional a la presión sanguínea, debido a que un aumento en la presión arterial provoca que la onda de pulso viaje antes al lugar de la periferia de medida (dedo índice) reduciéndose de esta manera el tiempo de tránsito de pulso. Sin embargo, cuando la presión arterial disminuye, el tiempo de tránsito de pulso aumenta.

En todas estas señales descritas anteriormente, la definición está basada en una toma de datos estática, donde no hay movimiento del cuerpo del sujeto, y por lo tanto la relación ruido-síñal es la menor posible.

El presente trabajo muestra un sistema concebido para la toma ambulatoria de dichas señales, y que tiene por objeto obtener una información de un nivel de calidad similar al que se obtiene con los sistemas estáticos usados en las unidades de videovigilancia de los hospitales.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 OpenBCI

El sistema de monitorización de crisis epilépticas se basa en una placa OpenBCI [8]. La placa OpenBCI Cyton (Figura 1) es una interfaz neuronal de 8 canales que se utiliza para medir y registrar la actividad eléctrica producida por el cerebro (EEG) siendo compatibles con los electrodos de EEG estándar. Dicha placa lleva implementada un microcontrolador PIC32MX250F128B (el cual puede ser reprogramado), lo que le proporciona mucha memoria local y velocidades de procesamiento rápidas. Además, la placa contiene:

- Un circuito integrado desarrollado por Texas Instruments para mediciones de biopotencial con 24 bits de resolución (ADS1299).
  - Un acelerómetro de 3 ejes (LIS3DH).
  - Módulo para guardar los datos en una tarjeta SD.
  - Módulo de radio (para conectarse y comunicarse con un dongle conectado a un ordenador o tablet).
- Cabe destacar que el microcontrolador trabaja a una tensión de 3,3V y se comunica con el resto de integrados de la placa mediante el protocolo de comunicación de SPI. La sincronización y la

transmisión de datos se realiza por medio de 4 señales, siendo el master el PIC32 y los esclavos el resto de integrados que contiene (ADS1299, LIS3DH, Tarjeta SD):

- **SCLK** (Clock): Es el pulso que marca la sincronización. Con cada pulso de este reloj, se lee o se envía un bit. Dicha señal tiene una frecuencia de 4 MHz.
- **MOSI** (Master Output Slave Input): Salida de datos del Master y entrada de datos al Esclavo.
- **MISO** (Master Input Slave Output): Salida de datos del Esclavo y entrada al Master.
- **SS/Select**: Sirve para que el Master seleccione al Esclavo con el que se quiere comunicar.

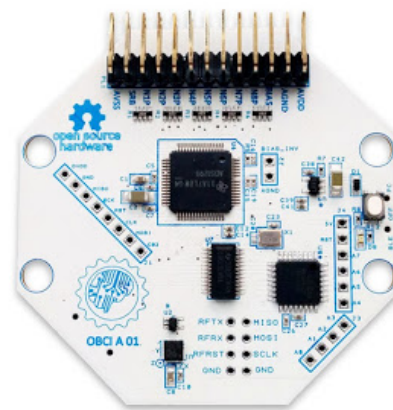


Figura 1: OpenBCI

### 2.2 MÓDULO MAX86150

El módulo de biosensor MAX86150 [7] de Maxim Integrated ofrece mediciones de fotopletimografía (PPG) y electrocardiograma (ECG) en un único paquete integrado con 16 bits de resolución. El módulo MAX86150 combina LEDs internos, fotodetectores y un Front-End Analógico (AFE) de ECG para proporcionar un rendimiento de PPG y ECG altamente preciso y de bajo consumo.

El integrado MAX86150 funciona con una tensión de alimentación de 1,8 V con una fuente de alimentación independiente para los LED internos (3,3V). La comunicación hacia y desde el módulo se realiza completamente a través de una interfaz estándar compatible con I2C. La comunicación I2C es un protocolo síncrono cuya principal característica es que utiliza dos líneas para transmitir la información: una para los datos (SDA) y otra para la señal de reloj (SCL). Cabe destacar que ambas líneas necesitan

resistencias de pull-up. En la figura 2 se puede observar el circuito impreso del módulo MAX86150, destacando el diminuto tamaño de éste.

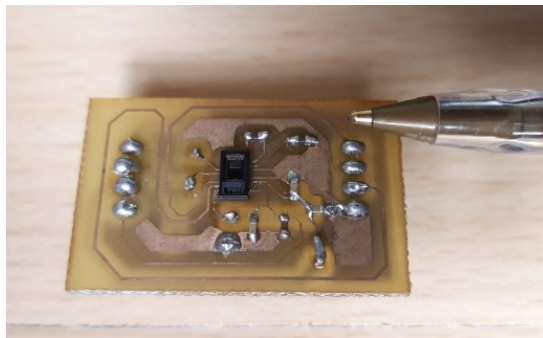


Figura 2: Módulo MAX86150

Dicho módulo es capaz de llevar a cabo una buena adquisición de la señal de electrocardiograma solamente con dos electrodos debido a que el amplificador de instrumentación que contiene el integrado MAX86150 posee un elevado factor de rechazo al modo común (CMRR). A la entrada de cada uno de los electrodos (positivo y negativo) se ha implementado un filtro R-C (H(w)) de paso bajo con el objetivo de eliminar las componentes de alta frecuencia asociadas a ruido. Para ello se ha usado una resistencia (R) de un valor de 50 kΩ y un condensador (C) de 10nF, dando como resultado una frecuencia de corte (fc) de 318,31Hz tal y como se muestra en las siguientes fórmulas (1) (2). Dicha frecuencia es mayor al espectro frecuencial de la señal ECG, que va desde los 0 Hz a los 100 Hz [16].

$$H(w) = \frac{1}{1+jw \cdot R \cdot C} = \frac{1}{1+jw \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} \quad (1)$$

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 318,31 \text{ Hz} \quad (2)$$

### 2.3 SISTEMA DE MONITORIZACIÓN

Como se ha comentado anteriormente, el sistema de monitorización de crisis epilépticas se ha diseñado mediante la combinación de una placa OpenBCI (EEG) y el módulo MAX86150 (ECG y PPG). Dado que el microcontrolador PIC32 que lleva incorporado la placa OpenBCI se comunica mediante el protocolo SPI y el integrado MAX86150 solo se puede comunicar mediante el protocolo I2C, no se pueden comunicar de forma directa. Por lo que se optó por llevar a cabo la comunicación entre ambos por medio de un microcontrolador Atmega328p. De tal forma que el microcontrolador Atmega328p actúa como

maestro y se comunica mediante el protocolo I2C con el módulo MAX86150 y a su vez el microcontrolador Atmega328p actúa como esclavo (enviando la información leída por el módulo MAX86150 al PIC32) y se comunica mediante el protocolo SPI con el microcontrolador PIC32 de la placa de OpenBCI siendo este último maestro. De esta forma, programando adecuadamente dichos microcontroladores existe una sincronización entre ambos módulos que hace que se pueda almacenar la información leída por los sensores en la tarjeta SD de la placa OpenBCI para su posterior análisis. La frecuencia de muestreo de las señales bioeléctricas que se están monitorizando (EEG, ECG, PPG) está fijada en 250 Hz. Cabe destacar que se ha añadido un botón (external trigger) que está conectado a una de las entradas digitales del PIC32 de tal forma que cuando dicho botón es pulsado es capaz de registrar y almacenar en la tarjeta SD eventos externos tales como crisis, cambio de actividades que pueden desencadenar una crisis, etc. De esta forma es más fácil diferenciar y separar los períodos de tiempo de los pacientes y relacionar las variables bioeléctricas almacenadas con las actividades que realiza el paciente. En la figura 3 se puede observar el esquema del funcionamiento y comunicación del sistema de monitorización diseñado.

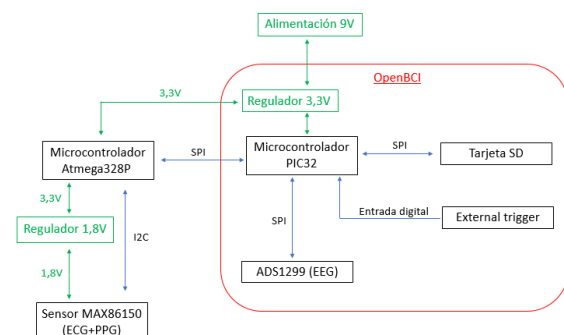


Figura 3: Esquema del sistema de monitorización

Respecto a la alimentación del sistema, se lleva a cabo mediante una pila de 9V directamente conectada a la placa OpenBCI, la cual lleva incorporado un regulador de 3,3V que alimenta a su microcontrolador PIC32 y a sus respectivos integrados y módulos. A través del citado regulador se alimenta también al microcontrolador Atmega328P, el cual a su vez alimenta al integrado MAX86150 y a otro regulador de 1,8V que se utiliza también para alimentar al integrado MAX86150 (ya que necesita 2 niveles de alimentación para poder obtener ECG y PPG de forma simultánea).

El microcontrolador PIC32 almacena los datos en formato hexadecimal en la tarjeta SD por bloques, es decir, a medida que recibe el microcontrolador los



datos de los sensores, y cuando un bloque está completo (512 bytes) se escriben dichos datos en el archivo de la tarjeta SD. De esta manera se lleva a cabo una escritura eficiente de los datos en la tarjeta SD.

Con el fin de que quedase todo el sistema compacto y fuera portátil, se ha diseñado una carcasa que alberga parte de la electrónica anteriormente citada. De tal forma que la placa OpenBCI está fijada a la carcasa mediante tornillos y justo debajo de la placa se encuentra la alimentación del sistema (pila de 9V) y el microcontrolador Atmega328p. Como se puede observar en la figura 4 del microcontrolador Atmega328p sale un cable negro encargado de comunicarse con el módulo MAX86150.

Para el módulo MAX86150 también se diseñó una carcasa de color blanco en la cual se apoya el dedo y se fija el dedo con velcro para medir PPG. De ella sale el cable negro descrito en el párrafo anterior y dos electrodos que son colocados en el pecho con el objetivo de medir ECG. Los electrodos que se han utilizado son electrodos desechables pre-gelificados con contenido de cloruro de plata.

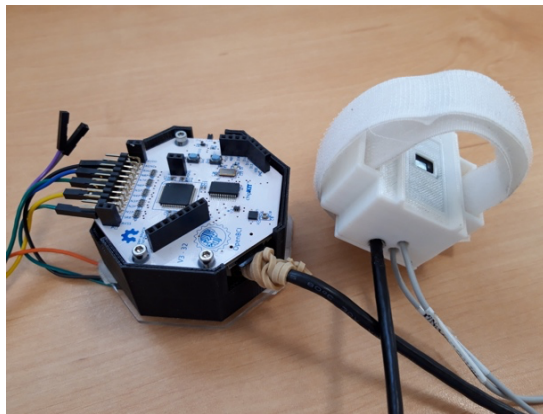


Figura 4: Carcasas

Para llevar a cabo la adquisición de la señal de EEG de oído, se ha diseñado un soporte con la forma adecuada para ser colocado detrás de la oreja derecha (lóbulo temporal). Dicho soporte ha sido fabricado con goma EVA (etilvinilacetato) y tiene incorporados los soportes en los que se insertan los 4 electrodos de copa de oro (3 canales + 1 referencia). Para llevar a cabo la sujeción del soporte de goma EVA diseñado se han utilizado dos turbantes. De esta manera, el soporte se queda fijo haciendo presión los electrodos sobre la piel de los pacientes, obteniéndose así una buena calidad en las adquisiciones de la señal de EEG. Los electrodos de copa de oro que se han usado en la experimentación son reutilizables y están diseñados para dar señales fiables con facilidad de uso una y otra vez. En la figura 5 se puede visualizar el sistema completo de monitorización, incluida la Tablet que se comunica con el sistema mediante un dongle de

bluetooth solamente para gestionar el tiempo de grabación del sistema de monitorización.

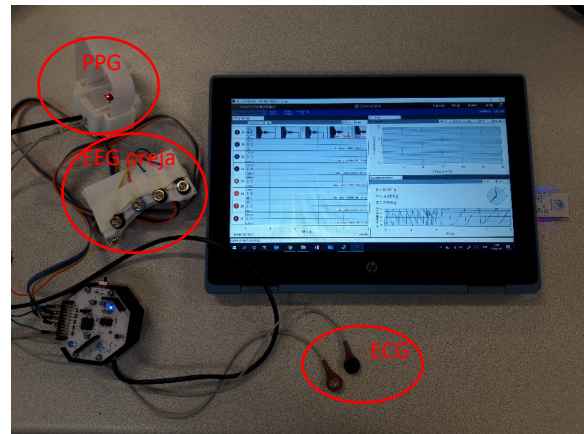


Figura 5: Sistema de monitorización

## 2.4 EXPERIMENTACIÓN

Para llevar a cabo la validación de los datos adquiridos por el sistema de monitorización se realizaron grabaciones en 5 voluntarios (tabla 1), con una duración total de 20 minutos cada grabación.

Tabla 1: Información de los voluntarios.

Género	Edad (años)	Peso (Kg)
Masculino	26	78
Masculino	28	70
Femenino	24	63
Masculino	47	72
Femenino	23	65

Durante los 15 primeros minutos el sujeto debía permanecer con los ojos cerrados, posteriormente debía llevar a cabo 1 minuto de apertura y cierre de ojos. Seguidamente, durante 3 minutos debía de hiperventilar (15-20 respiraciones/min). Finalmente, al voluntario se le sometía a 1 minuto de estimulación luminosa (parpadeo 2,5 Hz). Este procedimiento se diseñó en base a los consejos de una especialista en neurología cuyo trabajo se realiza en una unidad de videovigilancia para epilepsia.



## 2.5 TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Como se ha comentado anteriormente los datos son almacenados en la tarjeta SD en formato hexadecimal en un archivo de texto. Una vez que dichos datos se han convertido en valores decimales con signo, se ha procedido a llevar a cabo el análisis de estos mediante el software de Matlab. Para ello primero se ha realizado el filtrado de dichas señales, para la señal de ECG se ha utilizado un filtro paso banda de 0,4Hz a 5Hz y para la señal de PPG se utilizado un filtro paso banda de 0,4Hz a 3Hz. En la figura 6 se puede observar en color rojo la señal de ECG en bruto y en color azul la señal ya filtrada. También se puede visualizar en la figura 7 la señal de PPG en bruto en color rojo y en color azul la señal ya filtrada.

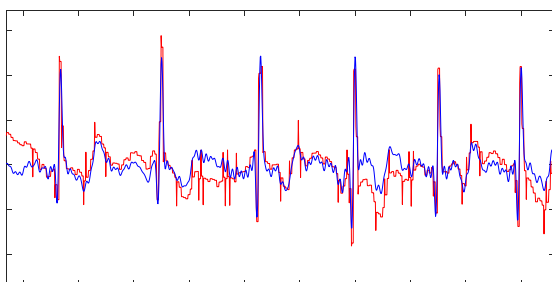


Figura 6: Señal ECG

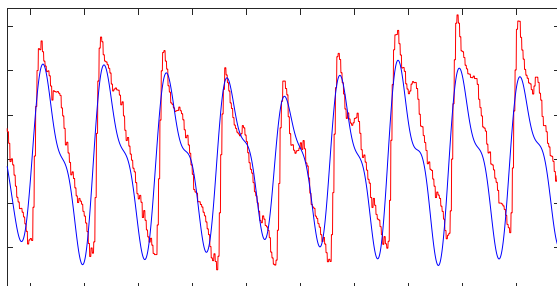


Figura 7: Señal PPG

Para cada una de las 3 señales de EEG de oído obtenidas, primero se utiliza un filtro de ranura a 50 Hz (para eliminar cualquier interferencia eléctrica) seguidamente dicha señal se filtra mediante un filtro de paso banda de 0,5Hz a 80Hz. A continuación, se vuelve a filtrar otra vez la señal EEG mediante filtros de paso banda para obtener información de las diferentes ondas que la componen [10]:

- Ondas delta (0,5-3,5Hz): son las que tienen una mayor amplitud de onda y se relacionan con el sueño profundo.
- Ondas theta (4-7,5Hz): Se relaciona con las tareas cognitivas internas, capacidades imaginativas, con la reflexión y el sueño.

- Ondas alfa (8-13Hz): predomina cuando el Sistema Nervioso Central se encuentra en reposo, relajado pero despierto y atento.
- Ondas beta (13-30 Hz): Están asociadas a tareas cognitivas externas, actividades relacionadas con la concentración como puede ser resolver un problema matemático.

En la figura 8 se pueden observar las diferentes ondas que componen las señales de EEG obtenidas mediante el sistema propuesto en este artículo.

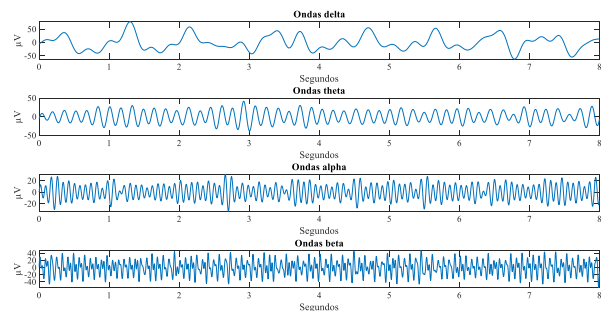


Figura 8: Ondas EEG.

## 2.6 CÁLCULO DE PARÁMETROS

Una vez se ha llevado a cabo el filtrado de las señales, se ha procedido a calcular la variabilidad del ritmo cardiaco (HRV) y el tiempo de tránsito de pulso (PTT) a partir de la señal de ECG y PTT. Tal y como se muestra en la figura 9, el parámetro HRV se obtiene a partir de la señal de ECG calculando el tiempo entre los picos R. Para llevar a cabo el cálculo del parámetro PTT es necesario medir el tiempo que transcurre entre el pico R de la señal de ECG y el valor máximo que se alcanza posteriormente en la señal de PPG. Ambos parámetros son calculados en milisegundos. En la figura 9 se puede visualizar la señal de ECG (en azul) y PPG (en rojo), y como se lleva a cabo el cálculo de los parámetros HRV y PTT.

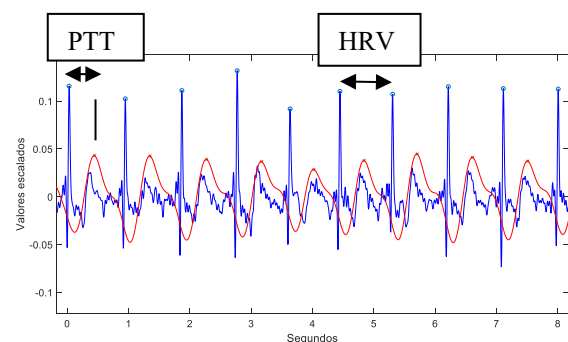


Figura 9: Señal ECG y PPG.

### 3 RESULTADOS

En este apartado se va a realizar un análisis de los resultados obtenidos, y las distintas líneas futuras de investigación.

#### 3.1 CONCLUSIONES

Como se ha ido desarrollando en el epígrafe anterior, se ha logrado con éxito desarrollar un sistema portátil de monitorización de crisis epilépticas. Cabe destacar la elevada calidad de las señales obtenidas mediante los sensores que se han descrito en el artículo. Gracias a dicha calidad es posible calcular de manera exacta las diferentes bandas que componen el EEG y los parámetros HRV y PTT.

Si analizamos los datos obtenidos tras la experimentación que se ha propuesto anteriormente, podemos observar en la figura 10 cómo al hiperventilar (min 16-19) se produce un descenso tanto en los valores del parámetro HRV Y PTT. Este fenómeno se ha observado en los 5 casos estudiados.

Ese descenso se traduce en un aumento del ritmo cardíaco y un aumento de la presión arterial, ya que la hiperventilación provoca un aumento de oxígeno y disminución en la cantidad de dióxido de carbono en la sangre. De manera que se libera menos oxígeno a los tejidos, provocando un aumento en la potencia y frecuencia de los latidos del corazón [17].

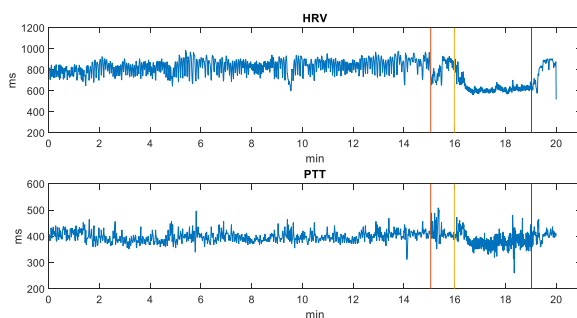


Figura 10: Variación parámetros HRV y PTT

Como conclusión, el dispositivo propuesto permite obtener todas las señales descritas anteriormente (ECG, PPG, EEG) de forma ambulatoria con un nivel de calidad similar al que se obtiene con los sistemas estáticos usados en las unidades de videovigilancia de los hospitales. Por lo tanto, dicho dispositivo es capaz de aportar valiosa información acerca del sistema nervioso y cardiovascular con el objetivo de estudiar de manera ambulatoria las crisis epilépticas.

#### 3.2 LÍNEAS FUTURAS

El dispositivo que se presenta en este documento puede servir como instrumento de apoyo a la hora de tomar decisiones clínicas. Por ello se espera seguir avanzando en este campo y que el dispositivo descrito sirva de base para poder llegar a detectar o predecir los inicios de las crisis lo antes posible, a partir de la información proporcionada por los sensores mediante técnicas de inteligencia artificial.

#### Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el apoyo económico a la Agencia Estatal de Investigación (AEI) mediante el proyecto PID2019-111023RB-C32 AEI/10.13039/501100011033. David Zambrana-Vinaroz agradece el apoyo económico del programa ACIF con la beca ACIF/2019/058.

#### English summary

#### AMBULATORY EPILEPTIC SEIZURE MONITORING SYSTEM

#### Abstract

*Epilepsy is a chronic disease with an important social impact. Those affected and their families often live conditioned by the possibility of an epileptic seizure and its possible consequences such as accidents, injuries and even sudden unexplained death (SUDEP). Therefore, this article proposes the design of an electronic and portable device that integrates and stores the information collected by different sensors (EEG, ECG and PPG) in order to calculate certain parameters that provide information about the nervous and cardiovascular system. In addition, such a device can be used to study epileptic seizures on an outpatient basis and serve as a clinical decision support tool.*

**Keywords:** Epilepsy, portable, monitoring, ECG, EEG, PPG, PTT.

#### Referencias

- [1] Baulac M, de Boer H, Elger C, Glynn M, Kälviäinen R, Little A, Mifsud J, Perucca E, Pitkänen A, Ryvlin P. (2015) "Epilepsy priorities in Europe: A report of the ILAE-IBE Epilepsy Advocacy Europe Task Force". *Epilepsia*. pp.1687-95.

- [2] Begley CE, Durgin TL. (2015) "The direct cost of epilepsy in the United States: A systematic review of estimates". *Epilepsia*. pp.1376-87.
- [3] Block, R.C., Yavarimanesh, M., Natarajan, K. et al. Conventional pulse transit times as markers of blood pressure changes in humans. *Sci Rep*.
- [4] DeGiorgio CM, Miller P, Meymandi S, et al. (2010) "RMSSD, a measure of vagus-mediated heart rate variability, is associated with risk factors for SUDEP: the SUDEP-7 Inventory" *Epilepsy Behav*. pp.78-81.
- [5] Furrakh Sana, Eric M. Isselbacher MD, Jagmeet P. Singh, (2020) "Wearable Devices for Ambulatory Cardiac Monitoring" *JACC Journal of the American College of Cardiology*, pp.1582-1592.
- [6] Jehi L, Schuele S. (2015), "Sudden death in epilepsy: Where is the "heart" of the problem?" *Neurology*. pp.208-9.
- [7] Hoja de características del módulo MAX86150; <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX86150.pdf>
- [8] OpenBCI; [www.openbci.com](http://www.openbci.com)
- [9] Pedro J. Serrano-Castro, Jose Angel Mauri-Llerda, Francisco José Hernández-Ramos, et al, Beatriz Parejo-Carbonell, Pablo Quiroga-Subirana, Fernando Vázquez-Gutierrez, Sonia Santos-Lasaosa, Carolina Mendez-Lucena, Luis Redondo-Verge, Carlos Tejero-Juste, Clara Morandeira-Rivas, Jerónimo Sancho-Rieger, Jorge Matías-Guiu. (2015) "Adult Prevalence of Epilepsy in Spain: EPIBERIA, a Population-Based Study", *The Scientific World Journal*.
- [10] Picon Calderon, Cristian; Gomez Tinoco, Saul. (2017). Electrofisiología neuronal: Ritmos cerebrales y epilepsia.
- [11] R. García-Ramos, A. García Pastor, J. Masjuan, C. Sánchez, A. Gil, (2011) "FEEN: Informe sociosantario FEEN sobre la epilepsia en España", *Neurología*, pp.548-555.
- [12] Rosales-Soto, G.; Corsini-Pino, R.; Monsalves-Alvarez, M. ; Yanez-Sepulveda, R. (2021) "Respuesta del balance simpático-parasimpático de la variabilidad de la frecuencia cardíaca durante una semana de entrenamiento aeróbico en ciclistas de ruta". *Rev Andal Med*, pp.143-147.
- [13] Ryvlin P, Nashef L, Lhatoo SD, Bateman LM, Bird J, Bleasel A, Boon P, Crespel A, Dworetzky BA, Høgenhaven H, Lerche H, Maillard L, Malter MP, Marchal C, Murthy JM, Nitsche M, Patariaia E, Rabben T, Rheims S, Sadzot B, Schulze-Bonhage A, Seyal M, So EL, Spitz M, Szucs A, Tan M, Tao JX, Tomson T. (2013) "Incidence and mechanisms of cardiorespiratory arrests in epilepsy monitoring units (MORTEMUS): a retrospective study" *Lancet Neurol*. pp.966-77.
- [14] Sana F, Isselbacher EM, Singh JP, Heist EK, Pathik B, Armoundas AA.(2020), "Wearable Devices for Ambulatory Cardiac Monitoring: JACC State-of-the-Art Review" *J Am Coll Cardiol*. pp.1582-1592.
- [15] Serhani MA, T El Kassabi H, Ismail H, Nujum Navaz A. (2020), "ECG Monitoring Systems: Review, Architecture, Processes, and Key Challenges" *Sensors (Basel)*. pp.1796.
- [16] Vidal-SilvaC., & Gatica-RojasV. (2013). Diseño e implementación de un sistema electrocardiográfico digital. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, pp.99-107
- [17] Wood, Cristina ; Cano Vindel, Antonio. (2021) "La Hiperventilación y el Trastorno de Angustia a la Luz de un Marco Cognitivo". *Clínica y Salud* . pp.57-66.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# APLICACIÓN DE REDES NEURONALES PARA EVALUAR EL ESTADO FUNCIONAL DE PACIENTES CON ESCLEROSIS MÚLTIPLE

Janire Otamendi, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes, Eva Portillo

Depto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

janire.otamendi@ehu.eus

## Resumen

*La Esclerosis Múltiple es una enfermedad neurodegenerativa que actualmente no tiene cura. Sin embargo, las terapias personalizadas han demostrado ralentizar o incluso detener la evolución de la enfermedad, mejorando así la calidad de vida de los pacientes. Para diseñar dichas terapias, es esencial conocer el estado funcional de cada paciente, lo cual suele ser una tarea laboriosa. Ante esta situación, en este trabajo se propone el desarrollo de un clasificador de estado de pacientes de Esclerosis Múltiple. Para ello, se hace uso de redes neuronales artificiales, las cuales utilizan una base de datos obtenida mediante una contera inteligente para desarrollar un sistema que permita determinar el estado funcional de los pacientes.*

**Palabras clave:** Esclerosis Múltiple, Contera sensorizada, Valoración pacientes, Clasificador de estado funcional, Machine Learning, Redes neuronales artificiales.

## 1 INTRODUCCIÓN

La Esclerosis Múltiple (EM) es una enfermedad neurodegenerativa, progresiva y crónica que afecta a unos 2,5 millones de personas en el mundo [10]. A pesar de tener una incidencia notablemente inferior a otras afecciones como el ictus o el Alzheimer, la EM tiene un impacto socioeconómico muy superior, debido a que afecta a personas desde una edad muy temprana (media 30 años) y evoluciona durante muchos años.

Aunque los síntomas de la enfermedad varían en función del área afectada, la fatiga y la disfunción motora son las más comunes, por lo que más de un 80% de los pacientes requiere de un dispositivo de ayuda técnica (muleta, bastón, andador) tras 15 años desde el primer brote de la enfermedad [11].

En la actualidad, no existe cura para la EM, sin embargo, estudios recientes han demostrado que una adecuada terapia de rehabilitación puede ralentizar o incluso detener la evolución de la enfermedad, mejorando la calidad de vida de los pacientes [6]. Para dicho fin, es fundamental la per-

sonalización de la terapia al estado particular de cada paciente y esto hace que, realizar una adecuada valoración funcional de dichos pacientes se torne esencial.

Tradicionalmente, la valoración de los pacientes de EM se ha realizado utilizando diferentes escalas clínicas normalizadas. La Short Physical Performance Battery (SPPB) es una de ellas, la cual consiste en la realización de varias pruebas que tratan de evaluar el equilibrio, la fuerza y la velocidad de la marcha del paciente. La puntuación en esta escala oscila entre 0 y 12, siendo 12 la mejor puntuación. Sin embargo, realizar las pruebas para poder obtener estos valores es una tarea laboriosa, con lo que la periodicidad entre las mismas es elevada [5].

Una de las posibles soluciones a este problema consiste en monitorizar a los pacientes y extraer indicadores que puedan ayudar a evaluar su estado de una manera objetiva. De esta forma, el terapeuta dispone de información sin necesidad de realizar todas las pruebas, para así rediseñar la terapia en caso de detectar variaciones en el estado funcional del paciente.

Existen diversos dispositivos tecnológicos para la monitorización. La tendencia actual es utilizar dispositivos vestibles [12], los cuales se basan en sensores inerciales (acelerómetros, giróscopos) [7]. Aunque estos dispositivos son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones, presentan inconvenientes cuando se utilizan en pacientes, dado que los métodos que se utilizan para mantenerlos fijados al cuerpo pueden resultar invasivos para éstos, sobre todo cuando presentan un deterioro en su capacidad motora.

Debido a ello, en los últimos años, se han propuesto alternativas vestibles de menor invasividad, como el uso de pulseras, relojes o móviles inteligentes [4]. Sin embargo, en el caso de pacientes de EM, los movimientos parásitos de los mismos han lastrado su aplicabilidad.

Con el objetivo de solucionar los problemas mencionados, recientes estudios han propuesto incluir sensores en dispositivos de uso cotidiano, como muletas, bastones o andadores, lo cual ha de-

mostrado ser una alternativa eficaz para la captura de datos [3, 9]. En este sentido, destaca el desarrollo de la Contera Sensorizada realizada por el Grupo de Sensorización Virtual para Bioingeniería [2], que constituye el punto de partida de este trabajo.

Una vez capturados los datos, es necesario procesarlos y extraer indicadores para proporcionar la información adecuada al terapeuta. En el ámbito de la EM ésta es un área apenas explorada. Los estudios realizados [12, 13] analizan principalmente las correlaciones entre las variables capturadas y el estado clínico del paciente medida con escalas clínicas, lo cual es útil para realizar la selección de variables significativas, pero aporta información poco procesada y en ocasiones, contradictoria, a los terapeutas.

En esta fase, el uso de las técnicas de Machine Learning (ML) se torna fundamental. En otras áreas de la salud, el procesamiento inteligente de datos ha permitido grandes avances, dado su potencial para trabajar con datos complejos y de diversa naturaleza, y su capacidad para generar modelos de comportamiento e incluso para poder extrapolar tendencias [8, 14].

En este trabajo se propone un clasificador del estado del paciente basado en redes neuronales, que en base de una serie de características obtenidas de los datos capturados por una contera inteligente, estima el estado del paciente según la escala SPPB. La aproximación propuesta es evaluada considerando los datos de 59 pruebas realizadas con pacientes de Esclerosis Múltiple en diferentes estadios de su enfermedad.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 2, se presenta el prototipo de Contera Sensorizada usada para la captura de datos; la Sección 3 detalla la base de datos usada para entrenar la red neuronal; la Sección 4 define el diseño del clasificador; mientras que la Sección 5 muestra los resultados del sistema diseñado. Finalmente, la Sección 6 detalla las ideas más relevantes.

## 2 CONTERA SENSORIZADA

Conociendo las ventajas que ofrece utilizar un dispositivo de ayuda técnica para la monitorización y captura de datos en pacientes con EM, en este trabajo, se ha empleado la contera sensorizada presentada en [2] (Figura 1) para obtener la información que compone la base de datos. Cabe mencionar que, a diferencia de muletas o bastones sensorizados que se plantean en algunos de los trabajos citados [3, 9], esta contera puede ser acoplada al dispositivo de ayuda técnica que

utilice el paciente, lo cual hace que éste no tenga que adaptarse a uno nuevo.

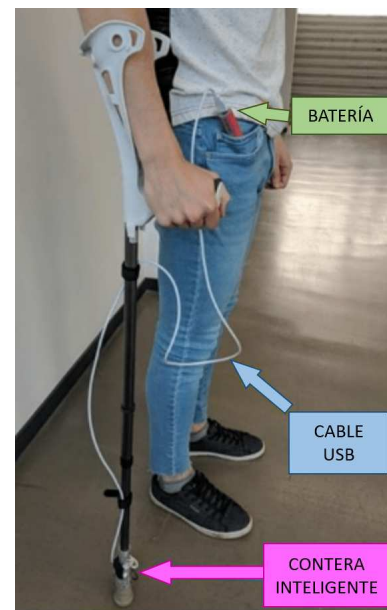


Figura 1: Contera sensorizada

La contera sensorizada se compone de un dispositivo de adquisición de datos y tres sensores (un sensor de fuerza, un barómetro y una Unidad de Medición Inercial o IMU) integrados en una estructura de aluminio.

El sensor de fuerza proporciona información sobre la fuerza axial que ejerce el paciente, el barómetro indica la presión atmosférica, permitiendo estimar la altura relativa del dispositivo, y finalmente, la Unidad de Medición Inercial ofrece los valores de la aceleración lineal, de la velocidad angular y del campo magnético en los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  locales de la muleta. Este último elemento, además de proporcionar las señales mencionadas, también integra un algoritmo que permite estimar los ángulos de Euler en un sistema de referencia global, los cuales se emplean para calcular los ángulos entre el cuerpo del paciente y la contera en los planos anteroposterior y lateromedial [2].

## 3 BASE DE DATOS

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un clasificador capaz de valorar a pacientes de EM, con lo que es necesario disponer de una base de datos generada a partir de pruebas realizadas con personas que padecen dicha enfermedad. Así, en esta sección, se presentan por un lado las pruebas que se han llevado a cabo (sección 3.1) y por el otro, el procesamiento de datos realizado para obtener la base de datos que se empleará en las siguientes fases (sección 3.2).



### 3.1 Pruebas con pacientes de EM

En este trabajo, las pruebas para generar la base de datos se han llevado a cabo en la Asociación de Esclerosis Múltiple de Bizkaia (ADEMBI), con la aprobación del Comité de Ética PS2018017. Dichas pruebas han sido realizadas en tres sesiones, en las cuales han participado un total de 30 pacientes. Sin embargo, algunos de estos pacientes han colaborado en más de una sesión, con lo que se ha conseguido una base de datos que incluye la información de 59 pruebas. La Tabla 1 resume las pruebas realizadas, incluyendo la distribución de pacientes según su escala SPPB, obtenida mediante la evaluación de los terapeutas.

Tabla 1: Número de pruebas, y número de ventanas para entrenamiento y test.

Valor SPPB	Número de pruebas	Muestras de entrenamiento	Muestras de test
0	0	0	0
1	2	43	0
2	0	0	0
3	4	62	15
4	4	55	26
5	5	65	19
6	10	110	40
7	7	64	25
8	7	51	25
9	11	100	34
10	4	35	10
11	4	31	11
12	1	10	0
Total	59	626	205

En cada sesión, los participantes han tenido que realizar dos repeticiones de una única prueba que consiste en andar 10 metros en línea recta a una velocidad cómoda según su estado, y lo más constante posible, con la contera inteligente acoplada a su dispositivo de ayuda técnica.

### 3.2 Procesamiento de datos

Una vez realizadas las pruebas, es necesario un adecuado procesamiento de datos, el cual, en este caso, está dividido en tres fases: recortar las pruebas, realizar la segmentación y caracterizar cada segmento para obtener la información que pueda ser utilizada en una red neuronal.

La primera fase consiste en eliminar las señales correspondientes al primer y último metro de cada repetición, ya que éstos corresponden respectivamente a las fases de aceleración y deceleración.

A continuación, en un segundo paso, se realiza la segmentación de señales empleando el procedi-

miento que se define en [1], el cual se basa en los ciclos de uso de la muleta. Mediante esta técnica, las señales proporcionadas por los sensores de la contera son divididos en ventanas secuenciales que están asociadas a dichos ciclos. Estos ciclos están compuestos por una fase de apoyo (en el que la contera está en contacto con el suelo) y una fase de movimiento (en el que no existe contacto entre la contera y el suelo), los cuales son fácilmente detectables mediante la señal proporcionada por el sensor de fuerza (Figura 2). Por lo tanto, en esta metodología, es el instante en el que la muleta entra en contacto con el suelo el que define el inicio de cada ventana, y por tanto, la segmentación. El resultado de la segmentación permite ampliar el número de muestras incorporadas en la base de datos, dado que en vez de trabajar con cada prueba o paciente, se trabajará con cada ciclo como muestra para el proceso de entrenamiento, validación y test de la red neuronal. La Tabla 1 resume el número de muestras total generada.

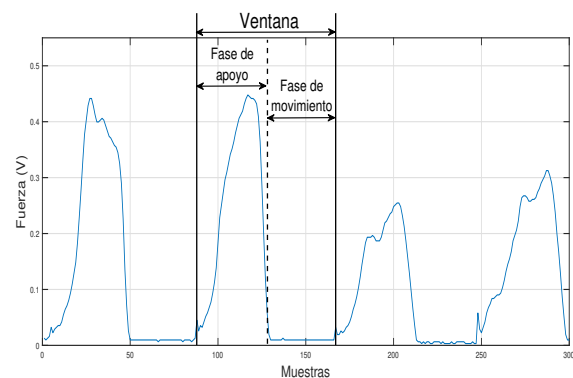


Figura 2: Ciclo de uso de la muleta y sus fases

Las mencionadas muestras son unidades discretas de información, de los cuales se pueden extraer datos estadísticos que caracterizan cada ciclo de la muleta. Para realizar dicha caracterización, que es la última fase del procesamiento, este trabajo se basa en [1], donde se aplican varios operadores a las señales que se obtienen de los sensores integrados en la contera. A diferencia de lo que se hace en el artículo citado, en este caso, se dejan fuera de la caracterización las señales del magnetómetro y los ángulos de Euler (debido a que tratan con ángulos absolutos y pueden derivar a errores), y también el barómetro, ya que su precisión relativa ( $0,12hPa \approx 1m$ ) no es lo suficientemente grande como para detectar variaciones en una prueba de 10 metros en línea recta.

De esta forma, y después de realizar las tres fases de procesamiento de datos, se consiguen 98 características (presentados en la Tabla 2) asociadas a cada ciclo de uso de la muleta. Nótese que estas características están basadas en las propuestas en la literatura. La relevancia relativa de las mis-



Tabla 2: Datos característicos generados a partir de la información proporcionada por la contera (A=Anteroposterior, L=Lateromedial).

Fuente de datos → Operaciones ↓	Acelerómetro (X,Y,Z)	Giróscopo (X,Y,Z)	Ángulos (A,L)	Sensor de fuerza
Media	X	X	X	X
Desviación estándar	X	X	X	X
Varianza	X	X	X	X
Kurtosis	X	X	X	X
Coef. Corr. XY	X	X		
Coef. Corr. XZ	X	X		
Coef. Corr. YZ	X	X		
Coef. Corr. AL			X	
Percentil 25	X	X	X	X
Percentil 50	X	X	X	X
Percentil 75	X	X	X	X
Área	X	X	X	X
Rango intercuartil	X	X	X	X
Valor al iniciar el apoyo			X	
Valor en Fuerza Máx.			X	
Valor al finalizar el apoyo			X	
Amplitud			X	
Tiempo de ciclo				X
Fase apoyo %				X
Núm. características	30	30	27	11

mas ha sido analizada usando la técnica Random Forest.

#### 4 DISEÑO DEL CLASIFICADOR

Partiendo de la base de datos definida en la sección 3, el clasificador tiene como objetivo determinar el valor de la escala SPPB (un número entero entre 0 y 12) que corresponde a cada muestra. A tal fin, el sistema usará las 98 características que extraerá de cada ciclo de la muleta.

Para ello, en este trabajo, se ha optado por utilizar una red neuronal, en concreto, un Perceptrón Multicapa con una única capa oculta. La elección de una red MLP como clasificador se ha realizado en base a los resultados obtenidos en [1]. El artículo citado presenta un procedimiento similar a este, en el que las técnicas Support Vector Machine (SVM) y K Nearest Neighbours (KNN) muestran un comportamiento ligeramente inferior a las redes neuronales artificiales (ANN).

Dicha red está compuesta por 98 neuronas de entrada (debido a la caracterización realizada en la sección 3.2), 13 neuronas de salida (uno por cada valor en la escala SPPB) y 10 neuronas en la capa oculta con la función de activación tangente hiperbólica-sigmoidal (Figura 3). La definición del número de neuronas en la capa oculta se ha basado en pruebas experimentales que han mostrado resultados óptimos con un número de 10 neuronas

en dicha capa.

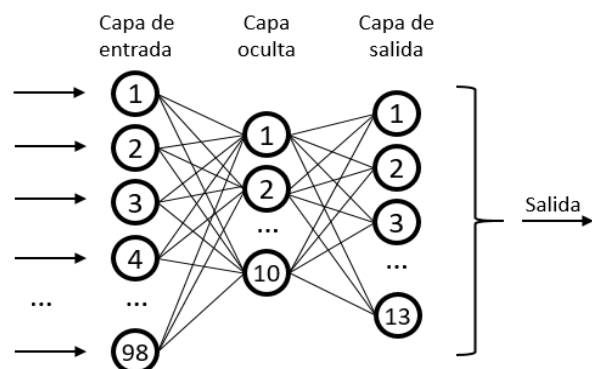


Figura 3: Estructura de la red neuronal

Una vez definida la estructura de la red, a continuación, se han preparado los datos con el objetivo de realizar un adecuado proceso de entrenamiento y validación. Para ello, la base de datos se ha dividido en dos conjuntos: uno para entrenamiento, y otro para test.

Para realizar dicha división, se ha tenido en cuenta el número de pruebas que se tienen por cada etiqueta. De esta forma, se han incluido en el conjunto de entrenamiento las muestras correspondientes a un 80% de las pruebas por cada etiqueta, y el resto de las ventanas, se han utilizado para el test. Cabe mencionar, que en este caso, tanto el número de pruebas por cada etiqueta, como el número de muestras por cada

Tabla 3: Matriz de confusión del conjunto de datos para test.

Valores predichas → Valores reales ↓	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	12	0	0	2	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	12	0	5	9	0	0	0
5	0	0	0	1	0	7	9	2	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	16	15	0	2	2	0	5	0
7	0	0	0	5	3	0	5	9	2	0	1	0	0
8	0	1	0	2	0	0	6	0	1	7	8	0	0
9	0	0	0	0	1	1	6	0	9	17	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	4	1	0
11	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	2	5	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

prueba es variable y que por tanto, no ha sido posible conseguir conjuntos equilibrados. La Tabla 1 presenta el número de muestras que constituyen cada conjunto.

Finalmente, una vez que se han preparado la estructura de la red y los datos, se ha empleado el algoritmo de Regularización Bayesiana para entrenar la red. Dicho entrenamiento se ha realizado 10 veces para tener en cuenta el efecto de la inicialización aleatoria de las neuronas y finalmente, se ha seleccionado la red que mejores resultados ha proporcionado.

## 5 RESULTADOS

En esta sección se detallarán los resultados más relevantes obtenidos por la red. A tal fin, se han considerado dos escenarios de validación: uno con los mismos datos que se han empleado en el entrenamiento y otro, con los datos que se han dejado para test.

Con el primer conjunto, el que incluye los datos empleados en el entrenamiento, la red ha obtenido un porcentaje de aciertos del 97,9%. Este resultado indica que el entrenamiento de la red ha sido el adecuado, y ésta ha logrado adaptarse al conjunto de muestras de entrenamiento.

Sin embargo, con el conjunto de test, el porcentaje de aciertos ha sido de 34,1%. Estos resultados indican un porcentaje muy bajo de aciertos, que reflejan que la red entrenada no es capaz de generalizar a partir de los datos de entrenamiento. Con el fin de estudiar este fenómeno, se han analizado los ratios de acierto para cada escala SPPB. La Tabla 3 muestra la matriz de confusión que se ha obtenido con este segundo conjunto de datos.

Los resultados muestran que, en el caso del con-

junto de test, la red categoriza adecuadamente algunas muestras (por ejemplo, las asociadas a la SPPB de valor 3 o un porcentaje elevado de la 9). Sin embargo, en muchas ocasiones, la red *confunde* la escala de un paciente por la inmediatamente anterior o la siguiente, como sucede en el caso de la SPPB de valor 5 o 6. En general, se aprecia que la matriz de confusión tiene una diagonal predominante, pero que en la zona central de la tabla existe una dispersión importante, principalmente entre las categorías adyacentes.

Es importante detallar que estos resultados no están causados por el proceso de entrenamiento. La configuración mostrada es la que mejor resultado ofrece, tras realizar ensayos con diferentes algoritmos de entrenamiento y conjuntos de validación. En este sentido, y tras analizar el conjunto de datos capturado, una de las problemáticas que se ha detectado es la gran variabilidad existente entre los valores característicos extraídos de pacientes con una SPPB similar. La Figura 4 muestra como ejemplo la distribución que tienen la media del acelerómetro y la media del giróscopo en el eje  $x$ , según el valor SPPB correspondiente a cada muestra. En ella se observa que dentro de cada etiqueta la variabilidad de los valores característicos es significativa, lo cual hace que el rango en el que se encuentren los datos no pueda asociarse directamente a un valor en la escala SPPB. Este comportamiento se repite en la mayoría de los datos característicos extraídos, lo cual indica que dentro de cada etiqueta existe una variabilidad notable entre pacientes.

Este fenómeno es habitual en EM, dado que la enfermedad puede evolucionar de formas muy diversas. Esto genera una mayor complejidad en el análisis de datos, y es la razón por la que en la Matriz de Confusión ilustrada en la Tabla 3 la red interpreta las señales de entrada en ocasiones con

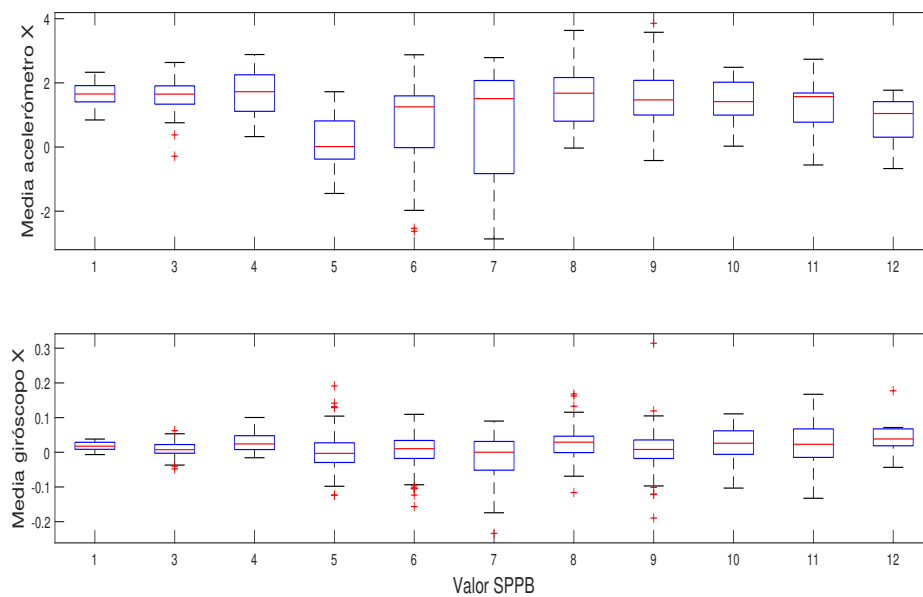


Figura 4: Distribución de la media del acelerómetro y de la media del giroscopo en el eje  $x$  según el valor SPPB de cada muestra

valores de SPPB cercanos al valor real.

Es por ello que, si bien el uso de técnicas inteligentes se considera una técnica de potencial para esta enfermedad, es necesario abordar esta problemática desde otro enfoque: incorporando un mayor número de datos que permita caracterizar un mayor conjunto de pacientes; o apostando por un enfoque personalizado, en el que la caracterización del estado del paciente se base en su evolución personalizada.

## 6 CONCLUSIONES

Una adecuada valoración del estado funcional de pacientes con Esclerosis Múltiple ha demostrado ser esencial para personalizar las terapias y mejorar así la calidad de vida de dichos pacientes [6].

Tradicionalmente, esta valoración se ha realizado utilizando escalas clínicas normalizadas, como la SPPB. Sin embargo, el obtener esos valores es una tarea laboriosa, por lo que la periodicidad entre las sesiones de evaluación es elevada [5].

Con el fin de agilizar dicho proceso, en este trabajo, se ha diseñado un clasificador que partiendo de los datos que proporciona una contera inteligente acoplada al dispositivo de ayuda técnica del paciente, pretende determinar el valor de la escala SPPB que corresponde a dicho paciente.

Para ello, en primer lugar, se ha generado una base de datos, partiendo de pruebas de 10 metros realizadas con pacientes de EM. A continuación,

se ha definido la estructura de una red neuronal, se han preparado los conjuntos de datos de entrenamiento y test, y se ha entrenado la red diseñada. Finalmente, se ha validado dicha red obteniendo un porcentaje de aciertos de 97,9% con las mismas muestras empleadas en el entrenamiento, y un porcentaje de aciertos de 34,1% con los datos que se han dejado para test.

Estos resultados muestran que la red no es capaz de generalizar, ya que no ha identificado correctamente aquellas muestras que desconocía. Esto puede deberse por un lado al desequilibrio de la base de datos de la que se dispone; sin embargo, teniendo en cuenta la problemática que se está tratando, es probable que un enfoque general no llegue a dar resultados satisfactorios, y sea necesario abordar el problema desde un enfoque individual.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad del País Vasco UPV/EHU (GIU19/045), FEDER/Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades - Agencia Estatal de Investigación/DPDPI2017-82694-R, y la ayuda FPU del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (FPU19/04874).

Los autores agradecen también a la Asociación de Esclerosis Múltiple de Bizkaia (ADEMBI) por su colaboración.

## English summary

# APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR THE ASSESSMENT OF PEOPLE WITH MULTIPLE SCLEROSIS

## Abstract

*Multiple Sclerosis is a neurological degenerative disease with no cure. However, personalized rehabilitation therapies have demonstrated to be effective to reduce the effect of symptoms and improving this way the life quality of patients. To design such therapies, it is essential to know the functional status of each patient, which is usually a laborious task. For that reason, in this work a status classifier for Multiple Sclerosis patients is developed. Artificial neural networks are used for this task, which work with a database obtained by a Smart Tip for developing a system to determine the functional status of patients.*

**Keywords:** Multiple Sclerosis, Smart Tip, Patients assessment, Functional status classifier, Machine Learning, Artificial Neural Networks.

## Referencias

- [1] Brull, A., Lucas, S., Zubizarreta, A., Cabanes, I., Portillo, E., Rodriguez-Larrad, A., "A Machine Learning Approach to Perform Physical Activity Classification Using a Sensorized Crutch Tip", *IEEE Access*, vol 8, pp 210023-210034, 2020.
- [2] Brull, A., Zubizarreta, A., Cabanes, I., Rodriguez-Larrad, A., "Sensorized Tip for Monitoring People with Multiple Sclerosis that Require Assistive Devices for Walking", *Sensors*, vol 20(15), pp 4329, 2020.
- [3] Chamorro-Moriana, G., Sevillano, J., Ridao-Fernández, C., "A Compact Forearm Crutch Based on Force Sensors for Aided Gait: Reliability and Validity", *Sensors*, vol 16(6), pp 925, 2016.
- [4] Creagh, A.P., et al., "Smartphone- and Smartwatch-Based Remote Characterisation of Ambulation in Multiple Sclerosis during the Two-Minute Walk Test", *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol 25(3), pp 838-849, 2020.
- [5] Flachenecker, P., "Clinical implications of neuroplasticity - the role of rehabilitation in multiple sclerosis", *Frontiers in Neurology*, vol 6(36), 2015.
- [6] Latimer-Cheung, A.E., et al., "Effects of Exercise Training on Fitness, Mobility Fatigue, and Health-Related Quality of Life Among Adults With Multiple Sclerosis: A Systematic Review to Inform Guideline Development", *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol 94(9), pp 1800-1828, 2013.
- [7] McGinnis, R.S., et al., "A machine learning approach for gait speed estimation using skin-mounted wearable sensors: From healthy controls to individuals with multiple sclerosis", *PLOS ONE*, vol 12(6), 2017.
- [8] Prakash, C., et al., "Recent developments in human gait research: parameters, approaches, applications, machine learning techniques, datasets and challenges", *Artificial Intelligence Review*, vol 49, pp 1-40, 2018.
- [9] Sardini, E., Serpelloni, M., Lancini, M., "Wireless Instrumented Crutches for Force and Movement Measurements for Gait Monitoring", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol 64(12), pp 3369-3379, 2015.
- [10] Sociedad Española de Neurología (SEN). Informe del Día Nacional de la EM.
- [11] Souza, A., Kelleher, A., Cooper, R., Cooper, R.A., Iezzoni, L.I., Collins, D.M., "Multiple sclerosis and mobility-related assistive technology: Systematic review of literature", *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol 47(3), pp 213-223, 2010.
- [12] Spain, R., et al., "Body-worn motion sensors detect balance and gait deficits in people with multiple sclerosis who have normal walking speed", *Gait Posture*, vol 35(4), pp 573-578, 2012.
- [13] Sun, R., et al., "Assessment of Postural Sway in Individuals with Multiple Sclerosis Using a Novel Wearable Inertial Sensor", *Digital Biomarkers*, vol 2, pp 1-10, 2018.
- [14] Zhao, Y., et al., "Exploration of machine learning techniques in predicting multiple sclerosis disease course", *PLOS ONE*, vol 12(4), 2017.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication

under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# HERRAMIENTA GRÁFICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE CULTIVOS DE MICROALGAS BASADA EN REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Pablo Otálora<sup>1</sup>, José Luis Guzmán<sup>1</sup>, Francisco Gabriel Acién<sup>2</sup>, Manuel Berenguel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Informática, Universidad de Almería, ceiA3, CIESOL, Ctra. Sacramento s/n, 04120 Almería, España. Tel: +34 950 214133; {p.otalora,joseluis.guzman,beren}@ual.es

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Almería; facien@ual.es

## Resumen

*En este trabajo se aborda el problema de caracterización de muestras de microalgas mediante modelos de redes neuronales artificiales. Se presenta una interfaz gráfica combinada con los modelos que permite predecir la composición de las especies *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus almeriensis* a partir de datos relativos a la muestra, como pueden ser imágenes de las células o propiedades descriptivas de estas. Los resultados del trabajo proporcionan una herramienta completa para abordar el problema sin necesidad de conocimientos del lenguaje de programación, de forma rápida, sencilla e intuitiva.*

**Palabras clave:** Microalgas, redes neuronales, interfaz gráfica, biotecnología.

## 1 Introducción

El proceso de producción de microalgas está cobrando cada vez más importancia en los últimos años, debido a su utilidad en gran variedad de aplicaciones relacionadas con los principales problemas de la sociedad. Principalmente, se trata de un proceso útil para el tratamiento de aguas residuales, la mitigación de emisiones de  $CO_2$  o la producción de biocombustibles o productos de alto valor, para el ámbito de la nutrición humana, alimentación animal o cosmética [2, 16, 21]. Las microalgas son organismos fotosintéticos con la capacidad de crecer y reproducirse en ambientes sin necesidad de agua limpia, con una gran tasa de cultivo por superficie y con una amplia variedad de condiciones [11].

Sin embargo, para asegurar la competitividad del proceso es necesario maximizar su productividad a través de la optimización del diseño y el control del proceso [3]. Esta solo puede ser alcanzada logrando una caracterización suficiente del proceso, la cual no es trivial, debido a su marcado carácter biológico [9]. Existen una gran cantidad de variables que influyen en el proceso, siendo una de las fundamentales la especie de microalga que se cultiva. Existen más de 30000 especies conocidas, de las cuales menos de 20 son explotadas

comercialmente [10]. La decisión sobre la especie que se cultiva se basa en el producto que se desee obtener del proceso. Además, las condiciones óptimas de producción varían en función de la especie cultivada, por lo que conocer la composición del cultivo es un paso fundamental para lograr la correcta caracterización del proceso [17].

Tradicionalmente, la monitorización de la composición se realiza usando un microscopio óptico, manualmente y basándose en las diferencias morfológicas entre las especies. Como es evidente, no es un proceso trivial, pues requiere mano de obra muy cualificada y mucho tiempo, además de ser imposible de automatizar [4, 5]. En trabajos previos se han desarrollado métodos más automatizados, basados en espectroscopía de absorción o citometría de flujo [19, 22]. Ambos métodos presentan claras ventajas frente al análisis manual, pero son relativamente costosos. También se han empleado métodos basados en técnicas de captación y procesamiento de imágenes para el análisis de imágenes ópticas [17].

Por otro lado, debido al incremento de la capacidad computacional, y sobre todo, al inmenso y creciente volumen de datos que se genera y se gestiona en los últimos años, los modelos de aprendizaje computacional basados en datos están siendo usados en casi cualquier ámbito [13]. Estas técnicas permiten obtener modelos muy precisos, a menudo más allá de la comprensión humana, haciendo uso únicamente de datos, sin necesidad de poseer un conocimiento exhaustivo del sistema modelado. Concretamente, las redes neuronales artificiales están demostrando muy buenos resultados para la obtención de modelos de todo tipo.

Para el problema de caracterización de la composición del cultivo, se han desarrollado modelos de red neuronal basados en datos de absorción de luz o procesamiento de imágenes para identificación y clasificación de distintas especies [6, 8, 18]. En [15] se presentan dos modelos de red neuronal basados en imágenes de las células de las microalgas, así como en rasgos descriptivos de estas, en combinación con el dispositivo *FlowCAM* [1]. Ambos modelos fueron desarrollados haciendo uso de un gran volumen de datos, y validados con



muestras mixtas, demostrando ser una herramienta bastante útil para afrontar este problema.

Sin embargo, el modelo descrito es un programa codificado en MATLAB. Si se desea emplear como una herramienta de fácil empleo y que no requiera conocimientos de informática, es muy recomendable el desarrollo de una interfaz que permita al usuario caracterizar cualquier mezcla a partir de los datos que el dispositivo de adquisición proporciona. Con esto en mente, este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una herramienta gráfica a partir de los modelos ya disponibles, con el fin de proporcionar una metodología útil, sencilla y completa para la caracterización de mezclas.

## 2 Materiales y métodos

En esta sección se presentarán las especies de microalgas consideradas por la herramienta, así como las herramientas empleadas para la adquisición de datos y el desarrollo de los modelos.

### 2.1 Especies de microalgas

Las especies empleadas para el desarrollo de los modelos en [15], y por tanto las que la herramienta será capaz de caracterizar son *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus almeriensis*. Se trata de dos de las especies más empleadas a nivel comercial, debido a su elevada tasa de crecimiento y su tolerancia a amplios rangos de pH, oxígeno disuelto y temperatura. Son especies óptimas para su cultivo en reactores abiertos.

*Chlorella vulgaris* (Figura 1) es una de las especies más producidas, con gran interés en el ámbito de la nutrición humana como suplemento dietético. En cuanto a *Scenedesmus almeriensis* (Figura 2), se trata de una especie menos extendida pero muy útil como fuente de luteína en ese mismo ámbito [7, 14].

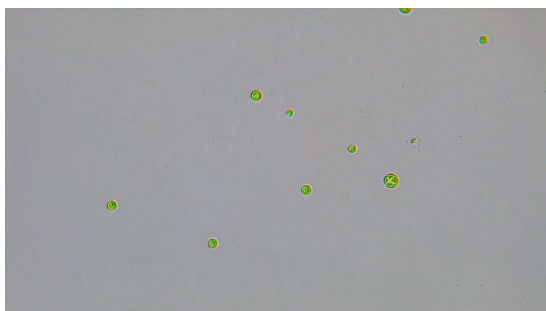


Figura 1: Muestra de *Chlorella vulgaris*.



Figura 2: Muestra de *Scenedesmus almeriensis*

### 2.2 FlowCAM

Los modelos desarrollados en [15] emplean como entradas imágenes individuales de las células de las muestras o rasgos descriptivos de estas, por lo que la herramienta gráfica deberá recibir del usuario alguno de estos tipos de datos. En el trabajo citado estos fueron adquiridos mediante *FlowCAM* [1]. Se trata de un dispositivo de análisis de partículas capaz de detectar y analizar cada una de las células de un fluido en movimiento.

El dispositivo impulsa la muestra mediante una pequeña bomba hacia una cámara con una lente microscópica en la cual toma imágenes a nivel microscópico con cierta frecuencia. El software del dispositivo analiza las imágenes, detectando y segmentando cada célula individual, y obteniendo una serie de propiedades o rasgos descriptivos de estas. Las salidas que devuelve la herramienta son un *collage* con todas las imágenes individuales detectadas en formato *.tif* como la mostrada en la Figura 3, y una hoja de datos con las propiedades de cada célula en formato *.xlsx*.

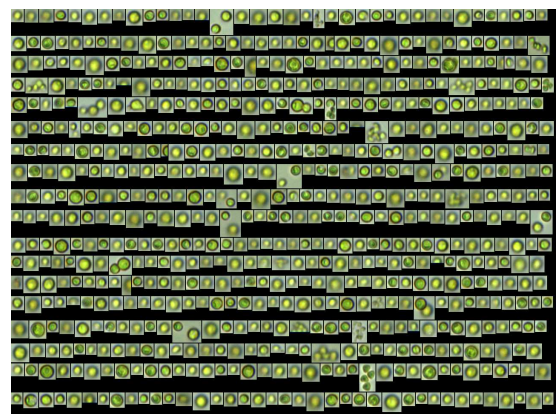


Figura 3: *Collage* de imágenes individuales proporcionado por *FlowCAM*.

De cara al uso de la herramienta gráfica, será imprescindible el uso de uno de estos tipos de datos. Ambos pueden ser obtenidos por *FlowCAM*, aunque existen otros dispositivos de de-

tección y segmentación de imágenes de células. Sin embargo, es imprescindible que el formato de estos datos sea en *collages.tif*. En cuanto a las propiedades de las células, si se desea usar estos datos para la caracterización de la muestra, sí que deberán ser obtenidos mediante *FlowCAM*, pues se emplearán concretamente los rasgos proporcionados por el dispositivo.

### 2.3 Toolboxes de MATLAB

Todo el desarrollo de este trabajo ha sido realizado en MATLAB. Los modelos obtenidos en [15] fueron construidos y entrenados haciendo uso del “*Deep Learning Toolbox*” [12]. Este toolbox permite diseñar las estructuras de las redes neuronales capa por capa, establecer las opciones de entrenamiento, llevar este a cabo y, por supuesto, emplear las redes neuronales entrenadas para posteriores predicciones. Para este trabajo, permitirá realizar las predicciones con los modelos previamente desarrollados.

Para trabajar con las imágenes proporcionadas por *FlowCAM* se hizo uso del “*Image Processing Toolbox*” [20]. Este conjunto de funciones permite una gran variedad de técnicas para el procesamiento, análisis y visualización de imágenes. Durante este trabajo, es fundamental para segmentar y transformar los *collages* que la herramienta recibirá como entrada.

Finalmente, la herramienta de MATLAB más empleada durante este trabajo ha sido el “*App Designer*”. Esta permite construir de manera sencilla interfaces gráficas con distintos elementos, tales como figuras, botones o tablas. En estas se pueden desplegar funciones que permitan al usuario interactuar con algunos de los elementos constituyentes, y mostrando los resultados o la información pertinente por otros.

## 3 Redes neuronales empleadas

Toda la herramienta está basada en los modelos de clasificación de cepas desarrollados y descritos en [15]. Ambos modelos están basados en redes neuronales artificiales, pero emplean como entradas distintos tipos de datos y presentan estructuras diferentes. Los dos modelos distinguen entre las mismas especies de microalgas y fueron entrenados y validados con las mismas muestras.

### 3.1 Modelo basado en rasgos

En primer lugar, se desarrolló un modelo de clasificación empleando las propiedades proporcionadas por *FlowCAM* como entradas. Estas son 30 variables numéricas independientes entre sí, resultando

como salidas dos variables con valores de 0 a 1, que se pueden considerar el “grado de similitud” de dicha entrada con cada una de las salidas. Las variables de salida son las mismas para ambas redes.

De este modo, la estructura de este primer modelo es la representada en la Figura 4. El modelo consta de una capa de entrada de 30 nodos (uno por cada entrada), una capa oculta de 25 nodos, y una capa de salida de 2 nodos (uno por cada salida). El modelo fue entrenado con muestras puras demostrando una precisión del 96.6%, y fue complementado con un umbral de clasificación para la salida “*Chlorella*”. Los resultados de validación de este modelo con muestras mixtas se muestran en la Figura 5. En esta gráfica se presenta la concentración predicha de *Chlorella vulgaris* frente a la real para las distintas mezclas validadas. Como se observa, se trata de un modelo muy preciso para todo el espectro de mezclas.

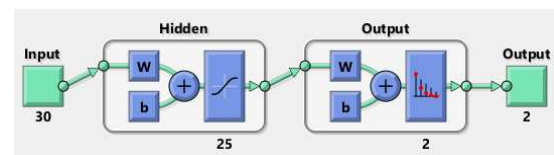


Figura 4: Estructura de la red neuronal basada en rasgos.

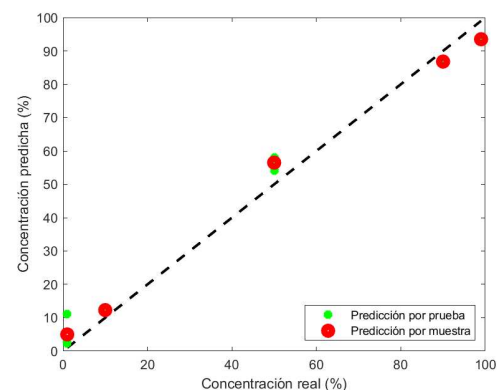


Figura 5: Resultados de validación de la red neuronal basada en rasgos.

### 3.2 Modelo basado en imágenes

El segundo modelo emplea como entradas las imágenes de las células individuales. Puesto que *FlowCAM* proporciona los *collages* con dichas imágenes, es preciso llevar a cabo un proceso de segmentación previo. De este modo, se pueden obtener las imágenes individuales con las que trabaja la red. Estas deben estar normalizadas a un tamaño de  $227 \times 227 \times 3$ .

En cuanto a la estructura de la red, se trata de una estructura ya existente ligeramente modificada y reentrenada, la de la red *AlexNET*. Se trata de una red neuronal convolucional de 25 capas, con el mismo tamaño de entrada que las imágenes normalizadas, y con un tamaño de la capa de salida reducido a 2, correspondiente con el número de clases identificadas.

La precisión del modelo durante su entrenamiento con muestras puras fue del 98.4%. Al igual que en el caso anterior, al modelo se le aplicó un umbral de clasificación para la salida "*Chlorella*", obteniendo los resultados de validación mostrados en la Figura 6. Esta gráfica, muestra la concentración predicha de *Chlorella vulgaris* frente a la real para las mezclas analizadas haciendo uso de este modelo. Se puede apreciar que los resultados en este caso también se aproximan mucho a la realidad, resultando un modelo muy preciso.

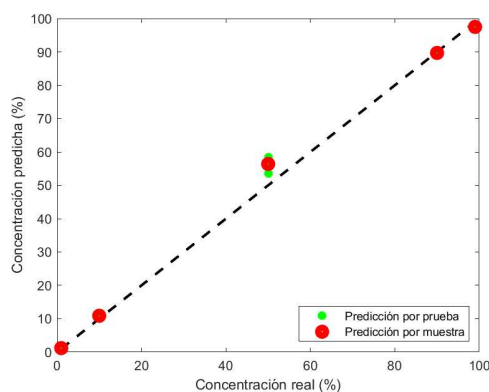


Figura 6: Resultados de validación de la red neuronal basada en imágenes.

#### 4 Herramienta gráfica

El objetivo de la herramienta es que permita, de manera sencilla, que el usuario pueda introducir los datos relativos a las muestras en cualquiera de las dos formas, bien sea un *collage.tif* o las propiedades obtenidas por *FlowCAM* en formato *.xlsx*. A partir de estos datos, el modelo debe presentar de forma gráfica y clara la composición de la muestra analizada. La Figura 7 muestra la interfaz completa de la herramienta.

De este modo, la herramienta tiene que, en primer lugar, dejar que el usuario seleccione el tipo de dato que va a usar. Esto se realiza mediante un grupo de botones de opciones que permiten la selección de una única opción (1). Una vez seleccionado, el usuario puede pulsar el botón "Add new dataset" (2) para que el programa abra el explorador de archivos y deje seleccionar los datos de entrada. Si se va a emplear el modelo basado

en rasgos, el explorador detectará los archivos *.xlsx* de cada carpeta para que el usuario seleccione los que quiere usar. Si por el contrario se desea predicción basada en imágenes, el usuario debe seleccionar la carpeta que contenga todos los archivos *.tif*. La ventana de texto (3) mostrará el path completo del archivo, o de la carpeta que contiene las imágenes.

Tras esto, el usuario puede pulsar el botón "Classify" (4) para que la herramienta dé comienzo a la clasificación. En función de la opción seleccionada, se carga un modelo u otro. Se verifica que el formato de los datos de entrada es correcto para cada uno de los casos, y se cargan dichos datos. En el caso del modelo basado en imágenes, dicha carga lleva consigo la segmentación de los datos, por lo que es un proceso más lento. Una vez cargados, se realiza la predicción con el modelo de red neuronal y se aplican los umbrales de clasificación. La ventana de texto (5) proporciona información sobre el proceso, indicando si se están cargando los datos, si se está realizando la clasificación o si ha finalizado el proceso. En el caso de la red basada en imágenes, también muestra el porcentaje de datos cargados.

Por último, la tabla (6) muestra la composición de cada especie en tanto por ciento, mientras que la figura (7) presenta un histograma con dichas composiciones. El tamaño de las imágenes de cada especie también será proporcional a su composición. De este modo, de forma muy sencilla el usuario puede conocer la composición de ambas especies para cualquier muestra a partir de los datos pertinentes.

La propia Figura 7 muestra el estado final de la interfaz tras realizar una clasificación de una muestra mixta basada en rasgos. El resultado cuando la clasificación se basa en imágenes es muy similar. El proceso completo desde que se seleccionan los archivos hasta que se muestran los resultados toma más o menos tiempo en función del volumen de datos empleados y del modelo que se use. Para una muestra de 50000 células, la clasificación basada en rasgos tomó menos de 20 segundos, mientras que empleando las imágenes tardó más de cinco minutos. La diferencia de tiempo es significativa, pero es lógica teniendo en cuenta la complejidad de los datos y el preprocesamiento de estos.

Mientras que la clasificación basada en rasgos es compatible únicamente con los datos adquiridos por *FlowCAM*, ya que son las propiedades que el modelo previo emplea en las predicciones, la clasificación basada en imágenes es más fácil de extrapolar a otros dispositivos de adquisición, siempre que sean capaces de segmentar las imágenes de

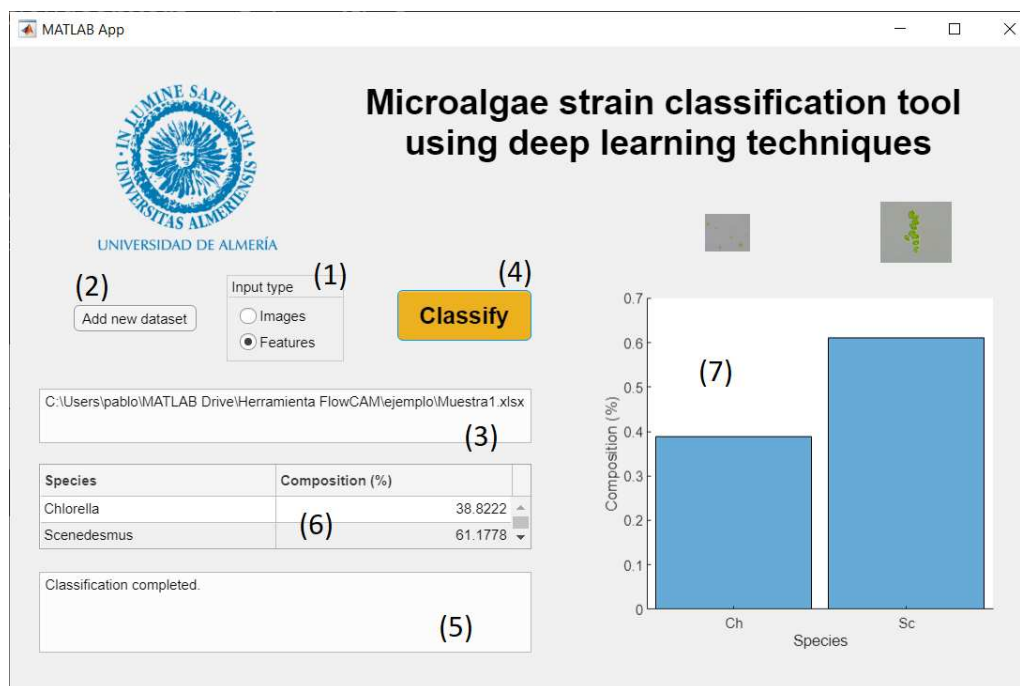


Figura 7: Interfaz de la herramienta para clasificación basada en rasgos.

las células e integrarlas en un *collage.tif*, lo cual supone una clara ventaja en términos de flexibilidad.

## 5 Conclusiones

En este trabajo se presenta una interfaz gráfica para la clasificación de cepas de microalgas basada en redes neuronales artificiales, empleando como entradas imágenes de las células de la muestra o rasgos descriptivos de estas. Los modelos empleados son muy precisos y permiten una caracterización correcta validada con mezclas muy diversas, siendo capaces de distinguir las especies *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus almeriensis*. A partir de estos, la herramienta proporciona una interfaz sencilla para que, únicamente introduciendo el archivo con los datos, se presente al usuario los resultados de la clasificación de forma automática y con la mínima intervención por parte de este.

Se trata de una herramienta fundamental para la implementación de estos modelos en un proceso de producción de microalgas, pues no se puede depender de los conocimientos del entorno de programación por parte de los usuarios para caracterizar cualquier muestra. Es imprescindible que esta caracterización pueda ser llevada a cabo por cualquier usuario, y la interfaz propuesta lo permite.

De cara a futuros trabajos, puede resultar muy interesante ampliar tanto los modelos como la propia interfaz a más especies y géneros de mi-

croalgas, para conseguir una herramienta más completa y que pueda ser libremente empleada en cualquier proceso de producción de microalgas, partiendo siempre de dispositivos de adquisición de datos apropiados.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto del Plan Nacional DPI2017-84259-C2-1-R del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

## English summary

### GRAPHICAL TOOL FOR CHARACTERISATION OF MICROALGAE CULTURES BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

## Abstract

*This work addresses the problem of characterization of microalgae samples through artificial neural network models. It presents a graphical interface in combination with the models that allows the prediction of the species composition of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus almeriensis* from data related to the sample, such as cell images or descriptive properties of the cells. The results of the work provide a powerful tool to approach the problem without the need of any programming language knowledge, in a fast, simple and intuitive way.*

**Keywords:** Microalgae, neural networks, graph-

ical interface.

## Referencias

- [1] FlowCAM ® Manual, 2011.
- [2] N. Abdel-Raouf, A. A. Al-Homaidan, and I. B.M. Ibraheem. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3):257–275, jul 2012.
- [3] F. G. Acien, J. M. Fernández Sevilla, and E. Molina Grima. Microalgae: The basis of mankind sustainability. In *Case Study of Innovative Projects - Succesful Real Cases*, chapter 7, pages 123–140. 2017.
- [4] E. Álvarez, M. Moyano, Á. López-Urrutia, E Nogueira, and R. Scharek. Routine determination of plankton community composition and size structure: A comparison between FlowCAM and light microscopy. *Journal of Plankton Research*, 36(1):170–184, 2014.
- [5] P. Coltelli, L. Barsanti, V. Evangelista, A. M. Frassanito, V. Passarelli, and P. Gualtieri. Automatic and real time recognition of microalgae by means of pigment signature and shape. *Environmental Sciences: Processes and Impacts*, 15(7):1397–1410, jul 2013.
- [6] I. Correa, P. Drews-Jr, S. Botelho, M. S. De Souza, and V. M. Tavano. Deep learning for microalgae classification. *Proceedings - 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, ICMLA 2017*, Decem:20–25, 2017.
- [7] J. M. Fernández-Sevilla, F. G. Acien Fernández, and E. Molina Grima. Biotechnological production of lutein and its applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86(1):27–40, mar 2010.
- [8] B. M. Franco, L. M. Navas, C. Gómez, C. Sepúlveda, and F. G. Acien. Monoalgal and mixed algal cultures discrimination by using an artificial neural network. *Algal Research*, 38(January):1–7, 2019.
- [9] J. L. Guzmán, F. G. Acien Fernández, and M. Berenguel. Modelling and control of microalgae production in industrial photobioreactors (in Spanish). *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 18(1):1–18, 2021.
- [10] K. Heimann and R. Huerlimann. Microalgal classification: Major classes and genera of commercial microalgal species. *Handbook of Marine Microalgae: Biotechnology Advances*, pages 25–41, 2015.
- [11] A. Hernández-Pérez and J. I. Labbé. Microalgas, cultivo y beneficios (Microalgae, culture and benefits, in Spanish). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(2):157–173, 2014.
- [12] M. Hudson, B. Martin, T. Hagan, and H. B Demuth. Deep Learning Toolbox™ User’s Guide, 1992.
- [13] M. I. Jordan and T. M. Mitchell. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245):255–260, jul 2015.
- [14] R. A. Kay and L. L. Barton. Microalgae as Food and Supplement. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 30(6):555–573, jan 1991.
- [15] P. Otálora, J.L. Guzmán, F.G. Acien, M. Berenguel, and A. Reul. Microalgae classification based on machine learning techniques. *Algal Research*, 55:102256, 2021.
- [16] J. K. Pittman, A. P. Dean, and O. Osundeko. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Biore-source Technology*, 102(1):17–25, jan 2011.
- [17] S. Promdaen, P. Wattuya, and N. Sanevas. Automated microalgae image classification. *Procedia Computer Science*, 29:1981–1992, 2014.
- [18] P. Qian, Z. Zhao, H. Liu, Y. Wang, Y. Peng, S. Hu, J. Zhang, Y. Deng, and Z. Zeng. Multi-Target deep learning for algal detection and classification. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, 2020-July:1954–1957, 2020.
- [19] A. Reul, M. Muñoz, B. Bautista, P. J. Neale, C. Sobrino, J. M. Mercado, M. Segovia, S. Salles, G. Kulk, P. León, W. H. D. van de Poll, E. Pérez, A. Buma, and J. M. Blanco. Effect of CO<sub>2</sub>, nutrients and light on coastal plankton. III. Trophic cascade, size structure and composition. *Aquatic Biology*, 22:59–76, nov 2014.
- [20] C. M. Thompson and L. Shure. Image Processing Toolbox™ User’s Guide, 1995.
- [21] C. V. González-López, F. García-Cuadra, N. Jawiarczyk, J. M. Fernández-Sevilla, and F. G. Acien-Fernández. Valorization of Microalgae and Energy Resources. In *Sustainable Mobility, IntechOpen*. 2020.



- [22] J. Wang, J. Zhao, Y. Wang, W. Wang, Y. Gao, R. Xu, and W. Zhao. A new microfluidic device for classification of microalgae cells based on simultaneous analysis of chlorophyll fluorescence, side light scattering, resistance pulse sensing. *Micromachines*, 7(11):1–17, nov 2016.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



# EVALUACIÓN DEL USO DE CORRIENTE ALTERNA EN LA MEDIDA DE LA RESPUESTA GALVÁNICA DE LA PIEL (GSR)

F.J. Verdú-García, J.M. Catalán, D. Martínez-Pascual, A. Blanco, J. Álvarez-Pastor, Nicolás García-Aracil  
Universidad Miguel Hernández de Elche, Instituto de Bioingeniería, francisco.verdug@umh.es

## Resumen

*Las terapias de rehabilitación asistidas por robot consiguen aumentar la motivación del paciente y la intensidad del ejercicio. Para ello, uno de los métodos con resultados muy prometedores es el uso de algoritmos de adaptación de la dificultad. Estos algoritmos se basan normalmente en parámetros de rendimiento del juego. Sin embargo, considerar el estado anímico del paciente podría mejorar la toma de decisiones en este tipo de estrategias. Una de las señales fisiológicas más utilizadas para la estimación del estado del paciente es el GSR. Los sensores de GSR utilizan corriente continua para realizar la medida de la conductancia de la piel. En este artículo, se propone el uso de corriente alterna a la hora de medir la conductancia de la piel. Este tipo de corriente puede aportar más información puesto que es capaz de penetrar a mayor profundidad en la piel del usuario. En este estudio se ha diseñado y evaluado un sensor de GSR de corriente continua y alterna para la estimación del estado del paciente durante un juego de rehabilitación con diferentes niveles de dificultad.*

**Palabras clave:** Robótica de rehabilitación, respuesta fisiológica, GSR

## 1 INTRODUCCIÓN

La medida de la Respuesta Galvánica de la Piel (GSR) tiene aplicaciones en muchos ámbitos. En terapias de neurorehabilitación asistidas por robots, la señal GSR es una de las señales fisiológicas más utilizadas para medir diferencias en el estado anímico del paciente [4].

Tradicionalmente, la medida del GSR se ha llevado a cabo sometiendo la piel del usuario a una corriente o tensión continua a través de dos electrodos [1]. Si bien algunos autores [7] ya realizaron estudios sobre el uso corriente alterna para la medida del GSR, en algunos estudios se comenta la necesidad de realizar más estudios para analizar las ventajas que ofrece este tipo de técnica [2].

El método más común es medir la conductividad de la piel a través de una Corriente Continua (DC). Este método se ha mantenido durante años, sin embargo, las tecnologías de estos sensores basados en corriente continua han evolucionado con el tiempo [2].

Por su parte, emplear corriente Corriente Alterna (AC) para medir la GSR es un método poco convencional. A pesar de ello, este método muestra una serie de ventajas que potencialmente pueden resultar muy útiles a la hora de estudiar las diferencias en la respuestas fisiológicas de los usuarios. En primer lugar, en algunos estudios establecen que el modelo eléctrico de la piel no es meramente resistivo, sino que incluye componentes capacitivos [2]. El componente resistivo viene dado por la humedad presente en las capas internas de la piel, en concreto la dermis y la hipodermis, que las dota de conductividad, así como la presencia de las glándulas sudoríparas y su actividad en estas capas aumentan este efecto. Por su parte, el componente capacitivo viene dado por las diferencias de potencial que se generan entre las membranas de las glándulas sudoríparas y las células que las rodean. Las partes del cuerpo con mayor actividad glandular y, por tanto, con niveles mayores de GSR son las palmas de las manos y de los pies, mientras que zonas como la muñeca presentan menor actividad y las medidas tienen menos calidad [6].

En la Figura 1 se muestra el modelo eléctrico de la piel humana. Tal y como puede observarse, el condensador  $C_z$  afecta de forma directa a la resistencia equivalente total, ya que aumentando la frecuencia de la señal que circula por el circuito, la impedancia  $Z$  se reduciría debido al efecto del condensador, permitiendo medir con mayor facilidad en zonas donde el nivel medio de la señal GSR no sea muy alto.

Hay estudios que indican que el uso de corriente AC entre los electrodos reduciría el efecto de la polarización de los mismos que se da cuando se usa corriente DC [5]. Esta polarización genera una tensión de offset que es imposible de estimar, por lo que no se puede realizar una corrección *a posteriori* precisa. La corriente alterna, no

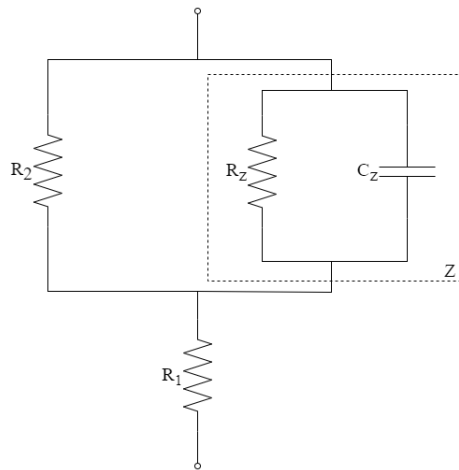


Figura 1: Modelo eléctrico de la piel humana.  $R_1$  es la resistencia asociada a la dermis, mientras que  $R_2$  es la resistencia de la epidermis. Ambas son valores constantes.  $Z$  representa la impedancia variable por la acción de las glándulas sudoríparas. [2]

obstante, hace que el efecto de la polarización no sea tan grande, ya que las capacitancias formadas por la superficie de los electrodos y la piel se van cargando y descargando [3].

En este estudio se pretende evaluar el uso de la AC para la medida de la señal GSR durante un ejercicio de rehabilitación. Para ello, se analizarán las diferencias en las reacciones fisiológicas de diferentes usuarios realizando un ejercicio de rehabilitación con diferentes niveles de dificultad. Este método de medida se comparará con el método convencional basado en corriente DC.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 SUJETOS

Han participado un total de 5 usuarios sin ningún tipo de discapacidad motora ni cognitiva ( $25,40 \pm 2,06$  años). Todos ellos eran diestros. Fueron reclutados entre el personal del Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Miguel Hernández. La familiarización con robots de rehabilitación o juegos de ordenador no se consideró para su exclusión o inclusión en el estudio.

### 2.2 MONTAJE EXPERIMENTAL

La experimentación se ha llevado a cabo con el sujeto sentado frente a una mesa con ambos brazos reposando sobre ella. Los electrodos se han colocado en el brazo que el usuario no utilizará para realizar las pruebas. El sistema de medición

se sitúa junto al brazo, a una distancia que impida que el circuito pueda ser golpeado por algún movimiento durante el ejercicio. En la mesa, frente al sujeto, se encuentra la pantalla en la que se muestra el juego, y el teclado con el que se realizaran las pruebas.

### 2.3 MEDICIÓN DE LAS RESPUESTAS FISIOLÓGICAS

#### 2.3.1 Diseño e Implementación del Sensor GSR

Para llevar a cabo el experimento es necesario contar con un dispositivo de medición de conductividad, que se ha diseñado para dicho fin. El circuito es capaz de medir la conductividad de la piel usando dos fuentes de alimentación distintas: una que introduce una señal de tensión AC y otra que inyecta una tensión DC. El sensor ha sido validado mediante la comparación de medidas simultáneas del circuito diseñado y un dispositivo comercial, el Shimmer 3 GSR+ Unit.

Además, se debe contar con cuatro electrodos adhesivos, ya que cada canal, el de AC y el de DC, requiere de dos electrodos para realizar la medida. El circuito, controlado por un microcontrolador Teensy, consta de un amplificador operacional y varias resistencias y condensadores, formando una configuración de amplificador no inversor con un filtro paso-bajo a la salida y un divisor de tensión a la entrada, en la que una de las resistencias es la formada por la resistencia de la piel ( $R_{sk}$ ). El circuito está duplicado, habiendo uno por cada canal de medición, tal y como se aprecia en la Figura 2.

Así, al circuito se le introduce una tensión de entrada, que será o bien alterna o bien continua.

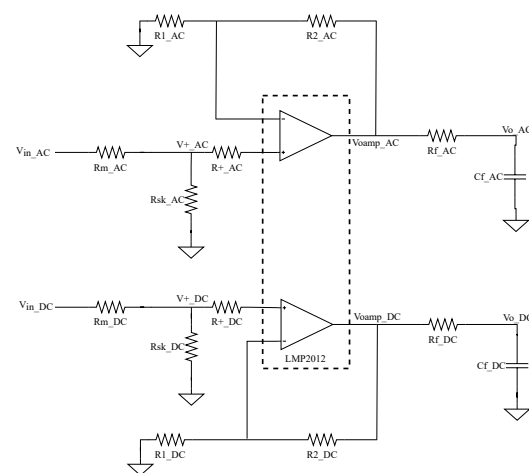


Figura 2: Esquemático del circuito con el que se ha realizado el experimento.

Esta tensión variará en función de la resistencia de la piel tras su paso por el divisor de tensión y después se amplifica. Por último, la señal se filtra para que sea leída por el microcontrolador.

El circuito, pues, cuenta con dos canales de medida, uno para corriente continua y otro para corriente alterna.

### 2.3.2 Medición mediante corriente continua

La tensión de entrada en el canal DC es constante y tiene un valor de 3,3 voltios. Esta tensión se reduce tras el divisor de tensión, con un factor que depende de la resistencia de la piel. Posteriormente, esta tensión se introduce por la entrada positiva de un amplificador operacional, configurado como amplificador no inversor y con un factor de amplificación de 3. Finalmente, se filtra esta señal amplificada y se obtiene la tensión de salida del circuito, que es leída por el microcontrolador.

### 2.3.3 Medición mediante corriente alterna

El canal AC presenta un comportamiento funcional idéntico al de corriente continua, aunque existen algunas diferencias. La señal es, en este caso, un Pulso Modulado por Amplitud (PWM) de 1 MHz de frecuencia y 50% de ciclo de trabajo y 3,3 voltios de amplitud. La señal es de frecuencia elevada para aprovechar los posibles beneficios que se le atribuyen [2].

La piel presenta unas propiedades eléctricas principalmente resistivas que tienen su origen en la humedad de las capas internas de la piel, así como en la segregación de sudor de las glándulas presentes en estas. No obstante, estas mismas glándulas son las que aportan a la impedancia de la piel su componente capacitiva, ya que entre sus membranas y el exterior se forman pequeñas diferencias de potencial que actúan como condensadores. Por ello es interesante el uso de señales AC, ya que la tensión continua ignora esos componentes capacitivos, mientras que la alterna interactúa con ellos.

Se espera, por tanto, que aún sin realizar un estudio frecuencial, pues es un análisis más complejo, el uso de tensión alterna ofrezca alguna mejora con respecto a la DC.

## 2.4 PROTOCOLO

Al inicio de la experimentación es importante informar al sujeto de en qué consiste la prueba que va a realizar, así como indicar que, durante las

medidas, debe permanecer lo más inmóvil posible, en especial el brazo en el que están colocados los electrodos, para evitar la generación de artefactos en la señal medida. Una vez se han colocado los electrodos y se ha comprobado que están bien sujetos a la piel, se puede proceder al inicio de la prueba.

El presente estudio se ha llevado a cabo bajo dos condiciones, donde cada sujeto realizará la prueba con dos niveles de dificultad diferentes, con el fin de generar distintos niveles de respuestas fisiológicas en el usuario. De esta forma se pretende comprobar si, mediante las medidas de conductividad, existen diferencias entre los canales AC y DC para diversos estados del sujeto. Antes de cada prueba, se debe realizar una medida de *baseline*, durante la cual el sujeto debe estar lo más relajado posible, de forma que se logre una referencia de su estado de calma antes de estimular el estrés.

El orden de las pruebas, por su parte, es aleatorio para cada sujeto. La razón es que de esta manera se eliminan los factores debidos al orden de las pruebas y no condicionarán los resultados. Esto se ve en la Figura 3, en la que cada condición es un nivel de dificultad que se elige de forma aleatoria. Cada prueba, así como las *baseline*, tienen una duración de tres minutos y se realizarán dos veces, una por cada lugar de medida. Se realizan primero las medidas con los electrodos colocados en los dedos y, posteriormente, se repite el proceso con los electrodos en la muñeca. La gestión de la ejecución de los juegos y de la comunicación con el microcontrolador del circuito, así como del almacenamiento de las medidas, la realiza un programa central.

## 2.5 Juego

Para este estudio se ha utilizado el juego de rehabilitación, que se trata de un juego desarrollado específicamente para este tipo de pruebas en las que se pretende generar cierto estrés al usuario. El juego consiste en ganar

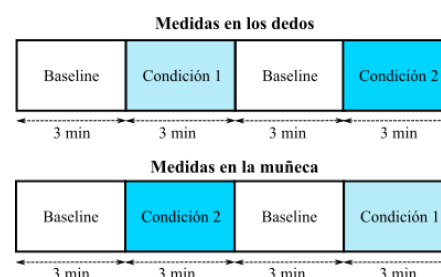


Figura 3: Diagrama de bloques del protocolo experimental.

puntos evitando colisiones con los obstáculos, representados por rectángulos azules. Cada vez que se produce una colisión, se restan puntos. El jugador se representa por el cuadrado verde, que debe moverse hacia arriba, abajo, izquierda o derecha para evitar las colisiones, ya que los obstáculos tienen un movimiento errático y de carácter casi impredecible. El jugador puede moverse dentro de la zona de juego, que está delimitada por un recuadro.

Los niveles de dificultad se ajustan modificando el número de obstáculos, así como su velocidad de movimiento, de forma que el nivel fácil únicamente cuenta con un obstáculo y se mueve muy lento. Por su parte, el nivel difícil tiene tres obstáculos, cada uno con un movimiento distinto y, además, se mueven con mucha velocidad, por lo que predecir el movimiento de los tres para esquivarlos se vuelve muy complicado. El nivel difícil se puede observar en la Figura 4. Debido a estas configuraciones de dificultad, la mayoría de jugadores acaban con la puntuación perfecta en el nivel fácil, mientras que apenas son capaces de llegar, en general, a la mitad de la puntuación en el difícil.

## 2.6 DATOS ADQUIRIDOS

Durante el experimento, el sistema envía al programa central las medidas, tanto por el canal AC como por el canal DC, a una frecuencia de unas 16 muestras por segundo, frecuencia más que suficiente para medir el Nivel de Conductividad de la Piel (SCL) y la Respuesta de la Conductividad de la Piel (SCR), ya que la frecuencia de muestreo mínima necesaria es de 6 Hz [2]. Cuando finaliza la toma de medidas, el programa almacena los dos grupos de datos junto con el tipo de prueba que se ha realizado. A la tensión medida se le aplica la conversión en conductancia según el circuito de la Figura 2 y un filtro de ventana para suavizar la señal.

Por tanto se obtienen dos grupos de medidas por cada prueba. Dado que cada sujeto realiza ocho,

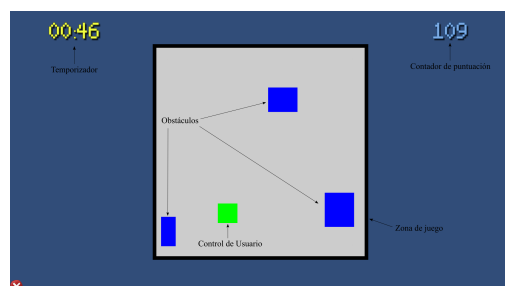


Figura 4: Captura de pantalla del juego de rehabilitación en nivel difícil.

en total se tienen 16 grupos de medidas por sujeto, que posteriormente habrá que procesar y analizar.

El análisis se debe hacer de forma relativa a la *baseline*, debido a que el valor absoluto de conductividad puede variar mucho entre individuos y sería imposible realizar una comparación entre todas las medidas. Para ello, se van a procesar los datos de forma que se puedan comparar los SCLs de las distintas medidas.

Debido a que los valores de conductividad varían mucho de usuario a usuario, la comparación no puede realizarse directamente, sino que es necesario normalizar cada señal. Así, la normalización se hará usando como referencia la *baseline*. En primer lugar, se ha de calcular la media del rango final de la línea base ( $\overline{B_s}$ ) para establecer el nivel de reposo de cada individuo. Posteriormente, y usando esta media, se normaliza el valor de la conductancia respecto a este valor ( $C_n$ ). La fórmula se ve en la ecuación 1. Se trata del cociente entre la resta del valor medio de la señal medida durante la prueba ( $\overline{S}$ ) y el valor medio de la *baseline* y la resta del máximo de la señal entre la media de la línea de base. Con la resta de  $\overline{B_s}$  se logra centrar todas las señales según cuánto se alejan de la media del estado de calma.

$$C_n = \frac{\overline{S} - \overline{B_s}}{\max(\overline{S}) - \overline{B_s}} \quad (1)$$

## 3 RESULTADOS

El análisis de los resultados se ha realizado mediante su representación en un gráfico *boxplot*, en el que se representan los valores  $C_n$  calculados para cada sujeto en cada una de las condiciones experimentales. En primer lugar, en la Figura 5 se pueden ver las medidas de las dos pruebas realizadas por los usuarios con los electrodos colocados en los dedos, es decir, el juego en nivel fácil y en nivel difícil. A la izquierda se muestran los valores correspondientes al canal AC, mientras que a la derecha se encuentran los del canal DC.

En la Tabla 1 se pueden ver los valores medios y la desviación típica de los coeficientes  $C_n$  de los sujetos para cada condición.

Por su parte, en la gráfica de la Figura 6, está la representación de la conductividad normalizada para los mismos cuatro grupos de medidas tomadas en la muñeca: medidas AC para niveles fácil y difícil y medidas DC para niveles fácil y difícil. y en la Tabla 2 se exponen las medias y la desviación típica para cada grupo de medidas.

Tabla 1: Media y desviación típica para las medidas realizadas en los dedos en alterna, continua y para las condiciones del juego en nivel fácil y difícil.

Tensión	Dificultad	Media	D. Típica
Alterna	Fácil	0.6249	0.2243
	Difícil	0.8307	0.0348
Continua	Fácil	0.6456	0.2223
	Difícil	0.8417	0.0327

Tabla 2: Media y desviación típica para las medidas realizadas en la muñeca en alterna, continua y para las condiciones del juego en nivel fácil y difícil.

Tensión	Dificultad	Media	D. Típica
Alterna	Fácil	-0.0714	0.4857
	Difícil	0.4138	0.5829
Continua	Fácil	-0.1015	0.4991
	Difícil	0.3735	0.6162

## 4 DISCUSIÓN

El principal objetivo que se planteó en este estudio es si mediante las medidas AC se podían diferenciar distintos niveles de GSR en comparación con las medidas en DC.

El sensor presentado se ha validado mediante un dispositivo comercial, el Shimmer 3 GSR+ Unit. Para la validación, se realizaron medidas simultáneas con ambos dispositivos, usando en el sensor presentado el canal DC. De esta forma, se puede comprobar si el sensor es capaz de detectar los cambios en las respuestas fisiológicas que el dispositivo comercial detecta, y tener así una estimación de la calidad de las medidas. No se realiza, sin embargo, calibración del valor exacto de conductividad medido, ya que, debido a la

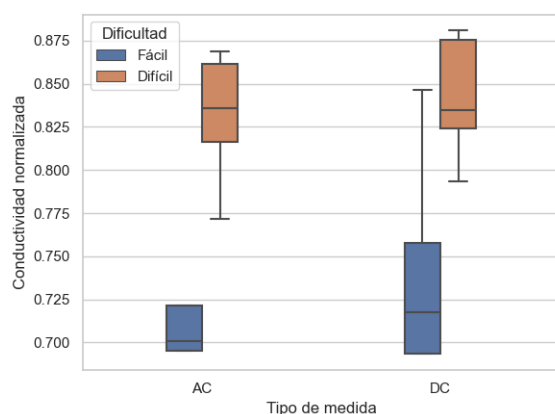


Figura 5: Gráfico *boxplot* de las medidas realizadas en los dedos.

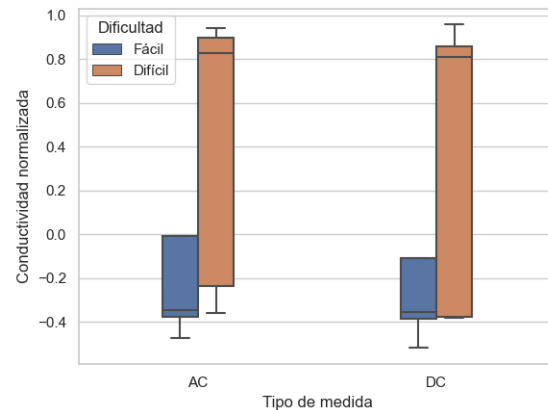


Figura 6: Gráfico *boxplot* de las medidas realizadas en la muñeca.

normalización, esta funcionalidad no es relevante. Así, en la Figura 7 se puede observar que ambos sensores realizan medidas muy similares, y que el sensor diseñado es capaz de seguir los aumentos y decrementos de la señal GSR.

En la gráfica de la Figura 5 se puede apreciar que para ambos canales parecen diferenciarse los dos niveles. La condición "fácil" presenta un nivel de GSR menor respecto a la *baseline* que la "difícil". Aunque para el canal DC el máximo del nivel fácil se solapa con el del nivel difícil, los recuadros no coinciden entre sí, por lo que se puede decir que ambos grupos de datos sí que se diferencian. Por otra parte, el rango de valores que presentan las medidas es relativamente pequeño, ya que todos se encuentran en 0.175 puntos. En la Tabla 1 se puede apreciar que ambos grupos de medidas, las AC y las DC, presentan propiedades muy parecidas, tanto en media como en desviación

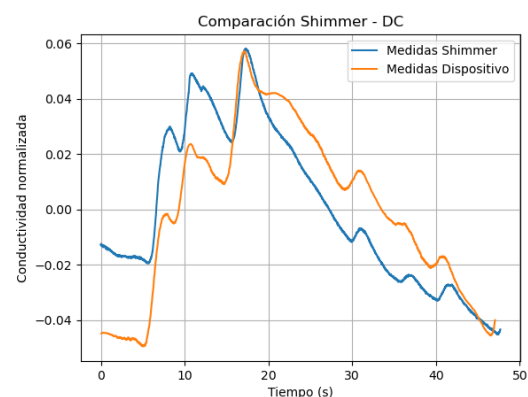


Figura 7: Validación entre la medida realizada con el sensor diseñado y la tomada con el Shimmer 3 GSR+ Unit.

típica.

En la Figura 6 vemos la representación de las medidas en la muñeca. La calidad de estas medidas respecto a las realizadas en los dedos es mucho menor, lo que se evidencia porque los recuadros se solapan y es mucho más complicado diferenciar las dos condiciones, ya que los valores del nivel fácil están contenidos en los del difícil.

Además, vemos que en las medidas hay valores negativos, lo que quiere decir que las medidas tomadas durante las pruebas tenían un nivel de GSR menor al medido durante la *baseline*. Esto ocurre sobre todo en las medidas del nivel fácil, en las que los datos sugieren que los estímulos no son suficientes para generar una respuesta fisiológica medible, al menos en el nivel de la señal GSR.

En las medidas en nivel difícil también se pueden encontrar valores negativos, aunque para algunos sujetos la respuesta fisiológica producida sí que resultó medible para el sensor, lo que se traduce en un aumento considerable de la desviación típica, tal y como se observa en la Tabla 2.

## 5 CONCLUSIONES

En este estudio se han comparado las medidas de GSR tomadas mediante corriente continua y mediante corriente alterna. Los resultados muestran que ambos métodos se comportan de forma muy similar. En el caso de las medidas en los dedos, tanto con AC como con DC parece que es posible distinguir ambos estados fisiológicos. En el caso de la muñeca, sin embargo, los datos muestran que la distinción es más complicada.

En resumen, se puede concluir que el uso de AC en la medida del GSR es, como mínimo, igual de válida que la tensión continua. Los datos apenas han mostrado diferencias entre ambos grupos, tanto en las medidas en los dedos como en las medidas en la muñeca. Esto es indicativo de que la medida en alterna tiene mucho potencial, ya que el funcionamiento de base es igual al de la medida en continua, por lo que con la implementación de un sistema capaz de analizar el espectro de la señal se podría obtener información sobre la parte imaginaria de la impedancia, cosa que es imposible mediante las medidas en DC. De esta forma se podría obtener información sobre la fase de la señal AC a la salida, o incluso realizar análisis espectrales que mostraran el efecto que tiene la piel sobre cada frecuencia.

## Agradecimientos

Este estudio ha sido subvencionado por la Conselleria de Educación, Cultura y Deporte de la Generalitat Valenciana (GVA), a

través de la ayuda ACIF/2018/214, de la ayuda APOTIP/2020/014 y de la ayuda APOTIP/2021/022 y por el Ministerio de Ciencia e Innovación, perteneciente a la Agencia Estatal de Investigación (AEI), a través del proyecto PID2019-108310RB-I00/AEI/10.13039/501100011033.

## 6 Acrónimos

**GSR** Respuesta Galvánica de la Piel

**AC** Corriente Alterna

**DC** Corriente Continua

**SCL** Nivel de Conductividad de la Piel

**PWM** Pulso Modulado por Amplitud

**SCR** Respuesta de la Conductividad de la Piel

## English summary

## EVALUATION OF ALTERNATING CURRENT IN THE MEASUREMENT OF GALVANIC SKIN RESPONSE (GSR)

## Abstract

*Robot-assisted rehabilitation therapies get to improve patient's motivation and exercise intensity. For this purpose, one of the methods with the most promising results is the use of difficulty-adapting algorithms. This algorithms are usually based in game performance parameteres. However, the consideration of the patient's emotional state could improve the decision making in this kind of strategies. One of the most used physiological signals for estimating the state of the patient is GSR. GSR sensors use direct current to measure skin conductance. In this article, the use of alternating current to measure skin conductance is proposed. This kind of current can provide more information because it can penetrate further in the user's skin. In this study, a GSR sensor capable of measuring both direct and alternating current was designed and evaluated in order to estimate the patient's*



*state during a rehabilitation game with several difficulty levels.*

**Keywords:** Rehabilitation robotics, physiologic response, GSR.

## Referencias

- [1] Badesa, F. J., Morales, R., Garcia-Aracil, N. M., Sabater, J. M., Zollo, L., Papaleo, E., Guglielmelli, E., (2016) Dynamic Adaptive System for Robot-Assisted Motion Rehabilitation, IEEE Systems Journal, vol. 10, no. 3
- [2] Boucsein, W., (2012) Electrodermal Activity, Springer
- [3] Boucsein, W., Fowles, D. C., Grimmes, S., Ben-Shakhar, G., Roth, W. T., Dawson, M. E., Filion, D. L., (2012) Committee report: Publication recommendations for electrodermal measurements, Psychophysiology, vol 49.
- [4] Catalán, J. M., García-Pérez, J. V., Blanco, A., Martínez, D., Lledó, L. D., García-Aracil, N., (2021) Differences in Physiological Reactions Due to a Competitive Rehabilitation Game Modality, sensors, vol. 21.
- [5] Pabst, O., Tronstad, C., Grimnes, S., Fowles, D. C. and Martinsen, Ø. G., (2017) Comparison between the AC and DC measurement of electrodermal activity, Psychophysiology, vol. 54.
- [6] van Dooren, M., de Vries, J. J. G., Janssen, J. H., (2012) Emotional sweating across the body: Comparing 16 different skin conductance measurement locations, Physiology & Behavior, vol 106.
- [7] Yamamoto, Y., Yamamoto, T., (1978) Dispersion and correlation of the parameters for skin impedance, Medical & Biological Engineering & Computing, vol. 16.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# ANÁLISIS DE INTERFACES CEREBRO-MÁQUINA BASADAS EN IMAGINACIÓN MOTORA DE LA MARCHA

Laura Ferrero, Vicente Quiles, Mario Ortiz, Eduardo Iáñez, José A. Flores, José M. Azorín  
Brain-Machine Interface System Lab, Universidad Miguel Hernández de Elche, España: lferrero@umh.es,  
vquiles@umh.es, mortiz@umh.es, eianez@umh.es, ja.flores@umh.es, jm.azorin@umh.es

## Resumen

*Las interfaces cerebro-máquina (BMIs de Brain-Machine Interfaces) son sistemas que utilizan la actividad cerebral para controlar dispositivos externos. Existen diversos paradigmas de control y uno de los más utilizados se basa en la imaginación motora (IM). La combinación de BMIs basadas en IM con dispositivos de asistencia como exoesqueletos robóticos ofrece nuevas formas de apoyo para pacientes con limitaciones motoras. Además, la realización de IM puede promover mecanismos de plasticidad del sistema nervioso. Este trabajo muestra una revisión de nuestros trabajos previos de BMI no invasivas basadas en IM de la marcha. Se presentan las diversas metodologías utilizadas, las limitaciones de este tipo de BMI y oportunidades de mejora.*

**Palabras clave:** Interfaz cerebro-máquina; imaginación motora; señales EEG; exoesqueleto.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las interfaces cerebro-máquina (BMIs de Brain-Machine Interfaces) son sistemas que utilizan la actividad cerebral para controlar dispositivos externos que pueden ir desde un cursor en una pantalla hasta un dispositivo robótico. El control se basa en la detección de patrones cerebrales [1]. El usuario de la BMI debe alternar entre distintos patrones para producir cambios en el dispositivo externo, lo que se conoce como paradigma de control.

Existen diversos paradigmas de control [1] y uno de los más utilizados es el basado en la imaginación motora (IM). IM se define como la ejecución mental de un movimiento sin activación muscular [2]. Este paradigma se ha empleado para controlar dispositivos de asistencia motora como sillas de ruedas o exoesqueletos robóticos [1].

Su principal ventaja es su aplicación para la neurorrehabilitación. Las terapias tradicionales de rehabilitación se enfocan de forma física a nivel distal. Los terapeutas diseñan ejercicios específicos, observan a los pacientes y manipulan de forma directa los miembros afectados realizando movimientos repetitivos. Estos movimientos se pueden realizar de forma más consistente con dispositivos robóticos. Además, durante el uso de la BMI con IM, el usuario realiza un entrenamiento cognitivo que puede promover la plasticidad del sistema nervioso [1], [3], [4].

Estudios previos han utilizado el contraste entre distintas tareas de IM, como mano derecha/mano izquierda, para producir cambios en los dispositivos externos [5] y otros han contrastado la tarea de IM con un estado inactivo o de relajación [6]. Este trabajo se ha centrado en dos tareas mentales: IM de la marcha y relajación. Uno de los principales problemas de este tipo de BMI reside en las falsas detecciones, es decir cuando el sistema identifica otra tarea mental como IM. En [3] combinan IM con la respuesta inducida por estimulación somatosensorial. En nuestros trabajos previos [7]–[9], el paradigma de IM se combina con un paradigma que mide el nivel de atención del usuario. De esta forma, para conseguir una activación se necesita la realización de IM y mantener un nivel alto de atención.

Como paso previo al control de un exoesqueleto, en nuestro estudio [7], presentamos una BMI basada en IM de la marcha y el nivel de atención para el control de una cinta de andar. Esta BMI se evaluó con 3 sujetos sanos y sin problemas motores. Posteriormente, utilizamos un sistema de realidad virtual con una BMI similar, pero sólo considerando el paradigma de IM y se evaluó con 2 sujetos sanos [8]. En [9] utilizamos la misma BMI que en [7], ajustando los umbrales de activación para controlar un exoesqueleto de miembro inferior y se validó con 2 sujetos sanos. El objetivo de la investigación es el desarrollo de una BMI para el control de un exoesqueleto de miembro inferior que proporcione asistencia y promueva la rehabilitación de pacientes con limitaciones motoras. Además, se busca reducir

los tiempos de entrenamiento necesarios para calibrar la BMI.

En este trabajo, hacemos una revisión de nuestros trabajos previos de BMI basadas en IM de la marcha. Resumimos la metodología y resultados obtenidos. Finalmente, buscamos las limitaciones de este tipo de BMI y las oportunidades de mejora.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 EQUIPO

Para el registro encefalográfico (EEG), se utilizó un gorro actiCAP (Brain Products GmbH, Alemania) con 32 electrodos. Los electrodos seguían la distribución 10-10 del sistema internacional. La señal EEG fue amplificada mediante el equipo actiCHamp (Brain Products GmbH, Alemania) y transmitida con la unidad MOVE (Brain Products GmbH, Alemania) de forma remota.

En [7] se empleó una cinta de andar y una unidad de medición inercial Tech-IMU V4 (Technaid, España) para monitorizar el movimiento de los sujetos.

En [8] se utilizó el visor VIVE HTC (HTC, Taiwan) (resolución de 2160 x 1200, 1080x1200 por ojo, con una frecuencia de actualización de 90 Hz), dos estaciones base que monitorizaban la posición exacta del visor (HTC, Taiwan) y el software Steam (Valve, Estados Unidos).

En [9], el exoesqueleto H3 (Technaid, España) se empleó para asistir el movimiento de marcha de los participantes.

La Figura 1 muestra los equipos utilizados en cada investigación.

### 2.2 PROTOCOLO

En todos los estudios [7]–[9], las sesiones de experimentación se dividieron en dos partes: entrenamiento y testeo. Durante el entrenamiento, los sujetos debían realizar una serie de tareas mentales, pero el dispositivo a controlar no estaba guiado por la BMI sino por comandos previamente definidos. El número de pruebas de entrenamiento fue distinto en cada estudio. En [7], [9], los participantes alternaron pruebas en las que debían estar estáticos mientras alternaban tareas mentales y otras en las que estaban en movimiento. La información de estas pruebas se utilizó para crear dos tipos de modelos, modelos estáticos y en movimiento que se utilizaron en el testeo. En el caso del entorno de realidad virtual [8], se realizaron pruebas físicamente estáticas, estando durante los periodos de relajación, el entorno virtual estático y durante los periodos de imaginación motora de la marcha, en movimiento.

En la segunda parte de la sesión, los dispositivos fueron controlados mediante la BMI. En [7], [9], cada prueba partía de un estado estático y sólo se utilizaban los modelos estáticos para generar comandos de control. En el momento en que la BMI enviaba un comando de movimiento, tanto para la cinta o el exoesqueleto, se utilizaban los modelos en movimiento. De esta forma el control se estableció como una máquina de estados. En [8], sólo se utilizó un tipo de modelo.

En [7], [9] se utilizaron dos paradigmas de control, uno basado en IM y otro basado en el nivel de atención. Por ello, durante las pruebas, los sujetos debían alternar periodos de relajación, con IM de la marcha y con periodos en los que debían realizar operaciones matemáticas. Para el paradigma de IM sólo se consideraron los eventos de relajación e IM y para el paradigma de atención se incluyeron los tres. Mientras que los periodos de relajación y operaciones matemáticas se consideraron como baja atención a la marcha, los periodos de IM se consideraron como alta atención. En [8] sólo se evaluó el paradigma de IM.

### 2.3 BMI

El primer paso de la BMI es la adquisición de la señal cerebral, en este caso mediante encefalografía. El análisis de esta señal se realizó en tiempo real, por lo tanto, una vez se adquirió una ventana temporal de datos, estos fueron procesados mientras se adquiría la siguiente ventana y así sucesivamente.

En primer lugar, las señales fueron filtradas mediante un filtro Notch a 50Hz para eliminar la contribución de la señal eléctrica y un filtro paso alto para eliminar la componente continua. A continuación, en [7], [9] se aplicó el algoritmo [10] para mitigar la presencia de artefactos oculares y variaciones de la señal. Los siguientes pasos de análisis fueron diferentes para cada paradigma de control.

#### 2.3.1 PARADIGMA DE IM

Para extraer características de la señal, se utilizó el algoritmo FBCSP (*Filter Bank Common Spatial Patterns*) [11]. Como primer paso, se aplicó un banco de filtros paso banda y en este caso se aplicaron 4 filtros: 5-10Hz, 10-15Hz, 15-20Hz, 20-25Hz. Después, se calculó una transformada espacial para cada señal filtrada con el objetivo de maximizar las diferencias entre clases de tareas mentales.

#### 2.3.2 PARADIGMA DE ATENCIÓN

Para el paradigma de atención, se aplicaron dos pasos de pre-procesado adicionales antes de extraer

características. La señal EEG de cada canal se estandarizó siguiendo el método presentado en [12]. A continuación, se aplicó un filtro Laplaciano para reducir el ruido espacial y aislar la actividad eléctrica de cada electrodo.

Se estimó la densidad espectral de potencia mediante MEM (Maximum Entropy Method) [13] y se utilizó

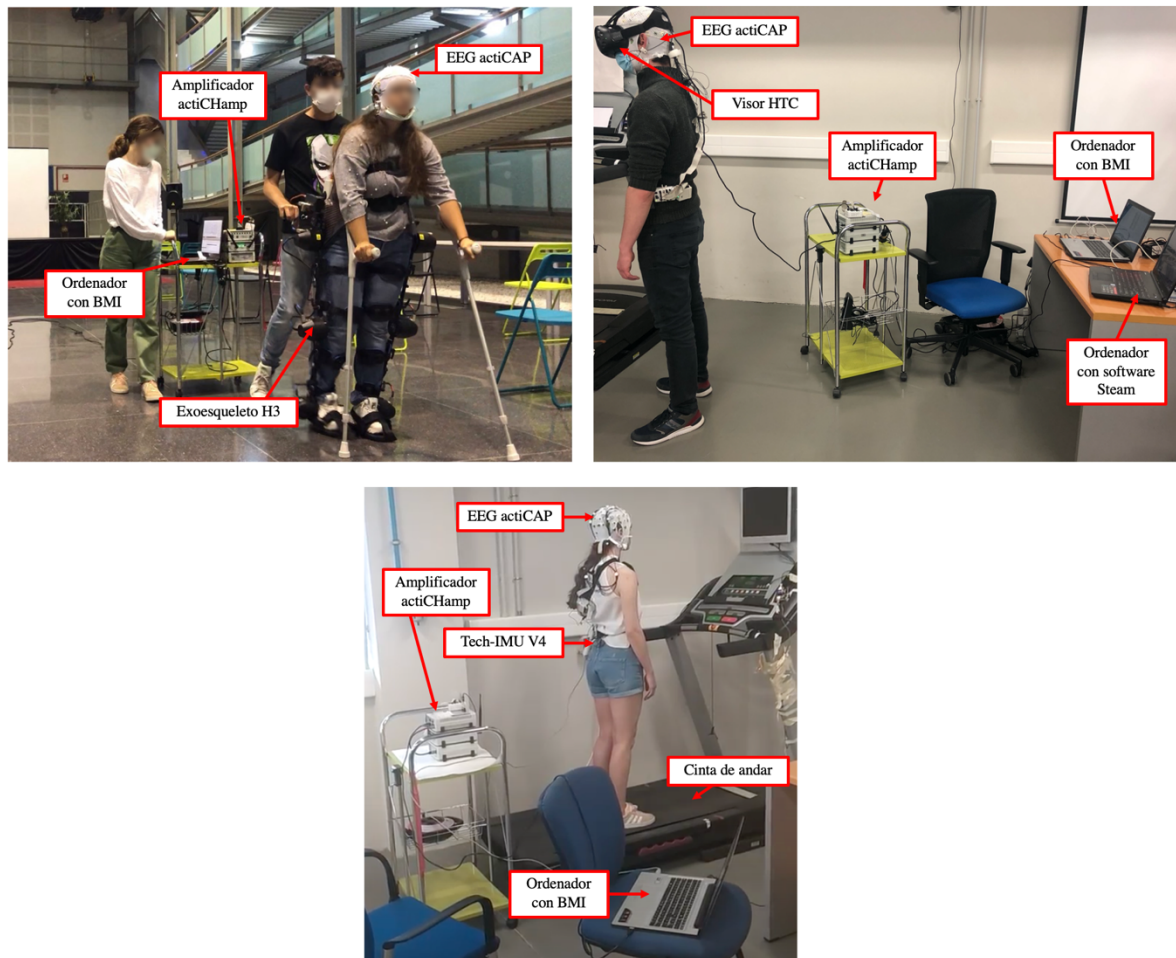


Figura 1: Equipos utilizados en cada investigación: [9] imagen superior izquierda, [8] imagen superior derecha y [7] imagen inferior.

la potencia de la banda gamma de cada electrodo como vector de características. Se escogió esta banda de frecuencia porque está asociada con la concentración [12].

### 2.3.3 COMANDOS

Una vez se extrajeron las características, cada ventana de datos se clasificó mediante el análisis discriminante lineal (LDA de *Linear Discriminant Analysis*). Las predicciones se promediaron respecto a las últimas 10 ventanas para obtener índices de 0 a 1. En [7], [9] se combinaron los índices del paradigma de IM y del de atención para generar comandos de control.

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 COMPARACIÓN

Los resultados de las pruebas de entrenamiento (bucle-abierto) se muestran en la Tabla 1. En [9], los sujetos participaron en distintas sesiones en días distintos. Las pruebas se evaluaron con el porcentaje de ventanas de datos correctamente clasificadas en cada paradigma.

Los resultados de las pruebas de testeo (bucle-cerrado) se muestran en la Tabla 2. Las métricas de evaluación fueron: el Ratio de Verdaderos Positivos (RVP), el número de Falsos Positivos por minuto (FP/min), el porcentaje de ventanas con comandos correctos (%Comandos) y el porcentaje de comandos correctos enviados (Ac).

En promedio, el paradigma de imaginación motora muestra resultados superiores al paradigma de atención. Estos resultados están en consonancia con las conclusiones obtenidas por [6].

También es interesante resaltar que los resultados del paradigma de IM han sido superiores tanto en el lazoabierto como en el lazo-cerrado en el control del entorno de realidad virtual, en comparación con la cinta y el exoesqueleto. Se ha hallado una correlación positiva entre el nivel de inmersión del usuario y su capacidad para controlar un dispositivo externo mediante una BMI [14].

Aunque en la primera sesión no se aprecian diferencias entre las pruebas en estático y las pruebas en movimiento, la precisión del paradigma de IM mejora en las pruebas en estático con las sesiones. Sin embargo, esta evolución favorable con la práctica no se aprecia en las pruebas en movimiento. En estas pruebas, los sujetos debían estar pendientes de no perder el equilibrio y acompañar con las muletas la marcha asistida por el exoesqueleto, a la vez que realizaban una serie de tareas mentales. Es por ello, que podían tener más dificultades para concentrarse.

La mayoría de las investigaciones de BMI basadas en IM se centran en el miembro superior [14], [15], [16] y no en el miembro inferior, debido a la dificultad de registrar la señal EEG durante la marcha [17]. Severens et al. [17] diseñaron una BMI que registraba la actividad cerebral mientras los usuarios realizaban IM de la marcha, estando de pie sobre una cinta de andar. Para el bucle-cerrado, los comandos de control se enviaron a un avatar visual. Los resultados obtenidos en nuestro trabajo previo con una cinta de andar fueron ligeramente superiores [7]. Por otro lado, también hay estudios que utilizaron estímulos externos, como estímulos visuales, para el control de exoesqueletos robóticos de miembro inferior [18]. Aunque los resultados con estos paradigmas de control son superiores a los que utilizan puramente IM de miembro inferior [6], [9], carecen de utilidad desde el punto de vista de la neurrorrehabilitación.

### 3.2 LIMITACIONES

Se necesita práctica para el uso de una BMI basada en imaginación motora. Los sujetos deben conseguir

modular su actividad cerebral para general distintos comandos de control. Además de la variabilidad que existe entre sujetos, hay quienes no son capaces de realizar esta modulación ni con la práctica. Este fenómeno se conoce como ineficiencia en BMI [19].

Durante el movimiento, existen artefactos producidos por la oscilación de los propios electrodos y por la actividad muscular (EMG). Gran parte de esta interferencia se elimina con los filtros de frecuencia, pero puede quedar alguna componente. Para lidiar con este problema, en [7], [9] se realizaron pruebas en las que el sujeto realizaba distintas tareas mentales, pero siempre en movimiento. De esta forma, si hay algún tipo de artefacto de movimiento, este es común para todas las clases. Sin embargo, sería interesante el uso y desarrollo de algoritmos para eliminar los artefactos de movimiento en tiempo real [20].

Por otro lado, una gran limitación es la complejidad para andar con el exoesqueleto. En [9], los sujetos realizaron una sesión previa en la que practicaron el uso del exoesqueleto antes de utilizar la BMI. Sin embargo, quizá sería interesante incrementar el número de sesiones previas antes de combinar el dispositivo con la BMI.

Como la señal EEG es no estacionaria, el sistema se calibra para cada usuario y sesión, por lo que el tiempo de calibración ocupa gran parte de la sesión. Esto puede producir que los sujetos sufran fatiga y afecte a su concentración y por lo tanto a la eficacia de la BMI [21]. Como posible mejora, se podrían reducir los tiempos de calibración con entrenamientos más efectivos; por ejemplo, mediante sesiones previas con entornos de realidad virtual. Por otro lado, si se diseñasen BMI más generalizadas, se podrían utilizar los datos de sesiones previas para el bucle-cerrado o incluso de otros usuarios [22].

Por último, la motivación de los sujetos parece afectar la eficacia del sistema. Cuando el bucle-cerrado empezaba sin funcionar correctamente, los usuarios se frustraban y en muchos casos no conseguían mejorarlo. Se ha demostrado una relación entre una motivación externa y la precisión de los resultados [23], pero la influencia del estado emocional aún no se ha podido probar.

Tabla 1: Resultados en bucle-abierto de las tres investigaciones. Se muestran, por separado, los resultados obtenidos en las pruebas en las que los sujetos estaban en estático y los resultados de las pruebas en movimiento.

			Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4	Sesión 5
[7]	<b>Estático</b>	<b>%IM</b>	73.30±9.40				
		<b>%Atención</b>	61.40±4.90				
	<b>Movimiento</b>	<b>%IM</b>	73.70±3.20				
		<b>%Atención</b>	66.70±9.00				
[9]	<b>Estático</b>	<b>%IM</b>	56.31±9.60	69.64±8.18	65.54±5.12	64.2±11.45	74.11±6.14
		<b>%Atención</b>	60.67±7.27	61.70±8.20	58.21±8.76	59.52±8.44	60.83±5.48
	<b>Movimiento</b>	<b>%IM</b>	54.60±9.78	65.03±7.27	62.50±8.91	59.82±10.11	54.11±12.71
		<b>%Atención</b>	63.44±7.06	66.33±4.09	61.55±7.21	65.71±6.82	70.83±3.04
[8]		<b>%IM</b>	83.45±38.48				

Tabla 2: Resultados en bucle-cerrado de las tres investigaciones.

		Sesión 1	Sesión 2	Sesión 3	Sesión 4	Sesión 5
[7]	<b>RVP</b>	100.00±0.00				
	<b>FP/min</b>	0.90±0.50				
	<b>%IM</b>	67.30±4.30				
	<b>%Atención</b>	53.00±3.10				
	<b>%Comandos</b>	75.60±10.30				
	<b>Ac</b>	67.90±15.40				
[9]	<b>RVP</b>	90.00±28.28	90.00±31.62	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00
	<b>FP/min</b>	1.62±0.80	1.85±0.89	3.69±1.26	1.85±1.03	2.31±2.31
	<b>%IM</b>	50.54±4.83	54.57±5.11	51.52±6.81	56.09±6.99	59.56±1.95
	<b>%Atención</b>	52.72±3.53	58.15±7.69	49.56±4.52	63.48±9.18	65.00±6.49
	<b>%Comandos</b>	61.80±6.91	59.90±11.01	69.80±7.95	64.20±8.58	67.80±14.39
	<b>Ac</b>	20.00±14.14	60.83±36.40	57.00±13.04	45.00±44.72	68.00±31.76
[8]	<b>RVP</b>	100.00±0.00				
	<b>FP/min</b>	3.50±2.62				
	<b>%Comandos</b>	90.94±6.69				
	<b>Ac</b>	74.48±8.79				

## 4 CONCLUSIÓN

Este trabajo muestra una revisión de estudios previos con BMI basadas en la IM de la marcha. Estos estudios utilizaron una BMI para controlar distintos dispositivos externos: una cinta de andar, un entorno de realidad virtual y un exoesqueleto. Existen diversas limitaciones para el uso de estos sistemas como la dificultad para la realización de IM, la pérdida de concentración y la fatiga producida por largos periodos de calibración. Trabajos futuros deberían intentar mantener la atención de los sujetos,

reducir los tiempos de entrenamiento y mejorar la calidad de la señal EEG durante el movimiento.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido realizada en el marco del proyecto “Walk - Control de exoesqueletos de miembro inferior mediante interfaces cerebro-máquina para asistir a personas con problemas de marcha” (RTI2018-096677-B-I00), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIU), la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo



Regional (FEDER), y en el marco del proyecto “Desarrollo de nuevas interfaces cerebro-máquina para la rehabilitación de miembro inferior” (GV/2019/009), financiado por la Consejería de Innovación Universidades, Ciencia y Sociedad Digital (Generalitat Valenciana) y el Fondo Social Europeo.

## English summary

### ANALYSIS OF BRAIN-MACHINE INTERFACES (BMI) BASED ON MOTOR IMAGERY OF THE GAIT

#### Abstract

*Brain-Machine Interfaces (BMI) are systems that use brain activity to control external devices. There are different control paradigms and motor imagery (MI) is one of the most employed. The combination of MI based BMI with assistive devices as exoskeletons offers new opportunities to assist patients with motor limitations. In addition, the performance of MI can promote plasticity mechanisms of the neural system. This research shows a review of our previous works with lower-limb MI based BMI. Different methodologies are presented, as well as limitations of this type of BMI and opportunities for improvement.*

**Keywords:** Brain-machine interface; BMI; EEG; exoskeleton.

#### Referencias

- [1] Y. He, D. Eguren, J. M. Azorín, R. G. Grossman, T. P. Luu, and J. L. Contreras-Vidal, “Brain-machine interfaces for controlling lower-limb powered robotic systems,” *J. Neural Eng.*, vol. 15, no. 2, 2018.
- [2] M. Jeannerod, “Mental imagery in the motor context,” *Neuropsychologia*, vol. 33, no. 11, pp. 1419–1432, 1995.
- [3] N. Padfield, J. Zabalza, H. Zhao, V. Masero, and J. Ren, “EEG-Based Brain-Computer Interfaces Using Motor-Imagery: Techniques and Challenges,” *Sensors (Basel)*, vol. 19, no. 6, p. 1423, Mar. 2019.
- [4] A. Gharabaghi, “What Turns Assistive into Restorative Brain-Machine Interfaces?,” *Front. Neurosci.*, vol. 10, p. 456, 2016.
- [5] K. K. Ang, Z. Y. Chin, C. Wang, C. Guan, and H. Zhang, “Filter bank common spatial pattern algorithm on BCI competition IV datasets 2a and 2b,” *Front. Neurosci.*, vol. 6, no. MAR, pp. 1–9, 2012.
- [6] M. Ortiz, L. Ferrero, E. Iáñez, J. M. Azorín, and J. L. Contreras-Vidal, “Sensory Integration in Human Movement: A New Brain-Machine Interface Based on Gamma Band and Attention Level for Controlling a Lower-Limb Exoskeleton,” *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 8, p. 735, 2020.
- [7] L. Ferrero, V. Quiles, M. Ortiz, E. Iáñez, and J. M. Azorín, “BCI Based on Lower-Limb Motor Imagery and a State Machine for Walking on a Treadmill,” *Int. IEEE EMBS Conf. Neural Eng.*, 2020.
- [8] L. Ferrero, M. Ortiz, V. Quiles, E. Iáñez, and J. M. Azorín, “Improving Motor Imagery of Gait on a Brain-Computer Interface by Means of Virtual Reality: A Case of Study,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 49121–49130, 2021.
- [9] L. Ferrero, V. Quiles, M. Ortiz, E. Iáñez, and J. M. Azorín, “A BMI Based on Motor Imagery and Attention for Commanding a Lower-Limb Robotic Exoskeleton: A Case Study,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, 2021.
- [10] A. Kilicarslan, R. G. Grossman, and J. L. Contreras-Vidal, “A robust adaptive denoising framework for real-time artifact removal in scalp EEG measurements,” *J. Neural Eng.*, vol. 13, no. 2, 2016.
- [11] K. K. Ang, Z. Y. Chin, H. Zhang, and C. Guan, “Filter Bank Common Spatial Pattern (FBCSP) in brain-computer interface,” *Proc. Int. Jt. Conf. Neural Networks*, pp. 2390–2397, 2008.
- [12] Á. Costa *et al.*, “Decoding the Attentional Demands of Gait through EEG Gamma Band Features,” *PLoS One*, vol. 11, no. 4, pp. e0154136–e0154136, Apr. 2016.
- [13] B. D. Rainford and G. J. Daniell, “μSR frequency spectra using the maximum entropy method,” *Hyperfine Interact.*, vol. 87, no. 1, pp. 1129–1134, 1994.
- [14] J. M. Juliano *et al.*, “Embodiment Is Related to Better Performance on a Brain-Computer Interface in Immersive Virtual Reality: A Pilot Study,” *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 4, p. 1204, Feb. 2020.
- [15] S. N. Resalat and V. Saba, “A Study of Various Feature Extraction Methods on a Motor Imagery Based Brain Computer Interface System,” *Basic Clin. Neurosci.*, vol. 7, no. 1, pp. 13–19, Jan. 2016.
- [16] F. Škola, S. Tinková, and F. Liarokapis, “Progressive Training for Motor Imagery Brain-Computer Interfaces Using Gamification and Virtual Reality Embodiment,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 13, p. 329, 2019.
- [17] M. Severens, M. Perusquia-Hernandez, B. Nienhuis, J. Farquhar, and J. Duysens,

- “Using Actual and Imagined Walking Related Desynchronization Features in a BCI,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 23, no. 5, pp. 877–886, 2015.
- [18] J. W. Choi, S. Huh, and S. Jo, “Improving performance in motor imagery BCI-based control applications via virtually embodied feedback,” *Comput. Biol. Med.*, vol. 127, p. 104079, 2020.
- [19] N. Leeuwis, A. Paas, and M. Alimardani, “Vividness of Visual Imagery and Personality Impact Motor-Imagery Brain Computer Interfaces,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 15, p. 634748, 2021.
- [20] A. Kilicarslan and J. L. C. Vidal, “Characterization and real-time removal of motion artifacts from {EEG} signals,” *J. Neural Eng.*, vol. 16, no. 5, p. 56027, Sep. 2019.
- [21] M. A. S. Boksem, T. F. Meijman, and M. M. Lorist, “Effects of mental fatigue on attention: An ERP study,” *Cogn. Brain Res.*, vol. 25, no. 1, pp. 107–116, 2005.
- [22] F. Lotte, “Signal processing approaches to minimize or suppress calibration time in oscillatory activity-based brain-computer interfaces,” *Proc. IEEE*, vol. 103, no. 6, pp. 871–890, 2015.
- [23] S. C. Kleih-Dahms, L. Botrel, and A. Kübler, “The influence of motivation and emotion on sensorimotor rhythm-based brain-computer interface performance,” *Psychophysiology*, p. e13832, May 2021.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN ÓPTIMA DE ELECTRODOS PARA LA DETECCIÓN DE ATENCIÓN EN TAREA DE IMAGINACIÓN MOTORA

Luis de la Ossa, Javier V. Juan, Mario Ortiz, Eduardo Iáñez, José M. Azorín;  
Brain-Machine Interface System Lab, Av. Universidad SN, ed. Innova, Elche, España;  
luis.ossa@goumh.umh.es, javier.juan02@goumh.umh.es, mortiz@umh.es, eianez@umh.es,  
jm.azorin@umh.es

## Resumen

*El uso de interfaces cerebro máquina (BCIs) supone un importante avance en el control de dispositivos para la rehabilitación de pacientes. Además, la detección de la atención durante la marcha puede ser fundamental a la hora de garantizar la seguridad en el control de estos dispositivos mediante electroencefalogramas (EEG) y evitar activaciones involuntarias. En esta investigación, realizamos un análisis de diferentes configuraciones de los electrodos que componen una BCI, tratando de discernir qué configuraciones detectan la atención de manera más precisa.*

**Palabras clave:** Atención, Imaginación Motora, EEG, Electrodos, Rehabilitación.

## 1 MOTIVACIÓN

Una correcta rehabilitación puede ser clave en la recuperación de los pacientes. En casos en los que el paciente haya experimentado una dolencia que implique una disfunción motora, sea parcial o total, del tren inferior, como pueden ser pacientes que hayan sufrido un accidente cerebrovascular o una lesión espinal, las interfaces cerebro máquina suponen un importante aliado.

De manera resumida, una BCI se encarga de leer los pulsos eléctricos que generan las neuronas del usuario (señales EEG) y los envía a una computadora para poder interpretarlos. Dicho de otro modo, BCI puede actuar como mensajero entre el cerebro y los músculos cuando esta comunicación biológica esté dañada, por ejemplo por alguna de las dolencias citadas previamente. El empleo de estas técnicas es capaz de mejorar notablemente el estado de los pacientes, ya que les ayudan a regenerar los patrones neuronales perdidos [2], [10], [14].

Por su parte, el éxito en las rehabilitaciones basadas en BCIs depende de la interpretación que se haga de los registros EEG efectuados. Este

artículo se centra en los procesos cuyo objetivo es conseguir diferenciar la imaginación motora del usuario (su intención de caminar) frente al relax (mantener la mente despejada). Existe mucha literatura al respecto [11]; pero, en general, los métodos se basan en "entrenar" un clasificador, es decir, realizar un número de sesiones en las que se marque cuándo se realiza cada tarea mental, y este algoritmo clasificador extraiga características de las señales EEG registradas para que aprenda a diferenciar cuándo se ejecuta cada una de estas tareas. De esta manera, tras el entrenamiento, se puede probar el algoritmo, ahora sin enviarle información de qué tarea se está realizando, y por tanto el clasificador debe averiguarlo únicamente analizando las señales EEG.

No obstante, la correcta distinción entre estos estados mentales no siempre garantiza un uso seguro del BCI. En aquellos casos en los que se emplee algún dispositivo que asista al paciente en su movimiento, como podría ser un exoesqueleto, y en los que este dispositivo esté controlado por el BCI [4], una mala interpretación de los registros EEG podría desencadenar activaciones involuntarias del exoesqueleto, y esto puede ser peligroso, especialmente en pacientes con discapacidades motoras.

Precisamente por este riesgo, en este estudio se ha tenido en cuenta también el concepto de atención [7], [11], es decir, una tercera tarea a analizar en los registros, junto con imaginación motora y relax. Así, en caso de detectarse imaginación motora, pero no atención, el exoesqueleto no se activará.

A su vez, las BCIs basan su funcionamiento en un conjunto de electrodos que se encarga de registrar las señales EEG. De forma general, los equipos para EEG suelen contar o bien con 64 electrodos, o bien con 32. No obstante, la elección de qué electrodos se van a emplear para el análisis de los registros es un aspecto clave para el éxito del algoritmo de clasificación de tareas mentales, debido principalmente a que una mala elección de los elec-

trodos de trabajo puede incluir señales EEG en el clasificador que presenten poca o nula información específica sobre las tareas que se desea clasificar, de modo que pueden "confundir" al clasificador e inducirlo a error. No obstante, las regiones del cerebro estimuladas (y que por tanto generan señales EEG que contienen información relevante para el clasificador) varían mucho en función de la naturaleza de las tareas mentales realizadas por el usuario [3], [12], [13].

Sin embargo, se ha demostrado que, en lo referente a la atención, una correcta selección de los electrodos de trabajo es capaz de lograr una mejora de los resultados en la clasificación de las tareas [5]. Es por ello que este estudio se ha focalizado en la búsqueda de las configuraciones óptimas de electrodos a la hora de detectar la atención en usuarios de EEG. Una mejora en estos algoritmos permitiría el desarrollo de técnicas de rehabilitación basadas en dispositivos controlados por BCIs más seguras y eficientes.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Equipamiento

Respecto a la BCI, se utilizó un sistema inalámbrico de *BrainProducts*, compuesto por un amplificador *actiCHAMP32*, un módulo inalámbrico *MOVE32*, treinta y dos electrodos, y dos gorros para electrodos de diferente tamaño. El software para la toma y procesamiento de datos está programado por nuestro equipo de investigación utilizando la plataforma *MatLab*.

El gorro de electrodos sigue la distribución del sistema internacional 10-10. Cuatro de los treinta y dos electrodos se colocaron alrededor de los ojos para la reducción de artefactos oculares. Las zonas elegidas para la colocación de electrodos son las indicadas en la figura 1.

### 2.2 Protocolo experimental

En total se registraron las señales cerebrales de 4 sujetos diferentes (W01, W02, W03, W04), a los que se instruía para que realizaran unas tareas determinadas mientras utilizaban una cinta de andar. Por supuesto, todos los sujetos participaron voluntariamente, dando consentimiento informado.

Para cada uno de los registros, se debía repetir dos veces la secuencia de tareas mostrada en la figura 2. Dicha secuencia consistía en una primera tarea de relax, en la que la cinta se encuentra parada, y el sujeto simplemente debía mantener la mente relajada; a continuación, la cinta se ponía en marcha, y comenzaba la tarea de imaginación motora,

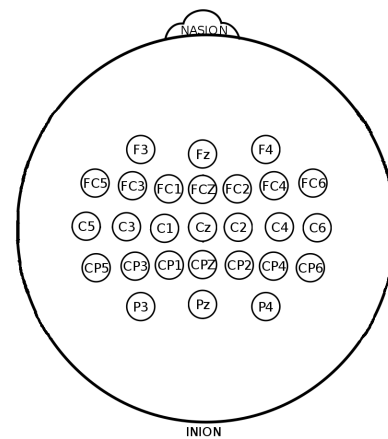


Figura 1: Configuración de los electrodos para los registros

en la que el sujeto debía imaginarse a sí mismo caminando (mientras caminaba); finalmente, el sujeto entraba en la tarea de cuenta regresiva, en la que se le indicaba al sujeto un número de tres dígitos, y otro número del 6 al 9 (que variaba en cada registro) que debía restarle de forma sucesiva mientras que seguía caminando. De esta forma, en el registro de EEG disponíamos de tres estados respecto a la atención en los que se podía encontrar la mente: *atención baja*, durante el relax; *atención alta en la acción de caminar*, durante la imaginación motora; y *atención alta, pero en una tarea diferente de caminar*, durante la cuenta regresiva. Todo este procedimiento fue aprobado por la Oficina de Investigación Responsable de la Universidad Miguel Hernández de Elche, de acuerdo con la declaración de Helsinki para la experimentación con sujetos humanos.

### 2.3 Procesamiento de señales

El algoritmo para la detección de la atención utilizado en esta investigación es el mismo que el publicado en [7], con la diferencia de que en este estudio utilizamos diferentes configuraciones de electrodos. Dicho algoritmo se puede dividir en distintas etapas:

En la primera etapa, el preprocesamiento, se aplica el algoritmo  $H^\infty$  [6] para reducir los artefactos oculares. Además, los datos originales, tomados con una frecuencia de muestreo de 500Hz se remuestreaban a 200Hz para reducir la carga computacional. Dicha frecuencia se escogió para mantener las frecuencias de interés de la banda  $\gamma$  (30-90Hz). Finalmente, se aplicaba una normalización a las señales para que los diferentes electrodos tuvieran el mismo peso a la hora de realizar el procesamiento. Dicha normalización es la misma que la aplicada en [1], basada en el parámetro MVT.

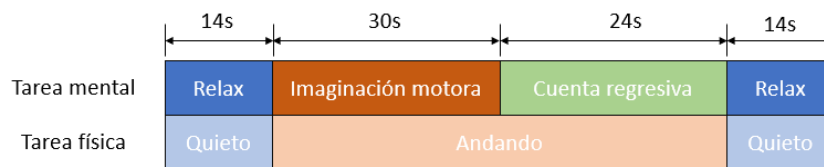


Figura 2: Esquema de las tareas a realizar durante los registros

La siguiente etapa, de procesamiento, comenzaba aplicando un filtro notch de 50Hz para filtrar el posible ruido introducido al sistema a través de la red eléctrica. A continuación, se aplicaba un filtro paso banda entre 5-90Hz, seguido de un filtro de *Common Average Reference* [8]. Finalmente, como vector de características se utilizaba la densidad espectral de potencia mediante el *método de máxima entropía* [9], para las bandas entre 30-45Hz y 55-90Hz.

La etapa final corresponde a la clasificación. Para realizar la misma, se empleó un *Análisis Discriminante Lineal* (LDA, por sus siglas en inglés). Para ello, se consideraban tres clases, cada una correspondiente a una de las tareas: relax, cuenta, e imaginación motora. Este clasificador se aplicaba a cada una de las épocas del registro, y se les asignaba un 0 si eran clasificadas como de la clase "relax" o "cuenta", y un 1 si pertenecían a la clase "imaginación motora". Finalmente, para determinar el nivel de atención de cada época, se realizaba una media aritmética de dicha época y las 9 anteriores. Así, se obtenía un índice entre 0 y 1 que representaba la atención predicha por el algoritmo.

## 2.4 Evaluación de configuraciones

Para evaluar las configuraciones de electrodos, se empleó una división por grupos similar a la encontrada en [7], dividiéndolos según el lóbulo al que pertenecían. Así, el total de electrodos se dividió en 5 grupos: Frontal (F), Fronto-Central (FC), Central (C), Centro-Parietal (CP) y Parietal (P). Además, también se analizaron todas las combinaciones posibles entre dichos grupos, por lo que la cantidad total de configuraciones analizadas asciende a 30.

Para evaluar cada configuración, se realizaba una validación cruzada, en la que se entrenaba al clasificador con todos los registros de cada sujeto menos uno. A continuación, se aplicaba dicho modelo para predecir el nivel de atención en el registro que no se había utilizado para entrenamiento, obteniendo así una gráfica como la mostrada en la figura 3. Esto se repetía hasta tener las predicciones de la atención de cada uno de los registros de cada sujeto.

Finalmente, para evaluar cada una de las configuraciones estudiadas, se comparaban las predicciones conseguidas con cada grupo de electrodos con las obtenidas utilizando la información de todos los electrodos, obteniendo así una gráfica como la mostrada en la figura 4. Para realizar una comparación objetiva de ambas predicciones, se calculaban las áreas bajo las curvas que formaban durante cada tarea, tanto la predicción con los electrodos específicos como la predicción con todos los electrodos, y se calculaba un índice de acuerdo a la siguiente expresión:

$$I = \left( \frac{a_{IM}}{A_{IM}} - 1 \right) + \left( \frac{A_C}{a_C} - 1 \right) + \left( \frac{A_R}{a_R} - 1 \right) \quad (1)$$

- $a_j$ : Área bajo curva de predicciones realizadas con una configuración de electrodos específica, pertenecientes a la tarea  $j$  (Imaginación Motora, Cuenta, Relax)
- $A_j$ : Área bajo la curva de predicciones realizadas con todos los electrodos, pertenecientes a la tarea  $j$  (Imaginación Motora, Cuenta, Relax)

Así, cada uno de los términos que conforman dicha fórmula evalúa lo mucho que han mejorado o empeorado las predicciones con el grupo de electrodos específicos en comparación con el caso en el que se utilizan todos los electrodos, para cada una de las tareas.

En el caso de la imaginación motora, se busca que el área perteneciente a esta tarea aumente con la elección de electrodos específica respecto al caso en el que se utilizan todos los electrodos. Por tanto, lo deseable es que la relación entre ambas áreas sea mayor que la unidad, y cuanto más alta mejor. Cuando esto se cumpliera, el primer término tendría un valor positivo.

En el caso tanto de la cuenta regresiva como de relax, se busca que el área con el grupo de electrodos específico sea menor que en el caso en el que se usan todos ellos. Por tanto, lo deseable es que las áreas producidas por las curvas de predicciones con todos los electrodos sean mayores que las producidas por los grupos de electrodos específicos.

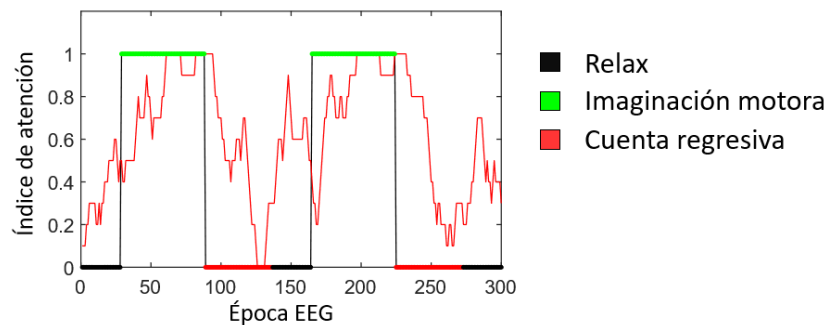


Figura 3: Ejemplo de las predicciones de atención durante uno de los registros.

Cuando esto se cumpliera, el segundo y tercer término también debería tener un valor positivo.

En resumen, cuanto mayor fuera este índice,  $I$ , mejor sería la combinación de electrodos analizada para realizar las predicciones de atención.

### 3 RESULTADOS

En la tabla 1 se muestran los índices calculados para cada uno de los sujetos y agrupaciones de electrodos, expresados en porcentaje (multiplicando el índice calculado por 100). Además, en la última columna se muestra la media aritmética de los índices de los cuatro sujetos para cada agrupación. Los cinco mejores índices de cada una de las columnas se encuentran subrayados y en negrita.

Como se puede observar, los resultados empeoraron para la gran mayoría de los casos. Además, la variabilidad entre sujetos es muy elevada. No obstante, sí que es posible detectar algunos casos en los que se mejoró con claridad la detección de la atención, como por ejemplo al emplear únicamente la región frontal (F) del cerebro, en vez de todos los electrodos disponibles, para el caso del sujeto W01. Pese a ello, debido a la ya mencionada variabilidad de los resultados en función del sujeto, no es posible encontrar una configuración que mejore claramente dicha predicción de atención; sin ir más lejos, las predicciones utilizando únicamente la región frontal (F) empeora los resultados en gran medida para todos los otros sujetos. De hecho, dicha selección de electrodos es una de las peores configuraciones para el sujeto W02. Este mismo efecto se puede observar a lo largo de toda la tabla 1, y ninguna de las configuraciones analizadas ha logrado mejorar los resultados de manera global (tomando la media de los resultados con los cuatro sujetos empleados en el estudio) respecto a los logrados con todos los electrodos.

### 4 CONCLUSIONES

Lo que se pretendía con este estudio era analizar la existencia de una selección de electrodos que mejorara la detección de la atención motora en un grupo de sujetos. Sin embargo, como se puede observar en los resultados, no se encontró ninguna configuración que aumentara la predicción de la atención respecto al caso en que se utilizaban todos los electrodos. Sí que se encontraron ciertas configuraciones que funcionaban mejor con unos sujetos que con otros, lo que sugiere la posibilidad de que los mecanismos de atención varíen entre unos individuos y otros. Al fin y al cabo, parece claro que la atención es un fenómeno cognitivo complejo, y su naturaleza parece depender de cada sujeto. Esto sugiere que, quizá, sería positivo realizar un pequeño estudio previo para cada sujeto, y así poder comprobar qué configuraciones funcionan mejor para cada uno, ya que varían entre sujetos, siempre que se vaya a desarrollar alguna aplicación en la que prime la detección de la atención, como las citadas en el primer apartado de este artículo, relacionadas con la rehabilitación.

Otra de las posibilidades podría ser que las características seleccionadas para la clasificación de las señales cerebrales no sean las adecuadas para la detección de este estado mental. Como trabajo futuro, se plantea la realización de nuevas pruebas utilizando características diferentes a la hora de realizar la clasificación. Además, teniendo en cuenta la ya nombrada variabilidad entre sujetos, también planteamos la posibilidad de entrenar una red neuronal convolucional que sea capaz de desarrollar características propias para cada sujeto, lo que mejoraría enormemente la clasificación de este proceso cognitivo.



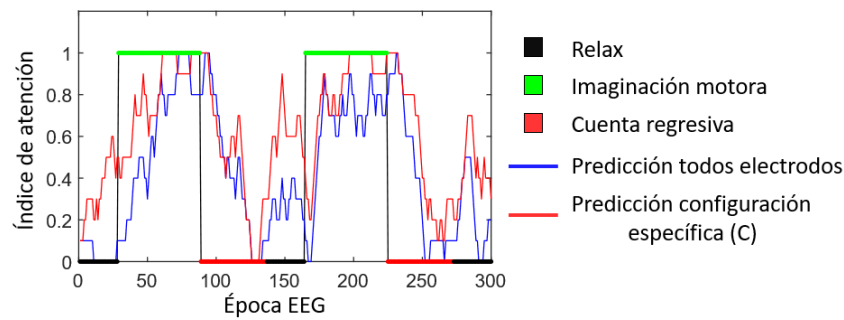


Figura 4: Ejemplo de la evaluación de una de las configuraciones, en la que se utilizaron únicamente electrodos de un grupo (C).

Tabla 1: Resultados finales. Las cuatro primeras columnas muestran los índices calculados, expresados en porcentaje (multiplicados por 100). En la última columna, se muestra la media de los resultados de todos los sujetos. Los mejores índices, tanto por sujeto como de la media total, se encuentran resaltados en negrita y subrayado.

Configuración	W01 [%]	W02 [%]	W03 [%]	W04 [%]	Media [%]
<i>F</i>	<b><u>35</u></b>	-115	-35	-42	-39
<i>FC</i>	-6	-78	-25	-50	-40
<i>C</i>	<b><u>8</u></b>	<b><u>-3</u></b>	-25	-42	<b><u>-15</u></b>
<i>CP</i>	<b><u>-2</u></b>	-35	-23	-42	-26
<i>P</i>	-14	-149	-41	-32	-59
<i>F + FC</i>	<b><u>5</u></b>	-84	-24	<b><u>-26</u></b>	-32
<i>F + C</i>	-24	<b><u>5</u></b>	-25	-42	-21
<i>F + CP</i>	-6	-23	-14	-38	-20
<i>F + P</i>	-32	-101	-25	<b><u>5</u></b>	-38
<i>FC + C</i>	-25	-27	-21	-38	-28
<i>FC + CP</i>	-16	-41	-8	-33	-25
<i>FC + P</i>	-18	-68	-13	<b><u>-17</u></b>	-29
<i>C + CP</i>	-17	-3	-11	-45	-19
<i>C + P</i>	<b><u>-1</u></b>	-16	-12	-36	<b><u>-16</u></b>
<i>CP + P</i>	-35	-19	-22	-55	-33
<i>F + FC + C</i>	-32	-39	-16	-35	-31
<i>F + FC + CP</i>	-13	-45	<b><u>-4</u></b>	-45	-27
<i>F + FC + P</i>	-4	-73	-11	<b><u>-12</u></b>	-25
<i>F + C + CP</i>	-16	<b><u>5</u></b>	-9	-48	<b><u>-17</u></b>
<i>F + C + P</i>	-26	-10	-14	-57	-27
<i>F + CP + P</i>	-37	-18	-12	-42	-27
<i>FC + C + CP</i>	-24	-27	<b><u>-4</u></b>	-73	-32
<i>FC + C + P</i>	-45	-27	-16	-48	-34
<i>FC + CP + P</i>	-17	-47	-5	-37	-27
<i>C + CP + P</i>	-17	<b><u>-1</u></b>	<b><u>-4</u></b>	-49	<b><u>-18</u></b>
<i>F + FC + C + CP</i>	-11	-24	<b><u>2</u></b>	-54	-22
<i>F + FC + C + P</i>	-31	-12	-6	-63	-28
<i>F + FC + CP + P</i>	-28	-37	-8	<b><u>-26</u></b>	-25
<i>F + C + CP + P</i>	-17	<b><u>1</u></b>	-10	-45	<b><u>-18</u></b>
<i>FC + C + CP + P</i>	-31	-13	<b><u>2</u></b>	-55	-24

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido realizada en el marco del proyecto DECODED, que ha recibido financiación del Programa de Investigación e Innovación Horizon 2020 de la Unión Europea, mediante una Open Call realizada y ejecutada bajo el proyecto EUROBENCH (grant agreement No 779963).

## English summary

### Study of the optimal electrode configuration for attention detection during a motor imagery task

## Abstract

*The use of Brain-Machine Interfaces (BMIs) represents a relevant advance in the control of devices destinated to patients rehabilitation. Besides, attention detection during gait becomes vital when guaranteeing a safe control of this devices through electroencephalographic signals (EEG), in order to avoid involuntary activations. In this research, we analyze different BMI electrode configurations trying to assure which ones detect attention with the higher accuracy.*

**Keywords:** Attention, Motor Imagery, EEG, Electrodes, Rehabilitation.

## Referencias

- [1] Costa Á, Iáñez E, Úbeda A, Hortal E, Del-Ama AJ, et al. (2016) Decoding the Attentional Demands of Gait through EEG Gamma Band Features. PLOS ONE 11(4): e0154136. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154136>
- [2] Dimyan MA, Cohen LG. Neuroplasticity in the context of motor rehabilitation after stroke. Nature Reviews Neurology. 2011; 7(2):76–85. doi: 10.1038/nrneurol.2010.200 PMID: 21243015
- [3] G. Lantz, R. Grave de Peralta, L. Spinelli, M. Seeck, C.M. Michel. Epileptic source localization with high density EEG: how many electrodes are needed? Clinical Neurophysiology, Volume 114, Issue 1, 2003, Pages 63-69, ISSN 1388-2457.
- [4] J. del. R. Millan et al., “Combining brain-computer interfaces and assistive technologies: state-of-the-art and challenges,” Frontiers in Neuroscience, vol. 4:161, 2010.
- [5] K. Yaomane, S. Pan-ngum and P. I. N. Ayuthaya, “Brain signal detection methodology for attention training using minimal EEG channels,” 2012 Tenth International Conference on ICT and Knowledge Engineering, 2012, pp. 84-89, doi: 10.1109/IC-TKE.2012.6408576.
- [6] Kilicarslan, A., Grossman, R. G., and Contreras-Vidal, J. L. (2016). A robust adaptive denoising framework for real-time artifact removal in scalp EEG measurements. J. Neural Eng. 13:026013. doi: 10.1088/1741-2560/13/2/026013
- [7] Mario Ortiz, Laura Ferrero, Eduardo Iáñez, José M. Azorín, and José L. Contreras-Vidal. Sensory integration in human movement: A new brain-machine interface based on gamma band and attention level for controlling a lower-limb exoskeleton. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 8:735, 2020.
- [8] McFarland, D. J., McCane, L. M., David, S. V., and Wolpaw, J. R. (1997). Spatial filter selection for EEG-based communication. Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 103, 386–394. doi: 10.1016/S0013-4694(97)00022-2
- [9] Rainford, B. D., and Daniell, G. J. (1994).  $\mu$ SR frequency spectra using the maximum entropy method. Hyperfine Interact. 87, 1129–1134. doi: 10.1007/BF02068515
- [10] Stephenson R. A review of neuroplasticity: some implications for physiotherapy in the treatment of lesions of the brain. Physiotherapy. 1993; 79(10):699–704. doi: 10.1016/S0031-9406(10)60008-9
- [11] Susan Aliakbaryhosseinabadi, Ernest Nlandu Kamavuako, Ning Jiang, Dario Farina, Natalie Mrachacz-Kersting, Classification of EEG signals to identify variations in attention during motor task execution, Journal of Neuroscience Methods, Volume 284, 2017, Pages 27-34, ISSN 0165-0270.
- [12] Van Hoey, G., Vanrumste, B., D’Havé, M. et al. Influence of measurement noise and electrode mislocalisation on EEG dipole-source localisation. Med. Biol. Eng. Comput. 38, 287–296 (2000).

- [13] William Speier, Aniket Deshpande, Nader Pouratian. A method for optimizing EEG electrode number and configuration for signal acquisition in P300 speller systems. *Clinical Neurophysiology*, Volume 126, Issue 6, 2015, Pages 1171-1177, ISSN 1388-2457.
- [14] Zimmerli L, Duschau-Wicke A, Riener R, Mayr A, Lünenburger L. Virtual reality and gait rehabilitation Augmented feedback for the Lokomat. In: *Virtual Rehabilitation International Conference*, 2009. IEEE; 2009. p. 150–153.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Estado del arte en robots de asistencia en hospitales, en entornos infecciosos (COVID-19)

Amparo Tirado-Bou, Raúl Marín-Prades, Pedro J. Sanz, José V. Martí  
Universitat Jaume I de Castellón  
al028901, rmarin, sanzpj, vmarti@uji.es

## Resumen

*En el presente artículo mostramos el estado del arte de los sistemas robóticos que están siendo desarrollados (algunos de los cuales ya en uso), para trabajar en entornos infecciosos, por ejemplo áreas de riesgo asociadas a COVID-19. Los sistemas permiten que el personal sanitario trabaje con mayor seguridad, e incrementan la seguridad también de los propios pacientes, permitiendo el seguimiento de los mismos, así como la desinfección de áreas expuestas al virus, entre otras potenciales aplicaciones. El trabajo futuro, mostrará el resultado de entrevistas con personal sanitario, los cuales han presentado requisitos para un potencial futuro sistema robótico asistencial en este ámbito.*

**Palabras clave:** COVID-19, Robótica Sanitaria, Desinfección, Sensores

## 1 INTRODUCCIÓN

Durante la pandemia del COVID-19, se ha evidenciado la necesidad de minimizar el contacto físico, sin perder la atención y el cuidado que los pacientes merecen. Por todo ello se ha presentado la necesidad de desarrollar dispositivos robóticos que permitan contribuir a estas tareas.

El personal sanitario han sido sobre-expuesto al virus, lo que ha puesto en peligro el sistema sanitario mundial.

El trabajo remoto se ha convertido en un aliado en la lucha contra el virus, pero en los entornos donde este no es posible, el número de contagios ha crecido de forma exponencial. En estos casos, los sistemas de protección personal (PPE) se han vuelto imprescindibles.

Hemos de recordar que el protocolo que han de seguir el personal sanitario previo a ingresar en contacto con pacientes con positivo para "COVID19", supone el consumo de equipos de protección personal desechables, como podemos ver en el diagrama mostrado en la figura 1, estos suponen un coste económico importante y también

un coste temporal que en muchos casos puede ser evitable <sup>1</sup>.



Figura 1: Información de la OMS sobre puesta y retirada del EPP

Procedimientos como los siguientes, pueden llegar a ser desarrollados con la ayuda de un robot diseñado a tal fin:

- Soporte para la comunicación con familiares
- Entrega de alimentos
- Consulta estado general, monitorización de constantes
- Desinfección de superficies

Hemos de tener en cuenta que cualquier robot cuya función esté relacionada con el cuidado de la salud ha de cumplir los siguientes requerimientos

<sup>1</sup> [https://www.who.int/csr/resources/publications/PPE\\_EN\\_A1s1.pdf](https://www.who.int/csr/resources/publications/PPE_EN_A1s1.pdf)

[10], en base a ellos se pueden decidir las mejores políticas y estratégicas para mejorar la calidad de la atención médica :

- **Cinemática y dinámica:** Si se necesita que el robot tenga capacidad de manipular su entorno ha de tener múltiples grados de libertad (DOF), ser precisos y flexibles.
- **Control y destreza:** Ha de tener destreza suficiente para poder realizar todas las tareas asignadas de forma controlada, sin poner en peligro a los usuarios.
- **Esterilización:** Es necesario que el equipo disponga de mecanismos para poder esterilizar el entorno y así mismo.
- **Seguridad:** Debe disponer de mecanismos de seguridad.
- **Requerimientos energéticos:** El equipo debe poder controlar la carga disponible, volver a su base cuando requiera recarga y poder avisar de ello a su supervisor para que sea consciente del estado de la tarea encomendada.
- **Coste:** Es necesario pensar en un coste asumible por instituciones y naciones en desarrollo.

## 2 Robots asistenciales en desarrollo

Los robots asistenciales deberían cumplir con las siguientes funciones principales: Comunicación, movilidad, mediciones de datos clínicos, manipulación de su entorno y uso de herramientas.

Veamos algunos de ellos más detenidamente, en la siguiente tabla 1 se presenta un resumen de diferentes sistemas desarrollados, que cumplen en parte con las características anteriormente mencionadas.

### 2.1 UVD Robot

UVD Robot es un robot de desinfección (UVD Robots, Denmark), ver Figura 2, que tiene capacidad de localización y mapeo del entorno, la cual le permite desplazarse por si mismo de forma autónoma. UVD -Robots <sup>2</sup>, detecta la presencia de personas por medio de sensores para detenerse si está realizando la desinfección. Utiliza una tablet a modo de interfaz (incluida con el propio robot) o a través de una aplicación en el teléfono móvil. El robot debe ser configurado previamente

<sup>2</sup> <https://www.uvd-robots.com/>

Tabla 1: Sistemas robóticos asistenciales

Dispositivo	Sensores	Multimedia	DOF
Spot [4]	Temp., RR HR, SpO <sub>2</sub>	LiDAR	-
Aimbot [1]	HD Infrared, Cámara térmica, LiDAR	-	-
Yumi [14]	Doppler Ultrasound Stethoscope	WebRTC	14 Ejes
ARI [5]	-	NVIDIA Jetson TX2, ReSpeaker MicArray V2.0	-
TRINA [11]	Temperatura SpO <sub>2</sub>	Cámara panorámica 180°	26 Ejes
XDBOT [9]	-	LIDAR Intel RealSenseF200 3D	6 Ejes
UVD [2]	Escáner Láser	Cámaras 3D	-
Sanbot Elf robot [3]	Temperatura Movimiento	Cámaras 3D Full-HD touch	2 Ejes
Dispositivo	Desinfección	Batería	Coste
Spot [4]	-	-	74,500
Aimbot [1]	-	-	-
Yumi [14]	✓	-	-
ARI [5]	-	8-12h	-
TRINA [11]	-	24h	75,000\$
XDBOT [9]	✓	4h	-
UVD [2]	✓	-	80,000\$
Sanbot Elf robot [3]	-	4-10h	3,000€

para memorizar todas las tareas que puede realizar y de esa forma ser autónomo.



Figura 2: UVD ROBOTS <https://www.uvd-robots.com/modelb>

## 2.2 Xdbot

Extreme Disinfection Robot, Nanyang Technological University, es un robot semi autónomo, con capacidad para explorar su entorno e identificar los objetos para ser desinfectados, posee además un brazo robótico controlado remotamente por un operador a través de un ordenador o tablet [9], ver figura 3

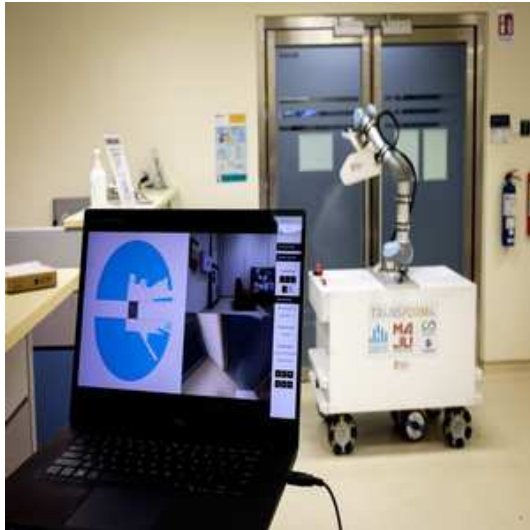


Figura 3: Interfaz XDBOT, COVID19; Chen I-Ming; Disinfection robot; RRC; Source:NTU Singapore

## 2.3 TRINA

El desarrollo del prototipo (TRINA) - Tele-Robotic Intelligent Nursing Assistant de la Universidad de Illinois [11], ha surgido como respuesta a la necesidad de minimizar la exposición a posibles contagios. Para ello se ha diseñado un robot manipulador móvil, con una consola integrada para la que se ha diseñado un software específico, manipulada por un operador experto, puede realizar diferentes rutinas, como preparar y servir comida, transportar y entregar medicinas, también dispone de diversos sensores que permiten por ejemplo medir la temperatura y humedad de la habitación así como la saturación de oxígeno en la sangre  $SpO_2$  del paciente.

El robot está compuesto por un torso humanoide "Rethink Robotics Baxter" [6], sobre una base omni direccional "HStar AMP-I" [13], y un sistema multimedia bidireccional. El dispositivo requiere estar conectado permanentemente a un cable de alimentación que le permite desplazarse por la habitación. Podemos ver los componentes en la figura 4

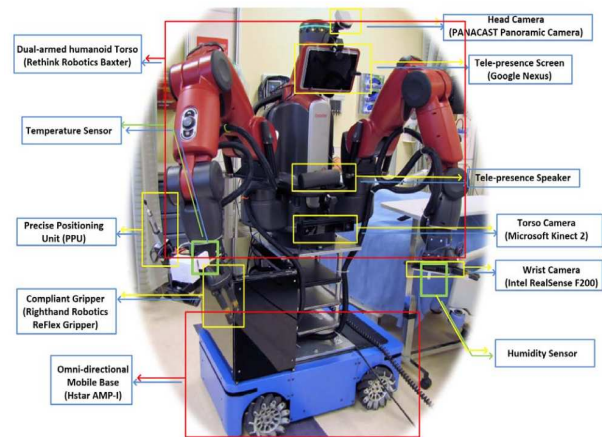


Figura 4: TRINA — the Tele-robotic Intelligent Nursing Assistant.

## 2.4 Robot colaborativo teleoperado con doble brazo YuMi (ABB, Switzerland)

El sistema telerobótico YuMi de ABB combina diferentes capacidades para trabajar en entornos peligrosos, así como la atención al paciente [14]. compuesto por dos subsistemas, un sistema teleoperado formado por un YuMi, IRB14000 [7], doble brazo que incluye manos flexibles, sistemas de alimentación de piezas, localización de piezas mediante cámaras y control robótico de última generación, a este subsistema se le une un sistema de telepresencia, compuesto por una tablet, con un sistema de comunicación basado en WebRTC [12].

El chasis se desplaza sobre "Mecanum wheels", lo que mejora la movilidad dentro de entornos aislados y reducidos, ya que podemos obtener desplazamientos en cualquier dirección mediante un control individual de la rotación de cada rueda y la combinación lineal de las fuerzas que esta genera [8].

## 2.5 Entorno social

Dentro de la robótica asistencial también existen iniciativas de diseñar robots con forma mecánica mas similar a un humano, como por ejemplo el Sanbot Elf robot (Qihan Technology, China) [3]. Como podemos ver en la figura 6, se trata de un robot comercial, con una API y un código SDK, para poder integrar el Sanbot Elf en cualquier escenario. Se ha puesto especial cuidado en su apariencia humanoide, el reconocimiento por voz y al detección y reconocimiento facial.



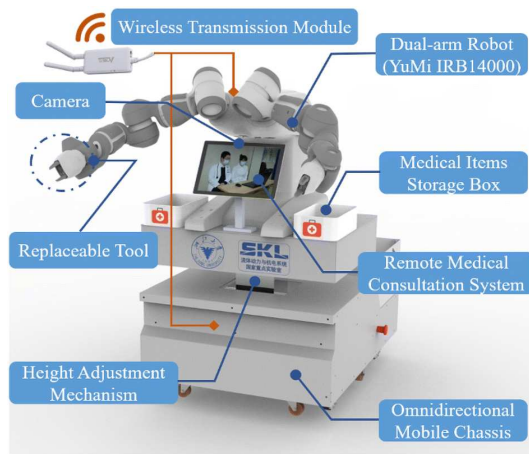


Figura 5: The teleoperation system consists of a wearable initial motion capture device and a dual-arm collaborative robot (YuMi, IRB14000)..

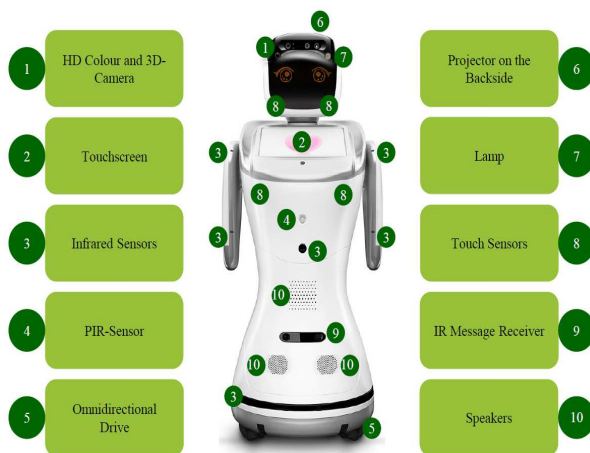


Figura 6: Hardware built into the Sanbot Elf. Picture of the Sanbot Elf: QIHAN Technology (2018a)

### 3 Conclusiones y Trabajo Futuro

En el presente artículo hemos examinado una selección de trabajos actuales en el ámbito de la robótica asistencial, especialmente en lo que respecta a la necesidad de apoyar a los técnicos sanitarios en escenarios de enfermedades contagiosas.

En varios de los ejemplos anteriores hemos visto que los dispositivos son muy pesados y voluminosos, como por ejemplo el robot TRINA [11], de 140kg y una altura de 1.70cm, lo que limita la movilidad y agilidad del mismo. También, existe una tendencia a procurar sustituir las funciones de un sanitario, a través de un robot.

En nuestra opinión, siguiendo conversaciones con técnicos sanitarios, es bueno proponer un dispositivo de dimensiones reducidas, que pueda plegarse para poder ser transportado fácilmente, con un

peso máximo de 20kg. El material ligero y el tamaño reducido nos permitirá reducir sensiblemente su coste de fabricación para poder tener varias unidades disponibles por departamento o área de trabajo. También, los técnicos sanitarios han manifestado la necesidad de dar una gran importancia al contacto personal de la persona confinada con un humano, en este caso el médico o el enfermero. Por ello, el sistema que nos han propuesto entra mas en el ámbito de la telerobótica supervisada, con grandes facilidades en la interfaz de usuario, concretamente para el de un usuario del ámbito sanitario que necesita interactuar con el robot no de forma manual, sino utilizando comandos de alto nivel (e.g. ir a la habitación del paciente, entregar comida, medir constantes, activar videoconferencia, etc.).

El trabajo futuro se centrará precisamente en avanzar en esta dirección, de la mano de los técnicos sanitarios, por medio de la realización de diferentes encuestas y entrevistas, podremos saber que necesidades debe cumplir el prototipo que vamos a desarrollar, procurando mejorar la seguridad y eficiencia, así como el desarrollo de una interfaz ágil y dinámica que pueda ser personalizada dependiendo de las necesidades del centro donde se va a distribuir el nuevo equipo, de forma que sea lo más eficiente posible para ayudar con la recuperación de las personas ante enfermedades contagiosas.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado por el equipo del CIRTESU, "Centro de Investigación en Robótica y Tecnologías Subacuáticas" de la Universidad Jaume I, y financiado por los proyectos DPI2017-86372-C3 (TWINBOT), IDIFEDER/2018/013 (GV), UJI-B2018-34 (NEPTUNO), y el proyecto H2020-Peacetolero-NFRP-2019-2020-04.

### English summary

## AUTONOMOUS ASSISTANCE ROBOT

### Abstract

*In this article we show the state-of-the-art robotic systems that are under development (some of which are already in use), to operate in infectious environments, for example, risk areas associated with COVID-19. The systems allow healthcare professionals to work more safely, and also increase the safety of the patients themselves, allowing patient monitoring, as well as disinfection*

*of areas exposed to the virus, among other potential applications. Future work will show the results of interviews with health-care personnel, who have presented requirements for a potential future robotic health-care system in this field.*

**Keywords:** COVID-19, Sanitary Robotics, Sanitation, Disinfection, Sensors.

## Referencias

- [1] Evan Ackerman. Why boston dynamics is putting legged robots in hospitals - iee spectrum.
- [2] Evan Ackerman. Autonomous robots are helping kill coronavirus in hospitals, 2020.
- [3] Jochen Bauer, Lennarth Gruendel, Julian Sessner, Moritz Meiners, Markus Lieret, Tobias Lechler, Christoph Konrad, and Jörg Franke. 2 camera-based fall detection system with the service robot sanbot elf. 12 2018.
- [4] Amanda Bouman, Muhammad Fadhil Ginting, Nikhilesh Alatur, Matteo Palieri, David D. Fan, Thomas Touma, Torkom Pailavian, Sung Kyun Kim, Kyohei Otsu, Joel Burdick, and Ali Akbar Agha-Mohammadi. Autonomous spot: Long-range autonomous exploration of extreme environments with legged locomotion. pages 2518–2525. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 10 2020.
- [5] Sara Cooper, Alessandro Di Fava, Carlos Vivas, Luca Marchionni, and Francesco Ferro. Ari: The social assistive robot and companion. pages 745–751. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 8 2020.
- [6] Sven Cremer, Lawrence Mastromoro, and Dan O. Popa. On the performance of the baxter research robot. pages 106–111. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 11 2016.
- [7] Simon Duenser, James M. Bern, Roi Poranne, and Stelian Coros. Interactive robotic manipulation of elastic objects. pages 3476–3481. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 12 2018.
- [8] A. Gferrer. Geometry and kinematics of the mecanum wheel. *Computer Aided Geometric Design*, 25:784–791, 12 2008.
- [9] Chen I-Ming. Researchers build disinfection robot to aid cleaners in covid-19 outbreak by nanyang technological university. 04 2020.
- [10] Zeashan Hameed Khan, Afifa Siddique, and Chang Won Lee. Robotics utilization for healthcare digitization in global covid-19 management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 6 2020.
- [11] Zhi Li, Peter Moran, Qingyuan Dong, Ryan J. Shaw, and Kris Hauser. Development of a tele-nursing mobile manipulator for remote care-giving in quarantine areas. pages 3581–3586. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 7 2017.
- [12] Paola Pierleoni, Luca Pernini, Lorenzo Palma, Alberto Belli, Simone Valenti, Lorenzo Maurizi, Loris Sabbatini, and Alessandro Marroni. An innovative webrtc solution for e-health services. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 11 2016.
- [13] Eric C. Townsend, Erich A Mielke, David Wingate, and Marc D. Killpack. Estimating human intent for physical human-robot co-manipulation. 5 2017.
- [14] Geng Yang, Honghao Lv, Zhiyu Zhang, Liu Yang, Jia Deng, Siqi You, Juan Du, and Huayong Yang. Keep healthcare workers safe: Application of teleoperated robot in isolation ward for covid-19 prevention and control. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 33:47, 12 2020.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# SOLUCIÓN INTEGRADA DE CONTROL BASADO EN EMG PARA LA REHABILITACIÓN DE TERAPIAS BILATERALES EN EL EXOESQUELETO DE REHABILITACIÓN DE MANO ROBHAND

Ana Císnal, David Sierra, Javier Pérez-Turiel, Juan Carlos Fraile  
ITAP - Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción, Universidad de Valladolid.  
{ana.císnal, david.sierra}@uva.es ; {jcfraile, jpturiel}@eii.uva.es

## Resumen

*Se ha demostrado que la rehabilitación bilateral asistida ayuda a los pacientes a mejorar su capacidad del miembro parético y promover su recuperación motora tras sufrir un accidente cerebrovascular (ACV), especialmente en las extremidades superiores. La rehabilitación bilateral asistida por robot, basada en el control por EMG, ha sido abordada anteriormente en otros estudios para mejorar la movilidad de la mano, pero faltan soluciones integradas de bajo coste para el control biocooperativo en tiempo real de las plataformas de rehabilitación robótica. Este artículo presenta una solución integrada de EMG en tiempo real de bajo coste, de diseño propio, implementada en la plataforma RobHand (Robot para la Rehabilitación de la Mano), un exoesqueleto que soporta terapias bilaterales basadas en EMG. Se ha desarrollado un control por umbrales basado en EMG para RobHand, que detecta el gesto de la mano sana y lo replica en el exoesqueleto colocado en la mano parética.*

**Palabras clave:** Control, Electromiografía, Exoesqueletos, Neurorehabilitación, Robótica asistencial.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los accidentes cerebrovasculares (ACV) son la tercera causa de discapacidad a nivel mundial, y afectan principalmente a los individuos en la cima de su vida productiva [8]. Aproximadamente el 75% de las personas sufren algún grado de paresia en los miembros superiores [14], que afecta especialmente a la mano [6].

Los pacientes con ictus mejoran el rendimiento motor de la mano mediante rehabilitación, que lleva al paciente a mejorar especialmente la amplitud de movimiento y la fuerza de la mano [16]. Sin embargo, la rehabilitación tradicional es muy costosa, ya que requiere mucho tiempo del especialista en rehabilitación. Un sistema robótico de rehabilitación que permitiese a los pacientes realizar el ejercicio repetitivo sin la asistencia continua del

terapeuta, haría que la rehabilitación fuera más accesible y asequible. Por este motivo, los sistemas robóticos de rehabilitación de la mano han aparecido recientemente como un enfoque complementario al de las terapias tradicionales.

En los últimos años, el entrenamiento robótico bilateral ha ganado popularidad [9], [18], [19]. En las terapias bilaterales se replica el movimiento de referencia que produce la mano sana en el exoesqueleto acoplado a la mano dañada. Un control basado en señales electromiográficas (EMG) puede utilizarse para la realización de terapias bilaterales, determinando el movimiento de referencia a través del análisis de las señales EMG.

En este artículo se presenta una solución integrada de EMG en tiempo real implementada en RobHand, un exoesqueleto de rehabilitación de mano orientado a restaurar la capacidad de abrir y cerrar la mano de pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular. El control propuesto permite la realización de terapias bilaterales, en las que el exoesqueleto puesto en la mano parética se mueve de acuerdo a un control de umbrales que utiliza las señales EMG registradas de los músculos del antebrazo de la mano sana. Las terapias bilaterales se realizan utilizando entornos virtuales, o juegos serios, para aumentar la motivación del paciente.

El objetivo del proyecto es desarrollar una plataforma de rehabilitación de mano asequible y compacta, que pueda ser utilizada en el entorno doméstico. El coste de todo el sistema de rehabilitación se reduce utilizando actuadores de bajo coste y diseñando un sistema de adquisición de señales EMG a medida. En este trabajo se presenta una solución compacta y de bajo coste, consistente en un microcontrolador y un circuito para la adquisición de señales EMG, que proporciona una solución embebida para el exoesqueleto de mano.

La plataforma de rehabilitación robótica RobHand incluye un exoesqueleto de mano (sección 2), el sistema electrónico embebido (sección 3) en el que se

ejecuta el control basado en EMG (sección 4) y un entorno software (sección 5).

## 2 EXOESQUELETO DE MANO

El exoesqueleto RobHand se basa en un mecanismo de cuatro barras en serie, de accionamiento directo y subactuado, que asiste a la flexión y extensión de los dedos de la mano [11]. Se utilizan cinco actuadores lineales L12-30-100-6-I (Actuonix Motion Devices Inc.), de 30 mm longitud de vástago y de bajo coste que proporcionan hasta 23 N, para transmitir el movimiento a las falanges distal y proximal de cada dedo, cuyo movimiento está cinemáticamente acoplado (Fig. 1).



Figura 1: Diseño asistido por ordenador del exoesqueleto.

El uso de este mecanismo de cuatro barras en serie (*four-bar linkage*) reduce el tamaño y peso del exoesqueleto, pero sigue proporcionando los ángulos de flexión y extensión de una mano humana sana. Los enlaces transmiten el movimiento del motor a los anillos que vinculan la estructura mecánica a las falanges proximales y mediales de la mano. Los anillos son de material flexible (Filaflex 82a), lo que mejora la ergonomía del dispositivo y permite que se adapte a diferentes tamaños de dedos. Además, los anillos facilitan el procedimiento de colocación y retirada del exoesqueleto. La posición del pulgar es fácilmente ajustable a través de un mecanismo manual (dispositivo comercial Noga LC6200). El exoesqueleto está fabricado en aluminio, pesa unos 600 g. y se utiliza junto con un soporte de antebrazo para mitigar los efectos negativos generados por el propio peso del exoesqueleto.

## 3 SISTEMA ELECTRÓNICO

Se ha diseñado un circuito para adquirir y realizar el acondicionamiento analógico de las señales de la actividad eléctrica muscular resultante (señales electromiográficas), registradas por electrodos de superficie. Además, este circuito transmite las señales EMG a un microcontrolador, configurado para realizar operaciones de procesamiento en tiempo real. El microcontrolador realiza el tratamiento

digital de las señales para desarrollar el control basado en EMG y aplicar las señales de control adecuadas a los actuadores, para mover el exoesqueleto de acuerdo con la intención de movimiento del usuario.

Trabajos previos relacionados [1], [2], [3], [10], [12], [13], [15], [20] presentaban dos inconvenientes: alto coste del sistema debido a la utilización de sistemas de adquisición de señales EMG comerciales (solo [15] utiliza sistemas de bajo coste, considerados como aquellos que cuestan menos de 150 €) y ejecución del procesamiento de las señales y del control en un ordenador, lo que puede incrementar el tiempo de latencia total del sistema. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, el sistema electrónico embebido desarrollado se ha diseñado para reducir el coste y el tiempo de latencia del sistema al máximo. Para ello, la solución presentada tiene como principales características que el sistema de adquisición de EMG es de diseño propio y se ha minimizado su coste en la medida de lo posible, con un precio inferior a 50 € para producción a pequeña escala, e incorpora un microcontrolador para el procesamiento a bordo y en tiempo real, que recibe los datos de EMG justo después de la conversión analógico-digital y que aplica la señal de control a los actuadores justo después de procesar los datos de EMG, de modo que el tiempo de latencia del sistema global se reduce.

En esta sección se presenta una solución embebida compacta de bajo coste para el control en tiempo real del exoesqueleto de mano accionado por EMG. Esta solución se compone principalmente de un microcontrolador TMS320F28069M (Texas Instruments, Texas, EEUU), un sistema de adquisición de EMG y una PCB para el control de los motores. Estos componentes (Fig. 2) y se detallan en los siguientes apartados.

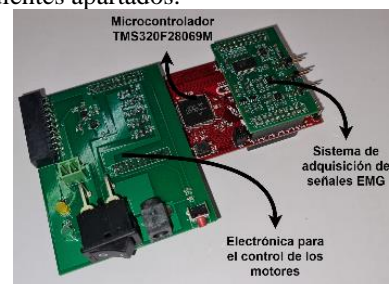


Figura 2. Componentes de la solución.

### 3.1. MICROCONTROLADOR

El microcontrolador (MCU) utilizado es el TMS320F28069M (Texas Instruments, Texas, EEUU) y tiene dos núcleos acoplados, el núcleo C28x y el CLA (*Control Law Accelerator*). El CLA ejecuta el código independientemente del núcleo

C28x y se comunica con él mediante un bus de datos especializado (Bus CLA). Esta característica permitirá que la CPU principal se encargue de la comunicación y el control de los actuadores, mientras que el núcleo CLA se encargará únicamente del procesamiento de las señales de EMG. De esta manera, se consigue aumentar el ancho de banda del microcontrolador.

### 3.2. SISTEMA DE ACQUISICIÓN DE SEÑALES EMG

Se ha diseñado y desarrollado un circuito para la adquisición de señales electromiográficas de dos canales diferenciales de 24 bits de resolución y 112 DB de rango dinámico (DR). Cada canal consta de un amplificador de instrumentación seguido de un filtro RC de paso bajo. Para evitar la saturación del amplificador de instrumentación, cada canal está diseñado para compensar el offset de la entrada diferencial. El conversor analógico-digital está configurado para funcionar a una frecuencia de muestreo de 3,3 MHz y la relación de sobremuestreo está ajustada a 4096, con lo que cada canal muestrea las señales a una frecuencia de 200 Hz. El circuito está diseñado para interactuar con el MCU TMS320F28069M, a través de una comunicación SPI y otras señales digitales necesarias.

La placa está diseñada en una PCB de 4 capas con un único plano de tierra (situado una capa interna) en la circuitería analógica y dos planos de tierra (superior e inferior) en la circuitería digital, de forma que los planos de tierra se dividen para separar los circuitos analógicos y digitales, mientras que el resto de capas son para las líneas de señal. La placa tiene un diseño de tipo "boosterpack" para evitar el uso de cables de conexión. Los componentes discretos se colocan en las capas superior e inferior para reducir aún más el tamaño de la placa resultante, que es de 50,8×33 mm. El circuito ocupa una superficie activa de 10 cm<sup>2</sup> y consume 3 mW, siendo alimentado a 3,3 V.

### 3.3. CONTROLADORA DE LOS MOTORES

El exoesqueleto cuenta con cinco actuadores lineales L12-30-100-6-I que se alimentan con DC 6V y tienen incorporado un controlador de posición interno que permite controlar la posición mediante el uso del modo PWM con el interfaz 0-5V, aplicando una señal de entrada PWM de 5V y 1KHz cuyo ancho de pulso es proporcional al porcentaje de la extensión del vástago del actuador. Los actuadores están controlados por el MCU TMS320F28069M, que genera señales de salida PWM de 3,3V, por lo que es necesario diseñar y desarrollar un driver para los motores (un circuito electrónico que actúe como puente entre el microcontrolador y los actuadores), que eleve el nivel de tensión de la señal de salida

PWM de 3,3 a 5V, para cumplir las especificaciones del control en modo PWM.

El circuito impreso incluye cinco drivers para controlar los cinco actuadores de forma independiente. Cada controlador de motor es un circuito de subida de tensión, que tiene una etapa de amplificación compuesta principalmente por un transistor MOSFET de canal N BSS138.

La placa controladora de los motores cuenta con un único conector para los cinco actuadores, por lo que facilita la conexión del exoesqueleto de mano a la caja electrónica. También cuenta con un botón de reset para el microcontrolador, un conector de alimentación de 6V DC en serie con un interruptor de encendido/apagado para permitir la conexión/desconexión de la alimentación y dos leds para la indicación visual del estado de alimentación del microcontrolador y de la fuente de alimentación. Por razones de seguridad, también tiene un pulsador de parada de emergencia, que puede ser utilizado para cortar la energía a los actuadores. La placa de control del motor desarrollada es una PCB de 2 capas, con componentes discretos sólo colocados en la capa superior.

## 4 CONTROLADOR BASADO EN EMG

El control planteado determina el movimiento del exoesqueleto basándose en las señales EMG registradas de los músculos responsables del movimiento de apertura y cierre de la mano.

### 3.1. SELECCIÓN DE LOS MÚSCULOS Y COLOCACIÓN DE LOS ELECTRODOS

La detección del movimiento de la mano, en concreto, de la apertura y el cierre de los dedos de la mano, es necesaria para controlar el exoesqueleto. Esta detección se consigue registrando las señales EMG de los músculos responsables de la flexión y extensión de los dedos de la mano. En concreto, se registran las señales EMG de los músculos *Extensor Digitorum* (ED) y *Flexor Digitorum Superficialis* (FDS), responsables de la apertura y el cierre de la mano, respectivamente. Se colocan dos pares de electrodos de superficie (Lessa -AB Medica Group, con un área de contacto de 30 x 30 mm) en la superficie cutánea del vientre de los músculos objetivo con una distancia central de 3 cm (recomendada por SENIAM), mientras que el electrodo de referencia se fija en la superficie cutánea del olécranon.

### 3.1. REGISTRO Y NORMALIZACIÓN DE LAS SEÑALES EMG



Las señales EMG deben normalizarse para comparar la actividad EMG entre los músculos [7]. La normalización de la EMG es importante debido a las interferencias que afectan a las señales, como el ruido de la línea eléctrica, la transpiración de la piel, la impedancia de contacto del sensor, que provoca una gran variabilidad de la señal, y la interferencia cruzada de los músculos activos. Además, las pequeñas diferencias en la colocación de los electrodos entre sesiones comprometen la repetibilidad de las señales EMG [4]. El procesamiento de la EMG convierte la señal EMG bruta en una señal normalizada en el rango de [0, 100], donde un valor de 100 representa la contracción voluntaria máxima (MVC) del músculo. La normalización realiza sobre la señal EMG rectificada.

Las señales se registran mediante el sistema de adquisición de EMG presentado, con una frecuencia de muestreo de 200 Hz. Antes de la conversión analógica-digital, las señales EMG sufren un acondicionamiento previo: las señales se amplifican con una ganancia de 50, y luego pasan por un filtro paso bajo de 150 Hz. Tras su digitalización, se filtran con un filtro eliminador de banda (frecuencia central de 50 Hz y factor Q de 20) y un filtro FIR de paso alto (frecuencia de banda de parada de 0,01 Hz, frecuencia de banda de paso de 10 Hz, atenuación mínima de la banda de parada a 80 dB y ondulación máxima de la banda de paso de 0,1 dB) para eliminar las interferencias electromagnéticas. Las señales filtradas se rectifican calculando la raíz cuadrada media (RMS) con una ventana de 10 puntos y luego se aplican a un filtro FIR de paso bajo (frecuencia de la banda pasante de 1 Hz, frecuencia de la banda de parada de 2 Hz, ondulación máxima de la banda pasante de 4 dB y atenuación mínima de la banda de parada de 10 dB) para producir una representación más suave de la señal envolvente. La señal rectificada resultante (rEMG) tiene un periodo de 20 ms y se normaliza con respecto a los valores de MVC del paciente medidos en la calibración. La Fig. 6 (arriba y centro) muestra las señales EMG sin procesar y sus correspondientes señales normalizadas, de los músculos FDS y ED.

### 3.2. CALIBRACIÓN

Es necesario realizar una calibración antes de comenzar una sesión de rehabilitación para calcular los umbrales necesarios para el control basado por EMG y para determinar el MVC, que es necesario para normalizar la señal de EMG.

Se pide a los pacientes que realicen una calibración que consiste en relajar la mano y en realizar la máxima flexión y extensión de los dedos durante ocho segundos, mientras la acción a realizar y la actividad muscular se muestran al sujeto en la

pantalla de un ordenador. Para eliminar los efectos transitorios entre los tres gestos de la mano (reposo, apertura, cierre), se desestiman dos segundos al principio y al final de cada gesto y sólo se consideran los cuatro segundos intermedios para determinar los umbrales (Fig. 3).

Durante la sesión de calibración se determinan dos valores de umbrales EMG ( $\mu$  y  $\epsilon$ ), que son los valores límite máximos correspondientes a la desactivación muscular más una constante de 0,1. El umbral  $\mu$  es el umbral del músculo FDS y  $\epsilon$  para el músculo ED. Los gráficos superior y central de la Fig. 6 muestran los umbrales mencionados.



Figura 3: Diagrama de la fase de calibración

### 3.3 CONTROL POR UMBRALES

El control por umbrales basado en EMG permite realizar una terapia bilateral, reconociendo el gesto realizado por la mano sana y replicando ese gesto en el exoesqueleto colocado en la mano parética (Fig. 4). Para ello, se definen tres posibles gestos del exoesqueleto: "mano en reposo", "mano abierta" y "mano cerrada".



Figura 4: Realización de una terapia bilateral basada en EMG utilizando un entorno virtual

El funcionamiento del control por umbrales basado en EMG es el siguiente: el microcontrolador procesa y normaliza las señales de EMG registradas de los dos músculos del antebrazo de la mano sana (ED y FDS) para determinar el gesto realizado por la mano sana, con el fin de proporcionar la señal PWM adecuada a los actuadores del exoesqueleto para lograr el gesto objetivo de la mano parética. El módulo de reconocimiento de gestos procesa las señales EMG normalizadas utilizando el MVC cada 20 ms (período de actualización del valor de las señales EMG normalizadas) para determinar los tres gestos predefinidos. Esto depende de los valores de las señales EMG normalizadas (nEMG) y de los dos valores de los umbrales EMG, que se fijan en función de la calibración inicial de cada sujeto según su actividad muscular residual (Fig. 5).



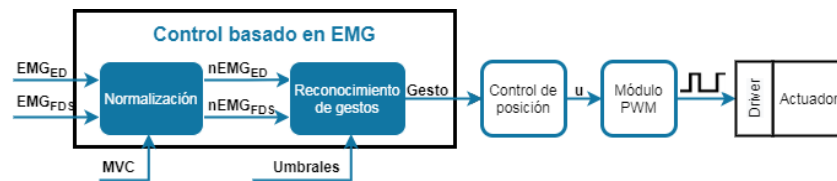


Figura 5: Diagrama del control por umbrales de EMG.

El gesto de mano cerrada se reconoce cuando la señal normalizada del músculo FDS supera el umbral de flexión  $\mu$  mientras que la señal normalizada del músculo FDS es mayor que la señal normalizada del músculo ED y, en consecuencia, los actuadores se extienden, por lo que el exoesqueleto se cierra. Del mismo modo, el gesto de mano abierta se reconoce cuando la señal del músculo ED supera el umbral de extensión  $\epsilon$ , mientras que la señal normalizada del músculo ED es mayor que la señal normalizada del músculo FDS, y los actuadores se retraen, por lo que el exoesqueleto se abre. El gesto de reposo se reconoce cuando ambas señales normalizadas de EMG son inferiores a sus respectivos umbrales y el exoesqueleto de mano alcanza el gesto de reposo (Fig. 6).

#### 4 ENTORNO SOFTWARE

Se ha desarrollado un entorno software que proporciona soporte al terapeuta para la gestión de pacientes (Fig. 7.a) y terapias (Fig. 7.b). Mediante

esta aplicación, el terapeuta selecciona el paciente que realiza la sesión y define la terapia a realizar por el mismo, de acuerdo con su historial clínico y de terapias realizadas.

En general, se ha demostrado que el uso de terapias de rehabilitación basados en entornos de realidad virtual de tipo videojuegos, también llamadas ‘juegos serios’, son menos aburridas que las terapias convencionales y son beneficiosas para la rehabilitación de pacientes que han sufrido un ictus [5, 17].

Con el objetivo de aumentar la efectividad del sistema de rehabilitación RobHand, se han desarrollado un conjunto de juegos serios para la realización de terapias bilaterales basadas en EMG. Los juegos han sido desarrollados en C# utilizando los entornos de programación de Unity y Visual Studio.

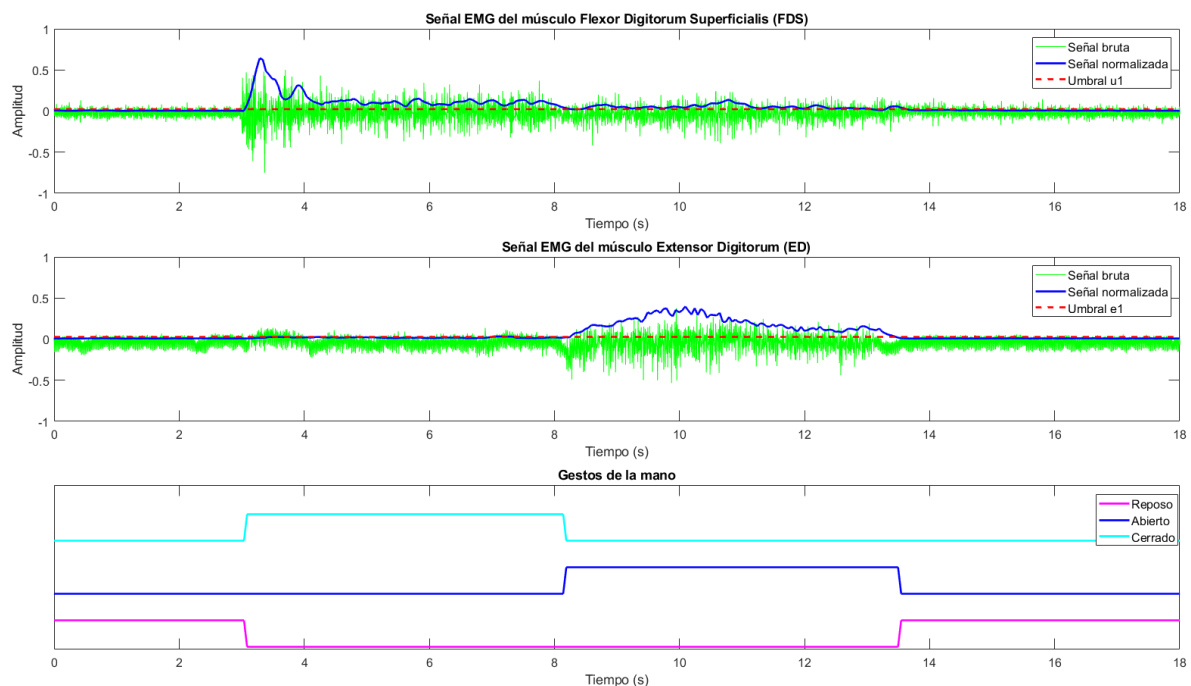


Figura 6: Tratamiento de las señales EMG en el control para el reconocimiento de gestos: señales en bruto de los músculos FDS y ED, señales normalizadas, umbrales y gestos identificados.

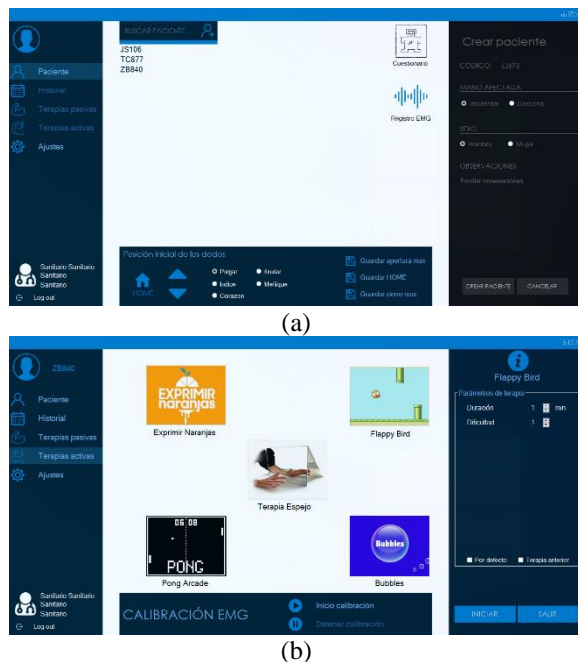


Figura 7: Entorno software. (a) Pantalla para la gestión de pacientes (b) Pantalla para la selección y parametrización de terapias bilaterales basadas en EMG utilizando entornos de realidad virtual.

Los juegos serios desarrollados son los siguientes: (i) Exprimir naranjas (ii) Flappy bird (iii) Pong (iv) Burbujas. La duración y la dificultad de las terapias son configurados por el personal sanitario. Todos los juegos proporcionan retroalimentación visual y sonora. También se ha incluido un feedback de recuperación comprensible para el usuario a través de la puntuación final del juego.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un sistema compacto de bajo coste que proporciona una solución embebida para el control en tiempo real de un exoesqueleto para rehabilitación de mano. La solución desarrollada cuenta con un sistema de adquisición de señales EMG de diseño propio y bajo coste que permite registrar señales de EMG. Además, el procesamiento de las señales EMG y el control se realizan en tiempo real en el microcontrolador, lo que reduce el tiempo de latencia del sistema, a la vez que proporciona un buen rendimiento para detectar la intención del usuario y replicar el movimiento identificado en el exoesqueleto de mano. Se ha implementado un control por umbrales para el reconocimiento de gestos porque su simplicidad permite implementarlo en un sistema embebido en tiempo real sin comprometer la fiabilidad.

Al diseñar y desarrollar el sistema de rehabilitación hemos intentado minimizar el tiempo de latencia en la medida de lo posible:

- El procesamiento digital de las señales EMG se realiza justo en el momento en que han sido muestreadas a 200 Hz por el conversor ADC y transmitidas al microcontrolador a través de comunicación SPI
- El alto rendimiento de la MCU TMS320F28069M, en concreto, la utilización el núcleo CLA para la implementación del procesamiento y el control de las señales EMG
- La optimización del algoritmo de rectificación de las señales EMG registradas con el sistema de adquisición de señales de diseño propio (selección de los filtros, del método de rectificación, de la ventana de tiempo...).
- Tanto el procesamiento de las señales de EMG como la generación de las señales de control de los actuadores es generada por el microcontrolador, por lo que no hay tiempo de latencia de transmisión a diferencia de trabajos anteriores, donde el procesamiento de EMG se realizaba en el PC por lo que era necesario transmitir los datos desde el PC al microcontrolador que controla los actuadores.

En resumen, se ha presentado una solución tecnológica de bajo coste que permite el control en tiempo real de un exoesqueleto mediante el análisis de las señales EMG. Permite la realización de terapias bilaterales de rehabilitación basadas en realidad virtual, ya que hacen posible que el exoesqueleto RobHand mueva la mano dañada reproduciendo el movimiento de la mano sana con un tiempo de respuesta y una precisión tolerables

## Agradecimientos

El trabajo reflejado en esta comunicación está siendo realizado gracias a la financiación con fondos FEDER del Ministerio de Ciencia e Innovación, a través del proyecto Retos Investigación PID2019-111023RB-C33, y del CDTI y la empresa CyL ImasD Informática S.L., mediante el proyecto IDI-20170263.

## English summary

## INTEGRATED EMG-BASED CONTROL SOLUTION TO SUPPORT BILATERAL THERAPIES ON THE ROBHAND REHABILITATION EXOSKELETON

## Abstract

Assisted bilateral rehabilitation has been proven to help patients improve their ability of the paretic limb and promote their motor recovery after suffering a cerebrovascular accident (ACV), especially in upper limbs. Robotic-assisted bilateral rehabilitation based on EMG-driven control has been previously addressed in other studies to improve the hand mobility, but there is a lack of low-cost embedded solutions for the real-time bio-cooperative control of the robotic rehabilitation platforms. This paper presents a proprietary, low-cost, real-time EMG integrated solution implemented on the RobHand

(Robot for Hand Rehabilitation) platform, an exoskeleton that supports bilateral EMG-based therapies. A threshold non-pattern recognition EMG-driven control for RobHand has been developed, which detects the hand gesture of the healthy hand and replicates it on the exoskeleton placed on the paretic hand.

**Keywords:** Electromyography, Control, Exoskeletons, Neurorehabilitation, Rehabilitation robotics.

## Referencias

- [1] Ben I. A., Bouteraa Y., y Rekik C., (2017) "Design and development of 3d printed myoelectric robotic exoskeleton for hand rehabilitation," *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 341–366.
- [2] Burns M. K., Pei D., y Vinjamuri R., (2019) "Myoelectric control of a soft hand exoskeleton using kinematic synergies," *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 13, no. 6, pp. 1351–1361.
- [3] Chen Y., Yang Z., y Wen Y., (2021) "A soft exoskeleton glove for hand bilateral training via surface EMG," *Sensors*, vol. 21, no. 2, pp. 1–18.
- [4] Chowdhury R. H., Reaz M. B. I., Bin Mohd Ali M. A., Bakar A. A. A., Chellappan K., y Chang T. G., (2013) "Surface electromyography signal processing and classification techniques," *Sensors*, vol. 13, no. 9, pp. 12431–12466.
- [5] Crosbie J. H. et al., (2008) "Virtual reality in the rehabilitation of the upper limb after hemiplegic stroke: a randomised pilot study," *Screen*, pp. 229–235.
- [6] Fischer H. C., Stubblefield K., Kline T., Luo X., Kenyon R. V., y Kamper D. G., (2007) "Hand Rehabilitation Following Stroke: A Pilot Study of Assisted Finger Extension Training in a Virtual Environment," *Top. Stroke Rehabil.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–12.
- [7] Halaki M. y Ginn K., (2012) "Normalization of EMG Signals: To Normalize or Not to Normalize and What to Normalize?," in *Computational Intelligence in Electromyography Analysis - A perspective on Current Applications and Future Challenges*, G. Naik, Ed, Croatia, InTech, pp. 175–194.
- [8] Johnson, W., Onuma O., Owolabi M., y Sachdev S., (2016) "Stroke: a global response is needed," *Bull. World Health Organ.*, vol. 94, no. 9, pp. 634–634.
- [9] Leonardis D. et al., (2015) "An EMG-controlled robotic hand exoskeleton for bilateral rehabilitation," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 8, no. 2, pp. 140–151.
- [10] Lu Z., Chen X., Zhang X., Tong K. Y., y Zhou P., (2017) "Real-Time Control of an Exoskeleton Hand Robot with Myoelectric Pattern Recognition," *Int. J. Neural Syst.*, vol. 27, no. 5, pp. 1–11.
- [11] Moreno-San Juan V., Císnal A., Fraile J., Pérez-Turiel J., y de la Fuente E., (2021) "Design and Characterization of a Lightweight Underactuated RACA Hand Exoskeleton for Neurorehabilitation," in *Robot Auton. Syst.*
- [12] Park S. et al., (2020) "User-Driven Functional Movement Training with a Wearable Hand Robot after Stroke," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 28, no. 10, pp. 2265–2275.
- [13] Park S., Meeker C., Weber L. M., Bishop L., Stein J., y Ciocarlie M., (2018) "Multimodal sensing and interaction for a robotic hand orthosis," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 4, no. 2, pp. 315–322.
- [14] Rathore, S. S., Hinn, A. R., Cooper L. S., Tyroler H. A., y Rosamond W. D., (2002) "Characterization of incident stroke signs and symptoms: findings from the atherosclerosis risk in communities study," *Stroke*, vol. 33, no. 11, pp. 2718–21.
- [15] Secciani N., Topini A., Ridolfi A., Meli E., y Allotta B., (2020) "A novel Point-in-Polygon-based sEMG classifier for Hand Exoskeleton Systems," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. XX, no. XX, pp. 1–9.
- [16] Sterr A. y Freivogel S., (2003) "Motor-improvement following intensive training in low-functioning chronic hemiparesis," *Neurology*, vol. 61, no. 6, pp. 842–4.
- [17] Subramanian S. K., Lourenço C. B., Chilingaryan G., Sveistrup H., y Levin M. F., (2013) "Arm motor recovery using a virtual reality intervention in chronic stroke: Randomized control trial," *Neurorehabil. Neural Repair*, vol. 27, no. 1, pp. 13–23.
- [18] Ueki S. et al., "Development of a hand-assist robot with multi-degrees-of-freedom for rehabilitation therapy," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 17, no. 1, pp. 136–146, 2012.

- [19] Wu H. et al., (2011) “Virtual reality based robotic therapy for stroke rehabilitation: An initial study,” *2011 IEEE ICMA*, Beijing, CN., pp. 1196–1200.
- [20] Zhang J., Wang B., Zhang C., Xiao Y, y Wang M. Y., (2019) “An EEG/EMG/EOG-based multimodal human-machine interface to real-time control of a soft robot hand,” *Front. Neurorobot.*, vol. 13.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# FABRICACIÓN DE MICRORROBOTS: MEMSLAB DE LA UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

Paloma Rodríguez, Enrique Mancha-Sánchez, Almudena Bravo, Cristina Nuevo-Gallardo, Inés Tejado, Blas Vinagre  
Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas s/n, 06006 Badajoz  
{palomard, emanha, abravo, cnuevog, itejbal, bvinagre}@unex.es

## Resumen

*La microrrobótica es un campo emergente de investigación con innumerables aplicaciones en el ámbito de la industria, la biología y la medicina. A pesar de los avances en el campo, todavía existen retos considerables entre los que se encuentra el de la fabricación de robots a escala micrométrica. La fabricación de microrrobots se beneficia de los avances en la fabricación de sistemas microelectromecánicos (MEMS). En este trabajo se presentan los equipos que forman el laboratorio de fabricación de MEMS de la Universidad de Extremadura (UEX), así como ejemplos de fabricación de microrrobots que se han realizado.*

**Palabras clave:** microrrobots, sistemas microelectromecánicos, fotolitografía.

## 1. INTRODUCCIÓN

El término microrrobótica suele referirse a los sistemas robóticos formados por componentes de dimensiones que varían desde los cientos micrómetros hasta unos pocos milímetros [4]. Se ha conseguido un progreso considerable en los últimos 30 años en este campo emergente de investigación, que está recibiendo gran atención por parte de la comunidad investigadora debido a sus potenciales aplicaciones [2].

La tecnología desarrollada puede ser utilizada en diversas áreas. En la industria, estas incluyen tareas de ensamblado, caracterización, inspección y mantenimiento y microóptica [9], ya que numerosas de estas aplicaciones requieren el manejo y ensamblaje de piezas pequeñas con una precisión en el rango de las micras. Otro campo relevante es el biológico, en el que los avances en microrrobótica permiten la manipulación, captura y combinación de células.

En medicina y cirugía, la microrrobótica promete un gran abanico de posibilidades, ya que el tamaño reducido de los dispositivos permitirá acceder a regiones complejas y estrechas del cuerpo humano, hasta ahora inaccesibles. Estas aplicaciones médicas, abarcan desde los procedimientos quirúrgicos

de forma no invasiva hasta la administración de medicamentos y las herramientas de diagnóstico y monitorización [10]. Es precisamente en este tipo de aplicaciones en las que se va a centrar este trabajo.

A pesar de todos los avances que se han producido en el campo de la microrrobótica, existen considerables desafíos en el desarrollo de robots con aplicaciones biomédicas en la escala micrométrica. Cambios relevantes en el comportamiento físico con respecto a la macroescala hacen necesario un estudio exhaustivo de las formas de locomoción, en las que las fuerzas de superficie como la viscosidad dominan con respecto a las fuerzas de volumen como la inercia. En este contexto de bajo número de Reynolds, el movimiento de los nadadores tiene que ser específico. Concretamente, es necesario que el nadador realice una secuencia de movimientos no simétrica e irreversible en el tiempo que suele referirse como movimiento no recíproco [8].

Este movimiento necesita de alguna fuente de energía para poder realizarse, otro de los retos de la microrrobótica. Los métodos convencionales en robótica para la obtención de energía no son aplicables, ya que, por el momento, no existe posibilidad de almacenar la suficiente energía eléctrica a estas escalas. Es por esto, que el enfoque mayoritario en la investigación es el de proporcionar la energía de forma externa. Existen varios métodos a la hora de propulsar microrrobots de forma inalámbrica, ya sea mediante energía acústica, eléctrica, térmica, química, magnética u óptica [13].

Como último aspecto clave, resaltar la fabricación, una parte crucial del desarrollo de la microrrobótica, ya que los diseños y funcionalidades que pueden lograrse dependen directamente de las técnicas disponibles de manufactura para la escala micrométrica. La mayor parte de técnicas de microfabricación están basadas en métodos desarrollados para la industria de los semiconductores. Algunos de los procesos convencionales de microfabricación incluyen litografía, deposición de películas delgadas, técnicas de grabado químico y electrodeposición [9].

Sin embargo, están emergiendo un buen número de tecnologías de microfabricación muy adecuadas para la fabricación de sistemas microelectromecánicos (MEMS, de su terminología inglesa) [5]. Estos nuevos procesos están basados en la deposición de tintas para formar estructuras en 2D o 3D y también procesos que utilizan láser, rayos de iones, rayos de electrones o sondas de exploración para depositar o eliminar material y formar microestructuras.

Es precisamente en este último grupo que se encuadra la descripción de los equipamientos disponibles en la Universidad de Extremadura (en adelante, UEX) para la fabricación MEMS. Este laboratorio está dotado de una impresora 3D de fotolitografía de dos fotones y por una impresora de inyección de tinta. Además, consta de un software para el diseño y la simulación de MEMS. En este contexto, la fabricación de microrrobots puede hacer uso de la tecnología de producción de MEMS que se ha descrito.

En este trabajo, se va a realizar la descripción de cada uno de los dispositivos nombrados, así como ejemplos de fabricación de microrrobots realizados en la impresora de fotolitografía.

## 2. MEMSLab de la UEX

En este apartado se van a describir los equipos que integran el MEMSLAB de la UEX. Conviene señalar que se realizará una descripción más detallada del Photonic Professional GT2 de Nanoscribe al ser el equipo principal del laboratorio, y más concretamente el que se ha utilizado para fabricar microrrobots.

### 2.1. PHOTONIC PROFESSIONAL GT2

La impresora Photonic Professional GT2 (Nanoscribe GmbH & Co. KG) es un equipo para la fabricación de estructuras en 3D a partir de resina fotopolimerizable. La particularidad de este equipo radica tanto en su resolución como en el rango de tamaños de las piezas que es capaz de fabricar: desde los cientos de nanómetros hasta los milímetros.

Esta resolución es posible gracias a la tecnología de fabricación de polimerización basada en DLW (Direct Laser Writing). En particular, este equipo realiza la fotopolimerización mediante dos fotones con longitudes de onda cercanas al infrarrojo. Una condición necesaria para que los dos fotones sean absorbidos de forma simultánea por la resina es que la intensidad lumínica sea lo suficientemente alta, por lo que utiliza un rayo pulsado láser de femtosegundo. Gracias a las características ópti-

cas de la absorción, solo se alcanza la intensidad suficiente para la fotopolimerización en el foco en el que se concentran los dos fotones [11]. Este volumen mínimo de polimerización se conoce como vóxel.

La fabricación de estructuras y piezas se conseguirá moviendo el láser en una trayectoria en tres dimensiones mediante sistemas de posicionamiento [6]. Las trayectorias en tres dimensiones pueden realizarse o bien moviendo el rayo láser o bien moviendo la muestra de resina. En la práctica, el sistema de posicionamiento del dispositivo es una combinación de las dos posibilidades de movimiento, como en la mayoría de sistemas de DWL [12].

El movimiento del láser se realiza mediante galvanómetros de escaneo, mientras que el movimiento de la muestra se consigue mediante etapas de posicionamiento en *xyz* de alta resolución, en concreto, con un sistema piezoeléctrico de precisión 3D. La utilización híbrida de estas dos posibilidades permite aprovechar la gran velocidad de los galvanómetros de escaneo (que alcanzan los m/s) con la mayor amplitud de movimiento de las etapas de posicionamiento de la muestra. Además, existe una etapa de posicionamiento lateral 2D, bastante más lenta en comparación con los sistemas ya nombrados, pero que permite movimientos extensos. Los diferentes elementos mencionados se encuentran representados en la Figura 1.

Las altas intensidades necesarias para la fotolitografía mediante dos fotones requiere la utilización de objetivos típicamente utilizados en microscopios que sean capaces de concentrar el láser. La gran desventaja de la utilización de este tipo de objetivos es que estos presentan una distancia de trabajo bastante pequeña, de valores típicos entre los 170  $\mu\text{m}$  y 1 mm, que limita la altura de las estructuras fabricadas.

Para resolver este problema, se utiliza la litografía "Dip-in" [3], una modificación de DLW en la que el objetivo está inmerso directamente en la resina. Como se puede observar en la Figura 1, la impresión se realiza desde la superficie del sustrato hacia abajo para que el objetivo y la resina estén en contacto. De esta forma, la distancia de trabajo del objetivo se convierte en un factor irrelevante. La apertura numérica del objetivo será uno de los factores que determinarán el tamaño del vóxel.

Según las características de la pieza que se quiera fabricar, hay disponibles tres sets de impresión como se muestra en la Figura 2. El set de características pequeñas es el de mayor resolución permite una resolución mínima de unos 200 nm. Esta resolución es a costa de un mayor tiempo de impresión y volumen máximo menor que el resto de



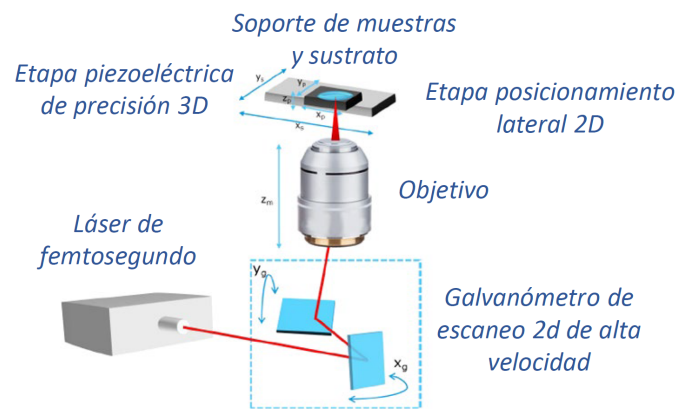


Figura 1: Esquema de los elementos principales de la impresora Photonic Professional GT2

los sets de hasta  $0,1 \text{ mm}^3$ . El set de características medianas imprime volúmenes de hasta  $50 \text{ mm}^3$ , con elementos estables de  $10 \mu\text{m}$  y estructuras de hasta  $8 \text{ mm}$  de altura. Por último, el set de características grandes permite unas resoluciones no tan finas, con elementos estables a partir de  $20 \mu\text{m}$  pero el tiempo de impresión es más reducido y el volumen de impresión es de hasta  $400 \text{ mm}^3$ .



Figura 2: Sets de impresión disponibles de la impresora Photonic Professional GT2

Cada set está compuesto por un objetivo, una resina y un sustrato diferente, que deben utilizarse en conjunto para obtener las características deseadas.

### 2.1.1. FLUJO DE TRABAJO

El uso de la impresora lleva aparejado un flujo de trabajo específico; la secuencia de pasos está representada en la Figura 3. El proceso comienza creando un modelo 3D de la estructura que se quiera fabricar en un programa informático adecuado. A continuación, este modelo debe exportarse en formato STL. Este archivo STL será a partir del cual se generen los archivos GWL, para lo cual se importará en el software de DeScribe desarrollado por Nanoscribe GmbH & Co. KG. Una descripción más detallada del funcionamiento del programa se encuentra en la sección 2.1.2.

Una vez generados los archivos GWL, se deberá

introducir el objetivo en la máquina y preparar la muestra. El objetivo, el sustrato y la resina deberán escogerse conforme al set de características que vaya a utilizarse. Se colocará el objetivo en el microscopio de la máquina y la cantidad de resina necesaria sobre el sustrato.



Figura 3: Esquema del flujo de trabajo de la impresora

A continuación, se encenderá el programa Nanowrite en el ordenador de la impresora, momento en el que el sistema realizará una calibración automática. Utilizando el programa Nanowrite, se deberá encontrar la interfaz y cargar los archivos correspondientes al trabajo. Desde Nanowrite se podrá ordenar el inicio de la impresión. En la sección 2.1.3, se describen las diferentes partes que componen el programa. El último paso para la obtención de una pieza, es la inmersión del sustrato en los líquidos de postprocesado. Primero, en un baño de acetato de 2-metoxi-1-metiletilo (PGMEA), para pasarlo a otro de isopropanol. Los tiempos de cada uno de los baños variarán en función del set de impresión utilizado y del tamaño de la pieza.

### 2.1.2. DESCRIBE

Describe es el software de preparación de la impresión de Nanoscribe GmbH & Co. KG. Su función es la de asistir en la generación de los archivos GWL necesarios para la realización de un trabajo. Los archivos GWL describen las trayectorias que debe seguir el láser y configura los parámetros de impresión del sistema. Estos archivos pueden ser generados a partir de un archivos STL mediante un asistente de importación o directamente programados.

El asistente de importación sigue un proceso específico para procesar los archivos STL de la pieza. Primero, el programa divide la pieza en capas, de forma similar a como se realiza en una impresora 3D convencional. Después de este paso, se divide cada capa en líneas, que corresponderán con la trayectoria que seguirá el láser. Por último, si el tamaño de la pieza sobrepasa el campo de impresión que pueden abarcar los sistemas de posicionamiento más precisos, es necesario dividir el sólido en bloques. Cada bloque se imprimirá utilizando los sistemas de posicionamiento finos, es decir, el galvanómetro de escaneo o la etapa piezoeléctrica, mientras que el movimiento entre bloques se realizará mediante la etapa de posicionamiento lateral 2D.

Es importante añadir que el tamaño de las capas, las líneas y los bloques en los que se divide el objeto 3D dependen directamente del set de impresión utilizado. Cuanto mayor sea el set de impresión, más grandes serán las capas, las líneas y los bloques, lo que llevará a un menor tiempo de impresión, pero con una resolución menor.

Describe permite la previsualización del proceso de impresión de la pieza, mostrando al usuario el tiempo y el procedimiento que se va a seguir para cada trabajo. Además, tiene una función de depuración del código GWL que ayuda a comprobar la sintaxis de los programas generados y visualizar el efecto que tiene cada línea escrita sobre la impresión.

### 2.1.3. NANOWRITE

Nanowrite es la interfaz gráfica de usuario para la utilización de la impresora Photonic Professional GT2. Si bien el programa permite un control manual de las diferentes partes de la máquina, su propósito es el de automatizar y posibilitar la visualización del proceso de impresión.

En la Figura 4, se presenta la ventana principal de Nanowrite. Se han añadido rectángulos de colores para dividir en partes la pantalla del programa y facilitar su explicación. En la sección del rectángulo rojo se encuentran los botones utiliza-

dos en una impresión estándar. El indicador rectangular que ocupa la posición superior indica el estado del sistema en el momento mostrado en la Figura 4, en este caso, en reposo. El siguiente pulsador es “*Exchanger Position*”, que permite abrir la impresora e introducir una muestra. El pulsador “*Approach Sample*” ejecuta la orden de encontrar la interfaz de la muestra colocada en el interior de la impresora. Pulsando el indicador “*Load job*” se abre una ventana secundaria que permite cargar un archivo de tipo GWL para su impresión. El siguiente botón es “*Find interface*” que permite, también, encontrar la interfaz. La siguiente opción es “*Start Job*”, que se volverá disponible una vez se haya cargado un archivo mediante “*Load Job*”, seleccionando el botón comienza la impresión del archivo cargado. Por último, presionando “*Abort*” se finaliza la impresión.

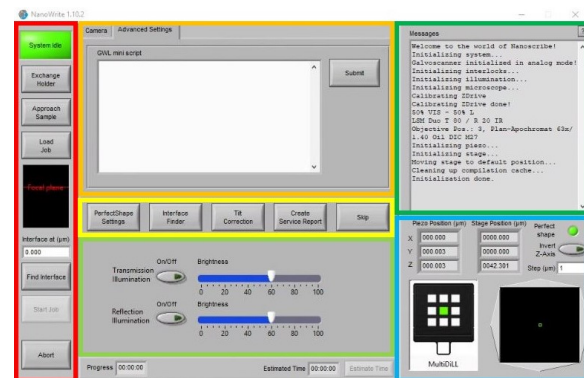


Figura 4: Ventana principal de Nanowrite

Dentro rectángulo naranja, está la sección GWL miniscript que permite ejecutar comandos GWL directamente en la impresora sin tener que cargar un archivo de este tipo. En la parte amarilla, se encuentran botones que corresponden con un uso avanzado de la impresora. La división verde clara contiene los controles de la iluminación de la impresión. Se puede elegir entre iluminación transmitida, utilizada para sustratos transparentes, e iluminación reflejada para sustratos no transparentes. Se puede regular, además, la intensidad de cada una de ellas. En verde oscuro está la ventana de mensajes, donde aparecen las diferentes notificaciones del sistema. Por último, en el interior del recuadro azul se localizan tanto las coordenadas del sistema piezoeléctrico como el del sistema de posicionamiento lateral 2D (en la Figura 4 identificada como “*Stage Position*”). Además, se puede visualizar la posición del sistema sobre el sustrato.

## 2.2. EQUIPAMIENTO ADICIONAL

### 2.2.1. DIMATIX DMP-2850: IMPRESORA DE INYECCIÓN DE TINTA PARA LA DEPOSICIÓN DE MATERIALES FLUIDOS

La impresora Dimatix DMP-2850 de Fijifilm es un sistema de sobremesa que permite la deposición de materiales sobre diferentes tipos de superficies planas de hasta 25 mm de grosor y de tamaño A4. Está diseñada para inyectar con microprecisión una gran variedad de fluidos funcionales sobre prácticamente cualquier superficie, como plástico, vidrio, cerámica y silicio, así como sustratos flexibles, desde membranas, geles y películas finas hasta productos de papel. Emplea cartuchos intercambiables que pueden rellenarse con materiales fluidos fabricados por el usuario.

Su funcionamiento está basado en la modificación de los impulsos electrónicos enviados al dispositivo piezoeléctrico de eyección de tinta y la observación a través de una cámara con el fin de conseguir que se genere una gota con características óptimas para la impresión. De esta manera, se pueden depositar gotas de hasta un diámetro mínimo de 20  $\mu\text{m}$ .

La gran versatilidad en el uso de sustratos y tintas en este equipo facilita en gran medida el desarrollo de prototipos de productos, desde circuitos flexibles, etiquetas RFID o pantallas, hasta matrices de ADN.

### 2.2.2. COVENTOR

Coventor es una plataforma software avanzada que resuelve los retos de modelado de procesos, automatización de diseños e integración de sistemas microelectromecánicos. La suite está formada por MEMS+, para una simulación compacta, ideal para diseñar y optimizar dispositivos MEMS que dependen de la electrostática para la actuación y sensorizado, y CoventorWare que ofrece características específicas para el diseño de MEMS que lo diferencian de otras herramientas de análisis de elementos finitos de propósito general.

## 3. EJEMPLOS DE FABRICACIÓN

A continuación, se van a presentar varios ejemplos de fabricación de microrrobots realizados con la impresora Photonic Professional GT2.

### 3.1. MICRORROBOT DE TIPO ESPERMATOZOIDE CON CABEZA FERROMAGNÉTICA

Se han fabricado microrrobots de tipo flagelo plano. Las dimensiones del microrrobot se han elegido a partir de las proporciones del microrrobot fabricado en [7], escalando las medidas al tamaño conveniente en cada caso. La Figura 5 representa un esquema del microrrobot.

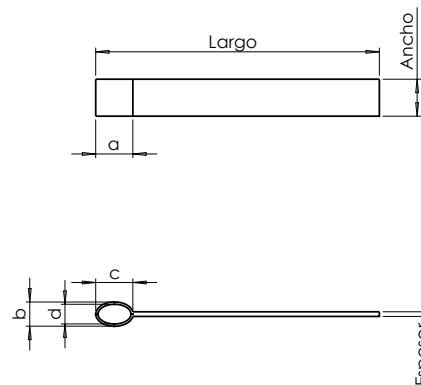


Figura 5: Modelo de un microrrobot espermatozoide de tipo flagelo plano

Estos dispositivos están pensados para ser actuados mediante campos magnéticos variables. El campo magnético oscilatorio provocará un movimiento fluctuante en la cabeza del microrrobot que moverá el flagelo, ya que este es solidario a la cabeza. Este movimiento del flagelo será el que propulse el microrrobot. Al diseño se le ha añadido una apertura en la cabeza para introducir un elemento ferromagnético que posibilitará la propulsión. Es importante señalar la forma elipsoidal del elemento ferromagnético que permitirá que el eje largo de la cabeza sea el que se alinee con el campo magnético generado [1].

Se han imprimido dos versiones del mismo prototipo, de longitudes de 15 y 4 mm, en adelante Prototipo 1 y Prototipo 2, respectivamente. En la Tabla 1, se reflejan las medidas de cada uno de los prototipos.

La fabricación se ha realizado utilizando el set de impresión mediano, el objetivo de 25 aumentos, el sustrato ITO y la resina IP-S. Las Figuras 6 y 7 muestran imágenes reales de los microrrobots ya fabricados.

El postprocesado de los microrrobots de 15 y 4 mm es idéntico. Se les somete a un baño de 20 minutos de PGMEA seguido de otro baño de isopropanol

Tabla 1: Dimensiones del microrrobot tipo flagelo de 15 mm

Dimensiones	Prototipo 1 (mm)	Prototipo 2 (mm)
Largo	15	4
Espesor	0,24	0,064596
Ancho	1,95	0,521739
a	1,98	0,529193
b	1,28	0,342857
c	1,78	0,46
d	1,08	0,27

de 6 minutos de duración.

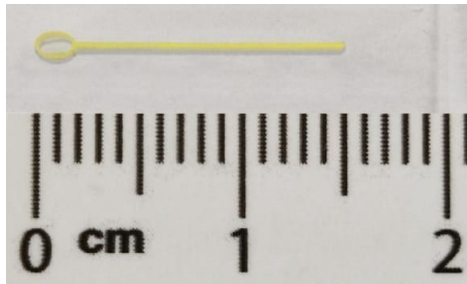


Figura 6: Fotografía del Prototipo 1

Además, al flagelo de 15 mm se le ha introducido una mezcla de nanopartículas con resina IP-S, con una alta concentración en nanopartículas. Las nanopartículas son de óxido de hierro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) de una pureza del 99,55 % y un tamaño de entre 14-29 nm. Debido a la alta concentración, no se consigue que la resina polimerice. Para lograr que el material depositado en la cabeza no se disperse, se cierra la superficie mediante resina epoxi.

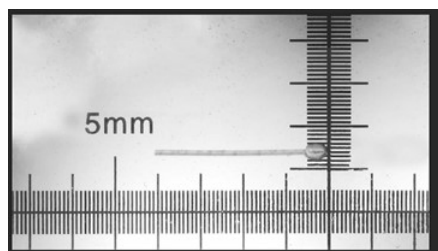


Figura 7: Fotografía del Prototipo 2

En la fabricación de estos microrrobots se han encontrado varios problemas. El más evidente es la dificultad para dotar de un elemento magnético al microrrobot de prototipo 2 de 4 mm. Debido a las dimensiones de la cabeza, es extremadamente complicado rellenar la cavidad de nanopartículas de forma manual, como se hizo en el caso del microrrobot de 15 mm.

Otro problema resultó derivado de las características de la resina. A pesar de las dimensiones reducidas del microrrobot, este terminó partiéndose

durante el manejo debido a su poca flexibilidad y relativa fragilidad.

Por último, a pesar de que se acabó utilizando resina epoxi para conseguir que las nanopartículas quedaran fijas en la cabeza del microrrobot de 15 mm, inicialmente se utilizó cianoacrilato, que terminó por no ser la opción más adecuada. Esto es debido a que el agua, en la que estaba inmersa el microrrobot, acabó disolviendo el pegamento.

### 3.2. MICRORROBOT TIPO ESPERMATOZOIDE PARA ESTUDIO DE INTERACCIÓN CON FLUIDO

El siguiente ejemplo de fabricación es un microrrobot de flagelo de sección circular de la Figura 8. Como se puede observar, la longitud total del microrrobot es de 1 mm, siendo el diámetro del flagelo 20  $\mu\text{m}$ . Además de la cabeza en forma de elipsoide y el flagelo, la pieza está formada por dos soportes de 300  $\mu\text{m}$  de alto y 20  $\mu\text{m}$  de diámetro.

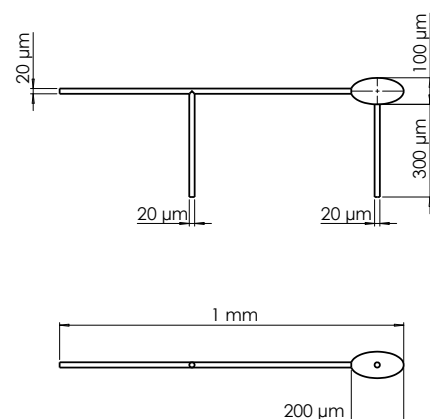


Figura 8: Modelo de un microrrobot de tipo espermatozoide para estudio de interacción con fluido

A partir de esta pieza, se va a realizar un estudio experimental para observar la interacción del

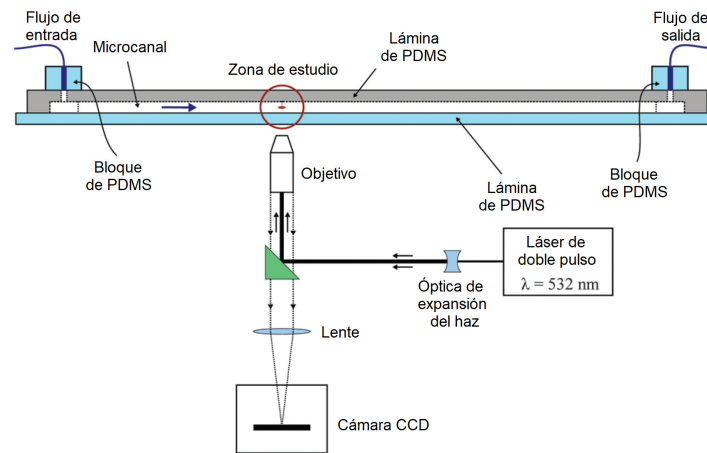


Figura 9: Esquema de la disposición del experimento

microrrobot con un fluido. El esquema de la disposición del experimento en el que se va a colocar el microrrobot está en la Figura 9. El robot se localizará en la zona de estudio, en el interior de un microcanal por el que se hará circular un fluido. La zona de estudio estará monitorizada mediante varios sistemas de visualización. Los soportes estarán unidos a la lámina de PDMS superior. Gracias a ellos se consigue un posicionamiento fijo en el experimento, intentando minimizar las posibles perturbaciones que la fijación a la lámina de PDMS pueda generar.

La fabricación se ha realizado utilizando el set de impresión pequeño, el objetivo de 63 aumentos y la resina IP-Dip. En cuanto al sustrato, el correspondiente al set de impresiones pequeñas sería el de sílice, sin embargo, para tratar de aumentar la adherencia de los soportes al sustrato, esta impresión se ha realizado sobre un sustrato de resina fabricado en una máquina convencional de impresión 3D de resina. Una fotografía del resultado se puede visualizar en la Figura 10, una vista en planta del resultado.

El postprocesado consistió en un baño de 12 minutos de PGMEA seguido de otro baño de isopropanol de 30 segundos de duración.



Figura 10: Fotografía del microrrobot de 1 mm

La fabricación de este microrrobot conllevó, también, una serie de problemas. En primer lugar, se

trató de utilizar el objetivo mediano, pero los soportes eran demasiado pequeños para este set y su fabricación no lograba ser estable. Por ello, se decidió realizar la impresión con el set de características pequeñas.

El flagelo es un gran desafío, al tratarse de una estructura que debe imprimirse en voladizo. Las primeras impresiones no conseguían que se fabricara correctamente, ya que parte del flagelo no quedaba correctamente conectado al resto de la estructura y se desprendía de la misma en los baños del postprocesado. Se consiguió realizar la impresión de forma correcta disminuyendo el tamaño de los bloques en el eje longitudinal del microrrobot, lo cual consigue que la cantidad de material que se imprima en voladizo en cada bloque disminuya, confiriendo estabilidad mecánica.

Por último, la impresión con un sustrato de resina no estandarizado ha dificultado la impresión, ya que la máquina no puede encontrar la interfaz entre el sustrato y la resina de forma automática, por lo que debe realizarse de forma manual.

## 4. CONCLUSIONES

El equipamiento que se ha descrito ofrece gran versatilidad en la fabricación de microrrobots y otros tipos de sistemas microelectromecánicos. En el futuro, se espera utilizar estos recursos para continuar la fabricación de microrrobots y otros tipos de MEMS.

## Agradecimientos

Este artículo ha sido financiado por la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura mediante el proyecto IB18109 y la "Ayuda a Grupos" GR18159, por la Agencia Estatal de Investigación mediante el proyecto PID2019-111278RB-C22 / AEI /



10.13039/501100011033, y por los Fondos Europeos de Desarrollo Regional “Una manera de hacer Europa”.

## English summary

## MICROROBOT MANUFACTURING: MEMSLAB AT UNIVERSITY OF EXTREMADURA

## Abstract

*Microrobotics is an emerging field of research with countless applications in industry, biology and medicine. Despite advances in the field, there are still considerable challenges including that of micrometer-scale robot manufacturing. The fabrication of microrobots benefits from advances in microelectromechanical systems (MEMS) manufacturing. This paper presents the equipment that forms the MEMS fabrication laboratory at Universidad de Extremadura (UEX), as well as examples of microrobot fabrication that have been carried out.*

**Keywords:** Microrobot, MEMS, two-photon polymerization.

## Referencias

- [1] J. J. Abbott, O. Ergeneman, M. P. Kummer, A. M. Hirt, and B. J. Nelson. Modeling magnetic torque and force for controlled manipulation of soft-magnetic bodies. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(6):1247–1252, dec 2007.
- [2] G. Adam, A. Benouhiba, K. Rabenorosoa, C. Clévy, and D. J. Cappelleri. 4D Printing: Enabling Technology for Microrobotics Applications. *Advanced Intelligent Systems*, 3(5):2000216, may 2021.
- [3] T. Bückmann, N. Stenger, M. Kadic, J. Kaschke, A. Frölich, T. Kennerknecht, C. Eberl, M. Thiel, and M. Wegener. Tailored 3D Mechanical Metamaterials Made by Dip-In Direct-Laser-Writing Optical Lithography. *Advanced Materials*, 24(20):2710–2714, may 2012.
- [4] P. Dario, R. Valleggi, M. C. Carrozza, M. C. Montesi, and M. Cocco. Microactuators for microrobots: A critical survey, 1992.
- [5] A. C. Fischer, M. Mäntysalo, and F. Niklaus. Inkjet Printing, Laser-Based Micromachining and Micro 3D Printing Technologies for MEMS. In *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies: Second Edition*, pages 550–564. Elsevier Inc., jan 2015.
- [6] V. Hahn, P. Kiefer, T. Frenzel, J. Qu, E. Blasco, C. Barner-Kowollik, and M. Wegener. Rapid Assembly of Small Materials Building Blocks (Voxels) into Large Functional 3D Metamaterials. *Advanced Functional Materials*, 30(26):1907795, jun 2020.
- [7] I. S. Khalil, H. C. Dijkslag, L. Abelmann, and S. Misra. MagnetoSperm: A microrobot that navigates using weak magnetic fields. *Applied Physics Letters*, 104(22):223701, jun 2014.
- [8] E. Lauga and T. R. Powers. The hydrodynamics of swimming microorganisms. *Reports on Progress in Physics*, 72(9):96601, aug 2009.
- [9] B. J. Nelson, L. Dong, and F. Arai. Micro-/nanorobots. In *Springer Handbook of Robotics*, pages 671–711. Springer International Publishing, jan 2016.
- [10] B. J. Nelson, I. K. Kaliakatsos, and J. J. Abbott. Microrobots for minimally invasive medicine, aug 2010.
- [11] S. K. Saha, C. Divin, J. A. Cuadra, and R. M. Panas. Effect of proximity of features on the damage threshold during submicron additive manufacturing via two-photon polymerization. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 5(3), sep 2017.
- [12] A. Selimis, V. Mironov, and M. Farsari. Direct laser writing: Principles and materials for scaffold 3D printing, jan 2015.
- [13] Y. Tu, F. Peng, and D. A. Wilson. Motion Manipulation of Micro- and Nanomotors. *Advanced Materials*, 29(39):1701970, oct 2017.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



# Instrumentación de muletas de antebrazo para uso en la monitorización de marcha y movimiento

Marien Narváez  
marien.cristina.narvaez@upc.edu

Joan Aranda  
joan.aranda@upc.edu

## Resumen

*Los dispositivos sensorizados en el ámbito de la rehabilitación física, proveen información cuantificable que le permiten al terapeuta conocer de forma objetiva el estado o evolución de la terapia del paciente. Para este estudio, fueron instrumentadas dos muletas de antebrazo que permitieron monitorizar tres tipos de marcha de cinco sujetos sanos. Cada prototipo es capaz de medir la fuerza axial aplicada por las extremidades superiores a la muleta y la orientación y aceleración de la misma, para cada ciclo de marcha en un patrón preestablecido. Con los datos obtenidos se analizaron características críticas de la marcha que permitirían potencialmente cuantificar el desempeño de la marcha y determinar la evolución del paciente en un proceso de rehabilitación. Este sistema se presenta como una alternativa para el análisis de marcha con muletas y la individualización de la terapia, a través de la monitorización de los pacientes en su proceso de rehabilitación.*

**Palabras clave:** Muletas instrumentadas, tecnologías de asistencia, monitorización de la marcha, análisis de marcha

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la monitorización de las actividades de rehabilitación se ha incrementado notablemente debido a la evolución de los sistemas electrónicos y de comunicación en paralelo a las necesidades en la terapia física [1]. En este contexto, la evaluación confiable y funcional de la marcha humana y sus alteraciones implica el desarrollo de diversos mecanismos o instrumentos, tales como plataformas para medición de fuerzas, sistemas para análisis de movimiento 3D o sistemas de captura de datos usando sensores localizados sobre la persona, entre otros [2, 3].

Los dispositivos sensorizados proveen datos objetivos que pueden permitir al paciente y al terapeuta cuantificar la progresión en la terapia, además de ayudar en la toma de decisiones precisas para adaptar el tratamiento de acuerdo con los paráme-

tros medidos y estandarizar el protocolo del tratamiento que permita obtener resultados confiables, comparables y eficaces [2].

En el ámbito de la terapia física, las muletas de antebrazo son dispositivos diseñados para asistir en la marcha de personas cuando una de las extremidades inferiores requiere de asistencia y se utilizan individualmente o por pares [4]. Es bien sabido que el uso incorrecto de las muletas puede extender el proceso de rehabilitación y causar dolor o futuras lesiones [5, 6].

Estudios previos [8, 7, 9], muestran diversos prototipos para monitorizar actividades de rehabilitación a través de muletas instrumentadas. Estos, generalmente han sido diseñados para medir las fuerzas ejercidas por el paciente y la orientación y posición de las muletas. Sin embargo estos estudios no comparan los cambios en la marcha en la ejecución de diferentes patrones. El objetivo de este estudio es monitorizar la marcha en muletas y analizar los cambios en diferentes parámetros espacio- temporales para 3 patrones de marcha diferentes. En la primera parte de este artículo se describe la implementación del sistema, compuesto por sensores de bajo costo e instalado sobre un par de muletas de antebrazos, para medir la fuerza normal aplicada por las extremidades superiores y ángulos relevantes en el movimiento de la muleta. La siguiente sección trata de la marcha con muletas y los parámetros relevantes en este contexto. Más adelante se presentan los experimentos realizados para medir las variables de interés. Por último se discuten los resultados obtenidos y se plantean las conclusiones.

## 2. MULETAS INSTRUMENTADAS

Para este trabajo fueron instrumentadas un par de muletas con el objetivo de medir la fuerza axial, ángulos de orientación (inclinación y giro) de la muleta y la aceleración de la misma. Los ángulos son relativos a la muleta y el suelo. Estas variables son transferidas en tiempo real a un ordenador vía *Bluetooth*. La Figura 1 muestra un esquema del sistema propuesto.

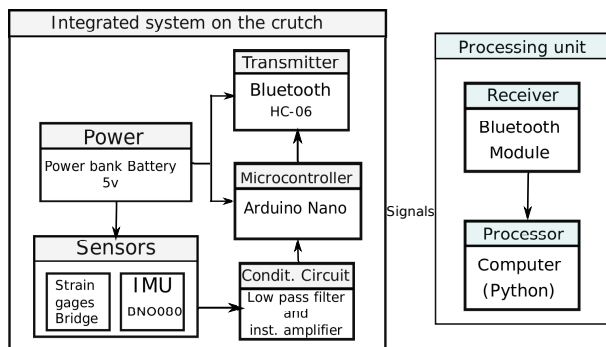


Figura 1: Sistema propuesto para cada muleta

## 2.1. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

La fuerza axial fue medida usando galgas extensiométricas instaladas en el mango de la muleta en una configuración de puente Wheatston. Estos sensores fueron calibrados usando cargas conocidas para obtener valores de fuerza en Newtons, mediante ensayos de pesos muertos en el mango de la muleta. Por otra parte, la orientación y aceleración de la muleta fueron medidas a través de una Unidad de Medición Inercial (IMU) BNO080 (*Sparkfun*). Las IMUs fueron calibradas a partir de los ejes establecidos (ejes  $z$  y  $x$ ) como se muestra en la imagen 2.

### 2.1.1. Adquisición de datos

Estas señales son adquiridas, filtradas y amplificadas usando un circuito de acondicionamiento que consiste en un filtro pasabajos y un amplificador de instrumentación (INA 126). Luego, a través de un microcontrolador estas señales son acondicionadas para ser transmitidas vía Bluetooth.

Los componentes fueron ensamblados en un circuito impreso alimentado por una batería externa de 5V, 2600mAh para cada muleta. El circuito está ubicado en una caja instalada debajo del mando de la muleta, como puede verse en la imagen 2. La información es procesada y almacenada en tiempo real en un ordenador estándar con un receptor Bluetooth externo. Los datos son adquiridos con una frecuencia de muestreo de 75 Hz. El proceso para la instrumentación de cada muleta fue el mismo.

## 2.2. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

El procesamiento de los datos obtenidos consiste en tres etapas: filtrado, segmentación de las fases de la marcha y obtención de las variables de interés.

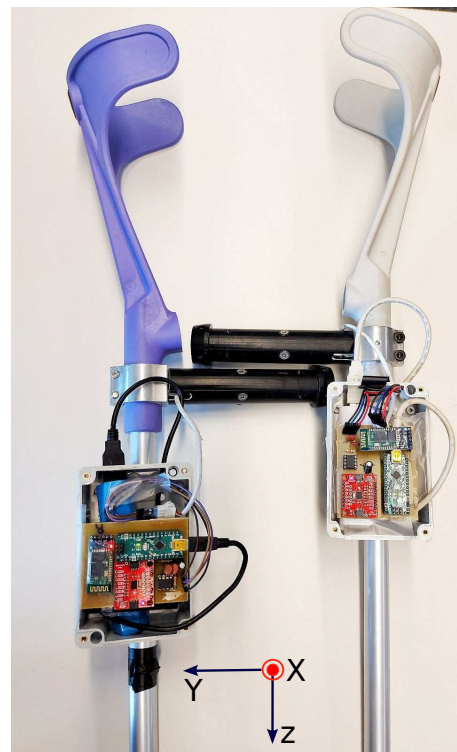


Figura 2: Muletas instrumentadas

Para atenuar las aceleraciones dinámicas medidas por las IMUs, fue implementado un filtro de media móvil, mientras que la señal de fuerza fue suavizada a través de un filtro Gaussiano para reducir los efectos del ruido analógico.

Posteriormente y tomando en cuenta la literatura estudiada, la señal es segmentada en las fases balanceo (*Swing*) y apoyo (*Stance*) de la marcha. Para ello, usamos como referencia el signo de la derivada del ángulo de inclinación en el sentido de la marcha (respecto al eje  $x$ ). El proceso de segmentación de la señal para cada tipo de marcha se describe detalladamente en [10].

Cada ejercicio de marcha fue segmentado en ventanas de 5 ciclos, donde se hallaron valores medios para cada variable de interés (fuerza máxima, inclinación y tiempos por ciclo de marcha). A partir de estas variables se calcularon parámetros característicos que son necesarios para el análisis de marcha.

## 3. ANÁLISIS DE MARCHA CON MULETAS

Tomando en cuenta estudios previos, el análisis de la marcha con muletas incluye la medición del rendimiento del usuario (respuestas físicas y fisiológicas) así como aspectos relacionados con la cinemática de la locomoción [16]. Por consiguiente es significativo el estudio de las fuerzas aplicadas

por las extremidades superiores, las cuales son responsables del desplazamiento del cuerpo en cada ciclo de marcha. También el análisis de variables como, ángulos de posición de la muleta, ratios de fuerza y tiempo entre las fases de *swing/stance*, velocidad y aceleración, entre otros. La fuerza ejercida, los ángulos de las muletas y la relación entre las fases dentro del ciclo de la marcha son parámetros esenciales para examinar el comportamiento de la marcha con muletas en función del patrón de marcha. Medidas de tiempo, tales como el tiempo de contacto pueden indicar un cambio en el patrón de marcha. Los ángulos de las articulaciones muestran la trayectoria de la muleta durante la marcha y la relación de fase y la relación *swing/ stance* compara el porcentaje relativo de cada postura o porción de swing durante un paso [16]. La marcha humana incluye progresiones cíclicas y repetitivas para cada extremidad inferior, alternadas entre la fase de balanceo y apoyo. Sin embargo factores como cambios fisiológicos, enfermedades neurodegenerativas, lesiones, etc. pueden comprometer la función de la marcha y afectar la capacidad del sistema neuromuscular para mantener un nivel constante de movilidad. Por lo tanto, evaluar las desviaciones de la marcha es una medida útil para la salud en general, la calidad de vida y como predictor de deterioro físico y cognitivo, entre otras [14].

Una de las formas de medir esta desviación es por medio del parámetro asimetría. Esta característica está asociada con la cantidad de divergencia entre el lado derecho e izquierdo del cuerpo. Asimetrías en la marcha pueden reflejar diferencias funcionales en la contribución de cada miembro en la propulsión y el control durante la locomoción.

Existen diferentes métodos [14, 15, 13] para determinar la asimetría en la marcha y que incluyen diversos parámetros. Para este trabajo fue escogido el Índice de Simetría o Índice de Robinson 1, el cual ha sido usado en trabajos como [15], para cuantificar la asimetría de las fuerzas de reacción.

$$SI = 2 \frac{|X_L - X_R|}{X_L + X_R} \quad (1)$$

En la ecuación 1,

$$X_L, X_R, >= 0$$

corresponde a la variable de la cual se pretende establecer el índice, L para el lado izquierdo y R para el lado derecho. Este índice fue utilizado en este trabajo para comparar las fuerzas máximas aplicadas por cada extremidad y los grados de inclinación máximos alcanzados por la muleta.

### 3.1. Tipos de marcha

Existen diferentes formas de caminar con muletas, cuya prescripción depende de la lesión o la condición física de un paciente. Los patrones de marcha dependen de la capacidad del usuario para mover los pies recíprocamente, tolerar cargas en cada pierna, levantar el cuerpo del suelo extendiendo los codos y presionando las manos y simultáneamente mantener el equilibrio [16]. En [10, 16] son descritos los tipos de marcha con muletas más utilizados. En este trabajo consideramos los siguientes tipos de marcha:

- Dos puntos (2p) : Se levantan simultáneamente una muleta y el pie opuesto, y luego la otra muleta y el pie contrario (pacientes con debilidad en ambas piernas, pero fuerza en ambos brazos).
- Tres puntos (3p): Se adelantan primero las dos muletas, seguido de la pierna en la que se tenga menos fuerza, y por último, el otro pie (pacientes que tienen toda la fuerza en una sola pierna).
- Cuatro puntos (4p): Se adelanta una de las muletas, luego el pie opuesto, seguido de la otra muleta, y finalizando con el otro pie (pacientes que tienen poca fuerza en las dos piernas).

En la Figura 3 se presenta la secuencia de los 3 patrones de marcha a ser analizados.

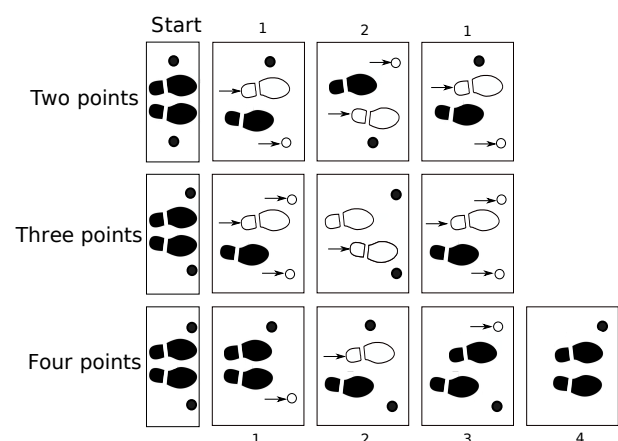


Figura 3: Secuencia de pasos para 3 patrones de marcha. Las áreas sombreadas representan la extremidad apoyada y sobre la cual recae el peso. Los números determinan el período en la secuencia de la marcha, cuando los puntos de contacto tocan el piso sincronamente. Las flechas indican el avance del pie o de la muleta. Imagen modificada de [16]

#### 4. PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Para la validación del sistema implementado en ambas muletas y la monitorización de diferentes tipos de marcha fueron realizados una serie de experimentos. En este estudio participaron 5 sujetos (edad promedio  $28.2 \pm 3.56$  años, estatura  $170 \pm 6.78$  cm,  $66.8 \pm 9.65$  kg) sin condiciones ortopédicas o dolor que modificaran su marcha. Ninguno de ellos había usado muletas previamente, por lo que fueron instruidos para ejecutar correctamente las marchas de 2, 3 y 4 puntos siguiendo la guía [12] y videos explicados por fisioterapeutas. Esto, para ser ejecutado en una distancia de 10 metros, lo que habitualmente genera un mínimo de 15 ciclos por ejercicio.

Los participantes caminaron 3 veces en cada uno de los patrones de marcha, simulando una lesión en la pierna derecha, por lo que no podían apoyar todo su peso en la misma. Entre cada ejercicio tenían un tiempo de descanso de 3 minutos.

#### 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados a continuación corresponden a 5 sujetos, quienes presentan diferencias antropométricas significativas. Los sujetos 1, 3 y 5 son mujeres con peso de 62.5 kg 55 kg y 64.2 kg, con estaturas de 162 cm y 166 cm y 163 cm respectivamente. Los sujetos 2 y 4 son hombres de 80 kg y 68 kg con estatura de 180 cm y 170 cm respectivamente.

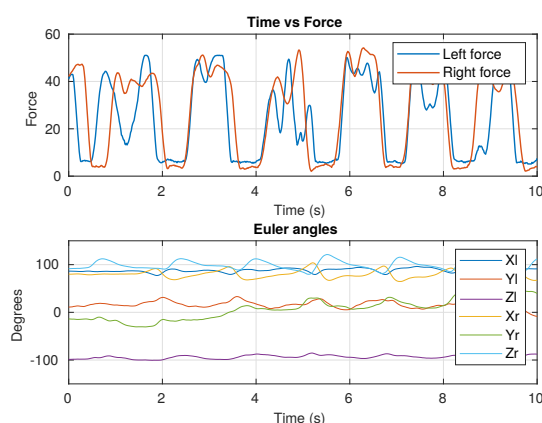


Figura 4: Medidas de fuerza y ángulos para 10s de marcha del Sujeto 1 ejecutando la marcha de 3 puntos. La gráfica superior representa la fuerza normal ejecutada sobre cada muleta. La gráfica muestra el movimiento de las muletas medido en grados, respecto a los ejes X, Y y Z. Las letras l y r, corresponden a izquierda y derecha respectivamente.

La gráfica 4 muestra las señales capturadas para 10 s de marcha con ambas muletas, ejecutando la marcha de 3 puntos. En este patrón de marcha ambas muletas avanzan en simultáneo lo cual puede notarse en los ciclos presentados en la imagen superior, los cuales corresponden aproximadamente a los mismos tiempos. Así mismo puede verse los ángulos de inclinación de la muleta medidos respecto al eje X, y dada la contra lateralidad de las muletas, en cada ciclo pueden verse movimientos opuestos. Con estos resultados, para este estudio se omitieron los ángulos medidos respecto a Z y Y por no representar medidas significativas. La Tabla 1, presenta los datos promedio para 3 tipos de marcha ejecutados por 5 individuos. De acuerdo con las medidas realizadas por el sistema en las muletas, la literatura estudiada y la asesoría por parte del personal médico, fueron considerados relevantes los parámetros: Fuerza Máxima, Inclinación máxima, y los ratios de fuerza y tiempo en las fases de *swing/stance*

Para los 3 individuos pueden determinarse diferencias entre las fuerzas y las inclinaciones máximas para el lado derecho e izquierdo.

Según la Tabla 1 en general, cuando el ángulo máximo de inclinación aumenta, el ratio *swing/stance* también lo hace, esto quiere decir que la persona emplea más tiempo en la fase de balanceo (*swing*). De acuerdo con estudios previos [16], sujetos en alguna condición de discapacidad física ejecutan la fase de apoyo (*stance*) en mayor tiempo debido a la falta de activación de la cadera y por tanto una flexión más lenta de la misma. También puede notarse que el *swing/stance* en general es mayor en la marcha de 4 puntos. Durante los experimentos pudo verse que este patrón es el que tiene más dificultad en su ejecución y el que se realiza de forma más lenta, pues requiere de coordinación de extremidades inferiores y superiores en cada paso. Dado que la marcha de 3 puntos implica el movimiento simultáneo de ambas muletas y el cuerpo se inclina hacia adelante más que con los otros patrones, las mayores fuerzas para los sujetos de estudio fueron aplicadas en este patrón de marcha.

La Tabla 1, permite establecer cuáles son los patrones de marcha con mayores asimetrías para cada individuo. Esta variable es cuantificada en la Tabla 2, que presenta los porcentajes de asimetría entre la fuerza y la inclinación máxima para cada caso. En estos primeros cálculos de asimetría fueron escogidas para análisis las características fuerza máxima e inclinación máxima. La fuerza máxima es un parámetro crítico para evaluar la ejecución de la marcha con las muletas, ya que permite ver la distribución del peso aplicado por

Cuadro 1: Comparación de parámetros de marcha para 3 sujetos. Las letras L y R para cada tipo de marcha corresponden a izquierda y derecha respectivamente. Los valores presentados son valores promedio.

Sujeto	Parámetro	2p L	2p R	3p L	3p R	4p L	4p R
S1	Fuerza máx (N)	46.73	47.98	54.07	53.01	51.39	54.38
	Inclinación (°)	24.08	26.08	32.01	24.66	27.23	25.14
	Ratio swing/stance (T)	0.46	0.66	0.59	0.62	0.69	0.69
	Ratio swing/stance (F)	0.2	0.18	0.24	0.32	0.7	0.69
S2	Fuerza máx (N)	80.68	102.25	100.07	96.03	83.62	78.69
	Inclinación (°)	14.94	12.11	17.02	14.9	17.26	18.68
	Ratio swing/stance (T)	0.42	0.46	0.49	0.41	0.74	0.67
	Ratio swing/stance (F)	0.19	0.2	0.47	0.29	0.41	0.46
S3	Fuerza máx (N)	48.67	44.67	59.6	60.47	49.37	50.53
	Inclinación (°)	15.21	17.79	17.61	17.59	17.25	20.35
	Ratio swing/stance (T)	0.37	0.66	0.7	0.75	0.63	0.62
	Ratio swing/stance (F)	0.19	0.23	0.38	0.43	0.49	0.38
S4	Fuerza máx (N)	55.88	51.5	60.46	59.54	59.88	55.33
	Inclinación (°)	22.27	20.55	18.44	19.58	22.42	24.84
	Ratio swing/stance (T)	0.47	0.49	0.58	0.63	0.66	0.71
	Ratio swing/stance (T)	0.22	0.24	0.35	0.29	0.68	0.65
S5	Fuerza máx (N)	47.31	49.94	60.03	65.81	60.28	63.29
	Inclinación (°)	17.27	16.12	21.99	17.26	17.25	25.42
	Ratio swing/stance (T)	0.52	0.68	0.62	0.62	0.63	0.65
	Ratio swing/stance (F)	0.24	0.28	0.39	0.33	0.64	0.66

Cuadro 2: Valores de asimetría expresados en porcentajes usando el índice de Robison 1

Sujeto	Parámetro	2p	3p	4p
S1	Fuerza	2.63	1.97	5.65
	Inclinación	7.97	25.95	7.98
S2	Fuerza	23.58	4.12	6.07
	Inclinación	20.91	13.28	7.90
S3	Fuerza	8.57	1.45	2.32
	Inclinación	15.64	0.06	16.47
S4	Fuerza	8.16	1.53	7.90
	Inclinación	8.03	0.06	10.24
S5	Fuerza	5.41	9.19	4.87
	Inclinación	6.89	24.1	32.57

las extremidades superiores y de esta forma determinar cambios en la terapia y evitar lesiones, entre otros aspectos que corresponden al análisis clínico. La inclinación permite establecer el inicio y fin de un ciclo de marcha, de acuerdo con el análisis hecho en trabajos previos.

De acuerdo con la tabla 2 los valores de asimetría varían de modo importante para cada sujeto, en un tipo de marcha. Por ejemplo el Sujeto 2, quien presenta características de peso y altura mayores comparado con los otros participantes, tuvo difi-

cultad en la ejecución del patrón de dos puntos, tanto en la distribución de la fuerza como en el movimiento de la muleta. En general, el parámetro con mayores valores de asimetría es el grado de inclinación máximo de la muleta ejecutado por cada sujeto, relacionado con el movimiento en la ejecución del patrón de marcha y con la postura que podría adoptar la persona con las muletas. Por otra parte, al parámetro de la fuerza máxima le corresponden los valores más bajos de simetría, con lo que puede determinarse que los sujetos distribuyeron su fuerza en ambas extremidades de forma más efectiva. Al tratarse de individuos sin lesiones reales puede deducirse que la distribución de fuerza incluyó las extremidades inferiores y no se recibió la mayor parte del apoyo en los brazos. Ya que de acuerdo con la literatura y estudios pasados, la fuerza aplicada en el mango de las muletas corresponde a valores entre 111 % y 120 % del peso corporal aproximadamente.

## 5.1. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Entre las principales motivaciones de este trabajo, se encuentra la individualización de la terapia en el proceso de rehabilitación de usuarios con muletas. Este trabajo presentó la instrumentación de

un par de muletas para uso en la monitorización de la marcha y movimiento en sujetos sanos. De acuerdo con las asimetrías medidas más la observación directa de los ejercicios, los profesionales clínicos podrían determinar el nivel de la terapia en la que se encuentra el paciente, sugerir cambios en la ejecución del ejercicio o cambiar el patrón de marcha de acuerdo con la condición tratada. A pesar de que las pruebas hasta ahora han sido en el ambiente de laboratorio, los resultados obtenidos son útiles para comenzar experimentos dentro del ambiente clínico, en el que pueda monitorizarse los ejercicios bajo supervisión del terapeuta.

Los individuos en este estudio simulaban una lesión para ejecutar la marcha con muletas, y aunque fueron observados y entrenados, presentaron asimetrías de diferentes proporciones en la ejecución. Sin embargo, estos dos parámetros no son suficientes para evaluar la condición del paciente, puesto que los fallos en el desempeño en los patrones de marcha pueden deberse a diferentes factores. Por tanto se hace necesario la inclusión de más variables características de la marcha. En nuestras próximas investigaciones, usaremos el sistema en personas en condición de discapacidad física real, donde podrá hacerse una evaluación de la marcha, que permita ver la ejecución de los patrones de marcha y a largo plazo ver la evolución de los pacientes. Los trabajos futuros incluirán además la correlación de índices de simetría con condiciones y lesiones particulares, junto con el análisis de otras características en la marcha, tales como velocidad y aceleración.

#### Agradecimientos

Agradecemos a los voluntarios por la participación en los experimentos y al área de investigación del Hospital Sant Joan de Deu por la asesoría.

#### English summary

### INSTRUMENTED FOREARM CRUTCHES FOR USING IN GAIT AND MOVEMENT MONITORING

#### Abstract

*Sensorized devices in physical rehabilitation provide quantifiable information that allows the therapist to objectively know the status or evolution of the patient's therapy. For this study, two forearm crutches were instrumented that allowed monitoring three types of gait of five healthy subjects. Each prototype can measure the axial force applied by the upper extremities to the crutch*

*and its orientation and position for each gait cycle within a pre-established pattern. The results obtained show critical characteristics to analyse and evaluate the gait evolution and determine possible errors in the user's performance. This system is an alternative for gait analysis using crutches and a tool for individualising therapy through the monitoring of patients in their rehabilitation process.*

**Keywords:** Instrumented crutches, Assistive technologies, Gait monitoring, Gait analysis

#### Referencias

- [1] Do Nascimento L. M. S., Bonfati L. V., Freitas M. L. B., Mendes Junior J. J. A., Siqueira H. V., and Stevan S. L., "Sensors and systems for physical rehabilitation and health monitoring—a review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 15, pp. 1–28, 2020.
- [2] Muro-de-la-Herran A., García-Zapirain B., and Méndez-Zorrilla A., "Gait analysis methods: An overview of wearable and non-wearable systems, highlighting clinical applications," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 2, pp. 3362–3394, 2014.
- [3] Chamorro-Moriana G., Ridao-Fernández C., Ojeda J., Benítez-Lugo M., and Sevillano J. L., "Reliability and validity study of the Chamorro Assisted Gait Scale for people with sprained ankles, walking with forearm crutches," *PLoS One*, vol. 11, no. 5, pp. 1–12, 2016.
- [4] Edelstein, J.: 36 - canes, crutches, and walkers. *Atlas of Orthoses and Assistive Devices*, 5th Edn. Elsevier Inc. (2019)
- [5] Sardini, E., Serpelloni, M., Lancini, M.: Wireless instrumented crutches for force and movement measurements for gait monitoring. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 64(12), 3369–3379 (2015)
- [6] Capecci, D., Kim, S.H., Reed, K.B., Handzic, I.: Crutch tip for swing-through crutch walking control based on a kinetic shape. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, pp. 612–617 (2015)



- [7] Merrett G. V. , Ettabib M. A. , Hallett C. Peters, G., White N. M., “Augmenting forearm crutches with wireless sensors for lower limb rehabilitation,” *Measurement Science and Technology*, vol. 21, no. 12, 2010.
- [8] G. Chamorro-Moriana, J. L. Sevillano, and C. Ridaó-Fernández, “A compact forearm crutch based on force sensors for aided gait: Reliability and validity,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 6, pp. 1–15, 2016.
- [9] I. Sesar, A. Zubizarreta, I. Cabanes, E. Portillo, J. Torres-Unda, and A. Rodríguez-Larrad, “Instrumented Crutch Tip for Monitoring Force and Crutch Pitch Angle,” *Sensors*, vol. 19, no. 13, p. 2944, 2019.
- [10] Narváez M. and Aranda J. , “Gait Patterns Monitoring Using Instrumented Forearm Crutches,” *Computers Helping People with Special Needs*, 2020, pp. 402–410.
- [11] F. Rasouli and K. B. Reed, “Walking assistance using crutches: A state of the art review,” *J. Biomech.*, vol. 98, Jan. 2020.
- [12] Oxford University Hospitals NHS Trust. (2015). Using Elbow Crutches Instruction for patients.
- [13] Błazkiewicz, M., Wiszomirska, I., Wit, A. (2014). Comparison of four methods of calculating the symmetry of spatial-temporal parameters of gait. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 16(1), 29–35.
- [14] Viteckova, S., Kutilek, P., Svoboda, Z., Krupicka, R., Kauler, J., Szabo, Z. (2018). Gait symmetry measures: A review of current and prospective methods. *Biomedical Signal Processing and Control*, 42, 89–100.
- [15] Alves, S. A., Ehrig, R. M., Raffalt, P. C., Bender, A., Duda, G. N., Agres, A. N. (2020). Quantifying Asymmetry in Gait: The Weighted Universal Symmetry Index to Evaluate 3D Ground Reaction Forces. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8(October).
- [16] F. Rasouli and K. B. Reed, “Walking assistance using crutches: A state of the art review,” *J. Biomech.*, vol. 98, Jan. 2020.



© 2021 by the authors.  
 Submitted for possible  
 open access publication  
 under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# COMPRESIÓN DE DATOS DE TIPO REAL BASADA EN UN NOVEDOSO ALGORITMO DE CODIFICACIÓN PARA REDES NEURONALES DE IMPULSOS

Sergio Lucas, Ander Arriandiaga, Eva Portillo, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

slucas004@ikasle.ehu.eus

## Resumen

*En este trabajo se propone la compresión de datos de tipo real basada en un nuevo algoritmo de codificación para Redes Neuronales de Impulsos inspirado en la conocida modulación por ancho de pulso (PWM). Esta propuesta presenta una serie de ventajas como la simplicidad del algoritmo. Así, permite al usuario establecer el compromiso deseado entre calidad y consumo de recursos de memoria mediante la selección de un sencillo parámetro.*

**Palabras clave:** Redes Neuronales de Impulsos, codificación, decodificación, PWM, compresión.

## 1 Introducción

En los últimos años se ha producido un incremento en el protagonismo de las técnicas de Inteligencia Artificial (IA), no sólo a nivel industrial, donde esta tecnología lleva usándose desde 1980 [10], sino en una gran variedad de campos de aplicación.

Una de las técnicas más reconocidas dentro de la IA son las Redes Neuronales Artificiales (*Artificial Neural Networks*, ANN), las cuales tratan de imitar la estructura de las redes biológicas. El principal atractivo de las ANN reside en su capacidad de aprender y generalizar a partir de datos reales. Así, han sido ampliamente utilizadas de forma satisfactoria en problemas de clasificación y regresión. Sin embargo, las neuronas artificiales tradicionales quedan muy lejos de imitar a las reales, siendo su coste energético y de memoria muy superior al de las redes neuronales biológicas.

Las neuronas biológicas se comunican mediante series de impulsos eléctricos. Todos estos impulsos son iguales entre sí, por lo que se concluye que la información no está codificada en la forma de la acción potencial, sino en el número y la distribución temporal de los impulsos [5], es decir, la importancia radica en cuándo suceden los impulsos. Con el objetivo de imitar con mayor fidelidad a estas neuronas biológicas ha surgido la tercera generación de redes o también conocidas como Redes Neuronales de Impulsos (*Spiking Neural Net-*

*works*, SNN). A diferencia de los modelos ANN, en este tipo de redes la información no se codifica en valores analógicos, sino en series de impulsos o *spikes*.

Debido a que su codificación se basa en la distribución temporal de los impulsos, las SNN poseen características innatas para manipular la información temporal. Así, las SNN han sido ampliamente utilizadas en la clasificación de datos temporales en múltiples campos, como pueden ser la compresión y reconstrucción de imágenes [14] o la detección y clasificación visual de objetos [6]. Sin embargo, apenas se ha producido algún avance para modelar evoluciones temporales mediante SNN en problemas de regresión, estando los pocos trabajos [15][16] realizados hasta la fecha más enfocados a la clasificación y sin que se realice en ellos una reconstrucción de los impulsos en las señales analógicas originales.

La razón principal de estas limitaciones radica en la falta de algoritmos capaces de codificar y reconstruir o decodificar con precisión las señales analógicas en impulsos, o viceversa. Por tanto, la codificación y decodificación se trata de uno de los principales retos de las SNN. Así, entre los diferentes enfoques de codificación existentes, se destaca la codificación basada en frecuencia (*rate coding*) y la codificación temporal (*temporal coding*).

La codificación frecuencial se basa en el número de impulsos sucedidos en ventanas de tiempo móviles. Aunque está ampliamente extendido su uso, trabajos recientes [12][13] sostienen que la codificación basada en tiempo contiene información relevante sobre la señal original, a diferencia de este tipo de codificación. La codificación basada en tiempo se basa en la distancia temporal entre impulsos. Sin embargo, los métodos propuestos también presentan una serie de inconvenientes, debido a que, o bien presentan errores significativos en el proceso de decodificación, o directamente no contemplan este proceso, el cual es necesario para afrontar los problemas de regresión.

En este sentido, en este artículo se propone una novedosa estrategia de compresión de datos de

tipo real basada en un nuevo algoritmo de codificación para Redes Neuronales de Impulsos. El algoritmo de codificación y decodificación es un algoritmo basado en tiempo y está inspirando en la conocida modulación por ancho de pulso (*Pulse Width Modulation, PWM*).

El resto del artículo está estructurado de la siguiente forma: en la sección 2, se presenta el algoritmo de codificación basado en PWM, incluyendo su diseño, sus parámetros y un ejemplo de aplicación. En la sección 3 se detalla la propuesta de compresión objeto de este artículo. Por último, en la sección 4 se exponen las conclusiones.

## 2 Algoritmo de codificación basado en PWM (PWM-SNN)

### 2.1 Diseño del algoritmo PWM-SNN

El PWM se trata de una de las técnicas más comunes en electrónica de potencia para realizar la conversión analógica a digital. Para ello, se comparan dos señales: a) la señal de referencia  $r(t)$ , que es la señal a convertir o modular; b) una señal portadora  $c(t)$ , la cual es periódica y donde habitualmente se emplea una onda triangular o diente de sierra. La forma de calcular la señal PWM se puede resumir en:

$$PWM(t) = f(x) = \begin{cases} 1, & \text{si } r(t) \geq c(t) \\ 0, & \text{si } r(t) \leq c(t) \end{cases} \quad (1)$$

La idea subyacente en el algoritmo de codificación que se presenta en este trabajo se basa en emplear la metodología PWM tanto en la codificación de los impulsos o spikes, como en la decodificación o reconstrucción de la señal original. Así, en la codificación, primero, se calcula la señal PWM correspondiente a la señal de referencia analógica y, posteriormente, se considera cada uno de los flancos ascendentes como un spike, es decir, el spike se produce en la intersección entre la señal de referencia y la portadora periódica (este proceso se puede ver en la Figura 1a). Visto el proceso de codificación, se puede deducir que cada spike se genera respecto a un punto de referencia en el tiempo (*Reference Time Point, RTP*), punto en el que la señal portadora  $c(t)$  adquiere el valor 0. Consecuentemente, cuanto mayor sea la amplitud de la señal de referencia  $r(t)$ , más lejos del RTP se genera el spike. Por el contrario, a menor amplitud de  $r(t)$ , más cerca del RTP se genera el spike.

En cuanto a la decodificación se aplica el método explicado anteriormente pero a la inversa. Esto se puede realizar debido a que se emplea la misma señal periódica para codificar y decodificar. En el

caso de la decodificación se parte de los spikes y de la señal portadora, se calculan los valores discretos de la señal original reconstruida mediante la intersección entre los spikes y la señal portadora y, por último, una vez calculados todos los valores discretos, se calculan el resto de los valores de la señal original mediante interpolación. Este proceso se visualiza en la Figura 1b.

Los métodos existentes de codificación para SNN no permiten calcular un spike por cada paso de tiempo [3], siendo ésta una condición indispensable para afrontar problemas de predicción o regresión. Mediante el método PWM-SNN propuesto siempre y cuando la señal de referencia se encuentre en el rango de la portadora, se produce una intersección entre las señales y, por tanto, se produce un spike en cada paso de tiempo, solventando uno de los principales problemas presentes en el campo de las SNN. Además, este método dispone de una serie de parámetros que permiten aumentar o disminuir la precisión de los resultados y el coste computacional [2].

### 2.2 Parámetros del algoritmo PWM-SNN

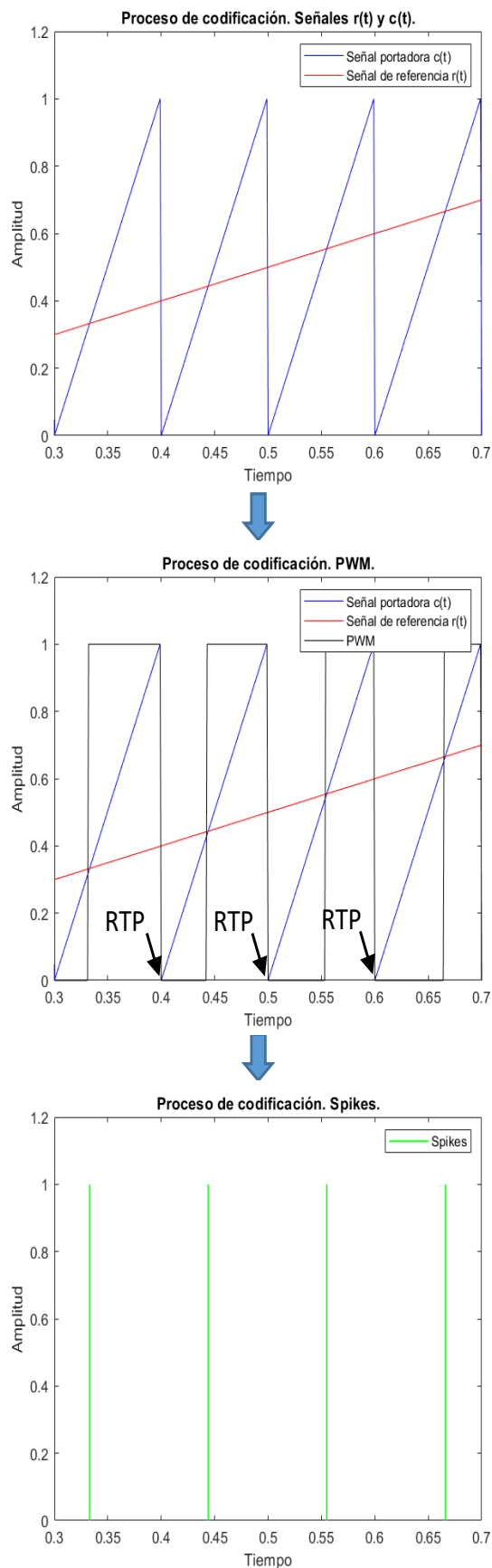
Una de las principales ventajas del método de codificación PWM-SNN presentado es que se trata de un método fácilmente parametrizable, pudiéndose reconstruir la señal con gran precisión.

En el método PWM-SNN se emplean dos señales. La señal de referencia se considera a la señal que se debe convertir o modular y viene impuesta por el problema o proceso con el que se esté trabajando. La segunda señal se trata de la señal portadora o *carrier*, la cual es una señal periódica y donde habitualmente se emplea una señal triangular o diente de sierra, como es el caso de la Figura 1. Esta segunda señal se va a poder parametrizar en función de las características de la señal de referencia.

La primera consideración a tener en cuenta de la señal portadora es su amplitud. Como se ha comentado anteriormente es muy importante que la señal de referencia se encuentre en el rango de la portadora, para poder compararlas y calcular de esta forma un spike por cada paso de tiempo. Así, en un primer paso se debe normalizar la señal de referencia entre los valores 0 y 1 y definir la señal portadora en el mismo rango.

Por otra parte, en el método PWM-SNN presentado se emplean dos parámetros que permiten modelar la señal portadora para ajustar el nivel de precisión de la reconstrucción: 1) el número de ondas de la señal portadora ( $nc$ , *number of carrier waves*), el cual se encuentra directamente relacionado con el ancho del pulso; 2) el número

### a) Codificación:



### b) Decodificación:

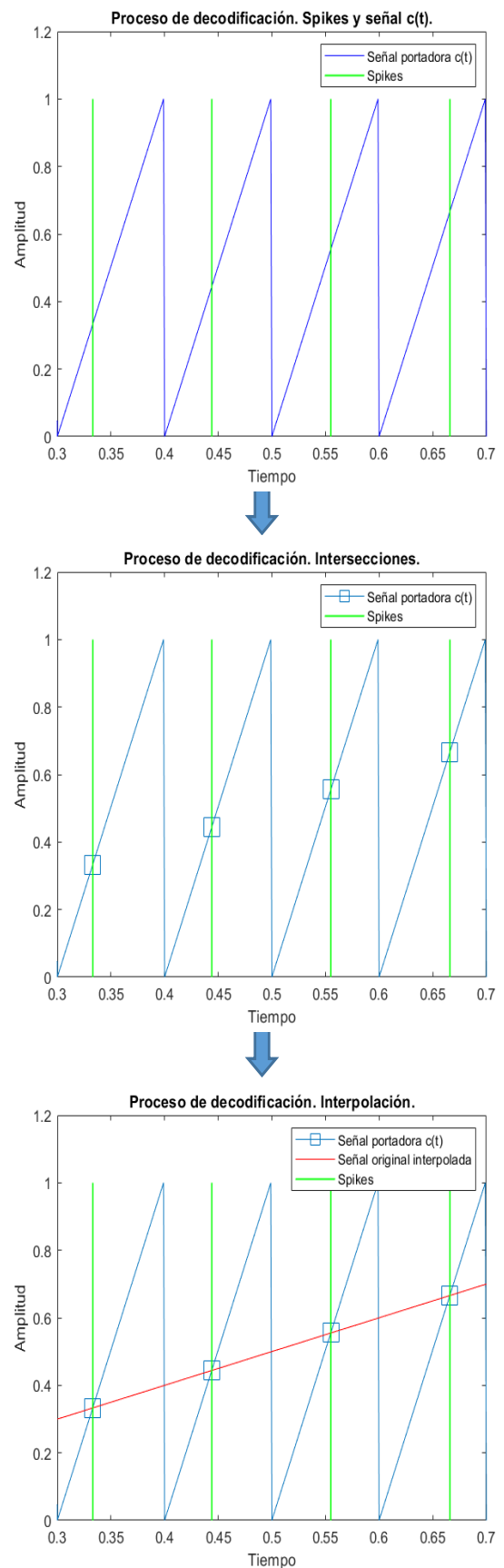
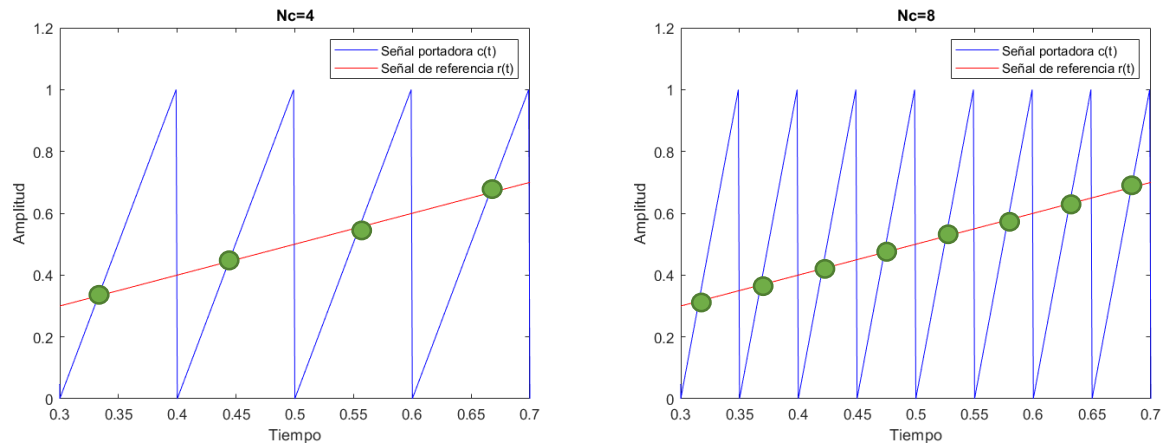


Figura 1: Resumen procesos codificación y decodificación

Figura 2: Comparación  $nc=4$  y  $nc=8$ 

de puntos por onda de la señal portadora ( $npc$ , *number of points per carrier wave*).

El número de ondas  $nc$  o ancho del pulso se encuentra directamente relacionado con la tasa de muestreo de la señal original  $r(t)$ . De acuerdo con el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, una función  $x(t)$  con un ancho de banda limitado  $W$  puede ser reconstruida de forma exacta si se emplea una tasa de muestreo superior a  $2W$  [17]. Así, en el muestreo tradicional un método empleado muy común consiste en multiplicar la señal analógica  $x(t)$  por una señal de muestreo  $s(t)$ , basada en una serie de impulsos Delta de Dirac distribuidos a intervalos regulares, de manera que se captura un valor de  $x(t)$  por impulso.

En este sentido, el PWM se puede entender como un equivalente a un método clásico de muestreo [7]. Sin embargo, en vez de muestrear por cada impulso (Delta de Dirac), se muestrea utilizando la señal portadora. Un buen algoritmo de codificación se distingue porque devuelve una señal reconstruida prácticamente idéntica a la original. Esto en el algoritmo presentado se consigue seleccionando un correcto valor de  $nc$ , asegurando un correcto muestreo y, con ello, una correcta reconstrucción. En la Figura 2 se puede visualizar el proceso de muestreo de una señal de referencia con dos valores distintos de  $nc$ . Para la selección de este parámetro se decide seleccionar un valor de  $nc$  igual al número de puntos o muestras adquiridas (menos uno) disponibles en un fichero digitalizado. Lo que es lo mismo, se elegirá una anchura de pulso igual al periodo de muestreo seleccionado por el experto de dominio en el caso de aplicación específico.

Otro factor que se debe tener en cuenta es la res-

olución, la cual se define como el mínimo cambio que se es capaz de detectar e influye en la precisión de la señal reconstruida. Así, en el caso del PWM-SNN este mínimo cambio se determina por el número de puntos de la señal portadora, es decir, por el segundo parámetro objeto de estudio, el  $npc$ . De esta forma, el  $npc$  se encuentra directamente relacionado con la resolución de la señal y determina el número de instantes posibles en los que se puede emitir el spike. En la Figura 3 se puede visualizar cómo a mayor  $npc$ , mayor cantidad de instantes posibles y, por tanto, mayor precisión se consigue en la señal reconstruida. Como hipótesis de partida se debe buscar un compromiso entre el  $npc$  y la finalidad de la aplicación, debido a que al aumentar el  $npc$ , a parte de incrementarse la precisión de la salida, también se aumenta el número de puntos de la señal portadora y con ello el coste de memoria.

### 2.3 Ejemplo de codificación

Para validar los resultados obtenidos con este algoritmo de codificación se va a emplear una base de datos formado por la grabación de voz de una persona. La grabación se corresponde con el discurso de una persona en la *Carnegie Mellon University ARTIC* [9].

Tabla 1: Listado de  $nc$  y  $npc$ 

Valores objeto de estudio					
$nc$	14120	28240	56480	112960	225920
$npc$	32	64	128	256	512

Se trata de una grabación adquirida con una frecuencia de muestreo de 32kHz durante 3,53 segundos, con lo que se dispone de un total de 112.960

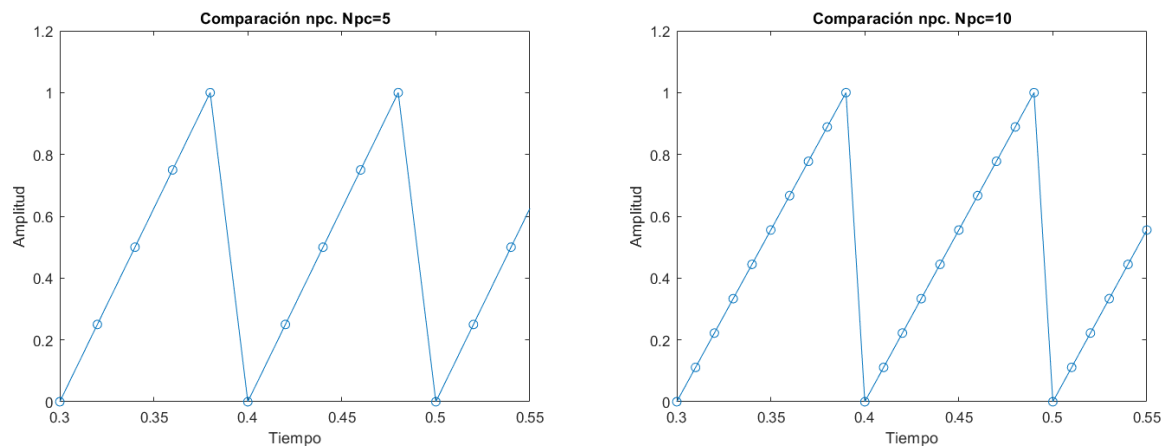


Figura 3: Comparación npc=5 y npc=10

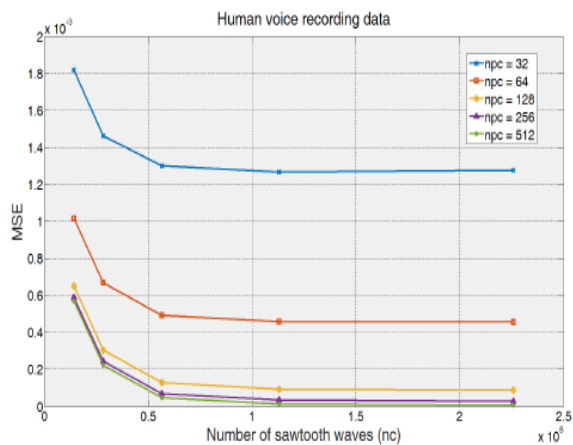


Figura 4: Error MSE con base de datos ARCTIC [2]

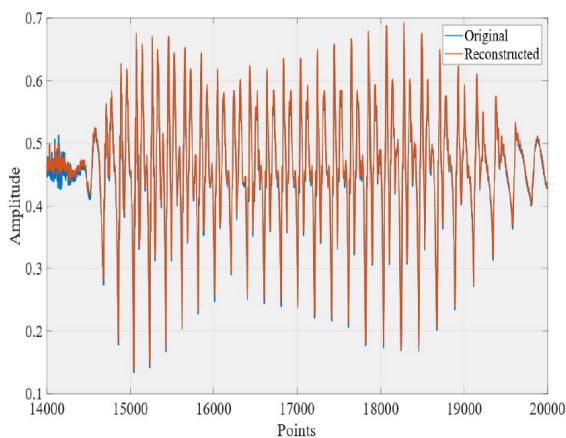


Figura 5: Comparación entre señal original y reconstruida para nc=56.480 y npc=256 [2]

muestras. El conjunto de valores de nc y npc que se van a estudiar son los que se representan en la Tabla 1.

Los errores medios cuadráticos cometidos (*Mean Square Error, MSE*) para la codificación y decodificación de la señal de la grabación de voz se visualizan en la Figura 4. Con este gráfico se verifica cómo con valores superiores a  $nc=112.960$  el incremento en la precisión es mínimo, lo cual confirma la hipótesis planteada en el apartado anterior. Aumentar el número de ondas nc por encima del número de muestras que se emplean, incrementa el número de puntos codificados, pero sin una mejora notoria en la reconstrucción de la señal. Además, para visualizar el proceso de reconstrucción se adjunta la Figura 5, donde se puede comprobar la diferencia entre la señal original y reconstruida para un  $nc=56.480$  y un  $npc=256$ .

Por tanto, una vez visualizados los resultados, exceptuando los casos donde se tienen unas fuertes restricciones de precisión y coste computacional, se recomienda el uso de un nc correspondiente con el periodo de muestreo utilizado para la adquisición de la señal.

### 3 Compresión de datos reales basada en PWM-SNN

Partiendo del nuevo algoritmo de codificación para Redes Neuronales de Impulsos PWM-SNN, esta sección presenta una aplicación basada en dicho algoritmo cuyo objetivo es comprimir datos de tipo real.

Así, esta propuesta presenta una nueva estrategia de compresión que ofrece la ventaja de que el ratio de compresión de datos  $C$  (ecuación 2) depende



únicamente del parámetro npc. En concreto, la estrategia de compresión se basa en almacenar la posición que ocupa cada spike dentro de la señal portadora, tal y como se ilustra en el ejemplo de la Figura 6. En este ejemplo, para un valor de npc igual a 8, el valor pasa a ocupar 3 bits tras aplicar esta estrategia.

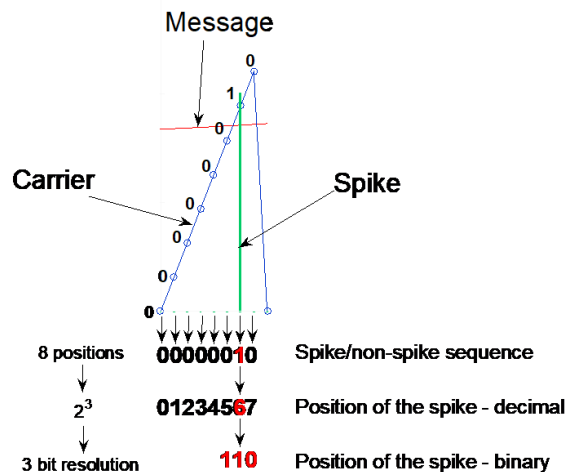


Figura 6: Compresión de los datos para la codificación PWM [2]

Los algoritmos de compresión de datos se dividen en dos tipos: sin pérdida (*lossless*) y con pérdida (*lossy*) [1]. Mientras los primeros permiten la recuperación exacta de los datos originales, los segundos pierden información original durante el proceso de compresión, con lo que no permiten la recuperación completa de los datos originales.

La mayoría de los trabajos sobre compresión de datos de doble precisión (double-precision floating-point format IEEE754) se basan en algoritmos lossless porque se suele tratar de aplicaciones de gran precisión, donde se requiere una exactitud elevada [11]. En la mayor parte de los métodos propuestos se emplean predicciones lineales y se codifican los residuos más pequeños, empleando variantes de códigos de longitud variable no estadísticos [4], o estadísticos [8]. Aunque su uso es importante en ciertas aplicaciones, con los métodos lossless raramente se consigue alcanzar ratios de compresión superiores a 1.5 en datos de doble precisión [11].

En este sentido, el algoritmo de compresión presentado se puede considerar lossless o lossy dependiendo de las preferencias del usuario. Para muestra de ello, se muestra en la Tabla 2 los ratios de compresión C, definiendo C como el ratio entre el tamaño original de los datos y el tamaño tras la

compresión.

$$C = \frac{\text{Tamaño sin comprimir}}{\text{Tamaño comprimido}} \quad (2)$$

Para ello, como es habitual, se toma como referencia el estándar IEEE 754, en concreto, los conocidos *single-precision floating-point format (binary 32)* y *double-precision floating-point format (binary 64)*, con tamaño sin comprimir igual a 32 y 64 bits, respectivamente. El tamaño comprimido corresponde al número de bits requeridos para codificar la posición del spike de la señal portadora, lo que depende directa y únicamente del valor del parámetro npc seleccionado por el usuario. Por tanto, a mayor resolución o valor npc, menor será el valor de C.

Tabla 2: Variación del ratio de compresión C en función del parámetro resolución (npc)

Número de puntos por onda (npc)	Resolución (bit)	Ratio de compresión C (N bit/resolución)	
		Binary32	Binary64
16	4 Lossy	8	16
32	5	6.4	12.8
64	6	5.33	10.66
128	7	4.57	9.14
256	8	4	8
512	9	3.55	7.11
1024	10 Lossless	3.2	6.4

En términos de algoritmos de compresión, esta propuesta presenta una serie de ventajas como son la simplicidad del algoritmo y la escalabilidad SNR, permitiendo al usuario establecer el equilibrio deseado entre calidad y consumo de recursos de memoria. Así, esta propuesta supone incrementar la eficiencia de la implementación hardware en coste de memoria.

Por tanto, se ha diseñado el algoritmo de compresión basándose en la estrategia arriba expuesta, de manera que los datos comprimidos puedan ser almacenados en el disco duro en un computador de destino (u otro soporte de memoria secundaria).

La implementación persigue almacenar en memoria RAM de manera consecutiva las sucesivas secuencias comprimidas de n bits aprovechando la palabra de memoria al completo. El valor de n corresponde a la resolución elegida tal que  $npc = 2^n$ .

Una vez almacenados los datos de tal forma en memoria RAM, es posible almacenar de forma permanente dichos datos comprimidos mediante el almacenamiento en fichero binario.

Esta implementación se ha programado en Python para longitudes de palabra de 32 bits, si bien es fácilmente extensible/parametrizable para 64 bits.

En la implementación se ha hecho especial uso de la función `bin()` de Python, la cual devuelve el string binario equivalente al valor del tipo Integer de entrada. Así, dicho valor de tipo Integer representa la posición del spike en la señal portadora, de manera que esta posición, una vez convertida a tipo binario, se almacena tras el anterior valor comprimido en un array del mismo tipo, cuyo número de columnas es igual a la longitud de la palabra. Siguiendo con el ejemplo de la Figura 6, para  $\text{npc}=8$ ,  $n=3$ , cada valor deberá ocupar dentro de la palabra de memoria 3 bits. Suponiendo que se desean almacenar los valores comprimidos de 5 señales portadoras en un plataforma de longitud de palabra 8 bit, la hipotética secuencia comprimida quedaría como se muestra en la Figura 7, donde  $V_{k,c}$  hace referencia al vector que contiene los  $k$  valores comprimidos, siendo  $k=5$  en el ejemplo.

$V_{k,c} = [110, 010, 001, 100, 101];$

1	1	0	0	1	0	0	0
1	1	0	0	1	0	1	

Figura 7: Ejemplo de implementación del almacenamiento de la extensión de compresión

## 4 Conclusiones

En este artículo se ha propuesto una nueva estrategia de compresión de datos de tipo real basada en un nuevo algoritmo de codificación y decodificación de datos analógicos en spikes, PWM-SNN. El algoritmo PWM-SNN permite codificar un spike por cada paso de tiempo, permitiendo así poder hacer reconstrucciones muy precisas de la señal original y afrontar problemas de regresión mediante Redes Neuronales de Impulsos.

Respecto a la propuesta de compresión de este artículo, como posibles trabajos futuros a realizar se deben destacar:

1. Desarrollar una interfaz sencilla que permita un correcto y fácil uso del algoritmo de compresión.
2. Analizar con detalle las capacidades de compresión del algoritmo, comparándolo con otros algoritmos reconocidos en la literatura, como pueden ser los compresores GZIP, FPZIP, ZFP, ZLIB, etc.
3. Realizar una búsqueda de bases de datos para seleccionar las más adecuadas para poder llevar a cabo dicho estudio comparativo (base de datos de imágenes, audio, etc.).

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad del País Vasco UPV/EHU (GIU19/045) y el Departamento de Educación del Gobierno Vasco (PIBA\_2020\_1\_0008).

## English summary

### REAL DATA COMPRESSION BASED ON A NOVEL ENCODING ALGORITHM FOR SPIKING NEURAL NETWORKS

## Abstract

*This article proposes a real data compression approach based on a novel encoding algorithm for Spiking Neural Network, which is inspired by the well-known pulsewidth modulation (PWM). This proposal offers a number of advantages, such as algorithm's simplicity. In this sense, it allows the user to reach a compromise between accuracy and memory consumption by selecting a simple parameter.*

**Keywords:** Spiking Neural Network, encoding, decoding, PWM, compression.

## Referencias

- [1] H. Al-Bahadili. A novel lossless data compression scheme based on the error correcting Hamming codes. *Computers and Mathematics with Applications*, 56(1):143–150, jul 2008.
- [2] A. Arriandiaga, E. Portillo, J. I. Espinosa-Ramos, and N. K. Kasabov. Pulsewidth Modulation-Based Algorithm for Spike Phase Encoding and Decoding of Time-Dependent Analog Data. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 31(10):3920–3931, oct 2020.
- [3] A. Arriandiaga Laresgoiti. Recurrent Neural Network Based Approach for Estimating the Dynamic Evolution of Grinding Process Variables. Technical report, dec 2016.
- [4] M. Burtscher and P. Ratanaworabhan. High throughput compression of double-precision floating-point data. In *Data Compression Conference Proceedings*, pages 293–302, 2007.

- [5] W. M. Gerstner, Wulfram; Kistler. *Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity - Wulfram Gerstner, Werner M. Kistler - Google Libros*. Cambridge Edition Press, Cambridge.
- [6] R. Guyonneau, R. VanRullen, and S. J. Thorpe. Temporal codes and sparse representations: A key to understanding rapid processing in the visual system. *Journal of Physiology Paris*, 98(4-6 SPEC. ISS.):487–497, jul 2004.
- [7] J. Huang, K. Padmanabhan, and O. M. Collins. The sampling theorem with constant amplitude variable width pulses. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 58(6):1178–1190, 2011.
- [8] M. Isenburg, P. Lindstrom, and J. Snoeyink. Lossless compression of predicted floating-point geometry. In *CAD Computer Aided Design*, volume 37, pages 869–877. Elsevier, jul 2005.
- [9] J. Kominek, J. Kominek, A. W. Black, and V. Ver. CMU Arctic Databases for Speech Synthesis. 2003.
- [10] S. H. Liao. Expert system methodologies and applications-a decade review from 1995 to 2004. *Expert Systems with Applications*, 28(1):93–103, jan 2005.
- [11] P. Lindstrom. Fixed-rate compressed floating-point arrays. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 20(12):2674–2683, dec 2014.
- [12] V. Lopes-dos Santos, S. Panzeri, C. Kayser, M. E. Diamond, and R. Quiñero. Extracting information in spike time patterns with wavelets and information theory. *Journal of Neurophysiology*, 113(3):1015–1033, 2015.
- [13] M. A. Montemurro, S. Panzeri, M. Maravall, A. Alenda, M. R. Bale, M. Brambilla, and R. S. Petersen. Role of precise spike timing in coding of dynamic vibrissa stimuli in somatosensory thalamus. *Journal of Neurophysiology*, 98(4):1871–1882, oct 2007.
- [14] L. U. Perrinet, M. Samuelides, and L. Perrinet. Sparse Image Coding Using an Asynchronous Spiking Neural Network Long-range apparent motion processing in V1 View project Reinforcement and Eye movements View project Sparse Image Coding Using an Asynchronous Spiking Neural Network. Technical report, 2002.
- [15] D. Reid, A. J. Hussain, and H. Tawfik. Financial time series prediction using spiking neural networks. *PLoS ONE*, 9(8):e103656, aug 2014.
- [16] D. Reid, H. Tawfik, A. J. Hussain, and H. Al-Askar. Forecasting weather signals using a polychronous spiking neural network. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, volume 9225, pages 116–123. Springer Verlag, 2015.
- [17] C. E. Shannon. Communication in the Presence of Noise. *Proceedings of the IRE*, 37(1):10–21, 1949.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# MONITORING INTERFACES FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AND DC MICROGRIDS: BRIEF SURVEY AND APPLICATION CASE

Isaías González Pérez, Antonio José Calderón Godoy, José María Portalo Calero, Manuel Calderón Godoy  
Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, {igonzp, ajcalde, calgodoy}@unex.es

## Abstract

*Monitoring interfaces enable the interaction between the human operator and the monitored process. This role acquires special relevance for advanced scenarios like microgrids and renewable energies-based facilities, which involve a large amount of magnitudes and energetic interactions. This paper performs a brief survey about monitoring interfaces applied to DC microgrids and photovoltaic systems. The software environments that are used and graphical design aspects are studied and reported. Furthermore, an experimental case applying an open-source suite (Grafana) to a DC microgrid is expounded.*

**Keywords:** Monitoring, renewable energy, microgrid, photovoltaics, open-source, Grafana.

## 1 INTRODUCTION

Microgrids constitute small-scale intelligent energy grids combining distributed generation and management. To achieve autonomous and efficient operation, microgrids are equipped with a number of sensors, actuators, controllers and monitoring systems. In addition, microgrids commonly incorporate renewable energies in order to implement environmental-friendly facilities. In fact, microgrids show a great potential to increase the penetration of renewable energies [30]. In this sense, photovoltaic generation is a mature technology able to be integrated within microgrids with different size and configurations.

To provide a reliable and stable power supply, a control and monitoring system is needed to deal with the variability and uncertainty of renewable energies [9]. Monitoring and supervisory systems are signaled as an essential infrastructure to evolve towards an energy system based on decentralized generation [26]. Even more, deploying distributed monitoring and control systems is one of the main challenges in the Smart Grid scope [6].

A monitoring interface displays real-time data to the operator in order to inform about the microgrid operation. Information of the main magnitudes of the microgrid components are shown through numerical and graphical resources. Command sending and data logging are tasks also supported by monitoring systems. A Data Acquisition System (DAS) is required, being composed by a hardware board devoted to gather signals from sensors/actuators mounted in the microgrid. Figure 1 depicts the described general configuration for a microgrid.

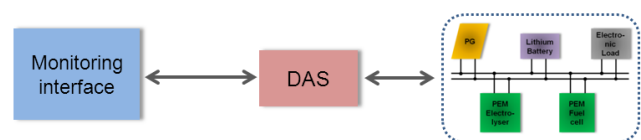


Figure 1: Block diagram of monitoring system applied to microgrid.

In this regard, an unstoppable trend consists on using open-source software and hardware to implement monitoring tasks. Low-cost, deep configurability and shared knowledge in the Internet are advantages associated to this type of technology. For instance, web-enabled platforms like Grafana [13], Thingier.io [15] and Angular [14] are used for monitoring tasks. About hardware resources, platforms for rapid electronics prototyping like Arduino [16], a microcontroller-based board, and the microcomputer Raspberry Pi [17] are widely applied in a large number of scenarios [2, 4].

Despite the importance of the monitoring function in these infrastructures, there is scarce literature about the design and deployment of this type of interfaces. A valuable recent paper that reviews and evaluates different visualization methods used in Smart Grids is found in [24]. Such research highlights the key role of visualization to facilitate monitoring and analyzing tasks in intelligent power grids.

This paper performs a brief literature survey about monitoring interfaces applied to photovoltaic systems and DC microgrids. The aim of this work is to

provide an overview about the available monitoring software considering both proprietary and open-source options according to existing literature. Moreover, an application case of open-source software (Grafana) concerning a microgrid is expounded. Such a microgrid is framed in a R&D project about the development of digital replicas of smart microgrids based on renewable energies.

The structure of the rest of the article is as follows. The second section delivers an overview of the existing literature. In the third section, a set of design considerations for monitoring interfaces in microgrids are provided. Section 4 reports an open-source monitoring interface applied to a DC microgrid. Finally, the main conclusions of the conducted work are addressed.

## 2 BRIEF LITERATURE SURVEY

This section performs a literature survey about monitoring interfaces devoted to DC microgrids and photovoltaic systems. It must be noted that this work is not envisioned to present an in-depth review about monitoring systems for renewable energy-based facilities. As it has been previously indicated, the focus of this paper is solely put on photovoltaic systems and DC microgrids. There are very interesting works dealing with monitoring interfaces applied to AC microgrids as well as to hybrid power systems without photovoltaic generation; however, they have not been included in this survey.

In these scopes, a common practice consists on using software suites oriented to monitor/supervise industrial processes given their demonstrated reliability. Relevant examples are LabVIEW of National Instruments, WinCC of Siemens, and iFix of General Electric.

Another option is developing the interface with open-source software devoted to monitoring tasks, like ScadaBr, TangoControls or Grafana. These packages decrease or eliminate expenditures but require low-level configurations and higher programming expertise. Further considerations about both options can be found in [2, 11, 23, 28].

Through diverse search processes in scientific databases, a set of papers from journals and conferences have been reviewed and selected. In order to provide useful and summarized information, Table I has been elaborated. As it can be seen, the scope of application, the used monitoring software, and the inclusion of scheme/diagrams and time-series

plots are indicated. In some cases, in the managed paper there is no image of the developed interface so it is not known the type of implemented graphical representations. This situation is indicated in the table with NA (Not Available).

Table 1: Surveyed works and main features.

Work	Scope	Monitoring software	Scheme/ Diagram	Time-series plot
[1]	Photovolt aics	Thingier.io	No	Yes
[3]	Microgrid	LabVIEW	No	Yes
[5]	Microgrid	LabVIEW	No	Yes
[7]	Microgrid	WinCC	No	No
[8]	Microgrid	LabVIEW	No	Yes
[9]	Microgrid	WinCC	No	Yes
[10]	Microgrid	EJS	Yes	Yes
[12]	Photovolt aics	LabVIEW	No	Yes
[19]	Photovolt aics	LabVIEW	No	No
[20]	Photovolt aics	LabVIEW	Yes	Yes
[21]	Photovolt aics	emonCMS	No	Yes
[22]	Photovolt aics	PHP	No	Yes
[25]	Microgrid	LabVIEW	Yes	No
[27]	Microgrid	HTML5	NA	NA
[29]	Photovolt aics	Grafana	No	Yes
[31]	Microgrid	iFix	Yes	No
[32]	Microgrid	iFix	Yes	No

On the view of the conducted survey, the following conclusions can be delivered. To begin with, concerning the applied software environment for monitoring, Figure 2 illustrates graphically the percentage of usage of the evaluated packages. As can be observed, LabVIEW is the most used package, a fact also pointed out by other works [22]. On the other hand, open-source software is a serious trend, with a growing amount of applications in the considered scopes.

Regarding the hardware where the monitoring environment runs, it is a PC in the majority of systems. Nonetheless, open-source interfaces are usually executed in open-source hardware, mainly the microcomputer Raspberry Pi. About the style of the interface layout, a noticeably difference resides in the inclusion of schemes or diagrams of the monitored system. Only 5 of the reviewed contributions include a graphical representation of the physical system, commonly with a schematic



approach. Moreover, time-series charts are included in almost all the surveyed works, witnessing that these plots are essential for proper monitoring interfaces.

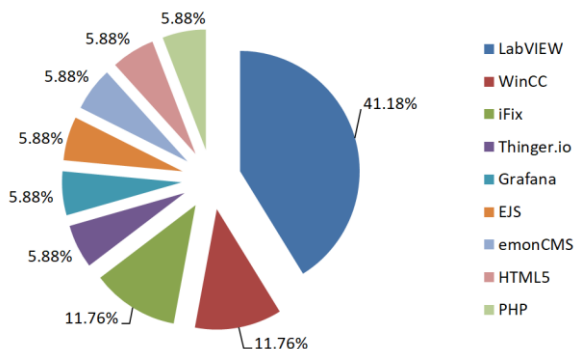


Figure 2: Percentage of usage of monitoring software in the surveyed works

### 3 DESIGN CONSIDERATIONS

This section contains a set of design considerations from the authors derived from the acquired expertise concerning monitoring systems applied to microgrids. Indeed, many of the commented aspects are also valid for monitored processes out of the energy scope.

Remote access to the monitoring system must be allowed. Nowadays, given the deep degree of penetration of Information and Communication Technologies (ICT), a monitoring interface must support on-line connections for tracking the microgrid at any moment from any place. In this regard, it must be noted that open-source solutions include by default this option, facilitating the remote visualization. On the other hand, proprietary solutions are increasingly providing apps for direct connection using smartphones. For example, the manufacturer of power equipment Victron Energy [18] offers an app to visualize the most relevant variables of the facilities involving its equipment, also accessible via web browser.

Another aspect is related to the schematic or synoptic representation of the monitored grid. The inclusion of synoptic diagrams facilitates the comprehension of the physical deployment of the microgrid. In addition, arrows or moving elements can be used to indicate the direction of the energy/hydrogen flow (from the bus to loads or from generators to the bus). Another option consists on modifying the colour of the connection lines in order to illustrate the direction changes.

A similar consideration for enhancing the human-machine interaction consists on representing the physical device by means of illustrative draws or photography instead of through general block diagrams. Thus, the user/operator perceives the nature of the physical equipment in a high degree.

An interesting decision is about using screens or tabs dedicated to subsystems with enhanced information. For instance, an overview of the core system parameters and magnitudes within the main screen, as well as particular screens for detailed numerical and graphical data of a component (load or generator). With this layout, the user rapidly views the most illustrative information at a glance and, also, search for particular data if interested.

Information about the communication network that links the hardware for data acquisition and the equipment where the monitoring interface runs is also relevant. Data about the successful connection from nodes in the network or crash events can be useful for monitoring the proper operation of the information exchange. This data can be provided in dedicated screens jointly with other information like alarms.

Weather information is commonly added to the provided data in order to illustrate the existing conditions, which, evidently, affect to the power generation. For instance, high wind speed reduces the temperature of photovoltaic modules, improving their performance.

User administration is also a general function of monitoring systems. By means of user authentication (name and password) a basic level of security is implemented. Different degrees of access and permissions should be established in order to differentiate from simple observers to advanced administrators of the microgrid. Additional information security measures must be taking into account given the increasing cyber-security threats. Nevertheless, these issues are out of the scope of this paper.

In the case of enabled connection/disconnection of equipment, for instance, a load, buttons or similar controls are given for the user to manipulate the device from the interface. A similar option consists on modifying setpoints through numerical fields, so the operator can directly write a value which is sent in real-time to the memory of the controller. When these manipulations are enabled, restrictive check loops must be implemented in order to avoid erroneous values which could damage the equipment. This issue is related to the user administration commented in the previous point.



Options provided to the operator can also be the selection of the storage file/database, the amount of magnitudes to include within a chart or even the time interval to visualize. In this regard, for graphical evolution over time of magnitudes, the considered interval is an important issue that can depend on the nature of such magnitude. For example, the variation of irradiance is generally slower than that of battery current. If the user can select the time interval, he/she is allowed to explore in real-time the behaviour over certain period. If this capability is not implemented, the operator will have to use the stored historical data.

The inclination degrees are not commonly shown in the interfaces, mainly due to the fact that the PV modules are fixed. In the case of tracking, to one or two axis, the interface should include this essential value.

Depending on the size of the facility, including geographical information in the form of GIS can be considered. In the case of DC microgrids, this information is not commonly provided.

Alarms and events are paramount requirements for any monitoring software. This feature is commonly included in the suites so the developer must configure thresholds and ranges over the monitored magnitudes in order to create alarms for anomalous situations or deviations of the expected behaviour.

Finally, an important requirement is that the software supports connectivity with open-source hardware and software. For example, LabVIEW can be connected to Arduino boards through the LIFA toolkit; Grafana can retrieve data from a large amount of database management systems like MariaDB, InfluxDB, PostgreSQL, etc. Besides, this connectivity can be achieved through open communication protocols like Open Platform Communications (OPC) or Modbus, widely incorporated in monitoring/supervisory software and also supported by open-source libraries. This characteristic is achieving increasing importance due to the aforesaid application of open-source technologies both for data acquisition and monitoring. Indeed, integration of commercial equipment with open-source tools also constitutes a prolific field of research within this scenario [8, 11].

## 4 APPLICATION CASE USING OPEN-SOURCE SOFTWARE IN DC MICROGRID

As indicated in the Introduction, within R&D context, a DC microgrid has been built with the corresponding monitoring interface. In this section,

the key features of the microgrid as well as the deployed interface are described.

### 4.1 DESCRIPTION OF THE DC MICROGRID

The DC microgrid integrates renewable generation through a Photovoltaic Generator (PG), a Lithium battery for energy storage and hydrogen. For hydrogen production a Polymer Exchange Membrane (PEM) electrolyser is used, whereas a PEM fuel cell consumes the accumulated hydrogen to supply the load. Such load is a programmable equipment in order to configure different load profiles and test the operation of the facility. An automation system collects data from a variety of sensors and implements an energy management strategy for a proper behaviour. Figure 3 shows the schematic diagram of the microgrid.

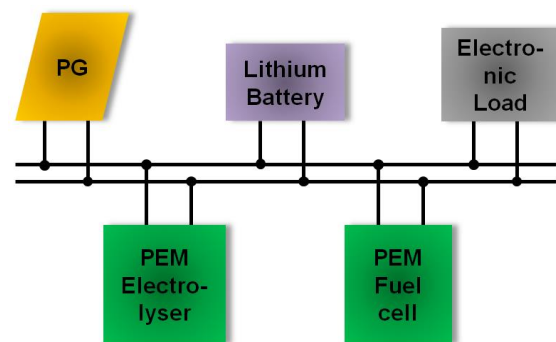


Figure 3: Diagram of the monitored DC microgrid.

### 4.2 MONITORING INTERFACE USING OPEN-SOURCE GRAFANA

In order to visualize in real-time the temperature of the modules that compose the PG, a monitoring interface has been implemented using Grafana. This software runs in a Raspberry Pi connected to an Arduino through an Ethernet network (see Figure 4). A set of digital sensors measure the temperature and send data to the Arduino, which transmits it to a database hosted by the Raspberry Pi. The Grafana dashboard collects this information and displays it in a friendly-manner to the user, which has established an on-line connection via web browser.



Figure 4: Deployed monitoring system using Grafana package.

The monitoring interface can be seen in Figure 5. It is composed by a time-series plot for the operator to observe the evolution of the sensed temperatures.

The shown data corresponds to 10 and 11 February, being the first one a sunny day, so the measured temperatures evolve following the typical variation of irradiance. The user is able to zoom in the plot as well as to choose the time interval to visualize. In addition, a gauge illustrates the instant value of one temperature in order to know at a glance such value. Other element that has been considered relevant is a table which provides metrics, namely, the current, minimum and maximum temperatures for each sensor.

Designing dashboards with Grafana is an easy task mainly due to the wide variety of in-built functions and available add-ons. Consequently, intuitive and attractive graphics can be deployed without long development times neither programming skills.

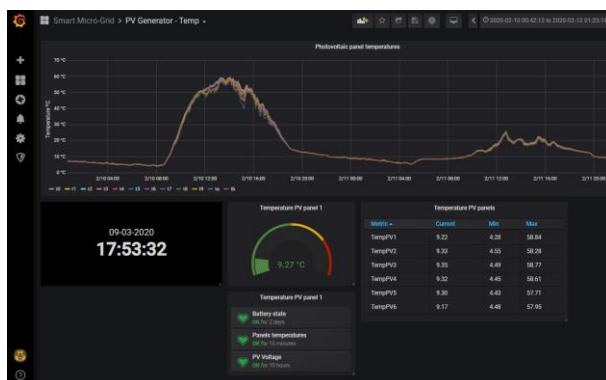


Figure 5: Monitoring interface developed to display the temperatures of PV modules in Grafana.

In addition, it must be remarked that the developed interface has been working in a continuous manner for 10 months without any crash event, which implies a reliable and stable operation. This interface is currently being enriched and expanded aiming to represent other variables of the microgrid.

Nonetheless, some disadvantages must be also commented. Namely, despite the fact that using Grafana is user-friendly, managing the RPi where it runs involves certain skills with the UNIX-based operating systems. This issue can be solved if MS Windows operating system was used, for which there are Grafana versions available.

On the other hand, Grafana does not allow manipulating the monitored process. This task is very useful for situations where the operator needs to modify some setpoint or parameter of the microgrid in a direct manner. To do this, writing operations should be performed over the memory positions of the control unit. However, as indicated, nowadays Grafana does not support this functionality.

## 5 CONCLUSIONS

The paper has presented a survey about monitoring interfaces applied to DC microgrids and photovoltaic systems. The main focus has been put on the software used as well as on deployment aspects. In addition, a set of design considerations have been provided. An application case using Grafana, open-source software, for an experimental microgrid has been described.

This work is envisioned to contribute to the design and development stage of monitoring interfaces devoted to microgrids within R&D projects.

Further guidelines will address the design of digital replicas of the microgrid using the information retrieved and stored by the reported monitoring interface.

## Acknowledgments

This work has been supported by the FEDER Funds (Programa Operativo FEDER de Extremadura 2014-2020) through the grant “Ayuda a Grupos de Investigación” (ref. GR18159) of Junta de Extremadura.

## Resumen en español

### INTERFACES DE MONITORIZACIÓN PARA MICROGRIDS Y SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: BREVE REVISIÓN Y CASO DE APLICACIÓN

## Resumen

*Los interfaces de monitorización permiten la interacción entre el operador humano y el proceso monitorizado. Esta función adquiere especial relevancia para escenarios avanzados como las microgrids y las instalaciones basadas en energías renovables, que integran una gran cantidad de magnitudes e interacciones energéticas. El presente artículo lleva a cabo una breve revisión sobre interfaces de monitorización aplicados a microgrids DC y sistemas fotovoltaicos. Los entornos software empleados así como aspectos sobre el diseño gráfico son estudiados y reportados. Además, se expone un caso de aplicación experimental utilizando software open-source (Grafana) en una microgrid DC.*

**Palabras clave:** Monitorización, energías renovables, microgrid, energía fotovoltaica, open-source, Grafana.

## References

- [1] Aghenta, L.O., Iqbal, M.T., (2019) “Low-Cost, Open Source IoT-Based SCADA System Design Using Thingier.IO and ESP32 Thing”, *Electronics*, 8, 822.
- [2] Calderón, A.J., González, I., Calderón, M., Segura, F., Andújar, J.M., (2016) “A New, Scalable and Low Cost Multi-Channel Monitoring System for Polymer Electrolyte Fuel Cells”, *Sensors*, vol. 16(3), 349.
- [3] Chinomi, N., Leelajindakraierk, M., Boontaklang, S., Chompoo-Inwai, C., (2017) “Design and Implementation of a smart monitoring system of a modern renewable energy micro-grid system using a low-cost data acquisition system and LabVIEW program”, *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 7, 142-152.
- [4] Costa, D.G., Duran-Faundez, C., (2018) “Open-Source Electronics Platforms as Enabling Technologies for Smart Cities: Recent Developments and Perspectives,” *Electronics*, vol. 7, pp. 404.
- [5] El-Leathey, L.A. (2018) “Energy Management System Designed for the Interconnected or Islanded Operation of a Microgrid Using LabVIEW Software,” Book: Smart Microgrids, Chapter 3, IntechOpen.
- [6] Ferreira, A., Ferreira, A., Cardin, O., Leitão, P., (2015) “Extension of holonic paradigm to smart grids”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48(3), pp. 1099-1104.
- [7] Figueiredo J, Martins J., (2010) “Energy production system management – renewable energy power supply integration with building automation system”, *Energy Convers Manage*, vol. 51(6), pp. 1120–6.
- [8] González, I., Calderón, A.J., (2019) “Integration of open source hardware Arduino platform in automation systems applied to Smart Grids/Micro-Grids”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 36, 100557.
- [9] González, I., Calderón, A.J., Calderón, M., Herrero, J.L., “Monitoring of Electric Power Systems: Application to self-sufficient Hybrid Renewable Energy Systems”, Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), 24-26 June 2015.
- [10] González, I., Calderón, A.J., Andújar, J.M., (2017) “Novel Remote Monitoring Platform for RES-Hydrogen based Smart Microgrid”, *Energy Conversion and Management*, vol. 148, pp. 489-505.
- [11] González, I., Calderón, A.J., Portalo, J.M., (2021) “Innovative Multi-Layered Architecture for Heterogeneous Automation and Monitoring Systems: Application Case of a Photovoltaic Smart Microgrid”, *Sustainability*, vol. 13(4), 2234.
- [12] Hertzog, P., Swart, A.J., (2015) “The Use of an Innovative Jig to Stimulate Awareness of Sustainable Technologies among Freshman Engineering Students”, *Sustainability*, 7, 9100-9117.
- [13] <https://grafana.com/>
- [14] <https://opensource.google/projects/angular>
- [15] <https://thingier.io/>
- [16] <https://www.arduino.cc>
- [17] <https://www.raspberrypi.org/>
- [18] <https://www.victronenergy.com/>
- [19] Martínez, M.A., Andújar, J.M., Enrique, J.M., (2014) “Temperature Measurement in PV Facilities on a Per-Panel Scale,” *Sensors*, vol. 14, pp. 13308-13323.
- [20] Moreno-Garcia, I.M., Palacios-Garcia, E.J., Pallares-Lopez, V., Santiago, I., Gonzalez-Redondo, M.J., Varo-Martinez, M., Real-Calvo, R.J., (2016) Real-Time Monitoring System for a Utility-Scale Photovoltaic Power Plant. *Sensors*, vol. 16, 770.
- [21] Paredes-Parra, J.M.; Mateo-Aroca, A., Silvente-Niñirola, G., Bueso, M.C., Molina-García, Á., (2018) “PV Module Monitoring System Based on Low-Cost Solutions: Wireless Raspberry Application and Assessment”, *Energies*, vol. 11, pp. 3051.
- [22] Pereira, R.I.S., Dupont, I.M., Carvalho, P.C.M., Jucá, S.C.S., (2018) “IoT embedded linux system based on Raspberry Pi applied to real-time cloud monitoring of a decentralized photovoltaic plant”, *Measurement*, vol. 114, pp. 286-297.

- [23] Portalo, J.M., González, I., Calderón, A.J., Calderón, M. Comparativa de entornos open-source para sistemas de supervisión aplicables a Smart Grids/Smart Micro-Grids. Proceedings of the XL Jornadas de Automática, Ferrol, September 2019.
- [24] Sánchez-Hidalgo, M.A., Cano, M.D., (2018) "A survey on visual data representation for smart grids control and monitoring," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 16, pp. 351–369.
- [25] Segura, F., Durán, E., Andújar, J.M., (2009) "Design, building and testing of a stand alone fuel cell hybrid system," *Journal of Power Sources*, vol. 193, pp. 276-284.
- [26] Vale, Z., Morais, H., Faria, P., Ramos, C., (2013) "Distribution system operation supported by contextual energy resource management based on intelligent SCADA," *Renewable Energy*, vol. 52, pp. 143 - 153.
- [27] Vargas-Salgado, C., Aguila-Leon, J., Chiñas-Palacios, C., Hurtado-Pérez, E., (2019), "Low-cost web-based Supervisory Control and Data Acquisition system for a microgrid testbed: A case study in design and implementation for academic and research applications", *Heliyon*, vol. 5, e02474.
- [28] Víctor, J.L.F., Jucá, S.C.S., Pereira, R.I.S., Carvalho, P.C.M., Fernández, L.M. IoT Monitoring systems applied to photovoltaic generation: The relevance for increasing decentralized plants. Proceedings of the 17th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREQP19), Spain, 10-12 April 2019.
- [29] Voicu, V., Petreus, D., Etz, R. Data Acquisition System for Solar Panels. Proceedings of the 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Wroclaw, Poland, 15-19 May 2019.
- [30] Zhang, L., Gari, N., Hmurcik, L.V., (2014) "Energy management in a microgrid with distributed energy resources", *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 297-305.
- [31] Ziogou, C., Giaouris, D., Papadopoulou, S. Voutetakis, S., (2016) "Supervisory Control and Monitoring of a Hybrid High Temperature PEM Fuel Cell System with Li-Ion Batteries and an LPG Reformer," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 52, pp. 1021-1026.
- [32] Ziogou, C., Ipsakis, D., Elmasides, C., Stergiopoulos, F., Papadopoulou, S., Seferlis, P., Voutetakis, S., (2011) "Automation infrastructure and operation control strategy in a stand-alone power system based on renewable energy sources", *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 9488-9499.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# ETHERNET-BASED MONITORING SYSTEMS FOR RENEWABLE ENERGY-HYDROGEN MICROGRIDS

Antonio José Calderón Godoy, Isaías González Pérez, José María Portalo Calero, Manuel Calderón Godoy  
Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, {ajcalde, igonzp, calgodoy}@unex.es

## Abstract

*The digitization of power systems has given birth to the rise of challenging scenarios like Smart Grids and Smart Microgrids. These infrastructures are mainly based in decentralized energy generation as well as in the intelligent management of the energy flows and data communications. For their successful implementation, a communication network is imposed for the proper data transmission between the vast amount of sensors, controllers and supervisory nodes involved. Ethernet-based networks have become the prevalent means for communications in office environments and are being increasingly applied also for industrial facilities. Consequently, Smart Grids and Smart Microgrids are also being equipped with Ethernet communication. This paper presents an Ethernet-based monitoring system architecture where monitoring software, proprietary automation hardware and open-source equipment share data over an Ethernet network. A set of experimental facilities are reported in order to prove the validity of the proposal.*

**Keywords:** Renewable energy, microgrid, Ethernet, automation, monitoring, communication network, IoT.

## 1 INTRODUCTION

The digitization of power systems involves the massive introduction of sensing and automation technologies causing the evolution towards the so-called Smart Grids and Smart Microgrids. The future energetic scenario is envisioned to be supported by these intelligent grids with enhanced capabilities of decentralized generation, optimized efficiency and higher introduction of renewable energy sources. Microgrids integrate both physical elements in the power grid and cyber elements (sensor networks, communication networks, and computation core) to make the power grid operation effective [21].

Apart from the energy flows, information flows characterize these grids [22]. Consequently, proper

information management and transmission networks are required between the vast amount of sensors, controllers and supervisory nodes involved. Indeed, the implementation of distributed monitoring and control systems is signalled as one of the main challenges in the Smart Grid scenario [4].

In this sense, Ethernet is a widely applied standard for networked communications. Namely, Ethernet corresponds to the IEEE standard 802.3 [15]. Within the Open Systems Interconnection (OSI) model, Ethernet operates in the two lower layers, the physical level (layer 1) and the link level (layer 2). The Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) is commonly deployed for Ethernet-based communications. Such a combination provides important building blocks to achieve technical interoperability between disparate digital systems [19].

Ethernet provides high bandwidth, scalability and modular configuration with inexpensive expenditures. Moreover, in the context of R&D projects, the application of Ethernet communication fosters an enhanced management of interoperability and flexibility. Both benefits acquire special relevance when a variety of heterogeneous equipment must be integrated and/or modified.

In fact, Ethernet is becoming a de facto standard in office, enterprise or business systems and modern Cyber-Physical Systems (CPS) [19]. Indeed, the undeniable prevalence of Ethernet networks contributes to the trend of industrial networks towards such communication means. Both proprietary and open communication protocols widely used in industrial environment have released specifications for Ethernet. Fieldbuses like Modbus TCP, PROcess Field NETwork (PROFINET), Ethernet for Control Automation (EtherCAT) or CC-Link IE are examples of such trend.

Another remarkable aspect concerning industrial control equipment is the application of Programmable Logic Controllers (PLC) to automate renewable energy facilities and microgrids in literature [3, 8, 9, 16]. Modern PLC include Ethernet

ports for easy connection to Local Area Networks (LAN) and even to be accessible from remote locations via Internet.

In the market, a common feature of commercial equipment for energy purposes is Ethernet connectivity. For instance, manufacturers like Victron Energy [14] or SMA [13] sell inverters, solar chargers and associated devices with embedded Ethernet port.

Moreover, open-source Internet-of-Things (IoT) technologies are also being applied for sensing and monitoring purposes in energy facilities. The most widespread examples of this kind of technology are the microcontroller Arduino [2, 10] and the microcomputer Raspberry Pi (RPi) [12]. Recent publications in this sense can be found in [5, 6, 7, 9, 17, 18, 20].

This paper presents an Ethernet-based monitoring system architecture which integrates monitoring software, proprietary automation hardware and open-source equipment. A set of experimental applications in microgrids are reported to prove the validity of the proposal. The motivation for this work arises during the design and implementation of the monitoring and automation systems of renewable energy-hydrogen microgrids in the context of R&D projects.

The structure of the rest of the contribution is as follows. The second section presents an Ethernet-based monitoring system architecture. In the third chapter, three experimental application of the proposal in R&D activities concerning renewable energy-hydrogen microgrids are reported. Finally, the key conclusions are addressed.

## 2 ARCHITECTURE OF ETHERNET-BASED MONITORING SYSTEMS

A general architecture for monitoring systems supported by Ethernet communication is presented in order to be applicable to modern facilities which include traditional automation units (PLC) as well as open-source IoT devices (RPi, Arduino, etc.). The block diagram of this proposal is depicted in Figure 1.

As it is illustrated, an Ethernet network acts as backbone for data exchange between the involved nodes. On the one hand, the monitoring system is responsible of gathering operational data from the connected devices and displaying the relevant

information to the user. Such information is fed in real-time with both numerical and graphical representations so the user is able to track the current status and operation of the microgrid. In addition, tasks like alarm generation and data accumulation are also performed by the monitoring system.

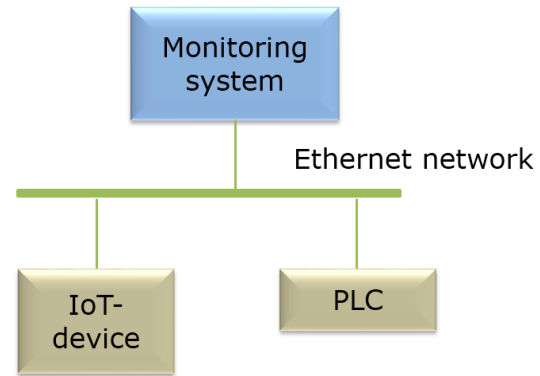


Figure 1: Block diagram of the proposed Ethernet-based monitoring system

As it is illustrated, an Ethernet network acts as backbone for data exchange between the involved nodes. On the one hand, the monitoring system is responsible of gathering operational data from the connected devices and displaying the relevant information to the user. Such information is fed in real-time with both numerical and graphical representations so the user is able to track the current status and operation of the microgrid. In addition, tasks like alarm generation and data accumulation are also performed by the monitoring system.

On the other hand, concerning hardware components, two main types of devices are considered in the proposal. PLC are commonly applied for automating processes and for data acquisition from sensors on the facility with well-known reliable operation. In the case of open-source IoT devices, they can perform the same tasks aforesaid (automation and/or data acquisition) or can be devoted to a single function. For instance, an Arduino board can be linked to a particular sensor, performing data polling and conditioning to be sent to the monitoring system through the network. On the other hand, such a device could implement some control algorithm processing measurements from sensors and commanding actuators.

Even more, the proposal can accommodate other commercial devices which are equipped with Ethernet connectivity like those devoted to energy management like photovoltaic inverters, power analysers, etc.



The monitoring function is performed by a software environment which can run in different hardware equipment. For instance, the high-level graphical language LabVIEW, profusely used both in energy-related facilities [2, 9, 18] and industrial systems [1], is commonly executed in a PC. Other packages that are gaining increasing attention are those developed under the open-source philosophy, for example, Grafana [11]. This software allows designing customized dashboards with user-friendly graphs and in-built functions, being mainly devoted to UNIX operative systems, such as Raspbian which runs in RPi.

As can be observed in Figure 1, the monitoring system and the hardware equipment share information over an Ethernet network. Consequently, a requirement for the application of the proposal consists on the availability of Ethernet port (RJ45) in the devices. Besides, depending on the amount of nodes to link and on the topology, one or more Ethernet switches or routers are also needed. The sensors and/or actuators that PLC and IoT devices have connected are not included in the architecture for a clearer view of data exchange over Ethernet. Moreover, on-line remote access to the monitoring system is facilitated due to the direct connection of the Ethernet network to the Local Area Network (LAN) of the building or facility where the monitored microgrid is deployed.

In order to achieve a higher degree of generality, the proposed system does not specify the communication protocol. E.g., the nodes can share data over the Ethernet network regardless the particular protocol, for example, by means of TCP/IP, PROFINET or Modbus TCP.

### 3 EXPERIMENTAL APPLICATION CASES IN RENEWABLE ENERGY MICROGRIDS

As indicated in the Introduction, a set of renewable energy-hydrogen microgrids have been designed and experimentally implemented within R&D activities. In this section, two of these facilities are briefly described and the corresponding Ethernet-based monitoring systems are commented.

#### 3.1 MICROGRID WITH PLC-BASED AUTOMATION SYSTEM

The microgrid consists on a lab-scale facility which combines PV and wind generation coupled around a low voltage DC bus. Such bus is the backbone where

the electrical flows occur and is deployed by means of a lead-acid battery. In addition, the energy carrier hydrogen is included in the microgrid through equipment for generation (electrolyser) and consumption (fuel cell) interconnected using a hydrogen bus based on metal hydride bottles. An electronic programmable load is applied to demand different load profiles. The layout of this microgrid is depicted in Figure 2.

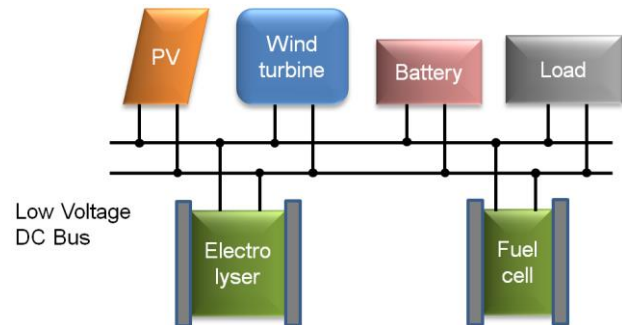


Figure 2: Schematic diagram of the microgrid in case 3.1.

This microgrid is automated by a PLC (S7-300, Siemens). This controller manages the activation and deactivation of the generation/consumption equipment aiming to use the surplus of PV energy to generate hydrogen. Sensors devoted to measure voltage, current, irradiance, temperature, hydrogen flow, hydrogen pressure, etc., are the input signals of the PLC. Figure 3 shows the aspect of the main components of this microgrid in the laboratory.

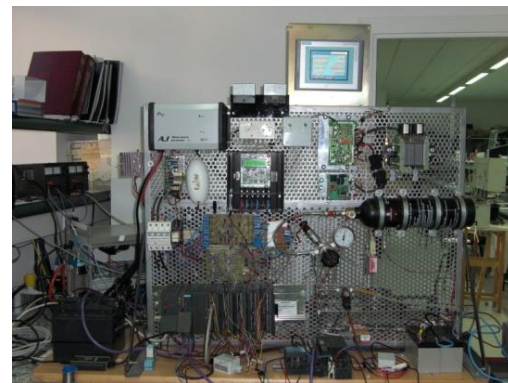


Figure 3: Aspect of the experimental setup within the laboratory.

To deploy the Ethernet-based monitoring system, a Communication Processor (CP) is used to provide Ethernet connectivity to the PLC, so it exchanges information with the monitoring software. Such monitoring task is implemented by the WinCC software of Siemens, executed in a PC. The block diagram of the developed monitoring system is depicted in Figure 4. As can be observed, data from

the microgrid operation are exchanged through Ethernet between the PLC and the monitoring system.

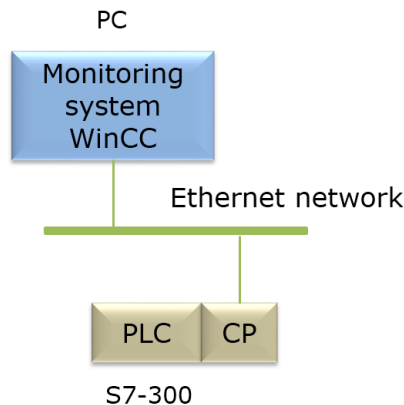


Figure 4: Deployed monitoring system based on Ethernet for application case 3.1.

Figure 5 shows a screen of the developed monitoring interface where the evolution of the voltage and current of the hydrogen generator is graphically illustrated in real-time. Further details can be found in [8].

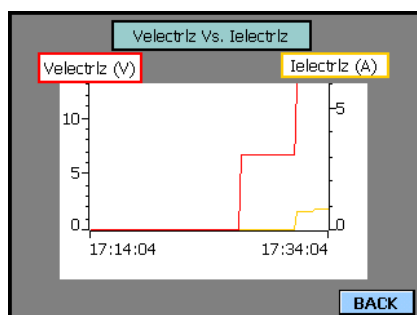


Figure 5: Monitoring interface to graphically display variables in WinCC.

### 3.2 PV TEMPERATURE MONITORING USING ARDUINO AND LABVIEW

To begin with, it must be noted that the microgrid monitored in these last application cases is the same. In other words, for this microgrid, two different monitoring systems have been orchestrated following the proposed Ethernet-based architecture in diverse stages of development. The first application is described in this subsection whereas the second one is expounded in the next subsection.

Moreover, the layout of this microgrid is very similar to the previous one (Figure 6). The main difference resides in the scale of the microgrid. E.g., in this case, the power of the associated equipment is noticeably larger than those involved in the microgrid of the previous subsection. For example, the PV generator in this case is composed by 6 modules

connected to provide a total power of 1.100 W (Figure 7) whilst the lab-scale microgrid included two modules with a joint power of 90 W.

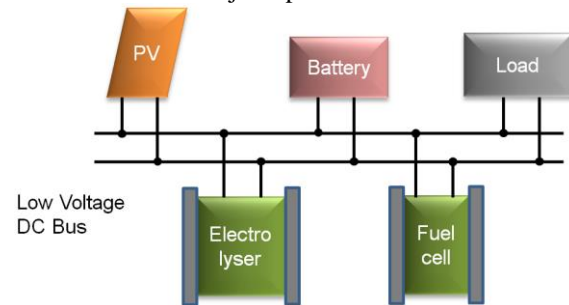


Figure 6: Schematic diagram of the microgrid in cases 3.2 and 3.3.

Another relevant aspect is that wind power is not implemented in this microgrid. The renewable energy is generated solely by means of the aforementioned PV facility. Finally, it must be remarked that the energy storage is carried out in this case by means of a Lithium-ion battery, which is a more modern technology in comparison with the lead-acid battery used in the microgrid of the case 3.1.



Figure 7: Aspect of the set of PV modules.

The PLC model S7-1500 of Siemens has been chosen to handle the interaction between the components as well as to acquire the relevant measurements from the physical facility.

Concerning the Ethernet-based monitoring system, the monitoring interface is designed using LabVIEW running in a PC. The operator/research is able to track the behaviour of the microgrid through the data displayed graphically and numerically by this interface. Hence, this software shares information with the PLC that automates the microgrid as well as with an Arduino board responsible of sensing tasks. Particularly, a temperature sensor Lm35 is connected to an Arduino MEGA board so the provided measurements are sent to the monitoring system via Open Platform Communications (OPC) over the Ethernet network. The architecture of the implemented monitoring system is depicted in Figure 8. In addition, Figure 9 shows the curve of the sensed

temperature in the LabVIEW monitoring interface. For further information, refer to [9].

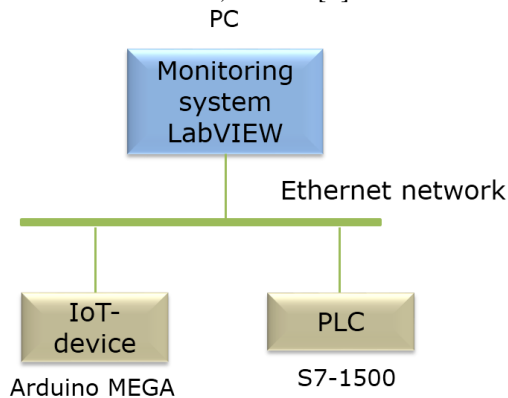


Figure 8: Deployed monitoring system based on Ethernet for application case 3.2

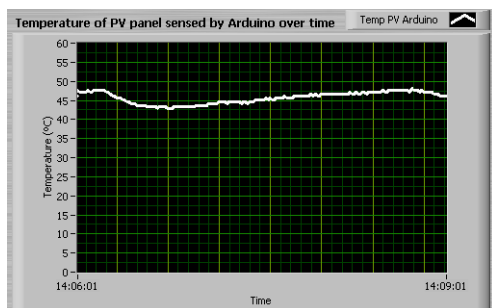


Figure 9: Graphical evolution of a PV module temperature in LabVIEW.

### 3.3 MONITORING SYSTEM USING OPEN-SOURCE TECHNOLOGY

In the present case, the open-source package Grafana is used for monitoring tasks. The remote operator accesses on-line to custom-designed interface mainly focused on time-series. This software runs in a RPi linked to an Arduino MEGA devoted to sense the temperature of the PV generator. In fact, digital temperature sensors DS18B20 are used to sense the temperature of each module of the generator.

The information retrieved by the Arduino board is exchanged with the Grafana dashboard by means of an Ethernet linkage. On the other hand, through the same Ethernet network, Modbus TCP is used to collect data from a commercial controller called Color Control GX of manufacturer Victron Energy. This device acquires signals from other equipment like the Lithium-ion battery and a solar charger with Maximum Power Point Tracking (MPPT). This way, by means of Ethernet communication, the Grafana interface provides real-time information to the operator about the microgrid operation. The described Ethernet-based architecture is illustrated in Figure 10 while in Figure 11 the temperature

measurements of the PV generator are depicted in the developed Grafana dashboard. For further information, refer to [7].

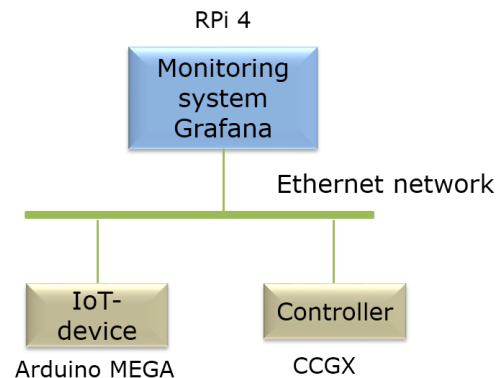


Figure 10: Deployed monitoring system based on Ethernet in application case 3.3.



Figure 11: Monitoring interface developed to display the temperatures of PV modules in Grafana.

## 4 CONCLUSIONS

Choosing an Ethernet-based communication network is a requirement for modern advanced automated infrastructures. Particularly, the importance of data management and transmission in intelligent microgrids imposes a proper selection of communication means and standards.

The paper has presented an Ethernet-based architecture to deploy monitoring systems applied to renewable energy-hydrogen microgrids. In addition, a set of experimental application cases have been reported to validate the proposal as well as to illustrate the wide variety of hardware and software technologies that can be accommodated. In fact, both proprietary industrial control devices (PLC) and open-source IoT equipment (RPi and Arduino) can be integrated in the proposal.

The usage of Ethernet networks facilitates a seamless data exchange between most of hardware and software tools available for automation and monitoring tasks. The trend of industrial fieldbuses towards Ethernet-based networks highlights the

relevance of this standard also for Smart Grids and Smart Microgrids.

Future guidelines include the development of digital replications of the components of the microgrid using the gathered data during mid and long-term operation.

### Acknowledgments

This work has been supported by the FEDER Funds (Programa Operativo FEDER de Extremadura 2014-2020) through the grant “Ayuda a Grupos de Investigación” (ref. GR18159) of Junta de Extremadura.

### Resumen en español

## SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN BASADOS EN ETHERNET PARA MICROGRIDS DE ENERGÍA RENOVABLE-HIDRÓGENO

### Resumen

*La digitalización de los sistemas energéticos ha dado lugar a escenarios desafiantes como las Smart Grids y Microgrids. Estas infraestructuras se basan fundamentalmente en generación descentralizada así como en la gestión inteligente de los flujos de energía y comunicaciones. Para su implementación efectiva, es esencial una red de comunicaciones que permita el intercambio de datos entre la elevada cantidad de sensores, controladores y nodos de supervisión involucrados. Redes basadas en Ethernet se han convertido en el medio de comunicación prevalente en entornos de oficina y gestión, siendo cada vez más aplicadas también para instalaciones industriales. Consecuentemente, las Smart Grids y Microgrids también incorporan comunicación Ethernet. Este artículo presenta una arquitectura para sistemas de monitorización basada en Ethernet en la que el software de monitorización, dispositivos propietarios de automatización y equipos open-source comparten datos en torno a una red Ethernet. La propuesta es validada mediante un conjunto de instalaciones experimentales.*

**Palabras clave:** Energías renovables, microgrid, Ethernet, automatización, monitorización, red de comunicaciones, IoT.

### References

- [1] Arpaia, P., De Matteis, E., Inglese, V., (2015) “Software for measurement automation: A

review of the state of the art”, *Measurement*, vol. 66, pp. 10-25.

- [2] Calderón, A.J., González, I., Calderón, M., Segura, F., Andújar, J.M., (2016) “A New, Scalable and Low Cost Multi-Channel Monitoring System for Polymer Electrolyte Fuel Cells”, *Sensors*, vol. 16(3), 349.
- [3] Cintuglu M.H., Mohammed O.A., Akkaya K., Uluagac A.S., (2017) “A survey on smart grid cyber-physical system testbeds”, *IEEE Commun Surv Tutor*, vol. 19, pp.446–64.
- [4] Ferreira, A., Ferreira, A., Cardin, O., Leitão, P., (2015) “Extension of holonic paradigm to smart grids”, *IFAC-PapersOnLine*, VOL. 48(3), pp. 1099-1104. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.230.
- [5] Fuentes, M., Vivar, M., Burgos, J.M., Aguilera, J., Vacas, J.A., (2014) “Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino™ that complies with IEC standards,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 130, pp. 529-543.
- [6] Gomes, L., Vale, Z., Corchado, J.M., (2020) “Microgrid management system based on a multi-agent approach: An office building pilot”, *Measurement*, vol. 154, pp. 107427.
- [7] González, I., Calderón, A.J., Portalo, J.M., (2021) “Innovative Multi-Layered Architecture for Heterogeneous Automation and Monitoring Systems: Application Case of a Photovoltaic Smart Microgrid”, *Sustainability*, vol. 13(4), 2234. <https://doi.org/10.3390/su13042234>
- [8] González, I., Calderón, A.J., Andújar, J.M., (2017) “Novel Remote Monitoring Platform for RES-Hydrogen based Smart Microgrid”, *Energy Conversion and Management*, vol. 148, pp. 489-505. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.06.031.
- [9] González, I.; Calderón, A.J., (2019) “Integration of open source hardware Arduino platform in automation systems applied to Smart Grids/Micro-Grids”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 36, 100557.
- [10] <https://www.arduino.cc>
- [11] <https://grafana.com/>
- [12] <https://www.raspberrypi.org/>
- [13] <https://www.sma-uk.com/>
- [14] <https://www.victronenergy.com/>

- [15] IEEE standard for Ethernet: [https://standards.ieee.org/standard/802\\_3-2018.html](https://standards.ieee.org/standard/802_3-2018.html) (https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es).
- [16] Iovev A.N., Yakimov P.I., (2015) “Application of PLC as a gateway in a network of smart power transducers”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48(24), pp. 95–8.
- [17] Paredes-Parra, J.M.; Mateo-Aroca, A.; Silvente-Niñirola, G.; Bueso, M.C.; Molina-García, Á., (2018), “PV Module Monitoring System Based on Low-Cost Solutions: Wireless Raspberry Application and Assessment”, *Energies*, vol. 11, pp. 3051. DOI: 10.3390/en11113051.
- [18] Pereira, R.I.S., Dupont, I.M., Carvalho, P.C.M., Jucá, S.C.S., (2018) “IoT embedded linux system based on Raspberry Pi applied to real-time cloud monitoring of a decentralized photovoltaic plant”, *Measurement*, vol. 114, pp. 286-297. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.09.033.
- [19] Rojas R.A., Ruiz Garcia M.A., (2020) “Implementation of Industrial Internet of Things and Cyber-Physical Systems in SMEs for Distributed and Service-Oriented Control”, In: Matt D., Modrák V., Zsifkovits H. (eds) *Industry 4.0 for SMEs*. Palgrave Macmillan, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4_3)
- [20] Vargas-Salgado, C., Aguila-Leon, J., Chiñas-Palacios, C., Hurtado-Pérez, E., (2019), “Low-cost web-based Supervisory Control and Data Acquisition system for a microgrid testbed: A case study in design and implementation for academic and research applications”, *Heliyon*, vol. 5, e02474.
- [21] Yang, Q., An, D., Yu, W., Tan, Z., Yang, X., (2016) “Towards Stochastic Optimization-Based Electric Vehicle Penetration in a Novel Archipelago Microgrid”, *Sensors*, vol. 16, 907.
- [22] Zhang, L., Gari, N., Hmurcik, L.V., (2014) “Energy management in a microgrid with distributed energy resources”, *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 297-305.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license

# CONTROLADOR DE PITCH HÍBRIDO OPTIMIZADO CON ALGORITMO GENÉTICO PARA AEROGENERADORES FLOTANTES

Carlos L. Serrano-Barreto<sup>1</sup>[0000-0003-1228-3135]

Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España, carser06@ucm.es

Matilde Santos<sup>3</sup>[0000-0003-1993-8368]

Instituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, España, msantos@ucm.es

Jesús Enrique Sierra-García<sup>2</sup>[0000-0001-6088-9954]

Universidad de Burgos, Burgos, España, jesierra@ubu.es

## Resumen

*El control de las turbinas eólicas flotantes (Floating Offshore Wind Turbine, FOWT) es complejo debido al tamaño de estas turbinas, las fuertes cargas a las que están sometidas, y su dinámica fuertemente no lineal. Además, la acción de control de la turbina puede influir en la estabilidad del dispositivo flotante. En este trabajo se diseña un controlador híbrido inteligente para el control del ángulo de cabeceo de las palas de un aerogenerador flotante. El objetivo del control es reducir la vibración del dispositivo flotante sin comprometer la potencia de salida. En concreto, se desarrolla un controlador borroso inteligente y una implementación difusa de la relación velocidad del viento-ángulo de cabeceo. Esta estrategia inteligente de control es validada con la referencia proporcionada por el software de simulación de aerogeneradores FAST, que implementa un controlador PI de ganancia programada. Además, se analizan los efectos de estas diferentes estrategias de control sobre las vibraciones en la estructura.*

**Palabras clave:** Control híbrido inteligente, Control de palas, Control borroso, Vibraciones, Turbina eólica flotante, Energía eólica.

## 1 INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente demanda de energía y al aumento de la contaminación por residuos de carbono, se buscan formas alternativas de producir energía limpia y renovable [1, 2]. Entre ellas, la energía eólica ha demostrado ser muy eficiente. La energía eólica incluye aerogeneradores terrestres y marinos. Los primeros, aunque son una tecnología madura, tienen hoy en día limitaciones en cuanto a espacio disponible y daños ambientales. Por ello, las turbinas eólicas marinas, principalmente las flotantes, están surgiendo como una prometedora solución en materia de energías renovables [3–5].

Pero el control de las turbinas eólicas flotantes (Floating Offshore Wind Turbine, FOWT) es complejo debido al gran tamaño de estas turbinas, las fuertes cargas (olas, viento, corrientes, ...) a las que están sometidas, y su dinámica fuertemente no lineal [6]. Además, la acción de control de la turbina, principalmente los cambios del ángulo de las palas, puede influir en la estabilidad del dispositivo flotante, comprometiendo la eficiencia y la integridad de la propia turbina [7–9].

En este trabajo se propone la utilización de un controlador híbrido inteligente para el ángulo de las palas de una FOWT, con el objetivo de reducir la vibración de la estructura flotante sin comprometer la potencia eólica de salida. Diferentes técnicas avanzadas e inteligentes han demostrado ser eficientes para estos sistemas complejos [11, 12]. En particular, en este trabajo se desarrolla un controlador difuso inteligente y una implementación difusa de la relación velocidad del viento-ángulo de inclinación. Los parámetros del controlador se han ajustado mediante un algoritmo genético. El controlador ha sido validado con la referencia proporcionada por el software de simulación de aerogeneradores FAST, que implementa un controlador PI de ganancia programada (GSPI). Además, se comparan los efectos de estas diferentes estrategias de control sobre las vibraciones de la estructura flotante.

La estructura del artículo es la siguiente. La sección 2 describe el control del ángulo de cabeceo de las palas de una turbina flotante. La sección 3 presenta la nueva estrategia de control híbrido. En la sección 4 se muestran y discuten los resultados. El artículo finaliza con las conclusiones y el trabajo futuro.

## 2 CONTROL DE CABECEO DE UNA TURBINA FLOTANTE

El viento y la potencia que se puede extraer de un aerogenerador vienen dados por la siguiente relación cúbica [4]:



$$P = 0.5\rho Av^3 \quad (1)$$

Donde  $P$  es la potencia ( $W$ ),  $\rho$  es la densidad del aire ( $Kg/m^3$ ),  $A$  es el área barrida por las palas ( $m^2$ ) y  $v$  es la velocidad del viento (m/s).

Según el límite de Betz [11], la energía eólica máxima que puede convertirse en energía eléctrica es del 59%. La energía que puede generar el aerogenerador depende del coeficiente de potencia  $C_p$ , que es específico para cada tipo de turbina. El coeficiente  $C_p$  es una función de la relación de velocidad de las palas,  $\lambda$ , y del ángulo de inclinación de las palas,  $\beta$ .

$$P_{\omega t} = 0.5\rho Av^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (2)$$

La aproximación del coeficiente  $C_p$  utilizada en las simulaciones viene dada por [11]:

$$C_p = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (3)$$

Donde la variable  $\lambda_i$  no tiene significado físico y se puede obtener como,

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{3\beta + 1} \quad (4)$$

La relación entre el cambio de velocidad punta del rotor y la velocidad del viento es:

$$\lambda = \frac{w \cdot R}{v} \quad (5)$$

Donde  $w$  (rad/s) es la velocidad angular del rotor y  $R$  (m) el radio efectivo de las palas.

Existen cuatro regiones de funcionamiento en función de la velocidad del viento, a saber:

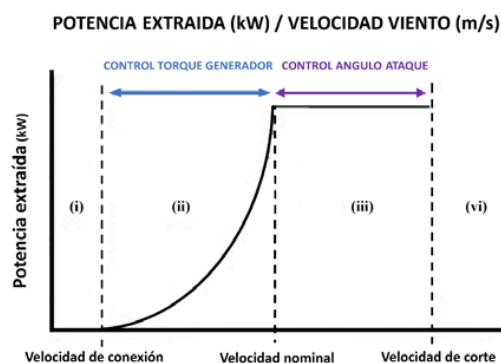


Figura 1: Regiones de funcionamiento de la turbina en función del viento[12].

Para mantener la potencia de salida en la región (iii) se requiere un sistema de control que ajuste el ángulo de paso de las palas (pitch) [13].

Se ha simulado el aerogenerador flotante NREL de 5MW, tipo barcaza (con plataforma ITI). Las principales características de esta turbina en relación al control son: velocidad nominal del viento, 12,1 m/s; longitud de las palas, 61,609 m; velocidad de corte del viento, 25 m/s, velocidad nominal del rotor,  $w_{ref}$  12,1 rpm [14].

### 3 METODOLOGÍA

En este trabajo utilizaremos como referencia para contrastar los resultados el control PI con ganancia programada (GSPI) que el software de simulación FAST tiene implementado para este aerogenerador.

Las variaciones de la velocidad del viento provocan cambios continuos en el punto de funcionamiento del aerogenerador, lo que a su vez provoca un cambio en el control. Los controladores borrosos permiten hacer frente a las no linealidades del sistema y superar las variaciones de la velocidad del viento y las turbulencias, proporcionando un modelo que relaciona cada velocidad del viento a la entrada [15]. Mediante la utilización de algoritmos genéticos (AG) se optimiza el punto de operación alrededor del cual trabajará el controlador de la turbina eólica.

La estructura de esta estrategia de control inteligente se muestra en la Figura 2. Se propone la implementación de un sistema de lógica híbrida borrosa porque las turbinas flotantes son sistemas fuertemente no lineales, y este tipo de controlador produce una respuesta más suave. La velocidad del rotor se controla utilizando el ángulo de cabeceo de las palas con el objetivo de obtener la potencia nominal de la turbina.

La entrada del controlador PD borroso incremental es la velocidad actual del rotor, y la referencia es la velocidad del rotor deseada para producir la potencia nominal.

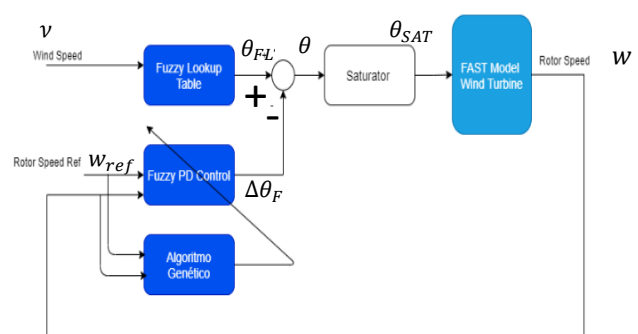


Figura 2: Controlador inteligente híbrido con estrategia de tabla de búsqueda difusa.

Se calcula el error como la diferencia entre estas dos señales para así poder aumentar o disminuir el ángulo

de cabeceo de la turbina en función de la región de funcionamiento del aerogenerador. El saturador limita la señal de control a  $25^\circ$ , que es el ángulo de cabeceo máximo para estas turbinas [16].

El controlador borroso es un PD incremental tipo Takagi-Sugeno (equivalente a un regulador PI). Tiene como entradas el error de velocidad del rotor,  $\omega_e$  (rpm) (7) y su derivada,  $\dot{\omega}_e$  (rpm/s).

$$w_e = w_{ref} - w \quad (6)$$

La referencia  $\omega_{ref}$  se ha fijado en 12,1 rpm. Para las dos variables de entrada se asignaron tres conjuntos difusos triangulares y trapezoidales en los extremos: Positivo, Negativo y Cero. El error y la derivada del error se han normalizado a  $[-1, 1]$ .

Las reglas del controlador difuso Takagi-Sugeno se han expresado de la siguiente forma,

$$Rule(i): \text{if } w_e \text{ is } A_{1i} \text{ and } \dot{w}_e \text{ is } A_{2i} \text{ then } y_i \quad (7)$$

Donde  $A_{1i}$  y  $A_{2i}$  representan los conjuntos difusos de las entradas  $w_e$  y  $\dot{w}_e$ , y la variable  $y_i$  representa la salida del controlador. La variable de salida es el incremento del ángulo de paso,  $\Delta\theta_F$  ( $^\circ$ ). Estas reglas se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1: Reglas del controlador difuso.

- |    |  |
|----|--|
| 1. | If $w_e$ is negative and $\dot{w}_e$ is negative, then $\Delta\theta_F$ is -5. |
| 2. | If $w_e$ is negative and $\dot{w}_e$ is zero, then $\Delta\theta_F$ is -2.5.   |
| 3. | If $w_e$ is negative and $\dot{w}_e$ is positive, then $\Delta\theta_F$ is 0.  |
| 4. | If $w_e$ is zero and $\dot{w}_e$ is negative, then $\Delta\theta_F$ is -2.5.   |
| 5. | If $w_e$ is zero and $\dot{w}_e$ is zero, then $\Delta\theta_F$ is 0.          |
| 6. | If $w_e$ is zero and $\dot{w}_e$ is positive, then $\Delta\theta_F$ is 2.5.    |
| 7. | If $w_e$ is positive and $\dot{w}_e$ is negative, then $\Delta\theta_F$ is 0.  |
| 8. | If $w_e$ is positive and $\dot{w}_e$ is zero, then $\Delta\theta_F$ is 2.5.    |
| 9. | If $w_e$ is positive and $\dot{w}_e$ is positive, then $\Delta\theta_F$ is 5.  |

El ángulo de cabeceo que se envía al modelo de la FOWT en FAST se obtiene con la siguiente relación:

$$\theta = \theta_{FL} - \Delta\theta_F \quad (8)$$

Por otro lado, la tabla de búsqueda se ha implementado utilizando también lógica difusa. La entrada es el viento y la salida es la referencia del ángulo de paso. Esta referencia es corregida por el controlador incremental borroso-PD.

La tabla de búsqueda difusa tiene como entrada la velocidad del viento, representada por 3 conjuntos borrosos: Positivo, Negativo y Cero, utilizados para crear la función de mapeo donde las reglas son la relación entre cada entrada y la salida. La salida es la referencia del ángulo de cabeceo. La función de

pertenencia difusa y las reglas difusas del sistema están inspiradas en [15].

El algoritmo genético se utilizar para minimizar el error entre la velocidad de referencia del rotor y la velocidad actual del rotor. Con él se sintonizan los coeficientes del controlador borroso, GE (Ganancia del error) y GDE (Ganancia de la derivada del error).

El algoritmo genético tiene la siguiente configuración. La población inicial es de 50 individuos, con dos cromosomas cada uno, GE y GDE; la probabilidad de cruce es 0.8; la probabilidad de mutación es 0.05; por último, la función de coste es:

$$J = \sum \frac{|(\omega_{ref} - \omega)|}{n} \quad (9)$$

Donde  $n$  es el número de muestras obtenidas en la simulación.

Por último, la condición de parada del algoritmo se establece cuando la función de coste es menor a uno, ya que un error de una revolución por minuto es aceptable en el control de velocidad del rotor. El algoritmo se ejecuta off-line para ajustar los parámetros del controlador.

## 4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y DISCUSIÓN

Para la simulación del aerogenerador se utilizó el software NREL FAST v8 [17] y el controlador se implementó en Matlab/Simulink. El enfoque de control propuesto se compara con el controlador PI de ganancia programada (GSPI) del sistema FAST [17].

El perfil del viento es una señal aleatoria generada por la herramienta TurbSim de NREL [17]. La velocidad media del viento es de 17 m/s, con un valor mínimo de 10,3 m/s y un máximo de 23,6 m/s.

El ángulo de cabeceo obtenido en la simulación por ambos controladores se muestra en la Figura 3.

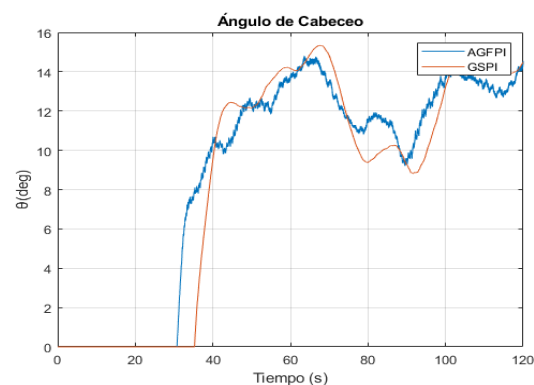


Figura 3: Ángulo de cabeceo.

Se puede observar algo de ruido de alta frecuencia en el controlador borroso. Sin embargo, debido a la gran masa de la turbina eólica, ésta no se ve afectada por el mismo. Por otro lado, si se quisiera reducir el ruido de alta frecuencia bastaría con poner un filtro pasa bajo a la salida del sistema de control borroso.

La velocidad del rotor obtenida con cada controlador se muestra en la Figura 4. Ambos controladores son capaces de mantener la velocidad del rotor en la región (iii) de funcionamiento.

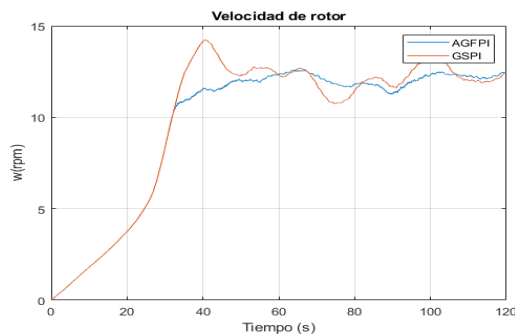


Figura 4: Velocidad de rotor.

Sin embargo, también se puede observar que la respuesta más estable la obtienen el controlador borroso (línea azul).

Por otro lado, la potencia generada durante la simulación debe ser constante, en torno a la potencia nominal, es decir, 5MW (Figura 5). En este caso también se obtienen resultados más estables con el controlador borroso.

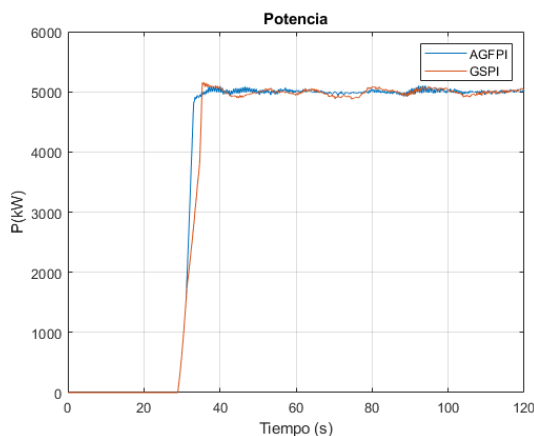


Figura 5: Potencia de salida.

Además, se han analizado los efectos de cada acción de control sobre la estabilidad de la turbina flotante. Para ello se utilizan dos variables: el cabeceo de la plataforma y el desplazamiento de la parte superior de la torre en la dirección proa-popa (TTDspFA). La primera indica el ángulo ( $^{\circ}$ ) de inclinación de la plataforma respecto a la horizontal, mientras que la

segunda representa el desplazamiento (m) de la parte superior de la torre respecto a la posición de equilibrio de la turbina. Estas mediciones se representan en las Figuras 6 y 7 para los diferentes enfoques de control.

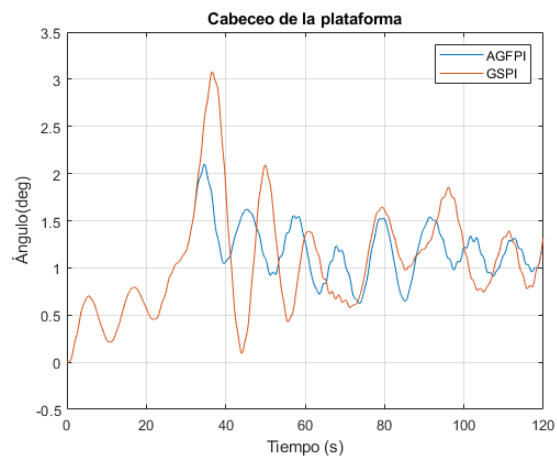


Figura 6: Cabeceo de la plataforma.

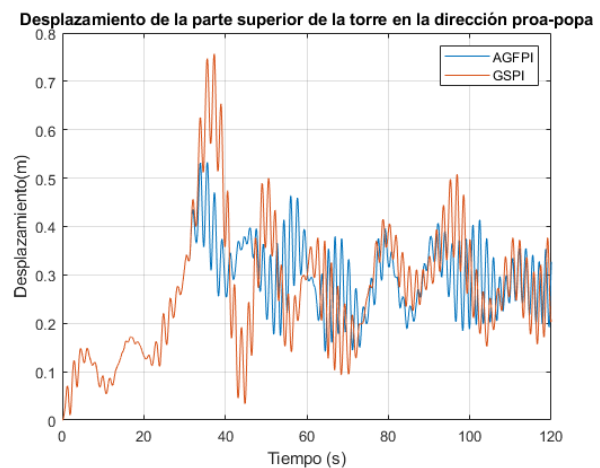


Figura 7: Desplazamiento de la parte superior de la torre en la dirección proa-popa.

Como se puede ver en esas figuras, el controlador GSPI genera mayores oscilaciones durante más tiempo. Por el contrario, el controlador borroso reduce las vibraciones y da mejor respuesta en el estado estacionario.

Es importante observar que ambos controladores se comportan igual hasta el segundo 32, tanto en la plataforma como en la torre. Esto se debe a que hasta ese momento reciben la misma señal de control, ya que el ángulo de cabeceo es cero para que el rotor se acelere lo más rápido posible.

Para evaluar el rendimiento de los controladores, además de la potencia de salida, se han analizado las vibraciones producidas en el sistema mediante la tasa de supresión de vibraciones,  $\eta$  (10) [18], y el error cuadrático medio (RMSE) (11),

$$\eta = \frac{\sigma_{GSFATS} - \sigma_{controller}}{\sigma_{GSFAST}} \cdot 100\% \quad (10)$$

$$RMSE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

Donde  $\sigma$  representa la desviación estándar de las oscilaciones en la turbina, tanto de la plataforma como de la torre, y  $n$  es el número de muestras. La tasa de supresión se calcula en ambos casos con respecto a la referencia del controlador FAST,  $\sigma_{GSFAST}$ .

Los resultados se muestran en la Tabla 2 y la Tabla 3.

Tabla 2: Rendimiento de los controladores con respecto al cabeceo de la plataforma

Controlador	RMSE normalizado	Tasa de supresión (%)
FAST	1	-
Hybrid	0.6754	32.4615

Tabla 3: Rendimiento de los controladores con respecto al desplazamiento de la parte superior de la torre (TTDspFA)

Controlador	RMSE normalizado	Tasa de supresión (%)
FAST	1	-
Hybrid	0.7461	25.3888

Se puede observar como el controlador borroso obtiene una mejora relevante en la disminución de las vibraciones de la torre. Estos resultados representan un buen rango de mejora con respecto al GSPI embebido en FAST.

Finalmente, se ha evaluado el rendimiento global de los controladores comparando la desviación estándar de la potencia de salida generada ( $\sigma_p$ ), el RMSE del del TTDspFA (RMSs) [19] en el estado estacionario, y el producto de ambas (Tabla 4).

Tabla 4: Comparación de rendimiento

Control	$\sigma_p$	RMSs	RMSs. $\sigma_p$
FAST	51.67	1	0.0705
Hybrid	28.40	0.9930	0.0289

Este producto (tercera columna) indica el equilibrio entre ambas métricas, por lo que cuanto menor sea este valor, mejor será el resultado. De nuevo se puede apreciar como la propuesta de control inteligente mejora el controlador de referencia.

## 5 CONCLUSIONES

Las turbinas flotantes son sistemas muy grandes cuyo objetivo es extraer la mayor cantidad de energía posible del viento. Esto hace que su control sea más

complejo y además son altamente no lineales y experimentan fuertes cargas externas. En este trabajo se ha abordado el control de cabeceo de un aerogenerador flotante de 5 MW mediante técnicas inteligentes.

Se ha propuesto una estrategia de control híbrida donde se diseña un controlador PD borroso incremental con una función de mapeo difusa, y se aplica al modelo del aerogenerador.

Se han obtenido mejoras relevantes comparando tanto la potencia de salida como las vibraciones del aerogenerador offshore con respecto al controlador de ganancia programada del software de referencia FAST. En cuanto a las oscilaciones, la estrategia difusa es la que da una respuesta más suave.

Como trabajos futuros se propone mejorar el modelo difuso para incluir reglas específicas para el sistema cuando hay perturbaciones debidas al oleaje. Además, se podría diseñar un sistema difuso que sintonice el controlador PID para implementar la variación de los parámetros en el esquema de ganancia programada.

## Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido desarrollado con financiación parcial del Proyecto MCI AEI/FEDER RTI2018-094902-B-C21, del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

## English summary

### HYBRID PITCH CONTROLLER OPTIMEZED WITH GENETIC ALGORITHM FOR FLOATING WIND TURBINES

## Abstract

*The control of floating wind turbines (FOWT) is complex due to the size of these turbines, the heavy loads they are subjected to and their strongly nonlinear dynamics. Moreover, the control action of the turbine can influence the stability of the floating device. In this work, an intelligent hybrid controller is designed for pitch control of a floating wind turbine. The objective of the control is to reduce the vibration of the floating device without compromising the power output. Specifically, an intelligent fuzzy controller and a fuzzy implementation of the wind speed-pitch angle relationship are developed. The same is validated with the reference provided by the wind turbine simulation software FAST. In addition, the effects of these different control strategies on the vibrations of the structure are analyzed.*

**Keywords:** Hybrid system, Pitch control, Fuzzy Control, Vibrations, Floating wind turbine, Wind energy.

## 6 REFERENCIAS

- [1] R. M. Aguilar, J. M. Torres, and C. A. Martín, "Aprendizaje automático en la identificación de sistemas. Un caso de estudio en la predicción de la generación eléctrica de un parque eólico," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 16, no. 1, pp. 114–127, 2019.
- [2] I. L. R. Gomes, R. Melício, V. M. F. Mendes, and H. M. I. Pousinho, "Wind power with energy storage arbitrage in day-ahead market by a stochastic MILP approach," *Log. J. IGPL*, vol. 28, no. 4, pp. 570–582, 2020.
- [3] M. Mikati, M. Santos, and C. Armenta, "Electric grid dependence on the configuration of a small-scale wind and solar power hybrid system," *Renew. energy*, vol. 57, pp. 587–593, 2013.
- [4] M. Mikati, M. Santos, and C. Armenta, "Modelado y simulación de un sistema conjunto de energía solar y eólica para analizar su dependencia de la red eléctrica," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 9, no. 3, pp. 267–281, 2012.
- [5] P. M. Rubio, J. F. Quijano, P. Z. López, J. J. F. Lozano, A. G. Cerezo, and J. O. Casanova, "Control inteligente para mejorar el rendimiento de una plataforma semisumergible híbrida con aerogeneradores y convertidores de oleaje: sistema de control borroso para la turbina," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 16, no. 4, pp. 480–491, 2019.
- [6] C. Serrano-Barreto and M. Santos, "Intelligent Fuzzy Optimized Control for Energy Extraction in Large Wind Turbines," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 12490 LNCS, pp. 269–276, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-62365-4\_26.
- [7] C. Kim, E. Muljadi, and C. C. Chung, "Coordinated control of wind turbine and energy storage system for reducing wind power fluctuation," *Energies*, vol. 11, no. 1, p. 52, 2018.
- [8] E. Quiles, E. Garcia, J. Cervera, and J. Vives, "Development of a Test Bench for Wind Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, no. 06, pp. 907–913, 2019.
- [9] J. E. Sierra-Garcia and M. Santos, "Performance Analysis of a Wind Turbine Pitch Neurocontroller with Unsupervised Learning," *Complexity*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/4681767.
- [10] J. E. Sierra-Garcia, M. Santos, J. E. Sierra-García, and M. Santos, "Exploring Reward Strategies for Wind Turbine Pitch Control by Reinforcement Learning," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 21, p. 7462, 2020, doi: 10.3390/app10217462.
- [11] Z. Civelek, M. Lüy, E. Çam, and H. Mamur, "A new fuzzy logic proportional controller approach applied to individual pitch angle for wind turbine load mitigation," *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 708–717, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.04.064.
- [12] M. Tomás-Rodríguez and M. Santos, "Modelado y control de turbinas eólicas marinas flotantes," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 16, no. 4, pp. 381–390, 2019.
- [13] L. Acho, "A proportional plus a hysteretic term control design: a throttle experimental emulation to wind turbines pitch control," *Energies*, vol. 12, no. 10, p. 1961, 2019.
- [14] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, "Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development," 2009.
- [15] M. A. Abdelbaky, X. Liu, and D. Jiang, "Design and implementation of partial offline fuzzy model-predictive pitch controller for large-scale wind-turbines," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 981–996, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.074.
- [16] J.E. Sierra-García, M. Santos, "Lookup Table and Neural Network Hybrid Strategy for Wind Turbine Pitch Control", *Sustainability*, vol. 13, no. 6, pp. 3235, 2021.
- [17] "National Wind Technology Center's Information Portal," *NREL.gov*. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/wind/nwtc.html>.
- [18] B. Han, L. Zhou, F. Yang, and Z. Xiang, "Individual pitch controller based on fuzzy logic control for wind turbine load mitigation," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 5, pp. 687–693, 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0320.
- [19] C. Zhang and F. Plestan, "Individual/collective blade pitch control of floating wind turbine based on adaptive second order sliding mode," *Ocean Eng.*, vol. 228, no. January, p. 108897, 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108897.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# A3C for drone autonomous driving using Airsim

David Villota  
davillot@unirioja.es

Montserrat Gil-Martínez, Javier Rico Azagra  
montse.gil@unirioja.es, javier.rico@unirioja.es

## Summary

*In this work, we apply artificial intelligence to guide a drone to a certain point autonomously. Unreal engine creates a virtual environment where the drone can fly, and the algorithm is trained simulating the drone dynamics thanks to Airsim plugin. The implemented algorithm is Asynchronous Actor-Critic Advantage (A3C), which trains a neural network with less computing resources than standard reinforcement learning algorithms that normally needs costly GPUs. To prove these advantages, several experiments are run using a different number of parallel simulations (threads). The drone should reach a point randomly generated each episode. The reward, the value and the advantage function are used to evaluate the performance.*

*As expected, these experiments show that a higher number of threads helps the learning process improve and become more stable. These learning results are of interest to optimize the computing resources in future applications.*

**Key words:** A3C, Actor critic, Reinforcement learning, Autonomous driving, Airsim, Multithread.

## 1 INTRODUCTION

Artificial intelligence nowadays is at the leading edge in almost all the industry fields, from data analytics to self-driving cars or drones [1][15]. It is evolving at a breakneck speed and enterprises are more and more interested in taking advantage of this technology, which pretty means that more researching efforts are being intended to develop new utilities.

In the framework of autonomously guiding a drone to a specific point, the main objective of this work is the use of reinforcement learning to achieve the best guiding performance using the least possible resources. We deem efficiency very important as it yields flexibility to run different trainings at the same time, easing the comparison of different algorithms as well as it also optimizes the time to get final results.

Unreal Engine and Airsim [17][18] will be used to simulate the drone's behaviour due to the simplicity and flexibility this API offers over other graphic engines' APIs (Gazebo, Unity) to be integrated in the code along IA libraries. In addition, they are not as user friendly, as they required a deep knowledge and specialization in their software to achieve the same results.

In this case, the control of the drone will be focused on reaching a specific point, randomly generated each episode of the training. The "brain" that will determine the variation of the speed vector searching for the objective point will be a traditional recurrent neural network with one LSTM (Long Short-Term Memory) cell to provide it with some memory. In the future, more architectures will be explored such as some variations of ResNet [24], kvCORE or DRNN (Deep Recurrent Neural Network).

For the training strategy, we have deemed several algorithms but selected A3C (Asynchronous Actor-Critic Advantage) [20] as one of our biggest concerns is the efficiency and the ability to run this code in a low performance server. A3C algorithm does not need GPUs and yields the opportunity of squeezing the CPU's performance to the max achieving great results. Also it has a better relation simplicity/results over others such as DQN (Deep Q Learning) [11], A2C (Advantage Actor Critic), PPO (Proximal Policy Optimization)[8], ACKTR (Actor-Critic using Kronecker-Factored Trust Region) [26], GAIL (Generative Adversarial Imitation Learning) [9].

A3C algorithm needs several instances of neural networks, also called models: those that will interact with the environment at the same time (local models); and another from where the local models will update their own weights when starting the episode and also to which the local models will update the weights when the episode has finished (shared model). A3C uses the leverage of multithreading to perform asynchronous updates to the shared model. By continuously updating the shared model, it is expected that the more threads used the steadier and the faster the model should learn. In our set up, we will reproduce this algorithm being able to validate that the learning performance improves when increasing the



number of threads applied to our specific purpose, guiding the drone towards a random point.

In the following text, we will explain how we have solved some of the difficulties faced. In the methodology section, we will firstly sum up the reinforcement learning algorithm that has been implemented, defining the return function, actor, critic, advantage and loss. Then, we will explain the set up developed with the different functions such as reward, actions codification, random point generation, multithreading in Airsim and the structure of the neural network. Finally, we will show our results and state some conclusions and future work to do.

## 2 METHODOLOGY

### 2.1 REINFORCEMENT LEARNING

This work will follow the standards reinforcement learning [19][20][21][11] settings where we have an agent interacting with an environment. In this case, the agent will be the NN and the environment will be the Unreal engine graphic engine alongside Airsim.

Each discrete step will have its own state  $S_t$  and for this state, the agent will output a policy  $\pi$  that will indicate which action is best to take. Once the action has been carried out, the reward  $r_t$  will measure how good the performance has been. This process is repeated continuously until a final state is achieved, for example a collision or distance too large to the objective point.

The process just mentioned only measures the behaviour in a single discrete point. As the drone is moving in a continuous state, it is also important to consider other discrete points. For this, we use the Return function, defined as in (1)

$$R_t = r_t + \gamma r_{t+1} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} \quad (1)$$

, which allows considering several discrete points with a discount factor  $\gamma \in (0,1]$ .

The goal of the NN will be to maximize  $R_t$ . The neural network will output the policy  $\pi$ ; the policy, as mentioned above, will tell us the expected return for  $R_t$  when applying that specific action in that specific state. This is also called the Action Value or the Actor, defined as in (2),

$$Q^{\pi}(s, a) = \mathbb{E}[R_t | s_t = s, a] \quad (2)$$

Thus, given a state  $s_t$ , the neural network outputs a policy  $\pi$  that tell us the expected returns to choose an

action  $a$  (2). With this action, the reward is calculated to tell us how good the performance has been in this specific discrete point. The fact of evaluating only a discrete point is that sometimes, some reward must be sacrificed to achieve a major reward in the future. For this, we use the Value function, also called Critic and defined as in (3),

$$V^{\pi}(s) = \mathbb{E}[R_t | s_t = s] \quad (3)$$

This means, given a state and a policy, which return should we expect. With this function, we are in condition of evaluating how good is the state we are in to achieve the best possible reward. Thus, this is a reference to control whether the action-value function (2) output by the NN is good or not.

While learning the model needs to be continuously updating by backpropagating the loss. The loss function will allow us to measure if the Critic is correct or also if the Critic has the correct criteria to judge the Actor. The Critic (3) asses the Actor (2) but it somehow needs to be assessed as well, for this we have the loss function, defined as in (4),

$$V_{loss} = V_{loss} + 0.5 \cdot A^2 \quad (4)$$

,where  $A$  is the Advantage function. This is defined as in (5).

$$A(a_t, s_t) = Q(a_t, s_t) - V(s_t) \quad (5)$$

and means that, given a state  $S_t$  whose Critic value is  $V$  (3), what extra reward can be achieved if an action  $a_t$  is taken.

### 2.2 MULTITHREADING IN AIRSIM

In this work, Unreal Engine and Airsim [17] will be used to implement the simulation environment. For A3C implementation, several Airsim instances will be used at the same time; each one of them will be one of the environments in which the agent will interact with. As there will be several threads, several instances of Airsim will have to be implemented at the same time. This is one of the main difficulties, as the configuration of Airsim does not allow multithreading [18]. The only way we have figured out to solve that is to configure different Local Host IPs to each Airsim instance. This way, each thread will have its environment with its single IP. The configured IPs are from 127.0.0.1 to 127.0.0. $n$ , being  $n$  the number of threads used in the simulation (see Figure 1).

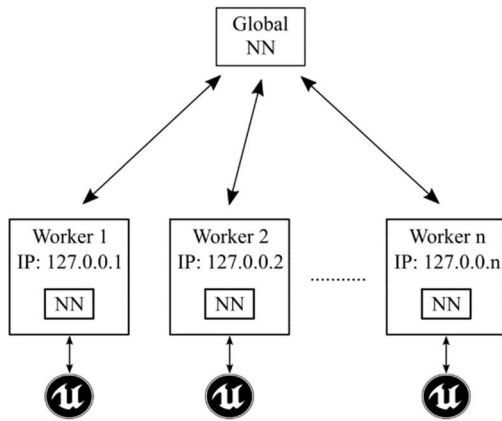


Figure 1: A3C Structure

### 2.3 RANDOM POINT GENERATION

The objective of the drone is to reach a specific point in a 3D virtual environment. The random point will be calculated using trigonometry in XY plane ( $\alpha$ ), and a random Z coordinate ( $z$ ) in a constant spherical radius  $d$ , as Figure 2 illustrates.

$$\begin{cases} \alpha = \text{random}(360) \\ z_{obj} = \text{random}(\max(Z)) \\ x_{obj} = d \cdot \cos(\alpha) \\ y_{obj} = d \cdot \sin(\alpha) \end{cases} \quad (6)$$

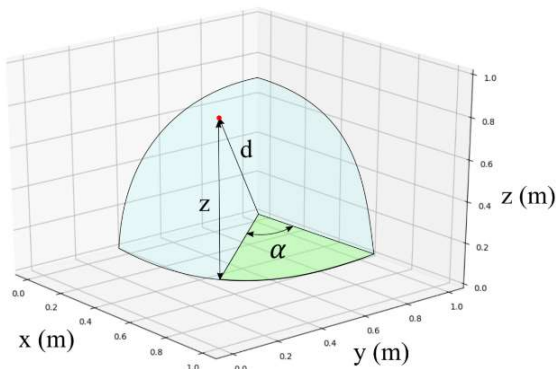


Figure 2: Parameters used for the objective point calculation

Note that the virtual environment has objects in which the drone could collide, preventing it from reaching the objective point. For this work, the object avoidance is not yet implemented, and the only drone information used as input for the NN will be the absolute drone's coordinates. If the drone collides with an object, the experiment will have finished, and another episode will start. The object will have reached the objective point when the distance between the drone and the point is less than 1 meter.

### 2.4 NEURAL NETWORK ARCHITECTURE

The Neural Network for the A3C algorithm is in Figure 3. It receives the relative distance to the objective point  $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]$  as well as the hidden state  $[h_{t-1}]$  and the cell state  $[c_{t-1}]$  [21]. On the other side, it outputs the Actor  $[Q(s, a)]$ , the Critic  $[V(s)]$ , the hidden state  $[h_t]$  and the cell state  $[c_t]$ . The internal structure is very simple. The network has an initial linear transformation with its linear rectification function (ReLU). Afterwards, the LSTM cell, whose hidden cell  $[h_t]$  will be used as input for both the Actor and Critic linear transformations. Matrix dimensions are detailed in Figure 3; let us remind that the Actor dimension  $n$  refers to the number of threads.

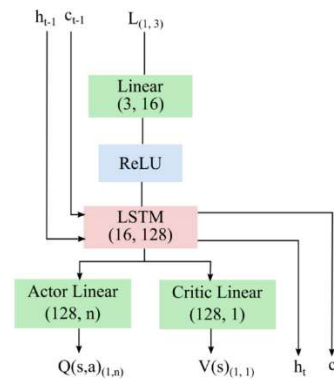


Figure 3: Neural Network Architecture

### 2.5 ACTION CODIFICATION

The action will define how the drone interacts with the environment. In this case, the actions will modify linear velocities. Taking into account the output of the NN, the current linear velocity will be increased or decreased by a certain constant value that is previously defined. The constant value is set to 0.6 m/s, i.e. the linear velocity of the axe will be incremented or decremented by 0.6 m/s. The image in Figure 4 tries to clarify the concept.

Thus, for a given Action  $a$  and a constant value  $k_v$ , the speed velocity will be incremented or decremented as

$$v(a) = [v_{x_{k-1}} + k_{v_x}, v_{y_{k-1}} + k_{v_y}, v_{z_{k-1}} + k_{v_z}] \quad (7)$$

The action will be gotten after selecting a random sample of a multinomial distribution created using as input:

$$\text{softmax}(Q^\pi(s, a)) \quad (8)$$

After that, the action will be decodified as shown in Figure 4 obtaining the variation of linear velocity in the chosen axe, also called  $k_{v_x}, k_{v_y}, k_{v_z}$ . Note that in

each episode only one of them will have a deviation value, the rest of them will be zero.

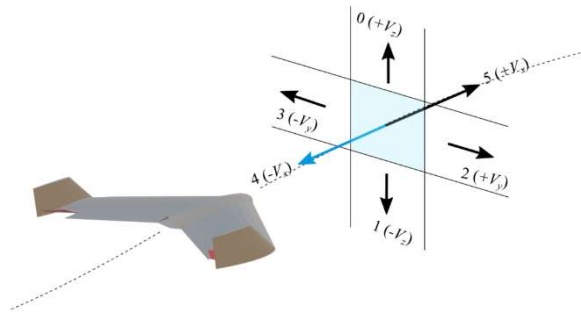


Figure 4: Codification of the actions

### 3.5 REWARD FUNCTION

The reward function will determine how good is the action yielded by the neural network once it is carried out. In other words, it is the way we can tell the algorithm how good it is performing.

The objective of the drone is to reach a given point in the environment. Thus, the variable used to compute the reward function will be the distance between the absolute position of the drone  $[x_d, y_d, z_d]$  and the absolute coordinates  $[x_o, y_o, z_o]$  of the objective point (6)

$$L = \sqrt{(x_d - x_o)^2 + (y_d - y_o)^2 + (z_d - z_o)^2} \quad (9)$$

Then, the reward function

$$r(L) = \begin{cases} -1 & L > 80 \text{ or Collision} \\ -L/40 + 1 & 80 > L > 40 \\ 0.5^{(0.15 \cdot L)} & 40 > L > 1 \\ 1 & L < 1 \end{cases} \quad (10)$$

, which is represented in Figure 5, has been created following the tips in [6]. It is constrained between (-1,1) to prevent the appearance of large numbers when backpropagating. For the intermediate values, an exponential function has been chosen to clarify that the desired behaviour is to minimize variable  $L$ .

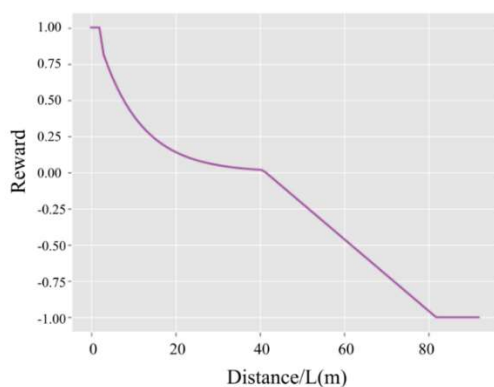


Figure 5: Reward function

### 3.5 EXPERIMENT SET UP

The experiments have been carried out in a Windows 10 Server with Visual Studio 2019, Unreal Engine 21, Airsim 1.5.0 and python 3.7.

To compare the impact the number of threads have in the learning process, several simulations will be carried out with different number of threads. We will simulate with 1,2,3,6 threads [2].

Each simulation will have 3000 episodes and each episode will last 15 seconds maximum, though it can finish before in case the point has been reached, there is a collision, or the drone gets stuck in the same position for three steps.

## 4 RESULTS

### 4.1 INITIAL EPISODE

In the initial episodes we can observe (Figure 6) that the relation between the Remaining Length and the Reward is the one stated in 3.5 while the value shows a behaviour that is not yet properly defined. We can see that in the first steps, the value grows rapidly but then it starts decreasing and never reverts this tendency even though the Remaining Length is decreasing.

A good behaviour would be that while the Remaining Length decreases, the Value function grows, as each step we are nearer to achieve our objective.

In the first epochs, weights are not yet properly updated. The Loss is too large and if the backpropagation of the Loss function is done, it could cause exploding gradients. To avoid this the gradients will be clipped to  $\pm 20$ . This is a reason it takes several epochs to be able to see a proper behaviour

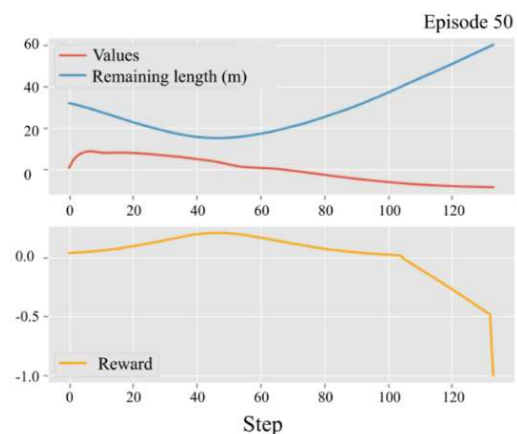


Figure 6: Parameters of an initial episode

## 4.2 FINAL EPISODE

If we pay attention to the behaviour in the final episodes (2400), we can see (Figure 7) that it behaves properly.

In the initial steps the Value function increases as the remaining length decreases. This means that at the time we are getting nearer to the objective point, the state we are in is better than before, and given the policy output by the network and the state, the expected Reward is larger. When the Remaining length starts growing in the middle steps, the Value function stops increasing and starts decreasing as the drone is getting further to the objective point.

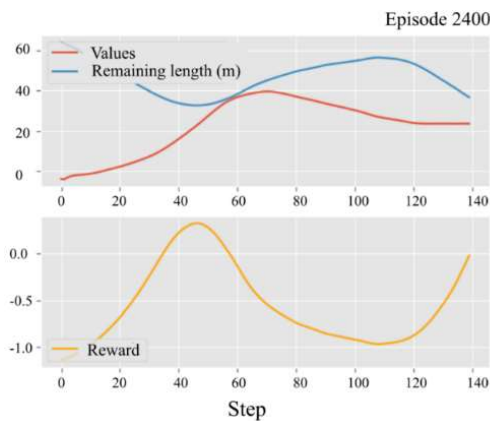


Figure 7: Parameters of a final episode

## 4.3 SUCCESSFUL EPISODE

Finally, as an example, we show the behaviour of a successful episode (Figure 8) where we can see the synchronized fluctuation of the Remaining length and the Reward as well as the Value function continuously growing until the last steps.

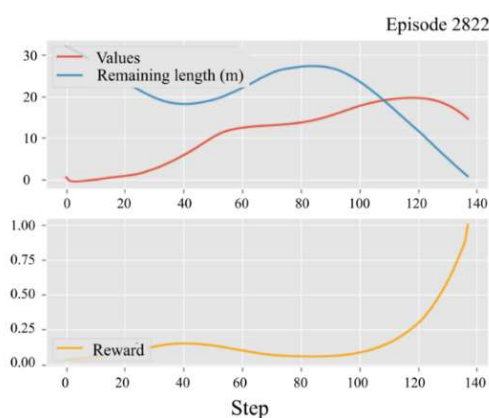


Figure 8: Parameters of a successful episode

In Figure 9, we show the 3D trajectory of the different threads in the same episode (2822). Only Thread number 1 reaches the objective point. Note that since the update to the global network is asynchronous, it is

not certain that all the local networks have the same weights, indeed it is highly improbable.

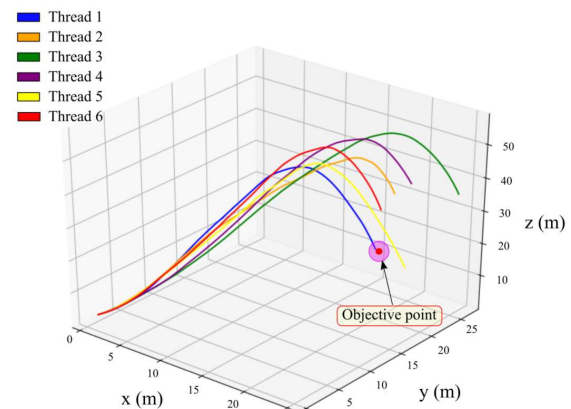


Figure 9: Behaviour of different threads in the same episode

## 4.4 LEARNING RESULTS

To evaluate how a simulation has learned, we will use the Value function as it is the one that tells us how good the states along the simulation have been. Since each single step of each episode has its own value, we will calculate the mean function of each episode and afterwards a line will be fitted in the points to ease the understanding. The graphs in Figure 10 contains the values for the different simulations with different number of threads.

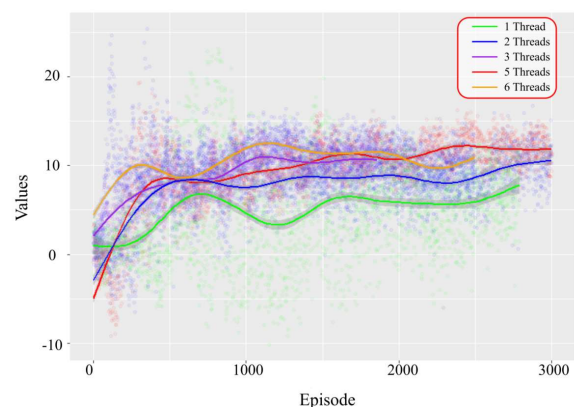


Figure 10: Values comparison for different simulations

The simulation with one single thread presents a stable behaviour during the training and it also reaches the lowest values. However, the simulation with 6 threads is the fastest one to reach the highest values. It only needs some hundreds of episodes to reach the same value than the while simulation with 2 threads. For the simulations with 2, 3 and 5 threads, we can see that each one surpasses the values of the previous one. This is the expected behaviour as mentioned in [20]. Thus, for our implementation, we can also conclude

that to have many threads directly affects the learning stability. The simulation with one single thread behaves significantly worse than those with more than one thread. The value oscillates in the first two thousand steps. Also, the more threads used the bigger values attained in the simulation and it also learns faster in the initial epochs.

## 5 CONCLUSIONS

In this work, we have successfully implemented the graphic engine and the A3C algorithm applied to the UAV field in a low performance server. This allows to launch simulations with great flexibility without the need of costly GPUs that sometimes are hard to set up. With these simulations, we have been able to demonstrate the influence of different number of threads in the training, observing that the behaviour is more stable and achieve better values with more threads. This sets the basis for starting a research line in which Asynchronous Actor-Critic Advantage will be the main training strategy for future experiments.

We are aware that the control carried out is very limited, since it only uses absolute positions. In future works, we will put more effort in implementing a more robust control of the drone. Our intention is to perform a control receiving as input the image, GPS coordinates and current angular and linear velocity. For the image processing we intend to use depth estimation as in [13][10] integrated in the neural network along with the sensors data as in [12]. Also we will study different modifications on the training strategy such as the adaptative reward described in [5].

## References

- [1] Antonio Loquercio, Ana I. Maqueda, Carlos R. del-Blanco, and Davide Scaramuzza (2018). DroNet: Learning to Fly by Driving. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(2).
- [2] Arun Nair, Praveen Srinivasan, Sam Blackwell, Cagdas Alcicek, Rory Fearon, Alessandro De Maria, Vedavyas Panneershelvam, Mustafa Suleyman, Charles Beattie, Stig Petersen, Shane Legg, Volodymyr Mnih, Koray Kavukcuoglu, David Silver (2015) Massively Parallel Methods for Deep Reinforcement Learning arXiv:1507.04296v2
- [3] David Silver (2015) Introduction to Reinforcement Learning with David Silver, DeepMind x UCL.
- [4] Danijar Hafner, Timothy Lillicrap, Jummy Ba, Mohammad Norouzi (2020) Dream to Control: Learning Behaviors by latent imagination.
- [5] Emilie Kaufmann , Pierre Ménard , Omar Darwiche Domingues, Anders Jonsson, Edouard Leurent, Michal Valko (2021) Adaptive Reward-Free Exploration
- [6] Felix Gers (2001) Long Short-Term Memory in Recurrent Neural Networks Thesis n° 2366
- [7] Jean-Bastien Grill, Florent Altche, Yunhao Tang, Thomas Hubert, Michal Valko, Ioannis Antonoglou, Remi Munos (2020) Monte-Carlo tree search as regularized policy optimization.
- [8] John Schulman, Filip Wolski, Prafulla Dhariwal, Alec Radford, Oleg Klimov (2017) Proximal Policy Optimization Algorithms
- [9] Jonathan Ho, Stefano Ermon (2016) Generative Adversarial Imitation Learning
- [10] Ke Xian, Chunhua Shen , Zhiguo Cao, Hao Lu , Yang Xiao , Ruibo Li , Zhenbo Luo, Huazhong University of Science and Technology, China The University of Adelaide, Australia Samsung Research Beijing, China (2018) Monocular Relative Depth Perception with Web Stereo Data Supervision
- [11] Matteo Hessel, Joseph Modayil, Hado van Hasselt, Tom Schaul, Georg Ostrovski, Will Dabney, Dan Horgan, Bilal Piot, Mohammad Azar, David Silver (2017) Rainbow: Combining Improvements in Deep Reinforcement Learning
- [12] Ratnesh Madaan, Nicholas Gyde, Sai Vemprala, Matthew Brown, Keiko Nagami, Tim Taubner, Eric Cristofalo, Davide Scaramuzza, Mac Schwager, Ashish Kapoor (2020) AirSim Drone Racing Lab. Proceedings of the NeurIPS 2019 Competition and Demonstration Track, PMLR 123:177-191, 2020
- [13] Rene Ranftl, Katrin Lasinger, David Hafner, Konrad Schindler, and Vladlen Koltun (2020) Towards Robust Monocular Depth Estimation: Mixing Datasets for Zero-shot Cross-dataset Transfer
- [14] Richard S. Sutton and Andrew G. Barto (2018) Reinforcement Learning: An Introduction, MIT Press, Cambridge, MA, 2018
- [15] Shantanu Ingle, Madhuri Phute (2016) Tesla Autopilot : Semi Autonomous Driving, an Uptick for Future Autonomy

- [16] Sorg, Jonathan Daniel (2011) The Optimal Reward Problem: Designing Effective Reward for Bounded Agents
- [17] Shital Shah and Debadeepta Dey and Chris Lovett and Ashish Kapoor (2017). Field and Service Robotics, AirSim: High-Fidelity Visual and Physical Simulation for Autonomous Vehicles. arXiv:1705.05065
- [18] Shital Shah (2018). Airsim Documentation
- [19] Volodymyr Mnih, Koray Kavukcuoglu, David Silver, Andrei A. Rusu , Joel Veness , Marc G. Bellemare , Alex Graves , Martin Riedmiller , Andreas K. Fiedjeland, Georg Ostrovski, Stig Petersen , Charles Beattie , Amir Sadik, Ioannis Antonoglou, Helen King, Dharshan Kumara , Daan Wierstra, Shane Legg & Demis Hassabis (2015) Human-level control through deep reinforcement learning, Macmillan Publishers Limited
- [20] Volodymyr Mnih, Adrià Puigdomènech Badia, Mehdi Mirza, Alex Graves, Tim Harley, Timothy P. Lillicrap, David Silver, Koray Kavukcuoglu (2016) Asynchronous Methods for Deep Reinforcement Learning
- [21] Volodymyr Mnih, Koray Kavukcuoglu, David Silver, Alex Graves, Ioannis Antonoglou, Daan Wierstra, Martin Riedmiller (2013) Playing Atari with Deep Reinforcement Learning arXiv:1312.5602v1
- [22] Xingyu Sha, Jiaqi Zhang, Keyou You, Kaiqing Zhang , Tamer Başar (2015) Fully Asynchronous Policy Evaluation in Distributed Reinforcement Learning over Networks, arXiv:2003.00433v3
- [23] Yuhuai Wu, Elman Mansimov, Shun Liao, Roger Grosse, Jimmy Ba (2017) Scalable trust-region method for deep reinforcement learning using Kronecker-factored approximation.
- [24] Zifeng Wu, Chunhua Shen, Anton van den Hengel (2019). Wider or Deeper: Revisiting the ResNet Model for Visual Recognition. ELSEVIER Pattern Recognition, Pages 119-133.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).



# ADAPTACIÓN DE LA DOCENCIA POR COVID-19: EXPERIENCIA EN LA INGENIERÍA AUTOMÁTICA

Oscar Miguel-Escrig, Carlos Díaz-Sanahuja, Ignacio Peñarrocha-Alós, Roberto Sanchis-Llopis

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Diseño. Universitat Jaume I

Campus del Riu Sec. Av. Vicent Sos Baynat s/n.

CP 12071 Castelló de la Plana. España

e-mail: {omiguel,csanahuj,ipenarro,rsanchis}@uji.es

## Resumen

*En este trabajo se describe y analiza la experiencia docente relativa al curso 2020-2021 en la asignatura Sistemas Automáticos. Debido a los efectos de la pandemia, se ha tenido que adaptar la docencia al no disponer de aulas suficientes que permitan una temporización correcta de los contenidos. Por lo tanto, se han desarrollado nuevos contenidos, mayoritariamente en forma de vídeo, que permiten el seguimiento del curso. Con los registros de actividad de estos nuevos recursos se ha observado la efectividad del método empleado así como su validez comparándolo con resultados de años anteriores.*

**Palabras clave:** Covid-19, Educación en ingeniería, vídeos

## 1. INTRODUCCIÓN

Con el inicio de la expansión de la covid-19 a principios del año 2020 el mundo ha sufrido un cambio sin precedentes que ha afectado a todas las facetas de la vida. Este cambio se concretó en España a mediados de marzo de 2020 con el establecimiento del estado de alarma, afectando a la movilidad y a la agrupación de personas, lo cual repercutió, entre otros ámbitos, a la docencia.

Este cambio de paradigma afectó a todos los integrantes de la comunidad universitaria alrededor del mundo por la gran incertidumbre que plantea [8, 13]. No obstante, las universidades optaron de forma unánime por adaptar su docencia presencial a una docencia en línea [14], con las dificultades que ello planteaba. Estudios como [12, 27] reflejan el impacto de dicha transición, que en algunos casos resulta apresurada o incompleta por falta de recursos.

Pese a que algunos estudios indican que los estudiantes perciben una mejor transferencia de conocimiento en sesiones presenciales, también reseñan que la modalidad en línea resulta útil y necesaria dadas las circunstancias [5]. Este hecho no entra en conflicto con la metodología didáctica en sí, ya que la docencia en línea ha sido ampliamente es-

tudiada y ofrece también grandes resultados [15]. Algunos autores la consideran un reemplazo viable a la docencia presencial [17, 18], e instituciones como la UNED, que imparte su docencia en línea, avalan su eficacia.

Por lo tanto, el problema en la transición a la docencia en línea que ponen de manifiesto los diferentes trabajos mencionados reside en una incorrecta planificación de la docencia. Existen diferentes vertientes en cuanto a cómo organizar y secuenciar los contenidos. Propuestas como el análisis de contenido [3, 20] permiten organizar la materia en un orden lógico según los conceptos clave y su relación entre ellos. Otras como el análisis de tareas [11, 10] están más orientadas a organizar el contenido procedimental, como la resolución de problemas. Reigeluth [21] propone una perspectiva que integra a las dos anteriores, planteando en primer lugar los conceptos generales, entrando en detalle en ellos y sus técnicas, para luego relacionarlos y enmarcarlos dentro de los contenidos a abordar.

Además de organizar y secuenciar los contenidos según los preceptos de alguna de las teorías anteriores, la situación actual requiere del diseño y desarrollo de materiales que se adecuen a la docencia en línea. Entre las técnicas más comunes se encuentran las videoconferencias como elemento de docencia síncrona, las cuales han demostrado ofrecer resultados similares a la docencia presencial [7, 25]. Con carácter asíncrono encontramos las lecciones grabadas o cualquier tipo de vídeo docente.

De acuerdo con la teoría del cognitismo aplicada al aprendizaje multimedia, todas las formas de transmitir conocimiento, mediante vista u oído, son capaces de activar nuestra estructura cognitiva, siendo el aprendizaje más efectivo cuando la información es transmitida por más de un canal [16, 22], es decir, se obtienen mejores resultados de aprendizaje usando un vídeo en el cual imagen y sonido transmiten un mensaje complementario simultáneamente, que si solo se usa un podcast o un texto como método de transmisión del mensaje.

Por otra parte, el uso de vídeos dota al alumnado

de cierto grado de control sobre su propio aprendizaje, lo cual según ciertos estudios incentiva su motivación y les permite regular su carga cognitiva [1, 26], y además, reduce la percepción de la carga cognitiva usada en el aprendizaje [24].

Sin embargo, si bien es típicamente aceptado que el grado de aprendizaje es directamente proporcional a la interacción del alumno con la materia [4, 6], el visionado de un vídeo, de naturaleza pasiva, también aporta cierto grado de interacción, permitiendo pausar, revisionar y tomar notas al respecto, aportando grandes beneficios al aprendizaje [19].

Teniendo esto en cuenta, en este trabajo se presenta una experiencia educativa en la cual se ha replanteado parte de la docencia a consecuencia de la coyuntura pandémica actual. Debido a las restricciones, la docencia de parte de las prácticas en laboratorio se ha sustituido por recursos disponibles en línea, bajo la forma de vídeos, que permiten al alumnado una formación autónoma. Estos vídeos no pretenden sustituir completamente a los recursos usados hasta la fecha, sino complementar la enseñanza como material de apoyo auxiliar.

## 2. PRESENTACIÓN DEL CASO

En este trabajo se presenta la experiencia docente de la asignatura “*Sistemas Automáticos*”. Se trata de una asignatura impartida en el primer semestre del tercer curso transversal a varios grados de ingeniería de la rama industrial, y tiene especial importancia ya que en algunos de estos grados no se vuelven a tratar temas relacionados con el control y la automatización.

Los contenidos de la asignatura comprenden muchos aspectos del control, abarcando desde el modelado e identificación de sistemas, hasta el diseño de controladores y análisis de sistemas realimentados. Por ello la asignatura se estructura en unidades temáticas tratando cada uno de estos aspectos. Si bien son contenidos con entidad propia, cabe destacar que en la práctica son necesarios conocimientos de cada unidad temática para desarrollar una aplicación de control funcional.

La metodología didáctica de la asignatura se estructura en cuatro actividades formativas: 1) sesiones de teoría, bajo la forma de lección magistral; 2) sesiones prácticas de problemas, más participativas o guiadas dependiendo de las características del temario; 3) sesiones prácticas de laboratorio, en que se aplican los conocimientos de la unidad temática, requiriendo en su caso trabajo previo; y 4) trabajo personal, en forma de problemas entregables, cuestionarios o trabajos previos.

En cuanto a la secuenciación de los contenidos, estos se impartían por unidad temática siguiendo el orden teoría-problemas-prácticas, requiriendo trabajo autónomo entre las sesiones en forma de problemas. Sin embargo, debido a la situación de pandemia, la temporización original se ha visto modificada como consecuencia de la reducción del aforo máximo de las aulas, y por tanto, su disponibilidad.

Esto ha causado que el lapso temporal entre sesiones que permitía en años anteriores al alumnado desarrollar el trabajo personal (entregables, cuestionarios y previos) se haya reducido tanto que la secuenciación anterior ya no es sostenible. En particular, la reducción ha sido especialmente significativa en el lapso entre problemas y prácticas de laboratorio, siendo las actividades autónomas que se realizaban en este espacio temporal las más afectadas.

## 3. MODIFICACIONES Y SEGUIMIENTO

De acuerdo con lo expuesto en la sección anterior queda claro que las modificaciones debían aplicarse principalmente a las tareas que desarrollaban los estudiantes de forma autónoma entre las sesiones de problemas y prácticas. Se da además la circunstancia de que este trabajo autónomo estaba muy vinculado con la sesión de prácticas posterior y en algunos casos constituía un trabajo previo para la misma.

Por lo tanto, los materiales docentes empleados para estas actividades han sido modificados, distribuyéndose entre dos actividades con entidad propia: Entregables de Problemas (EP) y Trabajos Previos Recomendables (TPR). De esta forma los EP son trabajos autónomos a realizar después de la sesión de problemas, pero desvinculados de la de prácticas, con lo cual no es necesario realizarlos antes de la misma. Asimismo, los TPR se han diseñado para realizarlos antes de la sesión de prácticas sin ser necesario haber realizado la sesión de problemas. La diferencia entre la secuenciación anterior y la actual se representa en la Figura 1.

Con esta separación se persiguen varios objetivos, en primer lugar, relajar las restricciones de sucesión de actividades de forma que no sea estrictamente necesario realizarlas entre sesiones, evaluar con los EP aspectos más concretos sin estar tan vinculados con un ejemplo real de la práctica que puede hacer más complejo el enunciado de forma innecesaria, y por último mantener el nivel de carga lectiva del trabajo autónomo original.

En concreto, los EP constan de diversas actividades, en forma de problemas, con y sin ayuda

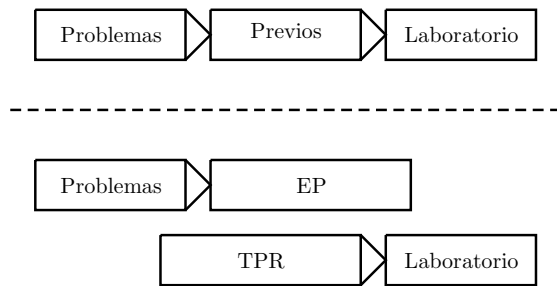


Figura 1: Diferencia entre la secuenciación anterior (arriba) y la actual (abajo).

de ordenador, y actividades usando herramientas desarrolladas en Java para la simulación de sistemas. Algunas de estas actividades son directamente requeridas para evaluar y otras sirven como apoyo para responder a cuestionarios realizados en línea cuyas preguntas se escogen de un banco de preguntas.

Por otra parte, los TPR consisten en el visionado de vídeos y en la propuesta de resolución de ejercicios tipo de las colecciones de problemas. Estas actividades no son evaluadas ya que toda la carga de evaluar la aplicación del conocimiento pasa a los EP, y por lo tanto, se centran más en introducir aspectos más técnicos de la práctica, como el manejo de las herramientas que se van a usar, cómo enfocar los problemas que allí se plantean y su resolución o la relación entre los conceptos teóricos y su repercusión en un entorno práctico; todo ello en formato vídeo. De forma complementaria, se proponen ejercicios tipo para reforzar algunos aspectos en concreto que van a ser tratados en la sesión práctica.

Pese a ser trabajos no evaluados, se ha decidido mantener las tareas previas a las sesiones de laboratorio ya que, desde una concepción constructivista del aprendizaje, según Ausubel [2] si en el sujeto no existen estructuras que le permitan aprender, a las que llama “organizadores previos”, hay que crearlas para que el estudiante pueda asimilar los nuevos conocimientos. Esto es lo que se persigue con los TPR, que las sesiones de laboratorio sean más aprovechables para el alumnado.

La carga que suponen los TPR no es muy intensa en comparación a las actividades requeridas en anteriores años antes de las sesiones prácticas, en su lugar, esta carga se ha trasladado a los EP, los cuales mantienen o amplían las tareas a realizar tras la sesión de problemas, de forma que la carga atribuida al trabajo autónomo se mantiene.

Debido a las características de los TPR se ha llevado a cabo un registro de la actividad relacionada con los materiales en concreto, es decir, se ha

registrado qué alumno y en qué fecha ha consultado cada uno de los recursos involucrados en cada TPR, sean vídeos o actividades.

Aplicar esta técnica de observación sobre actividades que no van a ser evaluadas, conlleva varias ventajas [9], entre ellas que nos van a permitir describir la conducta de los estudiantes sin el condicionante de la calificación. Además, los datos recopilados sirven de apoyo para observar el comportamiento de los estudiantes cuando son usados en conjunción con otras mediciones, como por ejemplo sus notas. Los datos recopilados mediante este registro de actividad se analizan en la siguiente sección.

## 4. RESULTADOS

La asignatura de *Sistemas Automáticos* consta de cuatro sesiones de prácticas en laboratorio diferentes. Para el TPR de estas sesiones se han preparado un total de 10 recursos, quedando distribuidos como sigue: Práctica 1, 2 recursos; Práctica 2, 1 recurso; Práctica 3, 4 recursos; y Práctica 4, 3 recursos. Estas 4 prácticas se imparten a 7 grupos de laboratorio distintos, con un total de 156 estudiantes homogéneamente repartidos.

Los recursos usados se presentan en la Tabla 1 donde se ha organizado en cada entrada cada uno de los recursos, indicando a qué práctica pertenecen, el tipo de recurso y se les ha asignado una etiqueta para diferenciarlos.

Entre los TPR de la primera sesión encontramos el vídeo con etiqueta **Model\_Graf**, el cual presenta la resolución de un problema típico sobre modelado con Graftets, incidiendo en el razonamiento y claves del enunciado que denotan que elementos o estructuras usar. En el vídeo **Impl\_UPro** se muestra como implementar en el programa Unity Pro un diagrama de contactos. Para la segunda sesión, se plantean algunos vídeos **Vid\_T5**, que muestran como identificar, a partir de la respuesta ante escalón, sistemas sin polos ni ceros en el origen y sistemas con integrador. Para preparar la tercera sesión, se plantean los problemas **Prob\_T7**, en los cuales se pide la sintonización de controladores a partir de la respuesta ante escalón conociendo el valor final o de la respuesta con un relé en el bucle. En algunos de estos ejercicios se requiere el uso de la herramienta **HJava** que permite cargar ficheros con datos experimentales y realizar el ajuste [23]. La resolución de algunos ejercicios de esta colección se muestra en los vídeos **Vid\_T7**. Para ayudar al correcto desarrollo de la sesión, en el vídeo **Med\_UPro** se muestra como registrar, mostrar y hacer mediciones en las señales de entrada de un PLC con Unity Pro. Para la última

Práctica	Etiqueta	Tipo	V. dif AP	V. tot AP	V. dif	V. tot
1	Model_Graf	Vídeo	96	159	101	174
1	Impl_UPro	Vídeo	90	154	94	165
2	Vid_T5	Vídeo	90	192	102	325
3	Vid_T7	Vídeo	64	166	84	350
3	HJava	Herramienta	39	57	72	143
3	Prob_T7	Ejercicios	58	115	82	222
3	Med_UPro	Vídeo	73	115	76	118
4	Vid_T8	Vídeo	45	94	72	227
4	Prob_T8	Ejercicios	37	68	59	139
4	Vid_SisReal	Vídeo	33	40	46	59

Cuadro 1: Recursos para los TPR y sus consultas antes de la práctica (AP) y en todo el periodo.

sesión se plantean los problemas **Prob\_T8**, en los que se pide ajustar controladores PID teniendo el modelo del sistema y cumplir con determinados márgenes de robustez. Algunos de estos problemas se resuelven en los vídeos **Vid\_T8**. Para que los alumnos relacionen todos los conceptos, en el vídeo **Vid\_SisReal** se muestra como los parámetros del controlador afectan y modifican tanto la respuesta en frecuencia como la respuesta temporal del sistema, incidiendo en como modifican los márgenes de robustez y las especificaciones de la respuesta temporal.

Como se ha comentado en el apartado anterior, se ha llevado a cabo un registro de la actividad de cada recurso, quedando registrado quien lo consulta y en qué fecha. Los datos recogidos abarcan fechas entre la activación visible del recurso hasta la fecha del examen final de la primera convocatoria. De esta forma podemos identificar el número de visualizaciones totales por recurso y de visualizaciones de alumnos diferentes por recurso, tanto antes de la fecha de la práctica de cada grupo y antes de la fecha del examen final. Todos estos datos quedan recogidos en la Tabla 1. Las columnas referentes a las visualizaciones recogen aquellas consultas hechas por alumnos diferentes (“dif”) y totales, además, el sufijo “AP” indica las consultas realizadas antes de la sesión de prácticas.

A la vista de estos datos se puede observar, en primer lugar, que la participación en la consulta de los recursos no es total por parte de los alumnos. El hecho de que no se evalúe directamente sobre los contenidos de los recursos puede jugar un papel clave. Asimismo, se puede observar una disminución en las consultas a medida que el curso avanza. Muchas pueden ser las causas de este hecho: dificultad de la asignatura, acumulación de tareas o falta de interés en los recursos.

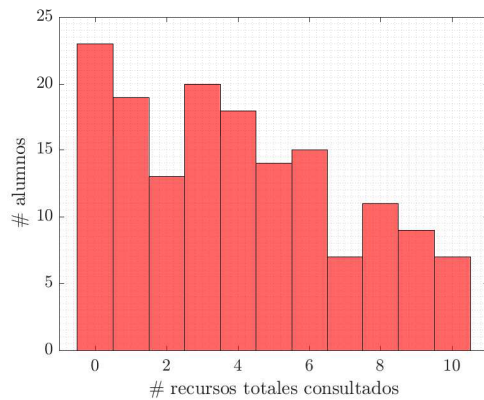
En segundo lugar, que los recursos son consultados en algunos casos más de una vez, lo cual es indicativo del grado de control de los alumnos sobre su educación y de la interacción con su aprendi-

zaje. Por otra parte, al dejar los recursos habilitados tras las sesiones, se puede observar que nuevos alumnos visualizan los recursos aún habiendo pasado la sesión para la cual estaban preparados, añadiendo en algunos casos una gran cantidad de consultas totales al recurso. Esto indica que el alumnado percibe una cierta utilidad de los recursos en su formación.

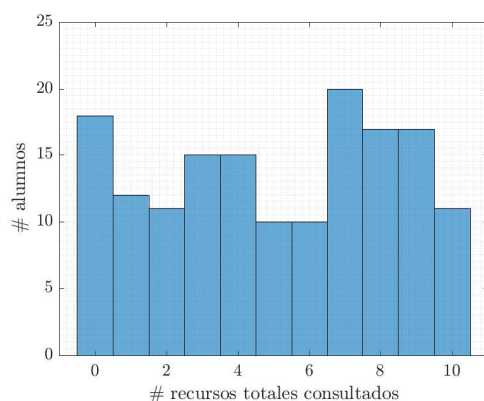
Un caso en concreto para comparar la utilización de los recursos lo encontramos en los recursos relativos a los TPR pertenecientes a la práctica 3. Los recursos para este TPR están formados por dos vídeos, una colección de ejercicios y de una herramienta informática preparada para trabajar con sistemas simulados. Fijándose en las consultas antes de la sesión de prácticas, se observa una preferencia de los alumnos por consultar los vídeos, aunque haya más de uno, antes que intentar los ejercicios propuestos o trabajar con la herramienta de aprendizaje desarrollada en Java.

Para el estudio de cara al examen final, podemos comparar la colección de problemas **Prob\_T7** con los recursos de vídeo asociado **Vid\_T7**, los cuales presentan soluciones a algunos problemas de la colección; y la colección de problemas **Prob\_T8** con algunas de sus soluciones **Vid\_T8**. En estos casos, se puede observar que la consulta de las soluciones en formato vídeo sigue siendo mayor que la consulta de la colección de problemas, tanto en número total de consultas como en alumnos diferentes consultando el recurso. Esto puede conducir a pensar, que parte del alumnado consulta los vídeos como medio para obtener un conocimiento “técnico” de resolución de problemas tipo. En cualquier caso, la máxima diferencia entre la consulta de vídeos y la colección de problemas es de 13 alumnos que apenas representan el 8% de la muestra.

Además de los datos comentados, se puede obtener también el número total de recursos consultados por cada alumno, tanto antes de la sesión de prácticas como en todo el periodo. Estos datos han sido recopilados y se presentan en la Figura 2,



(a) Antes de la práctica.



(b) En todo el periodo.

Figura 2: Número de alumnos que han consultado un total de recursos.

donde se presenta una recopilación del número de alumnos que han consultado un número total de recursos, tanto antes de la práctica (Figura 2a), como en todo el periodo (Figura 2b). Los datos reflejan que un tercio del alumnado a consultado más de la mitad de los recursos (suma de barras 6-10 en Figura 2a) pertenecientes a los TPR antes de las sesiones prácticas y de ellos solo 7 alumnos los han consultado todos. En cuanto a los datos presentados para todo el periodo (Figura 2b) se observa cierta evolución, los alumnos han consultado más recursos, aunque solo 4 alumnos se han añadido a la consulta de todos los materiales propuestos.

Con los datos disponibles, es posible agrupar por cada práctica aquellos alumnos que han consultado todo el material recomendable, parte de los recursos y ningún material. Las calificaciones obtenidas por cada uno de los diferentes grupos se presenta en el diagrama de caja de la Figura 3, donde los grupos se marcan con una *T* para todo el material, *P* para parte y *N* para ningún material. Cada sesión de práctica esta separada por una línea vertical.

Con esta representación se puede ver que aparentemente existe cierta correlación entre la consulta de los materiales planteados y el desempeño en las sesiones de laboratorio, aunque esta relación puede no ser causal y sea debida a otros motivos. Si bien no existe una diferencia tan pronunciada entre visualizar la totalidad y visualizar parte del contenido propuesto, sí que se da una mayor diferencia entre estos grupos y no consultar ningún material, tanto en resultados medios como en distribución de los mismos.

Cabe destacar que el volumen de muestras por grupo cambia entre prácticas, siendo los grupos *T* los más numerosos en las dos primeras prácticas, y los grupos *P* los más numerosos en las dos últimas, seguidos todos ellos del grupo *N* haciéndose la diferencia más pequeña con el transcurso de las sesiones.

Finalmente, para poder evaluar si la experiencia docente ha sido satisfactoria se ha incluido una comparativa con las calificaciones obtenidas en cursos anteriores en la Figura 4. En esta figura se comparan las calificaciones obtenidas en el curso 2020/2021 con las obtenidas en los cursos 2017/2018, 2018/2019 y 2019/2020, ordenadas por prácticas. Se puede observar que los resultados obtenidos en las tres primeras prácticas son bastante similares, siendo incluso ligeramente mejores en las dos primeras prácticas. Sin embargo, en la última práctica los resultados obtenidos son peores en el curso actual que en los anteriores, siendo la mediana de años anteriores superior al corte del primer cuartil de este año. Esta bajada del desempeño puede ser debida a varios factores, como por ejemplo el cansancio acumulado de llevar una docencia a la que los alumnos no están acostumbrados, el incremento de carga asociado al transcurso del curso o la baja tasa de consulta del material asociado a los TPR de esta práctica, consultas que a la vista de la Tabla 1 no llega al 30 % por recurso.

## 5. DISCUSIÓN

El estallido de la pandemia causada por la covid-19 ha afectado a todos las facetas de la vida, y entre ellas a la educación. En este trabajo se relacionan las decisiones tomadas para seguir ofreciendo una docencia adecuada en el ámbito de la automatización, a pesar de la nueva transición hacia un modelo de educación en línea.

En este contexto, durante este curso se ha decidido reemplazar el trabajo autónomo evaluado a realizar antes de las sesiones prácticas por una serie de trabajos recomendables no evaluados con menor carga lectiva. Esta sustitución viene motivada por

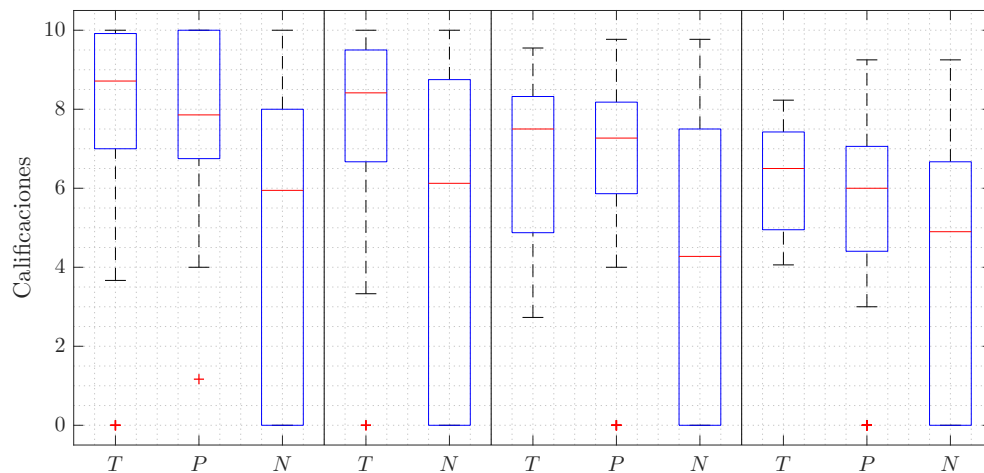


Figura 3: Distribución de las calificaciones obtenidas en las prácticas agrupadas por el grado de consulta de los recursos.

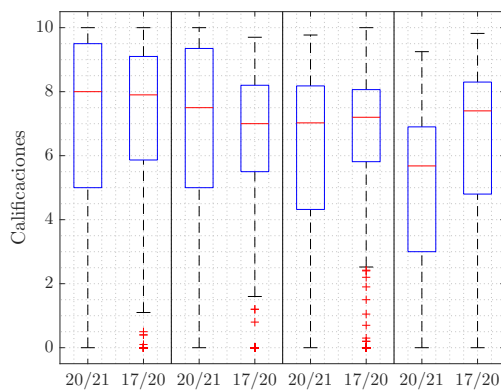


Figura 4: Comparativa de la distribución de calificaciones obtenidas en las prácticas entre el curso 2020/2021 y los cursos 2017/2018-2019/2020.

la falta de disponibilidad de aulas, la cual impide una correcta temporización de la docencia.

Los nuevos contenidos para el trabajo autónomo del alumnado vienen dados en diferentes formatos, entre ellos y el más común en forma de vídeo. Se ha optado por esta vía debido a sus ventajas para el aprendizaje, entre ellas, dotar de más autonomía al alumnado y permitirles regular la carga cognitiva en su aprendizaje.

Para evaluar los efectos producidos por estos cambios se ha llevado a cabo un registro de las consultas realizadas a los recursos propuestos, y se han confrontado estos datos con las calificaciones obtenidas por los estudiantes. En estos datos queda patente la utilidad de los recursos como “organizadores previos” para el aprendizaje, ya que existe cierta relación entre aquellos estudiantes que han

consultado los recursos propuestos y las calificaciones más altas.

Se ha observado cierta dejadez por parte de los alumnos en la consulta de los materiales, reduciéndose su consulta un 66 % a lo largo del curso, pudiendo ser causas de la misma el carácter opcional de las tareas propuestas, el aumento de carga de trabajo a lo largo del curso o la adaptación al nuevo modelo de docencia. A consecuencia, las calificaciones obtenidas han ido disminuyendo, quedando patente la relación entre el trabajo previo y el desempeño de los alumnos.

Con respecto a años anteriores, el método propuesto ofrece resultados igualmente favorables, sin embargo, en aquellos casos donde la consulta de los materiales previos ha sido menor, los resultados han sido peores que en otros años.

Por lo tanto, podemos concluir que la experiencia docente ha sido satisfactoria pero mejorable. En primer lugar, nos ha permitido copar con las dificultades derivadas de la ruptura de la temporización. En segundo lugar, los estudiantes han demostrado sacar provecho tanto de las tareas obligatorias empleadas en años anteriores como de los vídeos y materiales opcionales propuestos. Además, en aquellos casos donde se han consultado los materiales propuestos los resultados obtenidos por los alumnos han sido similares a los de otros años.

Sin embargo, queda por mejorar el recalcar a los alumnos la importancia de realizar las tareas propuestas, especialmente a medida que avanza el curso, ya que por diversas causas los alumnos tienden a no tenerlas tan en consideración para su aprendizaje.



## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la *Unitat de Formació i Innovació Educativa* de la USE, Universitat Jaume I y por la CEICE número de beca ACIF/2018/244.

## English summary

### TEACHING ADAPTATIONS DUE TO COVID-19: EXPERIENCE IN AUTOMATIC ENGINEERING

#### Abstract

*This article describes and analyzes the teaching experience related to the academic year 2020-2021 in the subject Automatic systems. Due to the effects of the pandemic, teaching has been adapted since there were not enough classrooms available to allow the correct temporal distribution of the contents. For this reason, new materials have been developed, mostly in the form of video, which allow the follow-up of the course. With the activity records of these new resources, the effectiveness of the method used has been observed, as well as its validity when compared with results from previous years.*

**Keywords:** Covid-19, Teaching in engineering, video

#### Referencias

- [1] Lakmal Abeysekera and Phillip Dawson. Motivation and cognitive load in the flipped classroom: definition, rationale and a call for research. *Higher education research & development*, 34(1):1–14, 2015.
- [2] David P. Ausubel. The psychology of meaningful verbal learning. 1963.
- [3] David P. Ausubel, Joseph D. Novak, Helen Hanesian, et al. *Psicología educativa: un punto de vista cognoscitivo*, volume 3. Trillas México, 1976.
- [4] Robert M. Bernard, Philip C. Abrami, Eugene Borokhovski, C. Anne Wade, Rana M. Tamim, Michael A. Surkes, and Edward C. Bethel. A meta-analysis of three types of interaction treatments in distance education. *Review of Educational research*, 79(3):1243–1289, 2009.
- [5] Pinaki Chakraborty, Prabhat Mittal, Manu S. Gupta, Savita Yadav, and Anshika Aroora. Opinion of students on online education during the covid-19 pandemic. *Human Behavior and Emerging Technologies*, 2020.
- [6] Michelene Chi and Ruth Wylie. The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational psychologist*, 49(4):219–243, 2014.
- [7] Jennifer Chipps, Petra Brysiewicz, and Maurice Mars. A systematic review of the effectiveness of videoconference-based tele-education for medical and nursing education. *Worldviews on Evidence-Based Nursing*, 9(2):78–87, 2012.
- [8] Harry de Boer. Covid-19 in dutch higher education. *Studies in Higher Education*, 46, 2021.
- [9] Júlia V. Espín and Mercedes Rodríguez Lajo. L'avaluació dels aprenentatges a la universitat, 1993.
- [10] Robert M. Gagné. *The Conditions of Learning and Theory of Instruction*. Holt, Rinehart and Winston, 1965.
- [11] Robert M. Gagné. *Principios básicos del aprendizaje para la instrucción*. Diana, 1975.
- [12] Jimena Gonzalez-Ramirez, Kerri Mulqueen, Ruth Zealand, Sara Silverstein, Christine Mulqueen, and Shawna BuShell. Emergency online learning: College students' perceptions during the covid-19 pandemic. *College Student Journal*, 55(1):29–46, 2021.
- [13] Jisun Jung, Hugo Horta, and Gerard A. Postiglione. Living in uncertainty: the covid-19 pandemic and higher education in hong kong. *Studies in Higher Education*, 46, 2021.
- [14] Kyungmee Lee. Coronavirus: universities are shifting classes online—but it's not as easy as it sounds. *The Conversation*, 9, 2020.
- [15] Chi-Sing Li and Beverly Irby. An overview of online education: Attractiveness, benefits, challenges, concerns and recommendations. *College Student Journal*, 42(2), 2008.
- [16] Richard E. Mayer. Applying the science of learning: Evidence-based principles for the design of multimedia instruction. *American psychologist*, 63(8):760, 2008.

- [17] Barbara Means, Yuki Toyama, Robert Murphy, Marianne Bakia, and Karla Jones. Evaluation of evidence-based practices in online learning: A meta-analysis and review of online learning studies. 2009.
- [18] Barbara Means, Yukie Toyama, Robert Murphy, Marianne Baki, et al. The effectiveness of online and blended learning: A meta-analysis of the empirical literature. *Teachers College Record*, 115(3):1–47, 2013.
- [19] Michael Noetel, Shantell Griffith, Oscar Delaney, Taren Sanders, Philip Parker, Borja del Pozo Cruz, and Chris Lonsdale. Video improves learning in higher education: A systematic review. *Review of Educational Research*, 91(2):204–236, 2021.
- [20] Joseph D. Novak. *Teoría y práctica de la educación*. Ed. Alianza Universidad, 1988.
- [21] Charles M. Reigeluth. In search of a better way to organize instruction: The elaboration theory. *Journal of instructional Development*, pages 8–15, 1979.
- [22] Vivien E. Rolfe and Douglas Gray. Are multimedia resources effective in life science education? a meta-analysis. *Bioscience education*, 18(1):1–14, 2011.
- [23] Roberto Sanchis-Llopis. Herramientas de hardware y software libre para la identificación experimental, el diseño y la implementación de controladores PID, 2013.
- [24] Sascha Schneider, Steve Nebel, Maik Beege, and Günter Daniel Rey. The autonomy-enhancing effects of choice on cognitive load, motivation and learning with digital media. *Learning and Instruction*, 58:161–172, 2018.
- [25] Jo Tomlinson, Tim Shaw, Ana Munro, Ros Johnson, D. Lynne Madden, Rosemary Phillips, and Deborah McGregor. How does telelearning compare with other forms of education delivery? a systematic review of telelearning educational outcomes for health professionals. *New South Wales Public Health Bulletin*, 24(2):70–75, 2013.
- [26] Tamara Van Gog, K. Anders Ericsson, Remy Rikers, and Fred Paas. Instructional design for advanced learners: Establishing connections between the theoretical frameworks of cognitive load and deliberate practice. *Educational Technology Research and Development*, 53(3):73–81, 2005.
- [27] Richard Watermeyer, Tom Crick, Cathryn Knight, and Janet Goodall. Covid-19 and digital disruption in UK universities: afflictions and affordances of emergency online migration. *Higher Education*, 81, 2021.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Uso del paradigma *Take-Home Labs* para la enseñanza del control automático en estudios de ingeniería

A. Hoyo, F. García-Mañas, J. Ramos-Teodoro

J. A. Sánchez-Molina, J. L. Guzmán, F. Rodríguez

CIESOL-ceiA3, Departamento de Informática, Universidad de Almería

Carretera Sacramento, s/n, 04120, Almería (España)

{angeles.hoyo, francisco.gm, jeronimo.rt, jorgesanchez, joseluis.guzman, frrrodrig}@ual.es

## Resumen

*Como alternativa a los laboratorios tradicionales, en los que los estudiantes interactúan con un sistema real cuyo uso tiende a estar limitado por el tiempo y/o el espacio, existe la posibilidad de emplear laboratorios “para llevar a casa” que constituyen un recurso didáctico más flexible. El presente trabajo describe la experiencia en la Universidad de Almería con una plataforma de este tipo que se ha empleado en estudios de grado y postgrado para la enseñanza de técnicas de modelado y control sobre un sistema termodinámico. Su aplicabilidad en otras asignaturas junto a la opinión positiva que se ha percibido del alumnado sugieren que esta podría ser una metodología con un prometedor recorrido por delante.*

**Palabras clave:** laboratorio portátil, aprendizaje experiencial, ingeniería de control, enseñanza universitaria.

## 1. INTRODUCCIÓN

Existe en psicología cognitiva una línea general de pensamiento constructivista que guarda cierta relación con el método científico experimental y se opone a los métodos tradicionales de enseñanza. Según esta, es posible la obtención de conocimiento a través de ensayo y error, convirtiendo a los sujetos en una parte activa del aprendizaje, frente a los métodos didácticos basados en lecciones y clases magistrales, donde el papel de los sujetos es meramente pasivo. De esta forma, se han consolidado a lo largo de las últimas décadas términos como aprendizaje experiencial [15] o el *learning by doing* acuñado por John Dewey [20].

La aplicación de estas metodologías requiere de material educativo apropiado para que los alumnos puedan llevar a cabo acciones sobre el mismo y reflexionar sobre sus consecuencias en un proceso recurrente de aprendizaje. En la práctica esto se traduce normalmente en la creación de un entorno controlado en el que realizar experimentos, de forma análoga a los laboratorios de centros de investigación, aunque con fines docentes. Sin em-

bargo, debido a los costes materiales y humanos que conlleva recrear ensayos reales, y gracias al avance en las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), en las últimas décadas han proliferado los denominados laboratorios virtuales tanto de carreras técnicas y científicas [3] como a nivel preuniversitario [4].

En determinadas titulaciones, especialmente en las ramas de ingeniería y ciencias experimentales, las materias están dotadas de una componente práctica muy marcada, donde se exige un fuerte contenido experimental, que precisa elementos (entornos de experimentación) que permitan a los estudiantes poner en práctica todos los conocimientos que vayan adquiriendo a lo largo del estudio de los contenidos.

Hasta ahora, se han estado utilizando laboratorios tradicionales en las instalaciones de las universidades, junto con laboratorios virtuales y remotos, principalmente por el coste del equipamiento real. En unos casos, la adquisición de unos dispositivos para la realización de pruebas experimentales no es posible, siendo necesario acceder al que está disponible en otros centros; en otras circunstancias es necesario aliviar costes y tiempos de desplazamiento.

Actualmente, debido al decremento significativo del precio del hardware de control y adquisición de datos, es posible proporcionar a los estudiantes hardware educativo a bajo coste. Por ejemplo, hoy en día se pueden utilizar tarjetas de entrada/salida a través del puerto USB con una interfaz simple basada en Raspberry Pi [12].

En términos de educación, esto abre la puerta a un cambio significativo en la forma en que los estudiantes acceden a los laboratorios, ya que ahora es posible que los alumnos tengan su propio hardware para una variedad de actividades, reduciendo así la necesidad de acceder a las instalaciones del departamento y el horario programado en las sesiones de laboratorio de los grupos de trabajo.

Surge así el paradigma *Take-Home Labs* que permite elevar a la máxima expresión la idea del “llévese el laboratorio a casa” posibilitando que, si el sistema está correctamente construido, per-

mita experimentar con él, a cualquier hora del día y en cualquier día del año, sin necesidad siquiera de conexión a Internet, o de un sistema de reservas basado en colas [8]. La idea principal es que a los estudiantes se les proporcione su propio equipo durante la impartición de la asignatura y, por lo tanto, puedan experimentar cuando lo deseen.

En este trabajo se detallará el uso de este paradigma docente *Take-Home Labs* para la enseñanza del control automático en estudios de ingeniería, como alternativa o apoyo al sistema tradicional que se utiliza en la Universidad de Almería. Esta metodología facilita la implantación de docencia multimodal y virtual. Por otra parte, con el estado de alarma decretado por la aparición de la COVID-19 y el cambio que ha habido que realizar a la docencia, de presencial a telemática, y sobre todo en la modificación de las prácticas en los estudios de ingeniería, también se ha podido analizar el uso de este paradigma en la adaptación urgente del material de laboratorio frente a la aparición de nuevas situaciones de alarma.

El resto del documento se estructura de la siguiente manera: la Sección 2 resume las formas de experimentación y los paradigmas relacionados con la enseñanza práctica en estudios de ingeniería; la Sección 3 proporciona una descripción general de la plataforma empleada como laboratorio portátil doméstico, incluyendo las adaptaciones y particularidades propias del nivel de enseñanza al que se han dirigido las actividades; las Secciones 4 y 5 incluyen una descripción de las actividades llevadas a cabo a nivel de estudios de grado y máster en el ámbito de la ingeniería industrial; la Sección 6 da conclusión a este trabajo resaltando los aspectos más importantes, desde el punto de vista del equipo docente, que justifican el interés de este paradigma para la realización de actividades formativas.

## 2. EXPERIMENTACIÓN EN LA ENSEÑANZA

Bajo el calificativo de entornos de experimentación se agrupan varias modalidades que se describen brevemente para saber a qué sistemas se está haciendo referencia. Dos son los criterios que, desde el punto de vista de los usuarios, permiten establecer una clasificación muy clara [22]:

- Forma de acceso a los recursos sobre los que experimentar. Se puede discernir entre acceso remoto a través de una red y acceso local, es decir, que no implica la necesidad de una conexión a la red para interoperar con otros componentes.

- Naturaleza del sistema sobre el que se opera. Se puede distinguir entre recurrir a modelos simulados o el trabajo con plantas reales.

Bajo los criterios en [22] se definen cuatro clases de entornos muy diferentes pero que abarcan distintas maneras de experimentación (Tabla 1). El acceso local/recurso real representa el tradicional laboratorio presencial de prácticas en el que los estudiantes trabajan con un computador conectado al sistema físico para realizar la práctica correspondiente. En el acceso local/recurso simulado todo el entorno es software y la interfaz de experimentación opera sobre un recurso simulado, virtual e inexistente físicamente que reside en el mismo ordenador que la interfaz. El acceso remoto/recurso real constituye el acceso al equipamiento de un laboratorio real a través de una red, donde el usuario opera y controla de forma remota los sistemas físicos reales. Por último, en el acceso remoto/recurso simulado los estudiantes trabajan con su interfaz de experimentación sobre un sistema virtual accedido a través de Internet, pudiendo trabajar múltiples usuarios simultáneamente sobre el mismo sistema.

Tabla 1. Entornos de experimentación

	Real	Simulado
Local	Laboratorio tradicional	Laboratorio virtual monousuario
Remoto	Telelaboratorio o laboratorio remoto	Laboratorio virtual multiusuario

En ingeniería se suelen utilizar dos paradigmas basados en estas ideas anteriores:

- **Laboratorio virtual.** Herramientas software locales o remotas basadas en WWW que, mediante el uso de un modelo y una interfaz de experimentación, simulan los principales aspectos de una planta real, permitiendo al usuario realizar las mismas operaciones que un laboratorio tradicional pero de forma virtual.
- **Laboratorio remoto.** Herramientas que permiten el acceso al equipamiento de un laboratorio real a través de una red WWW. El usuario controla de forma remota sistemas físicos reales mediante una interfaz de experimentación que se encuentra conectada directamente a la planta real. De esta forma, es posible explotar el rendimiento de los laboratorios las 24 horas de día, permitiendo una mayor flexibilidad horaria y un menor coste económico (necesidad de menos recursos).

Con el nuevo paradigma de los laboratorios portátiles, los estudiantes trabajan con acceso local y con un recurso real, similar al tradicional laboratorio presencial de prácticas pero de una manera mucho más flexible para docentes y alumnos.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA MAQUETA

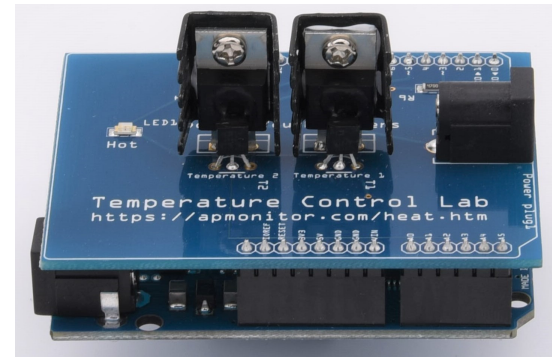
La plataforma TCLab es un producto comercial de APMonitor [1], cuyo esquema y apariencia se muestran en la Figura 1, que constituye un excelente campo de ensayo de estrategias de control multivariable a nivel industrial (se puede apreciar que los actuadores y sensores que incorpora son además ilustrativos de los que se emplean en entornos químicos e industriales en general).

Como se observa en la Figura 1b, la maqueta consta de dos transistores (actuadores) que disipan calor al hacer circular a través de ellos una corriente eléctrica cuya intensidad se regula desde la tarjeta Arduino. Cuenta también con dos termistores (sensores) que varían su resistencia eléctrica en función de la temperatura a la que se encuentren, por lo que si se mide la caída de tensión que produce una corriente conocida es posible determinar dicha temperatura. Cada termistor está unido a uno de los transistores mediante adhesivo termo-cromático, siendo directa la transmisión de calor entre actuador y sensor. El adhesivo presenta un color negro que se torna rosa a medida que se calienta el ensamblaje. También se emplea un led rojo en la placa que indica si alguno de los transistores supera los 40 °C.

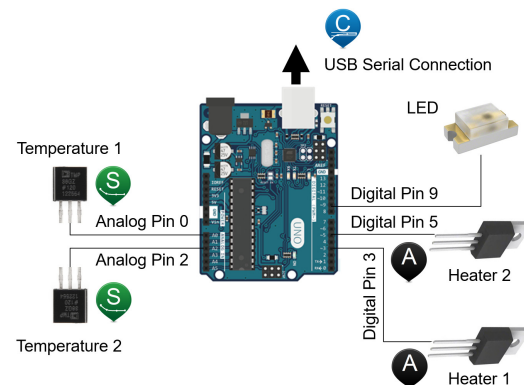
Cabe destacar que la placa Arduino no es la encargada de suministrar energía eléctrica directamente a los transistores, debido a la intensidad de corriente que requieren. Para ello el sistema se encuentra montado sobre una etapa de potencia acoplada a la anterior, como se aprecia en la Figura 1a, que es necesario conectar a la red eléctrica.

Arduino puede emplearse directamente como controlador si se programa su microcontrolador para tal efecto, o bien para la aplicación que promociona su fabricante y que se ha usado en las asignaturas donde los autores de este trabajo han hecho uso de TCLab, en las que puede servir simplemente como interfaz entre el sistema físico y un sistema de control por computador. Esto es posible gracias a las librerías que permiten la comunicación entre Arduino y software como Python o MATLAB®. Este segundo, junto con el entorno Simulink®, se han empleado en las diferentes actividades que han tenido que realizar los alumnos.

Nótese que el hecho de que la plataforma esté constituida por un par de sensores y de actuadores im-



(a) Aspecto de la plataforma



(b) Diagrama de conexiones

Figura 1. Plataforma de control de temperatura TCLab. Fuente: [1]

plica que se trata de un sistema multivariable desde el punto de vista de control. No obstante, para las actividades de cursos introductorios, el equipo docente ha adaptado las tareas de modelado y control para su aplicación sobre un único transistor, convirtiéndose en un sistema monovariable y empleándose el segundo transistor únicamente para introducir perturbaciones en el sistema.

Por analogía con el contenido de otras asignaturas, el problema se presenta a los alumnos como el control de temperatura de una resistencia que disipa calor por efecto Joule cuando se hace circular por ella una determinada corriente eléctrica (véase la Figura 2).

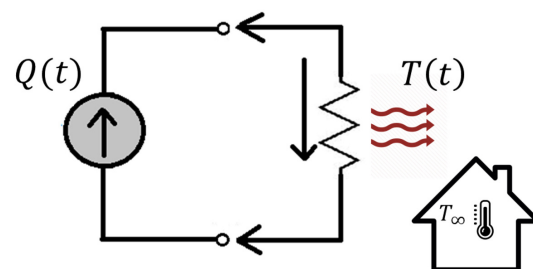


Figura 2. Esquematización del modelo físico del sistema

Los fenómenos de transmisión de calor que se consideran en el modelo simplificado que proporciona el fabricante para la plataforma son la convección y la radiación [1], conforme se expresa en la Ecuación (1). Teniendo en cuenta lo anterior y asumiendo una temperatura ambiente  $T_\infty$  estática, la dinámica de la temperatura,  $T(t)$ , con respecto al porcentaje de acción del transistor  $Q(t)$ , viene descrita por la siguiente expresión:

$$mc_p \frac{dT(t)}{dt} = UA(T_\infty - T(t)) + \epsilon \sigma A(T_\infty^4 - T^4(t)) + \alpha Q(t), \quad (1)$$

donde  $m$  es la masa del conjunto transistor-termistor-disipador,  $c_p$  su capacidad calorífica,  $A$  es la superficie en contacto con la atmósfera,  $U$  es el coeficiente global de transferencia por conducción y convección,  $T_\infty$  es la temperatura ambiente,  $\epsilon$  es la emisividad,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann, y  $\alpha$  es el factor de relación entre el porcentaje de acción del transistor y la potencia disipada por el mismo. El fabricante proporciona el valor para estos parámetros a una temperatura de 23 °C en su sitio web [1], aunque en la mayoría de las actividades llevadas a cabo, el valor de estos es indiferente, ya que el alumnado identificará sus propios modelos a partir de diferentes ensayos experimentales.

La idoneidad de TCLab como maqueta de ensayos para el ámbito del control automático se ha estudiado en múltiples trabajos publicados recientemente en la literatura científica, como los que se citan a continuación. En [19], se exponen las ventajas e inconvenientes de utilizar TCLab como laboratorio portátil y se compara frente a otro tipo de maquetas de bajo coste para enseñanza. En [7, 17], se demuestra que TCLab es una plataforma excelente para que los alumnos en cursos introductorios de control puedan identificar modelos y ensayar controladores de tipo Proporcional, Integral y Derivativo (PID). Asimismo, se han publicado algunos trabajos en los que se ensayan técnicas avanzadas con TCLab, como, por ejemplo, control por prealimentación (*feedforward*) o control en cascada [6], control predictivo basado en modelo [18] y control deslizante (*sliding mode control*, SMC) [11].

En el presente artículo, se exponen varios resultados obtenidos por los alumnos utilizando algunas de las técnicas citadas. Además, al haber realizado experiencias docentes en distintos cursos, se corrobora la versatilidad que ofrece TCLab para ensayar un amplio rango de esquemas de control, como se explica en las siguientes secciones.

## 4. EXPERIENCIA EN CURSOS INTRODUCTORIOS

En las asignaturas de iniciación al control automático a nivel de grado, como Automatización Industrial, en el módulo de formación común a la rama industrial, las experiencias con la plataforma TCLab se han planteado en dos prácticas destinadas al modelado y al control de sistemas dinámicos continuos. En la práctica de modelado, los alumnos se enfrentan a la resolución de una serie de ejercicios destinados a que adquieran destrezas en la obtención de modelos lineales de bajo orden. En la práctica de control, los alumnos se centran en diseñar un controlador con métodos de sintonía clásicos.

Las experiencias en la práctica de modelado comienzan con el estudio matemático del sistema. A partir de la ecuación diferencial que describe el comportamiento del sistema de forma simplificada (véase la Ecuación (1)), los alumnos deben obtener un modelo lineal de función de transferencia de primer orden, que relacione la temperatura del transistor (salida del sistema) con el porcentaje de acción (entrada del sistema). Este ejercicio permite que los alumnos puedan aplicar el concepto de linealización en torno a un punto de operación para obtener un modelo lineal, además de utilizar la transformada de Laplace. Por otro lado, los parámetros característicos del modelo de bajo orden (p. ej., la ganancia) poseen una relación con los parámetros físicos del sistema (p. ej., con la superficie de disipación,  $A$ ), y resulta interesante que los alumnos estudien dicha relación y comprendan cómo se vería afectada la dinámica del sistema si se producen cambios en algunos de sus parámetros físicos.

Una vez que los alumnos comprenden el concepto de punto de operación, el resto de las actividades de modelado se destinan a la obtención de modelos de función de transferencia a partir de datos experimentales, realizando ensayos con la plataforma TCLab. Cabe destacar que, dado que se trata de un sistema no lineal, se puede solicitar a los alumnos que obtengan sus modelos para un punto de operación concreto. De esta forma, los alumnos modelarán el comportamiento del sistema de manera distinta, según la dinámica que presente el sistema real en el punto de operación que les haya sido asignado. Los datos experimentales capturados durante los diversos ensayos con TCLab se emplean para obtener un modelo mediante el método de la curva de reacción y otro modelo mediante herramientas de identificación de sistemas como la que ofrece MATLAB® en System Identification Toolbox™. Una vez que se han identificado dichos modelos, los alumnos pueden realizar la va-



lidación de los mismos, efectuando nuevos ensayos con TCLab en el entorno de su punto de operación, así como analizar las diferencias gráficas que suelen aparecer entre las respuestas de los distintos modelos y los datos reales (véase la Figura 3).

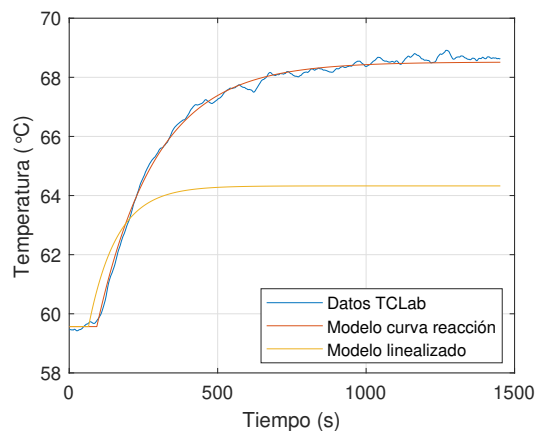


Figura 3. Comparación de modelos lineales de primer orden. El modelo linealizado está calculado para  $T(0) = 59.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pero con los parámetros que el fabricante proporciona a  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$

En la práctica de control, los alumnos utilizan uno de los modelos identificados para realizar el diseño de dos controladores: un primer controlador para un problema de seguimiento de referencias de temperatura, y un segundo controlador para regulación de una consigna de temperatura del primer transistor (el segundo transistor se utiliza para generar perturbaciones sobre el primero). En ambos casos, los alumnos deciden la estructura del controlador (de tipo PID) y qué método de sintonía escogen para calcular sus parámetros, imponiendo la dinámica que deseen para el bucle cerrado. Las funciones de transferencia que se identifican suelen presentar distintas dinámicas, contando incluso con la aparición de tiempos de retardo. Por ello, para el diseño de controladores, los alumnos emplean tanto métodos analíticos como métodos heurísticos. Principalmente, hacen uso de los siguientes métodos: cancelación polo-cero, método lambda (Figura 4), SIMC y Ziegler-Nichols [10]. Los controladores diseñados se prueban en TCLab y los datos generados en cada ensayo son estudiados por los alumnos para comprobar si se cumplen las especificaciones de control impuestas y para analizar la respuesta del sistema junto con la evolución de la señal de control.

## 5. EXPERIENCIA EN CURSOS AVANZADOS

En el marco del Máster en Ingeniería Industrial, se imparte la asignatura más avanzada de con-

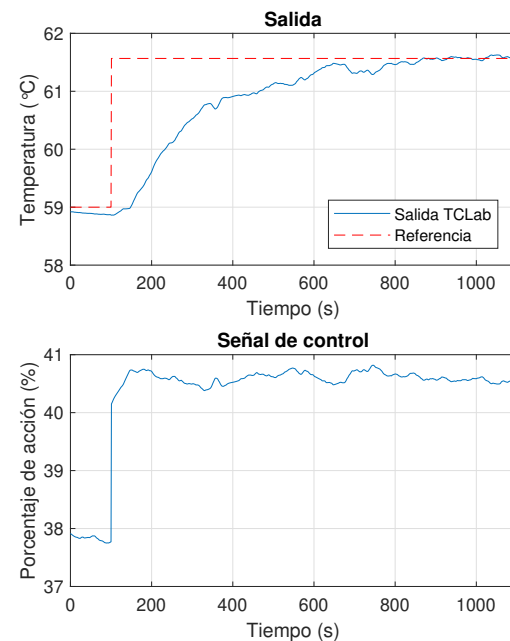


Figura 4. Ensayo de un controlador PI en TCLab en el entorno del punto de operación  $T(0)$ . Los parámetros del controlador se han sintonizado por el método lambda:  $k_p = 1.1857\text{ }^{\circ}\text{C}/\%$  y  $T_i = 197$  segundos

trol automático: Control de Procesos y de Sistemas de Producción. En esta asignatura se realiza una presentación descriptiva y actualizada de los distintos sistemas de automatización y control que se implantan en la actualidad en las más diversas actividades de producción industrial. Se pretende que los alumnos adquieran conocimientos amplios y actualizados de los principales elementos, automatismos y estrategias de control que suelen presentarse en procesos industriales y sistemas productivos y que sean capaces de realizar una planificación jerárquica de la producción y el control avanzado de dichos procesos.

Los alumnos comienzan estudiando la identificación basada en datos y calibración de modelos no lineales. A partir de ensayos en lazo abierto de la plataforma, donde se introducen escalones en la variable de entrada ( $Q(t)$ ), para obtener la respuesta de la variable a controlar ( $T(t)$ ), se utilizan diferentes técnicas para la obtención de modelos validando posteriormente la bondad de ajuste de cada uno de ellos. Por un lado, utilizando System Identification Toolbox™ de MATLAB® se obtiene un modelo lineal de alto orden ARX [13] y un modelo no lineal de alto orden NARX [14]. Por otro lado, de los dos modelos no lineales basados en datos mediante técnicas de *Deep Learning* (LSTM o NARX) se ha de obtener un modelo del proceso [21]. Por último, los alumnos deben aplicar el

algoritmo de mínimos cuadrados o genético para calibrar alguno de los parámetros del modelo no lineal del proceso (Ecuación (1)). La Figura 5 muestra la validación de los modelos obtenidos por los métodos mencionados anteriormente de un grupo de trabajo.

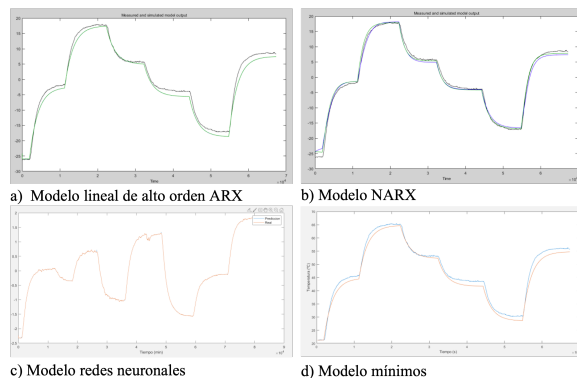


Figura 5. Validación de modelos detallados

Estudiados los métodos de modelado se procede a la implementación de estrategias de control avanzadas. Se comienza aplicando control adaptativo [2], dando libertad al alumnado para escoger entre cuatro métodos diferentes estudiados en la asignatura (ajuste por tabla, *self-tuning control*, MRAC y *Extremum Seeking Control*). Deben implementarlo en el sistema real comprobando su buen funcionamiento. El ejemplo que muestra la Figura 7 corresponde a la aplicación de la estrategia *self-tuning control* [5], el cual se basa en el cálculo en línea de los parámetros del modelo del sistema a partir de la entrada y salida del modelo real, obteniendo en línea los parámetros del controlador que mejor respondan a la dinámica del sistema. Se puede observar en detalle el esquema de control en la Figura 6.

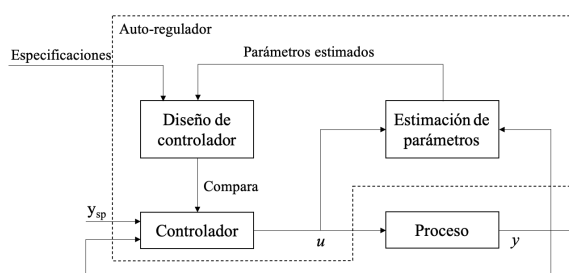


Figura 6. Esquema control *self-tuning*

Por último, los alumnos deben implementar en TCLab estrategias de control predictivo [16] y control jerárquico [9]. Para ello, de los diferentes algoritmos de control predictivo estudiados en la asignatura, lineales y no lineales, deben utilizar alguno para controlar la temperatura del sistema en torno a uno o varios puntos de operación. Por otro lado, deben adaptar un ejemplo de control jerárquico

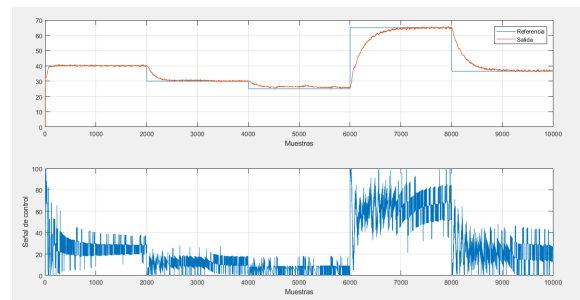


Figura 7. Ensayo con control *self-tuning*

para aportar una solución de este tipo de estrategia de control multinivel al control de temperatura del sistema TCLab. La Figura 9 muestra el ejemplo de implementación de control jerárquico de un grupo de trabajo. En este caso, han aplicado una jerarquía de dos niveles, como muestra la Figura 8, el superior encargado de la generación de consignas de temperatura y, el inferior destinado al control de bajo nivel del sistema, siendo controlado por un control predictivo.

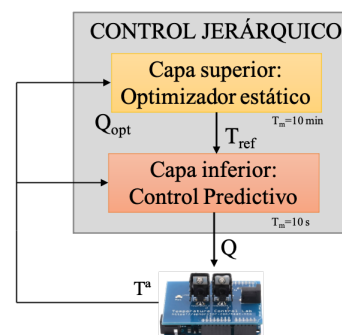


Figura 8. Esquema control jerárquico

El optimizador, con la función de coste que se muestra en la Ecuación 2, deberá ajustar el valor del calefactor ( $Q_0$ ) para poder obtener un valor de temperatura que se ajuste a los requerimientos de presión indicados. Esta ecuación está compuesta por la presión objetivo ( $P_{objetivo}$ ), densidad del fluido ( $\rho$ ), masa molar del fluido ( $M_m$ ), constante de gases ( $R$ ) y temperatura del punto de operación ( $T_0$ ). Una vez encontrado el valor óptimo del calefactor ( $Q_{opt}$ ), se calcula el valor de referencia de temperatura ( $T_{ref}$ ) que se envía al control predictivo como consigna (Ecuación 3).

$$J = \left[ P_{objetivo} - \frac{\rho}{M_m} \cdot R \cdot T_0 \right] \quad (2)$$

$$T_{ref} = T_{\infty} + \frac{\alpha \cdot Q_{opt}}{h_{conv} \cdot A} \quad (3)$$

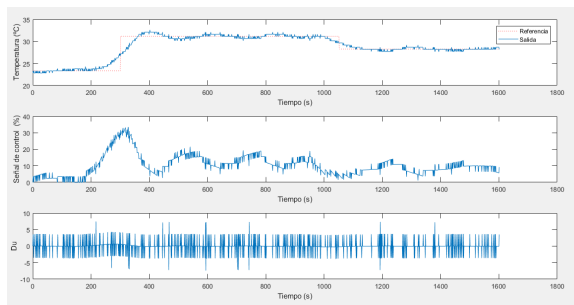


Figura 9. Respuesta del sistema con control jerárquico

## 6. CONCLUSIONES

La experimentación práctica en laboratorios es una parte esencial del proceso de aprendizaje en enseñanzas técnicas para que los alumnos aprendan la importante relación entre los conceptos teóricos y su aplicación en el mundo real. A pesar de estar ampliamente aceptado que esta formación práctica ha de realizarse en un entorno completamente equipado y controlado y con la supervisión del docente, una plataforma de experimentos diseñada adecuadamente puede suplir dichas necesidades a un coste más bajo. En este sentido, las experiencias descritas en este artículo avalan el enfoque de los laboratorios portátiles, pues la principal ventaja es que permiten a los estudiantes disponer de una maqueta real en la que realizar ensayos sin necesidad de acudir a un laboratorio del centro de enseñanza.

Además, para asignaturas relacionadas con el control automático, los laboratorios portátiles como TCLab facilitan que los alumnos puedan ensayar estrategias de control sobre un sistema real, familiarizándose con la presencia de ruido en las señales de interés del sistema, así como con la aparición de perturbaciones no medibles que pueden afectar a la dinámica del mismo. Tras las experiencias realizadas, se ha percibido una mayor satisfacción entre los estudiantes al trabajar con los laboratorios portátiles, frente al uso de laboratorios remotos o virtuales. Asimismo, el paradigma *Take-Home Labs* ha resultado una herramienta fundamental para impartir conceptos prácticos teniendo en cuenta las limitaciones ocasionadas por la pandemia de COVID-19 y la consecuente adopción de docencia no presencial por parte de la comunidad universitaria.

### Agradecimientos

Este trabajo está financiado por la ayuda 21.22.1.29C de la Convocatoria para la Creación de Grupos de Innovación y Buenas Prácticas Docentes en la Universidad de Almería (Bienio 2021 y 2022). El autor Francisco García-Mañas es bene-

ficiario de una ayuda FPU del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

## English summary

### Use of the Take-Home Labs paradigm to teach automatic control in engineering degrees

#### Abstract

*As an alternative to traditional laboratories, where the students interact with a real system whose use tends to be limited by space and/or time, there exists the possibility of employing “take-home” laboratories that constitute a more flexible didactic resource. The present study describes the experience in the University of Almería with a platform of this kind that has been used in undergraduate and postgraduate courses to teach modelling and control techniques on a thermodynamic system. Its applicability in other subject together with the positive opinion that has been perceived from the student body suggest that this might be a methodology with a promising way ahead.*

**Keywords:** portable laboratory, experiential learning, control engineering, university education.

## Referencias

- [1] APMonitor. Temperature Control Lab. [En línea], Accedido: 01-06-2021. Disponible en: <http://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/ArduinoTemperatureControl>.
- [2] Åström, K. J., “Adaptive control,” in *Mathematical System Theory*. Springer, 1991, pp. 437–450.
- [3] Calvo Gordillo, I., Zulueta Guerrero, E., Gangoiti Gurtubay, U. y López Guede, J. M., (2008) “Laboratorios remotos y virtuales en enseñanzas técnicas y científicas,” *Ikastorratza, e-Revista de didáctica*, vol. 3, pp. 1–21.

- [4] Cerezo, F. y Sastrón, F., (2015) "Laboratorios Virtuales y Docencia de la Automática en la Formación Tecnológica de Base de Alumnos Preuniversitarios," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 12, no. 4, pp. 419–431.
- [5] Clarke, D. W., *Self-Tuning and Adaptive Control*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1986, pp. 35–59.
- [6] de Moura Oliveira, P. B., Hedengren, J. D. y Boaventura-Cunha, J., "Bridging theory to practice: Feedforward and cascade control with TCLab Arduino kit," in *Portuguese Conference on Automatic Control*, 2020, pp. 23–32.
- [7] de Moura Oliveira, P. B., Hedengren, J. D. y Rossiter, J. A., (2020) "Introducing digital controllers to undergraduate students using the TCLab Arduino kit," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 17524–17529.
- [8] Durfee, W., Li, P. y Waletzko, D., "Take-home lab kits for system dynamics and controls courses," in *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, vol. 2, 2004, pp. 1319–1322.
- [9] Gil, J. D., Roca, L., Zaragoza, G., Normey-Rico, J. E. y Berenguel, M., (2020) "Hierarchical control for the start-up procedure of solar thermal fields with direct storage," *Control Engineering Practice*, vol. 95, p. 104254.
- [10] Guzmán, J. L., Costa-Castelló, R., Berenguel, M. y Dormido, S., *Control automático con herramientas interactivas*. Pearson, 2012.
- [11] Herrera, M., Camacho, O., Leiva, H. y Smith, C., (2020) "An approach of dynamic sliding mode control for chemical processes," *Journal of Process Control*, vol. 85, pp. 112–120.
- [12] Hoyo, A., Guzmán, J. L., Moreno, J. C. y Berenguel, M., (2015) "Teaching control engineering concepts using open source tools on a Raspberry Pi board," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 29, pp. 99–104, IFAC Workshop on Internet Based Control Education IBCE15.
- [13] Juliani Correa de Godoy, R. y Garcia, C., (2021) "Optimal order selection for high order ARX models," *Digital Signal Processing*, vol. 108, p. 102897.
- [14] Karami, K., Westwick, D. y Schoukens, J., (2021) "Applying polynomial decoupling methods to the polynomial NARX model," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 148, p. 107134.
- [15] Kolb, D. A., (2014) *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, 2nd ed. Pearson Education, Upper Saddle River, New Jersey, United States.
- [16] Lequesne, D., *Predictive Control*. Elsevier, 2017.
- [17] Oliveira, P. M. y Hedengren, J. D., "An APMonitor temperature lab PID control experiment for undergraduate students," in *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2019, pp. 790–797.
- [18] Park, J., Martin, R. A., Kelly, J. D. y Hedengren, J. D., (2020) "Benchmark temperature microcontroller for process dynamics and control," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 135, p. 106736.
- [19] Rossiter, J. A., Pope, S. A., Jones, B. L. y Hedengren, J. D., (2019) "Evaluation and demonstration of take home laboratory kit," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 9, pp. 56–61.
- [20] Ruiz, G., (2013) "La teoría de la experiencia de John Dewey: significación histórica y vigencia en el debate teórico contemporáneo," *Foro de Educación*, vol. 11, no. 15, pp. 103–124.
- [21] Schmidhuber, J., (2015) "Deep learning in neural networks: An overview," *Neural Networks*, vol. 61, pp. 85–117.
- [22] Sánchez, J., "Un nuevo enfoque metodológico para la enseñanza a distancia de asignaturas experimentales: análisis, diseño y desarrollo de un laboratorio virtual y remoto para el estudio de la Automática a través de Internet," Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2001.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Aplicaciones Multimedia de Técnicas de Paralelismo

Valentina Romero, Matias García Rivera, Miguel Diaz-Cacho,  
Esc. Ing. Informática, Universidad de Vigo, vromero18@esei.uvigo.es, mgrivera@uvigo.es, mcacho@uvigo.es

René Lastra  
Oficina de Proyectos Internacionales, Universidad de Vigo, renelastracid@hotmail.com

## Resumen

*La visión artificial es una de las técnicas mas utilizadas para la sensorización de datos de retorno en sistemas de control. Este artículo muestra el empleo de la técnica del paralelismo enfocado a procesamiento de imagen y video, tanto con instrucciones de tipo SIMD como con threads (hilos), como método docente. La finalidad del empleo de estas técnicas es conseguir aprovechar al máximo, en la medida de lo posible, los recursos de la computadora, así como conseguir un mejor rendimiento y velocidad de procesamiento. Las técnicas de paralelismo tienen muy diversas aplicaciones, resaltándose en este caso las aplicaciones en la industria y particularmente en el paradigma de la Industria 4.0 y el mantenimiento. Este artículo muestra cómo utilizar estas técnicas utilizando el lenguaje de programación C y la librería OpenCv.*

**Palabras clave:** Paralelismo, OpenCV, IIoT.

## 1 Introducción

Una de las formas de crear sensores de defectos visuales para la industria y en particular para la ingeniería del mantenimiento es la de dividir la imagen en secciones y comparar todas las secciones con las secciones de un patrón visual del defecto. La división de la imagen en secciones y su comparación con otra tiene los mismos fundamentos que la creación de un “efecto mosaico” tomando como base una imagen cualquiera. El “efecto mosaico” permite crear en entornos docentes una práctica amena y visual sin perder en ningún momento la perspectiva de la detección de patrones mediante comparación.

En la materia de Arquitecturas Paralelas de la Escuela de Ingeniería Informática de la Universidad de Vigo [6], se plantea el uso de técnicas de paralelismo del tipo SIMD (Singel Instruction Multiple Data) para procesar imagen y vídeo, centrándose en el empleo de instrucciones SSE2 (Streaming SIMD Extensions 2), threads e instrucciones AVX2 (Advanced Vector Extensions

2). Existen precedentes en la misma materia utilizando el paralelismo en video [1] e incluso utilizando el audio como ejemplo de paralelismo empleando la librería Portaudio [12]. El objetivo esencial de esta materia es el de aprovechar las posibilidades que ofrecen las arquitecturas monoprocesador, procesadores vectoriales, sistemas multiprocesador, sistemas multicomputadora, clusters y los procesadores multi-core. Para la consecución de este objetivo es necesario introducirse en las prácticas del paralelismo, demostrando que existe una mejora bastante notable entre aquellos programas que hacen uso de estas técnicas y aquellos que no las aplican y observando cómo afecta a la velocidad de ejecución de los mismos y al rendimiento del sistema en general.

Las competencias de la materia de Arquitecturas Paralelas son:

- Utilizar los conocimientos adquiridos para conseguir programar con un alto rendimiento.
- Ser capaz de diseñar o modificar algoritmos para que apliquen paralelismo, comprendiendo cómo se puede descomponer un problema y cómo afectará el utilizar estas técnicas a la hora de implementarlo.

Los trabajos asociados al “efecto mosaico” comparan una imagen patrón (imagen P) con cualquier otra imagen (imagen O), dividiendo ambas imágenes en sectores del mismo tamaño y asignando pesos a cada uno en función de los parámetros que se quieran comparar. Una vez hecho se sustituyen los sectores de la imagen O por los sectores “mas parecidos” de la imagen P. Esta técnica se hace habitualmente para imágenes estáticas, pero en la industria, y en particular en la ingeniería de mantenimiento es necesario conocer el comportamiento de un sistema de forma dinámica, por lo que se hace necesario comparar un movimiento con un patrón. La realización del “efecto mosaico” no es conocida para imágenes en movimiento.

Un ejemplo de efecto mosaico, orientado a la detección de irregularidades en una yanta se presenta en la figura 1, donde la imagen patrón P es un



cuadro de materiales, y la imagen original O es una yanta estándar de un automóvil. El resultado sería la imagen R.

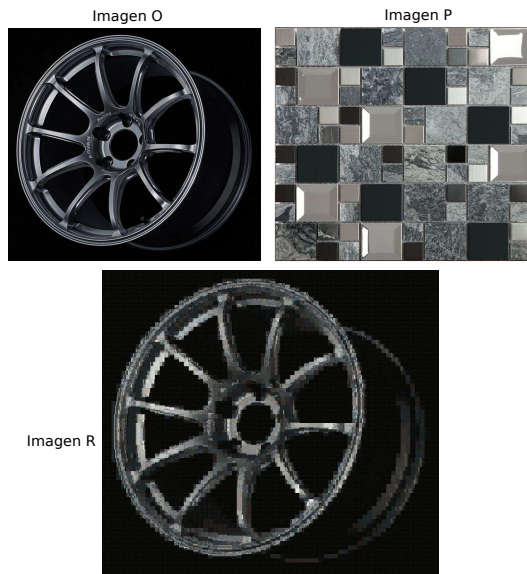


Figura 1: Ejemplo efecto mosaico aplicado a una yanta

Este trabajo muestra cómo desarrollar la forma de crear un mosaico de un video partiendo de una imagen base utilizando técnicas de paralelismo. De esa forma se consiguen proyectar las competencias a adquirir por el alumnado que curse la materia con los requerimientos presentes y futuros de la producción y mantenimiento industrial.

Los objetivos y la motivación de la realización de *efectos mosaicos* para la industria y el entorno académico se adelantan en esta introducción. La sección II presenta las técnicas de paralelismo y su aplicación a situaciones reales. La sección III describe la creación de un mosaico entre un vídeo y una imagen con técnicas específicas de paralelismo SSE2 y división en hilos o Threads. Finalmente las Conclusiones se resumen en la sección IV.

## 2 DESARROLLO DE LAS TÉCNICAS DE PARALELISMO APLICADO A CASOS PRÁCTICOS

El lenguaje C está demostrado ser el mas eficaz para el aprovechamiento de las cualidades de un procesador, al ser prácticamente un lenguaje ensamblador de alto nivel. No obstante requiere de una curva de aprendizaje mucho mas atenuada que otros lenguajes de programación. Para la programación utilizando técnicas de paralelismo en procesamiento de imagen, este lenguaje es el mas recomendado, a pesar de que otros lenguajes

como python disponen de las librerías OpenCV [10]. Uno de los motivos es la existencia de funciones nativas como "intrinsics", SSE2 e instrucciones AVX2.

### 2.1 INTRINSICS Y C

Un intrinsics es un conjunto de funciones que se compilan directamente a una secuencia de una o más instrucciones en lenguaje ensamblador [9]. Los intrinsics de Intel fueron pensados desde un principio para ser utilizadas en lenguaje C. Se pueden emplear con otros lenguajes, pero eso implicaría la traducción de esas instrucciones en C a esos lenguajes.

### 2.2 INSTRUCCIONES SSE2

El conjunto de funciones intrinsics son las instrucciones que se emplean al trabajar con SIMD (Single Instruction Multiple Data). Esta técnica es la que se utiliza para conseguir paralelismo a nivel de datos. Dentro de esta técnica, se encuentran algunas de las funciones "intrinsics". Uno de los conjuntos de funciones "intrinsics" es el conjunto de instrucciones SSE2 (Streaming Single instruction multiple data Extensions 2). SSE2 reemplazó a la versión anterior (SSE1) y a MMX. SSE2 no tiene ningún registro en común con la FPU x87 [11] (registros reservados para instrucciones de coma flotante) y además añade 8 nuevos registros no compartidos. En cambio, MMX y SSE1 sí tienen registros compartidos con la FPU x87, lo cual genera conflictos. Además, los últimos cambios que se hicieron en SSE2 fueron en el año 2004, por lo tanto, cualquier persona con un ordenador de 64 bits podrá ejecutar este tipo de instrucciones.

Para poder trabajar con SSE2 se debe de incluir la librería *emmintrin* al principio del programa (`#include <emmintrin.h>`) y también es necesario indicarle al compilador que se utiliza SSE2 (`-msse2` en las opciones del compilador). El tipo de dato empleado es el de un registro de 128 bits que almacena integers (las imágenes trabajan con integers de 8 bits). Este tipo de dato es `_m128i`.

A continuación se describirán las instrucciones utilizadas en las prácticas de Arquitecturas Paralelas, [4] que sirven tanto para crear un mosaico entre 2 imágenes como para crear un mosaico entre un vídeo y una imagen.

- `_m128i _mm_loadu_si128 (_m128i const* mem_addr)`

Carga 128 bits de datos en destino. A diferencia de la instrucción `_m128i _mm_load_si128 (_m128i const* mem_addr)`, no necesita estar "acotada" bajo ningún límite particular como



pasa con la última, que debe estar acotada en un límite de 16 bytes (si lo supera, da lugar a una excepción). Ocurre lo mismo con todas las demás instrucciones de ese estilo.

- `void _mm_storeu_si128 (__m128i* mem_addr, __m128i a)`

Guarda 128 bits de datos del registro 'a' en destino.

- `_m128i _mm_add_epi32 (__m128i a, __m128i b)`

Añade (suma) 32 bits de datos empaquetados en los registros a y b y guarda los resultados en destino.

- `_m128i _mm_srli_si128 (__m128i a, int imm8)`

Desplaza a la derecha imm8 bytes mientras se desplaza en ceros y guarda los resultados en destino.

- `_m128i _mm_sad_epu8 (__m128i a, __m128i b)`

Calcula diferencias absolutas (resta y hace el valor absoluto del resultado) entre los enteros sin signo de 8 bits de los registros 'a' y 'b', a continuación, realiza la suma horizontal cada 8 diferencias consecutivas, con el fin de generar enteros de 16 bits sin signo y luego empaqueta estos últimos en los 16 bits bajos de los elementos de 64 bits en destino. Esta instrucción es muy útil, ya que permite calcular las diferencias entre 2 bloques (bloques de pixel) a la vez, es decir, en paralelo. Esto quiere decir que la carga computacional se verá reducida, lo cual implica una mejora de rendimiento.

- `int _mm_cvtsi128_si32 (__m128i a)`

Copia el entero bajo de 32 bits en el registro 'a' en destino.

### 2.3 INSTRUCCIONES AVX2

AVX2 [6] es un conjunto de instrucciones que emplean paralelismo que surge como mejora de AVX y de SSE2. La novedad de AVX2 fue el aumento de tamaño de los registros, que pasaron de ser de 128 bits a ser de 256 bits. Además, añade 32 nuevos registros no compartidos. Como consecuencia de su mayor tamaño, se puede almacenar más información (el doble que en SSE2) y tratarla simultáneamente, es decir, de forma paralela. Otra ventaja es que no solo admite instrucciones de 256 bits, sino que también admite las de 128 bits. El tipo de dato que se usa para AVX2 correspondiente con `_m128i` es `_m256i`. Además, es necesario incluir la librería `immintrin` (`#include <immintrin.h>`) y hay que indicarle al compilador

que se están empleando instrucciones AVX2 (`-mavx2` en las opciones del compilador). El funcionamiento de estas instrucciones es exactamente el mismo que el de las de SSE2. Algunas de las instrucciones AVX2 que se han utilizado en este trabajo son las siguientes:

- `_m256i _mm256_loadu_si256 (__m256i const* mem_addr)`

- `void _mm_storeu_si256 (__m256i* mem_addr, __m256i a)`

- `_m256i _mm256_sad_epu8 (__m256i a, __m256i b)`

### 2.4 Threads

Los threads, también conocidos como Hilos, se definen como la agrupación de un trozo de programa junto con el conjunto de registros del procesador que utiliza y una pila de máquina. [2] El uso de threads tiene la finalidad de repartir el trabajo para conseguir unas mejores prestaciones, consiguiendo que varias tareas se ejecuten de forma paralela [5]. En este trabajo se utilizaron threads para distribuir la tarea de creación del mosaico de cada frame de un vídeo. Además, utilizándose de forma conjunta con paralelismo, SSE2 en este caso, los resultados fueron superiores.

## 3 CREACIÓN DE UN MOSAICO ENTRE UN VÍDEO Y UNA IMAGEN CON SSE2 Y THREADS

Este trabajo consiste, en síntesis, en crear el mosaico de un vídeo. Para ello, se partirá de un vídeo y una imagen base. El objetivo es ver en una ventana los frames del vídeo original y en otra ventana los frames en mosaico utilizando SSE2 [8] y threads [7]. Además, es importante prestar atención al tiempo de ejecución, ya que se intentará que el vídeo se vea fluido.

Para la creación del mosaico, se precisan 3 funciones:

```
void copiarBloqueSSE2(int i, int j, IplImage * imagenOrigen, int k, int l, IplImage * imagenDestino) {
    int fila, columna;

    for (fila = 0; fila < ALTOBLOQUE; fila++) {
        _m128i *origen = (__m128i*) (imagenOrigen->imageData + (i + fila) * imagenOrigen->widthStep
            + j * imagenOrigen->nChannels);
        _m128i *destino = (__m128i*) (imagenDestino->imageData + (k + fila) * imagenDestino->widthStep
            + l * imagenDestino->nChannels);
        for (columna = 0; columna < (ANCHOBLOQUE * imagenDestino->nChannels); columna += ANCHOBLOQUE) {
            _m128i reg = _mm_loadu_si128(origen++);
            _mm_storeu_si128(destino++, reg);
        }
    }
}
```

Figura 2: Función copiar bloque con SSE2

```

int compararBloqueSSE2(int filaBloque1, int columnaBloque1, IplImage * img1,
int filaBloque2, int columnaBloque2, IplImage * img2) {
int fila, columna,
sad, suma = 0;
__m128i reg1, reg2, reg3, reg4, reg5;

for (fila = 0; fila < ALTOBLOQUE; fila++) {

__m128i *origen = (__m128i*) (img1->imageData +
((fila + filaBloque1) * img1->widthStep)
+(columnaBloque1 * img1->nChannels));
__m128i *destino = (__m128i*) (img2->imageData +
((fila + filaBloque2) * img2->widthStep)
+(columnaBloque2 * img2->nChannels));
for (columna = 0; columna < ANCHOBLOQUE *
img2->nChannels; columna += ANCHOBLOQUE){
reg1 = _mm_loadu_si128(origen++);
reg2 = _mm_loadu_si128(destino++);
reg3 = _mm_sad_epu8(reg1, reg2);
reg4 = _mm_srli_si128(reg3, 8);
reg5 = _mm_add_epi32(reg3, reg4);
sad = _mm_cvtsi128_si32(reg5);
suma += sad;
}
}
return suma;
}

```

Figura 3: Función comparar bloque con SSE2

Las 2 funciones anteriores, en conjunto, sirven para buscar en una imagen ‘A’ el bloque de pixel más semejante al bloque de pixel correspondiente en una imagen ‘B’ y a continuación, copiarlo.

La siguiente función es la más importante en esta práctica de laboratorio.

```

void mosaicoThread(void *ptr) {
int parte = *((int*) ptr);
int filasP = Video->height / NTHREADS;
unsigned int fila1 = 0, fila2,
columna1, columna2,
diferencia, nuevaDiferencia,
i, j;
for (fila1 = parte * filasP; fila1 < (parte + 1) * filasP; fila1 += ALTOBLOQUE) {
for (columna1 = 0; columna1 < Video->width; columna1 += ANCHOBLOQUE) {
diferencia = ANCHOBLOQUE * ANCHOBLOQUE * 255 * 3 + 1;
for (fila2 = 0; fila2 < Video->height; fila2 += ALTOBLOQUE) {
for (columna2 = 0; columna2 < Video->width; columna2 += ANCHOBLOQUE) {
nuevaDiferencia = compararBloqueSSE2(fila1, columna1,
Video, fila2, columna2, Frutas);
if (nuevaDiferencia < diferencia) {
diferencia = nuevaDiferencia;
i = fila2;
j = columna2;
}
}
}
}
copiarBloqueSSE2(i, j, Frutas, fila1, columna1, Mosaico);
}
}
}

```

Figura 4: Función mosaico Thread

La función mosaicoThread (figure 4) es la función a la que se llamará en el método main. Esa llamada se realizará para indicarle a cada thread que se invoque, que tiene que realizar el mosaico.

NTHREADS se corresponde con el número de threads que se van a utilizar. Es conveniente conocer las capacidades del procesador con el que se va a trabajar, ya que el número de threads que se puedan usar, depende directamente del procesador. Se puede trabajar hasta con 8 threads para aquellos procesadores que tienen 4 núcleos o incluso 12 threads, para aquellos procesadores con

```

pthread_t threads[NTHREADS];
int i, filas[NTHREADS];

while (cvGrabFrame(Capture)) {

Video = cvQueryFrame(Capture);

if (!Video) {
break;
}

for (i = 0; i < NTHREADS; i++) {
filas[i] = i;
pthread_create(&threads[i], NULL,
(void *) &mosaicoThread,
(void *) &filas[i]);
}

for (i = 0; i < NTHREADS; i++) {
pthread_join(threads[i], NULL);
}

cvShowImage("Video Shrek", Video);
cvShowImage("Mosaico", Mosaico);

cvWaitKey(1);
cvWriteFrame(pWriter, Mosaico);
}

```

Figura 5: Bucle para mostrar por pantalla el vídeo base y el mosaico del vídeo

6 núcleos. A veces, al ver las características del procesador, puede indicar que es capaz de trabajar con más threads de los que realmente puede. Esto se debe a la tecnología Hyperthreading. Esta tecnología consiste en que cada núcleo cambie la ejecución entre 2 threads a una velocidad muy alta. Esto no quiere decir que tenga el mismo rendimiento que un procesador que sí es capaz de trabajar normalmente con ese número de threads, de hecho es menor, pero mayor que si se empleasen menos threads de los posibles.

Se pueden comprobar las características de la CPU mediante la aplicación CPU Z para Windows [3].

En el método main, se creará un array, threads[NTHREADS], que contendrá tantos elementos como threads haya y será necesario a la hora de “llamar” a los threads y un array, filas[NTHREADS], encargado de definir la parte de la imagen que se le encargará a cada thread.

Lo que hace Capture es almacenar el vídeo base que se haya escogido. Video almacena cada frame del vídeo base. Es importante tener en cuenta que un vídeo es una sucesión de imágenes, por lo tanto nunca se deja de trabajar con imágenes como se hacía en prácticas anteriores.

Se podría decir que el bucle hace lo siguiente: mientras haya vídeo base, se guardará cada frame en Video, el cual también se mostrará por pantalla. Hay dos bucles for. El primero se encarga de crear los threads hijos (tantos como se haya in-

dicado en NTHREADS) y de invocar a la función `mosaicThread`, indicando al thread invocado la parte del mosaico que tiene que crear. El segundo `for` es el encargado de esperar a que el thread que se le indique finalice y una vez este termine, parar la ejecución del thread padre.

Con cada frame, muestra en una ventana (“Video Shrek”) los frames del vídeo base y en otra ventana (“Mosaico”) el resultado de realizar el mosaico de cada frame del vídeo base, a tiempo real. Es decir, ambas ventanas se reproducen de manera fluida simultáneamente.

El bucle principal termina cuando ya no hay más frames en el vídeo base, lo que indicaría que el vídeo habría terminado. El resultado [13] se puede comprobar en el vídeo al que se puede acceder escaneando el código QR. También cuenta con una breve explicación acerca del funcionamiento del programa.



Figura 6: Video efecto mosaico

## 4 Conclusiones

El uso de técnicas de paralelismo es especialmente útil a la hora de programar con altas prestaciones. En el caso práctico propuesto en este artículo, explicado en el apartado 3.2, se aprecia cómo utilizando threads combinado con SSE2, hay una mejora de rendimiento notable. En eso consiste utilizar técnicas de paralelismo. Con SIMD se consigue tratar varios datos al mismo tiempo con una sola instrucción y con threads se reparte la carga de trabajo de manera que la ejecución de la parte que le toca a cada thread se ejecuta en paralelo a las demás. En el proyecto descrito en este trabajo, se ha creado el *efecto mosaico* de un vídeo mediante el empleo de threads y SSE2.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el soporte de los proyectos ANL-Med (586035-EPP-1-2017-1-DZ-EPPKA2-CBHE-JP) y SM-TMC (586035-EPP-1-2017-1-DZ-EPPKA2-CBHE-JP).

### English summary

## PARALLELISM TECHNIQUES APPLIED TO MULTIMEDIA

## Abstract

*Artificial vision is one of the most used techniques to collect feedback data in control systems. This article shows the use (as teaching method) of the technique of parallelism centered on image and video processing, both with SIMD-type instructions and threading. The purpose of using these techniques is to take advantage as much as possible of the resources of the computer, as well as to achieve better performance and to reduce processing time. These techniques has several applications, but highlighting the use in Industry 4.0 and Maintenance 4.0. This article shows how to use these techniques using the C programming language and the OpenCv library.*

**Keywords:** Parallelism, IIoT, OpenCV.

## Referencias

- [1] C. Márquez, M. García, M. Díaz-Cacho, J. Camaño, “Paralell computing technologies in video stabilization for teaching purposes”, artículo para ‘Jornadas de Automática 2019’
- [2] Concepto de Thread, [online] <https://www.rastersoft.com/OS2/CURSO/THREAD.HTM>
- [3] CPU Z, System Information Software, [online] <https://www.cpubid.com/software/cpuz.html>.
- [4] Intel Intrinsics Guide, intel.com, [online] <https://software.intel.com/sites/landingpage/IntrinsicsGuide/>
- [5] James Reinders, Intel Threading Building Blocks: Outfitting C++ for Multi-core Processor Parallelism, O’Reilly, 2007’.
- [6] M.G.Rivera, (2019) Guía docente de Arquitecturas Paralelas, ESEI-Universidad de Vigo, España.
- [7] M.G.Rivera, (2019), Mosaico y Paralelismo con Hilos, material de Arquitecturas Paralelas, Dpto. Ing. Sistemas y Automática, Universidad de Vigo, España.
- [8] M.G.Rivera, (2019), Mosaico y Paralelismo SIMD, material de Arquitecturas Paralelas, Dpto. Ing. Sistemas y Automática, Universidad de Vigo, España.

- [9] M.G.Rivera, (2019), Transiciones entre imágenes con SSE2, material de Arquitecturas Paralelas, Dpto. Ing. Sistemas y Automática, Universidad de Vigo, España.
- [10] OpenCV, [opencv.org](https://opencv.org), [online] <https://opencv.org>.
- [11] Parhami, Behrooz, Arquitectura de computadoras: de los microprocesadores a las supercomputadoras, McGraw-Hill Interamericana, 2007, [online] [http://www.apps4two.com/curso\\_dba/bibliografia/3-Arquitectura.de.computadoras.Behrooz.Parhami.PDF](http://www.apps4two.com/curso_dba/bibliografia/3-Arquitectura.de.computadoras.Behrooz.Parhami.PDF)
- [12] Portaudio, [portaudio.com](http://www.portaudio.com), [online] <http://www.portaudio.com>.
- [13] Valentina Romero, Efecto mosaico de un video con threads y SIMD, 2020. [online],



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# LABORATORIO REMOTO PARA EL ROBOT EDUCATIVO DOBOT MAGICIAN

Daniela A. Goncalves-López-Medrano, Jesús Chacón, José A. López-Orozco, Eva Besada-Portas  
Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática. Universidad Complutense de Madrid (UCM)  
{dgoncalv,jeschaco,jalopez,ebesada}@ucm.es

## Resumen

*Este artículo presenta una metodología para dar acceso remoto, a través de una aplicación web, al robot educativo Dobot Magician. El procedimiento consiste en 1) ampliar la funcionalidad de ReNo-Labs, el servidor utilizado en la Universidad Complutense de Madrid (UCM) para poner en marcha sus laboratorios de Control de Sistemas, y en 2) implementar un controlador para el robot en Python. Además, se despliega todo el software del laboratorio en una Raspberry PI y se utiliza EJS, reforzado mediante un “Plugin”, para gestionar de forma centralizada la puesta en marcha del laboratorio. Finalmente, también se presenta un ejemplo de aplicación práctica del laboratorio remoto.*

**Palabras clave:** EJS, Node.js, Raspberry Pi.

## 1. INTRODUCCIÓN

La realización de prácticas de laboratorio permite a los alumnos de Ciencias Experimentales e Ingeniería aplicar, sobre casos reales, los conocimientos adquiridos en las sesiones teóricas y adquirir habilidades y competencias útiles para adaptarlos al entorno laboral [26]. Sin embargo, para que diferentes alumnos puedan realizarlas de forma simultánea es conveniente que el laboratorio multiplique sus puestos, algo que no es posible cuando el hardware necesario para equiparlos tiene un elevado coste económico. Además, los laboratorios presenciales limitan el tiempo de acceso al hardware de los alumnos, y por lo tanto, el número de experiencias que pueden realizar con él [22].

Los inconvenientes anteriores pueden ser mitigados a través del desarrollo de laboratorios remotos, que dan acceso a través de Internet a los dispositivos/hardware del laboratorio. Además, su uso se encuentra avalado por diferentes estudios que muestran que aportan beneficios educativos similares a los laboratorios presenciales [17, 20, 25, 29]. Finalmente, destacar que el nuevo escenario educativo, con limitaciones de aforo adicionales impuestas por la pandemia de la COVID-19, ha ace-

lerado el proceso de adaptación de las prácticas presenciales a sus variantes remotas [21].

En este contexto, los autores de este artículo han decidido dar acceso remoto a uno de los brazos robóticos de los laboratorios presenciales de las titulaciones de Informática y de Ingeniería Electrónica de Comunicaciones de la Universidad Complutense de Madrid (UCM). Para lograrlo, han seguido una metodología *similar* a la que utilizan para desarrollar los laboratorios remotos de Control de Sistemas de la misma universidad [12, 14], en la que un servidor (programado en Node.js) sirve 1) de gestor de la página web de las experiencias y 2) de pasarela entre su interfaz gráfica (diseñada en Easy JavaScript Simulations, EJS) y el controlador (definido en un lenguaje de programación estándar) de los dispositivos del laboratorio. Además, dicha metodología contempla la posibilidad de desplegar todo el software del laboratorio en una Raspberry PI y gestionarlo de forma centralizada desde un EJS con funcionalidades añadidas mediante un *Plugin* [10, 13, 15].

Más concretamente, para este laboratorio, y tal y como se muestra en la Figura 1, el brazo robótico del laboratorio es el Dobot Magician [1], que es controlado a través del puerto USB de la Raspberry PI mediante un programa escrito en Python, con el que interactúa con una nueva versión de nuestro servidor Node.js, a la que se le han añadido protocolos estandarizados de comunicación.

En este artículo se describen todas las capas software desarrolladas para crear este nuevo laborato-

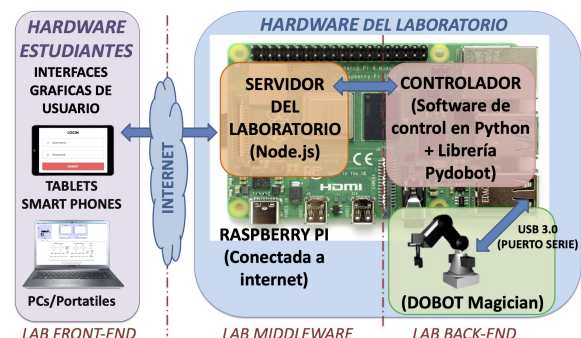


Figura 1: Elementos del laboratorio remoto



rio remoto de robótica educativa, la metodología seguida para obtenerlas y las herramientas que las sustentan. Además, también se contextualiza el trabajo y se presentan experiencias que pueden realizar los alumnos con este laboratorio remoto.

## 2. CONTEXTUALIZACIÓN

Esta sección plantea la importancia de la robótica y de sus laboratorios remotos en la enseñanza.

### 2.1. ROBÓTICA EDUCATIVA

En la actualidad, la robótica es un área tecnológica relevante en el sector industrial y de servicios, que extiende su protagonismo de forma progresiva al ámbito cotidiano y a la enseñanza. La robótica educativa se define como la concepción, creación y puesta en funcionamiento, con fines didácticos, de objetos tecnológicos que reproducen los procesos y herramientas robóticas usadas cotidianamente en nuestro entorno social, productivo y cultural [30]. Además, la robótica educativa promueve los procesos prácticos de enseñanza y aprendizaje, fomenta la motivación y el interés del estudiante, y es aplicable a todos los niveles de enseñanza (primaria, secundaria, universitaria, y formación profesional [28]).

El interés despertado por esta nueva forma de enseñanza ha promovido el desarrollo de numerosas plataformas robóticas educativas, entre las que podríamos mencionar los robots manipuladores Dobot [1] y Scorbob [8], los robots humanoides NAO [4] y Pepper [5], o los robots móviles sobre ruedas Lego Mindstorm [2] y Moway [3]. Estos robots comerciales constituyen soluciones educativas completas, incluyen hardware y software para que los alumnos interactúen con ellos y programen su comportamiento mediante diferentes lenguajes, y material didáctico adicional. Sin embargo, no suelen estar diseñados para interactuar con ellos de forma remota.

### 2.2. LABORATORIOS REMOTOS

Los laboratorios remotos para robótica educativa responden a las mismas necesidades que los desarrollados en otras áreas, tal y como muestran los ejemplos de laboratorios remotos que hay en la literatura para robots móviles [11, 16, 18, 19] y manipuladores [23, 27, 24, 31, 32]. Entre las características de estos últimos, resumidas en la Tabla 1 según la fecha de creación del laboratorio, destaca el uso de herramientas comunes para el desarrollo de la interfaz de la experiencia y para implementar el controlador de cada robot.

Tabla 1: Lab. remotos de brazos robóticos

	Interfaz experiencia	Controlador	Robot
[27]	Java	Mentor	Mentor
[23]	EJS	Scorbob	Scorbob
[32]	EJS	Arduino	Almega
[24]	C	Arduino + Rasp	
[31]	EJS	Arduino	Propio
Este	EJS	Python + Rasp	Dobot

La propuesta de este trabajo, recogida en la última fila de la tabla, comparte la herramienta común de desarrollo de la interfaz de la experiencia (EJS) y utiliza una Raspberry PI no sólo para interactuar con el robot a través del controlador programado en Python, sino también para desplegar el servidor de páginas web de laboratorio. Además, es configurado de forma centralizada desde EJS, una novedad de este trabajo que podría facilitar, modificando las capas de software adecuadas, el uso de la metodología sobre otras plataformas robóticas.

## 3. HERRAMIENTAS

En esta sección se presentan las herramientas hardware y software que han sido utilizadas y/o adaptadas para nuestro laboratorio remoto.

### 3.1. EL BRAZO ROBÓTICO DOBOT MAGICIAN

El brazo robótico DOBOT Magician [1], mostrado en la Figura 2, está formado por una base, un brazo trasero, un antebrazo y, opcionalmente, un efector final. Además, cuenta con tres o cuatro articulaciones de revolución (J1, J2, J3 y J4 - apareciendo la última cuando se instala un efector final) que le proporcionan el rango de trabajo mostrado en la Figura 3.

El software de control proporcionado por el fabricante permite moverlo de forma incremental

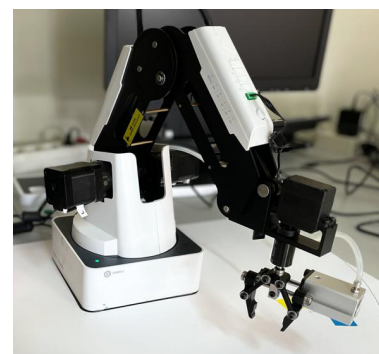


Figura 2: Imagen del Dobot Magician



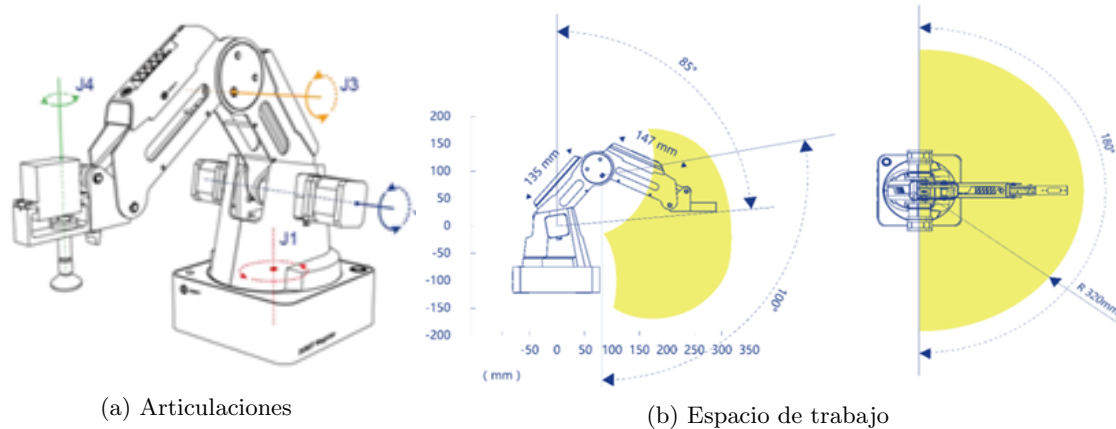


Figura 3: Caracterización del Dobot Magician (fuente de imágenes [1])

(modo *jogging*), hasta un punto destino (modo Point To Point - *PTP*) o siguiendo un arco (modo *ARC*). Además su comportamiento puede ser programado desde diferentes entornos de programación (e.g. C, Python, ROS, Qt, Matlab, Labview, Android, Blockly) y desde una aplicación de control propia, lo que le convierte en una herramienta ideal para diferentes niveles educativos.

### 3.2. RASPBERRY PI

La Raspberry PI es un ordenador de placa única, originalmente desarrollado para promover la Informática entre estudiantes de primaria y secundaria. Sin embargo, su bajo coste, tamaño reducido y conectividad la ha convertido en un sistema embebido de referencia para muchas aplicaciones.

En nuestro caso, es conveniente utilizar la Raspberry Pi 4, ya que constituye el soporte computacional de todo el laboratorio (i.e. en ella se ejecuta el controlador y el servidor) y porque dispone, al igual que el Dobot, de un puerto USB 3.0.

### 3.3. PYTHON

El Dobot Magician proporciona una API (Interfaz de Programación de Aplicaciones) que es accesible desde Python a través de la librería `pydobot` [6].

La API dispone de dos tipos de órdenes. Las de *ejecución inmediata* se procesan instantáneamente (cuando son recibidas) con independencia de si el Dobot está realizando otra acción. Las de *ejecución encolada* se almacenan en una lista FIFO (*First-In First-Out*) y se procesan según su orden de llegada. Las instrucciones soportadas por la API controlan el movimiento del brazo, obtienen la posición y velocidad de las articulaciones, lo trasladan a su configuración inicial y acceden a toda su funcionalidad.

Sin embargo, la librería `pydobot`, utilizada en el controlador del Dobot, únicamente implementa parte de la funcionalidad de la API. Por este motivo, también se ha ampliado en este proyecto el conjunto de funciones disponibles en esta librería.

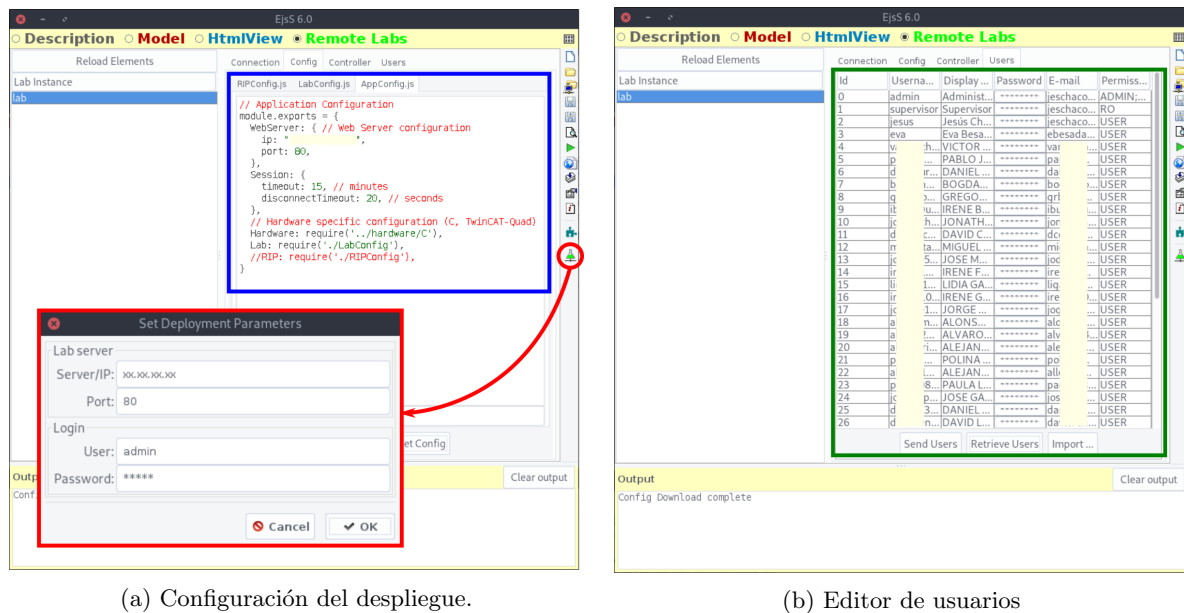
### 3.4. SERVIDOR NODE.JS

El servidor de laboratorios remotos *ReNoLabs* [12], desarrollado en Node.js, soporta la gestión del laboratorio (centralizada desde EJS) y la creación de su infraestructura web, proporcionando entre otras las siguientes funciones: la gestión de usuarios y control de acceso, el alojamiento de la interfaz web de la experiencia, la comunicación entre dicha interfaz y el controlador, y el registro de datos experimentales y eventos.

### 3.5. EASY JAVASCRIPT SIMULATIONS

La herramienta EJS se utiliza para crear la aplicación cliente que constituye el interfaz experimental del laboratorio remoto. Para facilitar el proceso, se utiliza la versión 6.0 de EJS, ya que incorpora el soporte de *Plugins*, que es un nuevo mecanismo para extender la funcionalidad e interfaz de EJS a las necesidades de sus usuarios [15].

El *Plugin* utilizado en este caso facilita la integración, en EJS, del flujo de trabajo seguido para el diseño de laboratorios remotos. En concreto, y a modo de ejemplo, el botón rodeado por un círculo rojo en la Figura 4a permite desplegar la interfaz gráfica y la descripción desarrollada en EJS sobre el servidor elegido, el Editor enmarcado en azul en la Figura 4a permite cambiar la configuración de despliegue en el servidor y modificar las variables usadas por el servidor para el intercambio de datos entre la interfaz experimental y el controlador, y el Editor enmarcado en verde en la Figura 4b permite gestionar los usuarios del laboratorio.



(a) Configuración del despliegue.

(b) Editor de usuarios

Figura 4: EJSs con funcionalidades añadidas por el *Plugin* del laboratorio

## 4. DESARROLLO

Esta sección describe las características más relevantes de los elementos desarrollados para nuestro laboratorio remoto, que estarán a disposición de la comunidad educativa, junto con las instrucciones necesarias para su despliegue, en el repositorio [7].

### 4.1. CONTROLADOR

La funcionalidad del controlador la constituyen dos tipos de tareas diferentes: 1) la lectura de la posición del efector final y de las orientaciones de la articulaciones del robot, y 2) la recepción y ejecución de las órdenes enviadas por el servidor.

Cada tarea se implementa en un hilo de ejecución independiente (el primero correspondiente al programa principal y el segundo ejecutado como respuesta a cada orden recibida). Esto se ha hecho así por dos motivos. El primero es la diferente naturaleza temporal de cada tarea: mientras que la lectura de datos se realiza periódicamente con una base de tiempos fija, la interpretación de las órdenes del servidor se hace de forma asíncrona. El segundo es el modelo de comunicaciones utilizado por cada tarea, que se discute en detalle en el siguiente apartado.

### 4.2. SERVIDOR

Desde el punto de vista de las comunicaciones, se establece una estructura en capas que desacopla a los componentes software del laboratorio: la página web de la experiencia (creada con EJSs), el

servidor del laboratorio (llamado *ReNoLabs*) y el controlador del Dobot (programado en Python).

Las comunicaciones entre el cliente EJSs y *ReNoLabs* son soportadas por el elemento *Lab* del *Plugin* desarrollado para facilitar la interacción de ambas herramientas. De esta manera, basta con configurar los datos de conexión en EJSs (ver Figura 4a) para que la aplicación reciba automáticamente los datos enviados por el servidor y sea capaz de enviar órdenes a discreción. La instancia del elemento *Lab* mantiene una lista de variables con los valores sincronizados con el servidor, permite utilizar una memoria intermedia para adaptar las velocidades de recepción de datos y de visualización, y proporciona métodos para realizar el envío de datos al servidor. Para la transferencia de datos utiliza el protocolo de comunicaciones específico de *ReNoLabs*, que está basado en JSON (JavaScript Object Notation) y que puede funcionar sobre una conexión HTTP o WebSocket.

La arquitectura modular de *ReNoLabs* permite definir las comunicaciones entre éste y el controlador del Dobot mediante la implementación de un objeto que actúa como interfaz entre ambos. Para este fin, se ha decidido utilizar la librería *ZeroMQ* por los siguientes motivos. En primer lugar, porque proporciona un modelo de comunicaciones de E/S asíncrono y de alto rendimiento. En segundo, porque soporta diferentes patrones de comunicaciones, entre ellos publicador-subscriptor y petición-respuesta, que resultan adecuados para este caso. En tercero, por su robustez, debida a su popularidad y a su amplia comunidad de desarrolladores. Por último, por la flexibilidad que aporta a

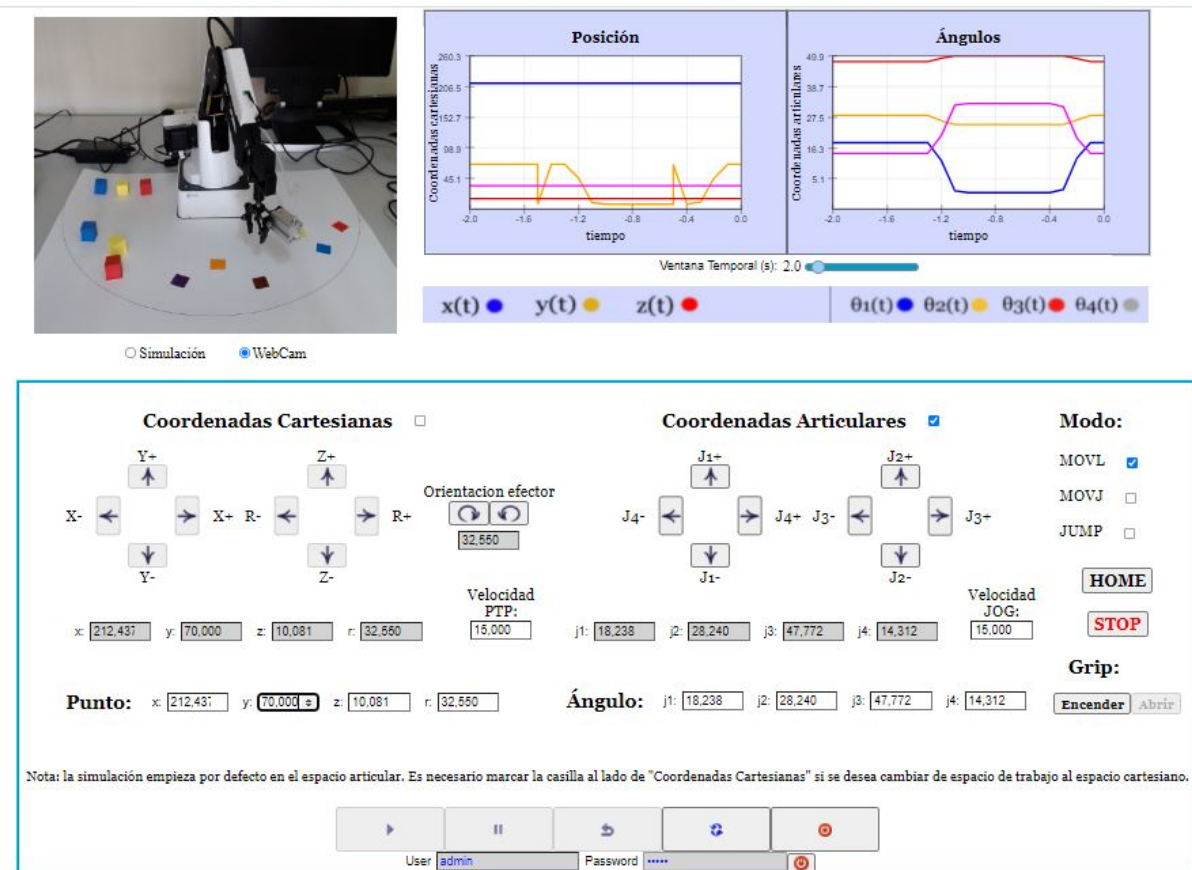


Figura 5: Interfaz experimental del laboratorio

la hora de integrar códigos de diferente naturaleza, al estar implementada en los principales lenguajes de programación (incluidos Python y Node.js).

Más concretamente, para establecer la comunicación entre el servidor y el controlador, se crean dos *sockets* TCP (Transmission Control Protocol) locales de comunicación, tal y como se muestra en el Código 1. Uno de ellos se inicializa para funcionar como petición-respuesta, y el otro para funcionar con el modelo publicador-subscriptor. En este caso, al estar ejecutando ambas aplicaciones en la Raspberry PI, se utiliza una IP local en la inicialización de los sockets. También sería posible utilizar dos dispositivos diferentes sin más que configurar las respectivas IP de acceso. Esta naturaleza distribuida aporta otro grado de libertad, que puede ser útil, por ejemplo, si se dispone de diferentes brazos robóticos, controlados desde diferentes Raspberry PIs, a los que se desee acceder a través de un único servidor del laboratorio.

Código 1: Uso de sockets ZeroMQ en Python

```
command = context.socket(zmq.REP)
notify = context.socket(zmq.PUB)
command.bind("tcp://127.0.0.1:5555")
notify.bind("tcp://127.0.0.1:5556")
```

También es importante resaltar una funcionalidad previa del servidor *ReNoLabs*, en concreto su soporte de RIP (Remote Interoperability Protocol), ya que permite la integración de este laboratorio remoto en otras plataformas. Más en concreto, posibilita la integración del laboratorio en *UNILabs* [9], la red universitaria de laboratorios interactivos formada por diversas universidades españolas, que está soportada por una plataforma basada en el sistema de gestión del aprendizaje Moodle LMS.

Finalmente, indicar que aunque para este laboratorio remoto se ha hecho una implementación *ad-hoc* de la comunicación entre el servidor y el controlador, el módulo añadido al servidor es genérico, y puede ser utilizado para comunicar con cualquier otro controlador que utilice la misma librería y se adhiera al protocolo de comunicaciones estándar utilizado por *ReNoLabs*.

#### 4.3. INTERFAZ DEL LABORATORIO

La interfaz web para acceder al laboratorio sigue la estructura habitual de este tipo de aplicaciones, tal y como se observa en la Figura 5.

En la esquina superior izquierda se muestra la imagen del Dobot, obtenida por una cámara web que

está situada en el laboratorio y conectada a la Raspberry PI a través del puerto USB. La transmisión de video se realiza con la aplicación *mjpg-streamer*, que captura la imagen y la emite a través de una conexión HTTP. A la derecha de la imagen, dos gráficas muestran la evolución temporal de las variables de interés: la posición del efector final y los ángulos de las articulaciones del Dobot.

En la parte central, se disponen y organizan en varios paneles todos los elementos que permiten interactuar con el Dobot. A la izquierda, el panel de *Coordenadas Cartesianas* permite realizar un control del movimiento en el espacio cartesiano (XYZ+Roll), i.e. permite especificar cualquier punto del espacio de trabajo en el que se desea que se posicione el efector final del Dobot. En la parte central, el panel de *Coordenadas Articulares* permite hacer un control en el espacio articular, de forma que las coordenadas especificadas corresponden directamente a los ángulos requeridos para las articulaciones (J1-J4) del Dobot. En la zona derecha hay algunos botones adicionales que permiten (de arriba abajo): configurar el tipo de modo de movimiento punto a punto (en línea recta según los ejes XYZ, con un movimiento articular, y de forma similar al anterior pero con distancia de aproximación y despegue), mandar al robot a la posición de inicio, hacer una parada de emergencia, y controlar el efector final.

En la parte inferior, la interfaz proporciona una barra de control de ejecución y cuadro de autenticación (para introducir las credenciales necesarias para acceder al laboratorio). Cabe indicar que estos dos últimos grupos de elementos gráficos forman parte de los que el *Plugin* incorpora a los elementos visuales de EJS.

## 5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Nuestro laboratorio remoto permite usar, a través de Internet, el Dobot Magician. Resulta un complemento ideal a las prácticas presenciales que realizan los alumnos sobre cinemática de robots manipuladores, ya que les permite verificar, sobre el robot real y en cualquier momento que tengan disponible, los resultados obtenidos durante la sesión presencial del laboratorio. De este modo, los alumnos pueden finalizar (o ampliar el número de experiencias relacionadas con) la práctica que comienzan a desarrollar en el laboratorio presencial y, que por las limitaciones propias de éste (horario restringido, un único Dobot) no todos pueden finalizar en una única sesión.

También permite que los alumnos detecten sus errores de forma progresiva. Para ello, los alumnos utilizan: 1) Matlab de forma local para llevar

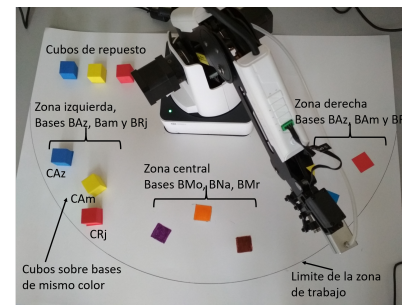


Figura 6: Disposición del entorno experimental

a cabo las operaciones, funciones y comprobaciones necesarias; y 2) el laboratorio remoto para verificar sobre el robot real si los cálculos realizados son correctos, comparando si el comportamiento del Dobot es el esperado. Si esto no ocurre, pueden corregir sus cálculos y volver a comprobarlos sobre el Dobot, en cualquier horario, en el que no esté siendo utilizado por otro alumno.

En concreto, en la práctica diseñada, los alumnos deben obtener los parámetros de Denavit-Hartenberg del robot a partir de la información mostrada en la Figura 3. Una vez obtenida la tabla de parámetros, calculan las matrices  ${}^{i-1}A_i$  e implementan una función para la cinemática directa del robot. A continuación, deben verificar que su funcionamiento es correcto sobre el Dobot, que tienen a su disposición de forma remota.

Tras finalizar esta primera fase, deben diseñar el movimiento necesario para llevar a cabo una operación de montaje sencilla con los elementos disponibles en la Figura 6. Ésta tiene como finalidad que 1) el alumno aprenda a manejar diferentes ejes, puntos de aproximación y despegue adecuados; y que 2) calcule la trayectoria más adecuada para evitar colisiones del robot manipulador durante la operación. Para realizar esta parte de la experiencia al alumno se le proporcionan las dimensiones de los cubos (rojo - CRj, amarillo - CAm, y azul - CAz) que el robot debe colocar en una posición determinada desde una configuración inicial. Para simplificar el problema, las posiciones iniciales donde pueden estar situados los cubos están prefijadas (BAm, BRj y BAz) a ambos lados del robot. A cada alumno se le propone: (1) una posición inicial (derecha o izquierda) y configuración de cubos diferente (p.e. CRj sobre BAm, CAm sobre BRj y CAz sobre BAz); y (2) un movimiento a otra posición (en el lado opuesto) con una configuración final diferente. Los alumnos deben definir unos movimientos/posiciones relativos a las posiciones inicial y final de los cubos, obtener la secuencia de pasos (puntos) por los que debe pasar el robot y las acciones del efector final (pinza del Dobot).

Tras verificar mediante simulación que la secuencia de pasos obtenida permite realizar la operación con éxito, los alumnos se conectan de nuevo al laboratorio remoto para verificar que la secuencia es correcta. En esta última fase el alumno debe situar los bloques en su posición inicial (usando los cursores para movimiento manual y utilizando bloques de repuesto cuando sea necesario). Con los cubos en su posición inicial correcta, ejecuta paso a paso la secuencia de puntos calculada y verifica sobre el Dobot si ésta es correcta para llevar a cabo con éxito la operación planteada.

## 6. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un laboratorio remoto para el robot educativo Dobot Magician, que puede ser desplegado por menos de 100€ (gasto aproximado de una Raspberry PI 4), al haber sido desarrollado con herramientas software de código abierto (EJS, Node.js y Python). Además, la metodología utilizada para desarrollarlo hace que su configuración se centralice en EJS, la misma herramienta que permite al usuario modificar la interfaz gráfica del laboratorio (y adaptarla a cada experiencia concreta). También es relevante mencionar, que la metodología seguida ha sido aplicada, con algunas diferencias en los protocolos de comunicación y lenguaje de programación del controlador, en otros laboratorios. Y que el hecho de utilizar el servidor *ReNoLab* permite que el laboratorio desarrollado sea también compatible con el proyecto *UNILabs* [9] del Grupo de Educación en Control de CEA.

Como trabajos futuros se plantean los siguientes. Consideramos conveniente pulir la interfaz gráfica de la experiencia (reorganizando su información en pestañas) e incluir en ella un editor de secuencias de instrucciones. También deseamos utilizarlo el curso que viene en las asignaturas de Robótica.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los Proyectos de Innovación Educativa y Mejora de la Calidad Docente 2019-139 y 2021-39 de la UCM.

### English summary

## REMOTE LABORATORY FOR THE EDUCATIONAL DOBOT MAGICIAN

### Abstract

*This article presents a methodology to give remote access, through a web application,*

*to the educational robot Dobot Magician. The procedure consists in 1) expanding the functionality of ReNoLabs, the server used at the University Complutense of Madrid (UCM) to set up its Control Systems laboratories, and in 2) implementing a robot controller in Python. In addition, it deploys all the laboratory software on a Raspberry PI and uses EJS, enhanced by a Plugin, to centralize the management of the laboratory. Finally, an example of a practical application of the remote laboratory for the students is also presented.*

**Keywords:** EJS, Node.js, Raspberry Pi.

## Referencias

- [1] Dobot. <https://www.dobot.cc>. Accessed: 2021-06-15.
- [2] Mindstorms. <https://www.lego.com/es-es/themes/mindstorms>. Accessed: 2021-06-15.
- [3] Moway. <http://moway-robot.com>. Accessed: 2021-06-15.
- [4] Nao. <https://aliverobots.com/robot-nao/>. Accessed: 2021-06-15.
- [5] Pepper. <https://aliverobots.com/robot-pepper/>. Accessed: 2021-06-15.
- [6] Pydobot. <https://github.com/luismesas/pydobot>. Accessed: 2021-06-15.
- [7] Repositorio del software desarrollado. <https://gitlab.com/jcsombria/jj-aa-2021>. Accessed: 2021-06-15.
- [8] Scorbob. <https://intelitek.com/scorbob-er-4u-educational-robot/>. Accessed: 2021-06-15.
- [9] UNILabs. <https://unilabs.dia.uned.es/>. Accessed: 2021-06-15.
- [10] I. Aizpuru-Rueda, E. Besada-Portas, J. Chacón, and J.A. Lopez-Orozco. Despliegue automático de laboratorios remotos extendiendo las capacidades de EJS. In *XL Jornadas de Automática*, 2019.
- [11] I. Angulo, J. García-Zubía, U. Hernández-Jayo, I. Uriarte, L. Rodríguez-Gil, P. Orduña, and G. Martínez Pieper. Roboblock: A remote lab for robotics and visual programming. In *4th Experiment@International Conference*, 2017.



- [12] J. Bermudez-Ortega, E. Besada-Portas, L. de la Torre, J.A. Lopez-Orozco, and J.M. de la Cruz. Lightweight node.js ejss-based web server for remote control laboratories. In *IFAC Symposium on Advances in Control Education*, 2016.
- [13] J. Bermudez-Ortega, E. Besada-Portas, J.A. Lopez-Orozco, J.A. Bonache-Seco, and J.M. de la Cruz. Remote web-based control laboratory for mobile devices based on EJS, Raspberry Pi and Node.js. In *IFAC Workshop on Internet Based Control Education*, 2015.
- [14] J. Bermudez-Ortega, E. Besada-Portas, J.A. Lopez-Orozco, and J.M. de la Cruz. A new open-source and smart device accessible remote control laboratory. In *4th Experiment@ International Conference*, 2017.
- [15] J. Chacón, E. Besada-Portas, G. Carazo-Barbero, and J.A. López-Orozco. Enhancing EJS with extension plugins. *Electronics*, 10(3), 2021.
- [16] D. Chaos, J. Chacón, J.A. Lopez-Orozco, and S. Dormido. Virtual and remote robotic laboratory using ejs, matlab and labview. *Sensors*, 13(2), 2013.
- [17] L. de la Torre, J. Sanchez, and S. Dormido. What remote labs can do for you. *Physics Today*, 69.
- [18] M.S. dos Santos Lopes, I. Pacheco-Gomes, R. M. P. Trindade, A. F. da Silva, and A.C. de C. Lima. Web environment for programming and control of a mobile robot in a remote laboratory. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 10(4), 2017.
- [19] E. Fabregas, G. Farias, S. Dormido-Canto, M. Guinaldo, J. Sánchez, and S. Dormido-Bencomo. Platform for teaching mobile robotics. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 81, 2016.
- [20] E.K. Faulconer and A.B. Gruss. A review to weigh the pros and cons of online, remote, and distance science laboratory experiences. *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 19(2), 2018.
- [21] K.A.A. Gamage, D.I. Wijesuriya, S.Y. Ekanayake, A.E.W. Rennie, C.G. Lambert, and N. Gunawardhana. Online delivery of teaching and laboratory practices: Continuity of university programmes during COVID-19 pandemic. *Education Sciences*, 10(10), 2020.
- [22] L. Gomes. Current trends in remote laboratories. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56, 2009.
- [23] C.A. Jara, F.A. Candelas, S.T. Puente, and F. Torres. Hands-on experiences of undergraduate students in automatics and robotics using a virtual and remote laboratory. *Computers Education*, 57, 2011.
- [24] R. Jiménez, O. Avies Sanchez, and M. Mauledeox. Remote lab for robotics applications. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, 14(1), 2018.
- [25] N. Kostaras, M. Xenos, and A.N. Skodras. Evaluating usability in a distance digital systems laboratory class. *IEEE Transactions on Education*, 54(2), 2011.
- [26] J. Ma and J.V. Nickerson. Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review. *ACM Computing Surveys*, 38(7), 2006.
- [27] R. Marín, P.J. Sanz, P. Nebot, and R. Wirz. A multimodal interface to control a robot arm via the web: A case study on remote programming. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(6), 2005.
- [28] Mu. Merdan, W. Lepuschitz, G. Koppensteiner, R. Balogh, and D. Obdržálek, editors. *Robotics in Education*. Springer, 2020.
- [29] J.V. Nickerson, J.E. Corter, S.K. Esche, and C. Chassapis. A model for evaluating the effectiveness of remote engineering laboratories and simulations in education. *Computers Education*, 49(3), 2007.
- [30] S. Papadakis and M. Kalogiannakis. *Handbook of Research on Using Educational Robotics to Facilitate Student Learning*. IGI Global, 2020.
- [31] J. Saenz, L. de la Torre, J. Chacón, and S. Dormido. Learning planar robots with an open source online laboratory. In *21th IFAC World Congress*, 2020.
- [32] M. Vagaš, M. Sukop, and J. Varga. Design and implementation of remote lab with industrial robot accessible through the web. *Applied Mechanics and Materials*, 859, 2016.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



## MeiA • 4.0 PARA ABORDAR LOS RETOS ACTUALES DE FORMACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN

Arantzazu Burgos

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU  
[arantzazu.burgos@ehu.eus](mailto:arantzazu.burgos@ehu.eus)

Nagore Iriondo, Maria Luz Álvarez, Isabel Sarachaga

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU  
[nagore.iriondo@ehu.eus](mailto:nagore.iriondo@ehu.eus), [marialuz.alvarez@ehu.eus](mailto:marialuz.alvarez@ehu.eus), [isabel.sarachaga@ehu.eus](mailto:isabel.sarachaga@ehu.eus)

### Resumen

*El software de control de sistemas de producción automatizados está experimentando un rápido aumento en cantidad y complejidad que lo convierte es un factor clave en la transición de una visión tradicional a una más flexible capaz de hacer frente a los nuevos retos de la Industria 4.0. La industria requiere de personal capacitado para afrontar estos nuevos retos, con formación tanto en tecnologías para la transformación digital como en metodologías de desarrollo de software de control necesarias para poder conectar la información del proceso productivo con procesos de gestión bajo este nuevo paradigma. En este artículo se presenta un ciclo de desarrollo de software de control en base a una actualización de la metodología MeiA• que incluye los estándares propuestos por las arquitecturas de referencia para las empresas del futuro. Además, se realiza una propuesta de cómo introducir estos nuevos conceptos en la formación en enseñanzas de ingeniería.*

**Palabras clave:** Sistemas de producción automatizados; Software de control; Metodología MeiA•; Formación en automatización

### 1 INTRODUCCIÓN

En el ámbito de los sistemas de automatización industrial, el crecimiento de la cantidad de software de control, así como su complejidad, lo convierte en un aspecto cada vez más relevante. La cuarta revolución industrial o el paradigma Industry 4.0 ha promovido, además, la adopción de nuevas arquitecturas de referencia como RAMI 4.0 (Reference Architectural Model for Industrie 4.0), IIRA (Industrial Internet Reference Architecture), Smart Manufacturing Ecosystem o IMSA (Intelligent Manufacturing System Framework). Asimismo, define nuevos conceptos como son los componentes Io4, CPPS (CyberPhysical Production Systems) o IoT (Internet of Things). También propone una serie de

estándares destacando IEC 62264-1 [10], IEC 61512-1 [9] e IEC 61131-3 para el desarrollo de software de control, y OPC-UA (Open Platform Communications - Unified Architecture) y MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) para comunicaciones [12], [7]. Todo ello tiene una implicación directa y plantea nuevos retos en el ciclo de desarrollo de software de control (en adelante referido como SW) [6].

En los últimos años son muchos los trabajos relacionados con nuevos enfoques de desarrollo de SW, y de ensayos sistemáticos de los mismos. El estudio realizado en [16] refleja los desarrollos y avances más importantes relacionados con la ingeniería de software de automatización industrial, considerados como una base de referencia para salvar la distancia entre los mundos de la automatización y la ingeniería del software.

Otro estudio interdisciplinario presentado en [14] expone los retos asociados a la evolución de los sistemas de producción automatizados (aPS – automated Production Systems) en las distintas fases de desarrollo y en varios ámbitos transversales, y realiza una revisión de los enfoques existentes para hacer frente a dichos retos.

El estudio realizado a 61 empresas de fabricación y presentado en [15] proporciona resultados cuantitativos y cualitativos interesantes acerca de la ingeniería del software para aPS, como, por ejemplo, que la cantidad de software requiere un esfuerzo de entre el 35% y 50% del personal de desarrollo. También identifican obstáculos que se deben abordar en futuras investigaciones, además de contramedidas industriales en aspectos relacionados con la cualificación del personal y las cuestiones organizativas para aplicar nuevos paradigmas. Otro resultado destacable es que entre el 50% y el 75% del código de control industrial es código extrafuncional, es decir, tareas transversales que se realizan en todas las unidades de producción, como la gestión de fallos, la recopilación de datos de funcionamiento o el cambio de modos de operación. Este código

extrafuncional no suele estar representado en el diseño, lo que lo hace más difícil de entender que las partes de control de operación.

Este trabajo presenta, por un lado, el ciclo de desarrollo de SW basado en una versión actualizada de la metodología **MeiA**, en la que se integran los estándares de la Industria 4.0 y los conceptos de la ingeniería del software. Por otro lado, plantea una propuesta de cómo introducir estas nuevas necesidades de formación en enseñanzas de ingeniería, para proporcionar a las personas que se van a incorporar a la industria los principios de ingeniería del software y el conocimiento de los estándares necesarios en el desarrollo de este tipo de software.

La estructura del artículo es la siguiente: la motivación y evolución de la metodología **MeiA**, se aborda en el apartado de antecedentes. El apartado 3 presenta el ciclo de desarrollo del SW **MeiA 4.0**, y el apartado 4 ilustra cómo se desarrollan las competencias a adquirir en las titulaciones de Grado y de Máster de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. El último apartado presenta las conclusiones del trabajo.

## 2 ANTECEDENTES

La integración de las disciplinas de la ingeniería del software con los métodos y estándares extendidos en el ámbito de los aPS fue la motivación de una propuesta de formación, estructurada en tres niveles: inicial, de diseño y metodológico [5]. La formación está basada en la metodología **MeiA** de análisis y diseño de SW, que combina la guía GEMMA, los diagramas de casos de uso UML y el lenguaje de modelado GRAFCET, e incluye, implícitamente, conceptos fundamentales de la ingeniería del software relacionados con la flexibilidad, modularidad y extensibilidad de los diseños que pueden ser reutilizados en otros sistemas.

**MeiA** guía el análisis y el diseño a través de seis fases, cada una de ellas relacionada con un modo de operación (Modo automático, Modo Manual, Modo de Pruebas, Fallos, Paro de Emergencia y Producción Normal), utilizando la terminología del dominio, lo que permite conseguir una mejora en la comunicación entre todos los agentes involucrados en el desarrollo, puesta a punto y operación del sistema [1]. La metodología ofrece guías de diseño y plantillas para cada una de las fases, incluyendo aspectos estructurales, así como los aspectos de la ingeniería del software mencionados. La utilización del lenguaje de modelado GRAFCET permite generar unidades de organización de diseño (DOUs – Design Organization Units) de tres tipos: de decisión, de producción y auxiliares.

El trabajo presentado en [3] plantea la extensión de la metodología **MeiA**, mostrando cómo incorporar el estándar IEC 61512-1 [10]. Así, siguiendo la metodología, se obtienen los modelos propuestos en el estándar IEC 61512 y la descripción de los modos de operación acordes al mismo.

En este punto, cabe destacar dos aspectos relevantes de la metodología **MeiA**. Por un lado, el diseño por fases contempla todos los estados de la Guía GEMMA, es decir, identifica, ya desde la fase de análisis, todas las funcionalidades transversales o código extrafuncional identificado en el estudio en [15] como código que en un alto porcentaje no suele representarse en el diseño.

Por otro lado, resaltar la importancia que tiene la utilización del color asignado a cada una de las fases de la metodología (Figura 1). Estos colores se utilizan en los componentes que conforman los modelos de análisis y ayudan a interpretar y conectar los mismos conceptos en diferentes modelos. A modo de ejemplo, la figura incluye un diagrama en el cual se pueden distinguir los casos de uso asociados a cada fase por medio del color.

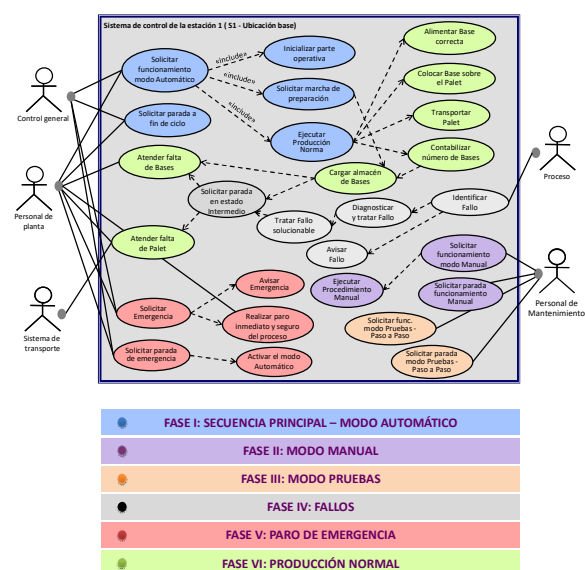


Figura 1: Colores asociados a las fases de **MeiA**.

El trabajo en [4] presenta la metodología de transformación de los diseños (DOUs) obtenidos con **MeiA** a código IEC 61131-3, concretamente a código en texto estructurado (ST) y un prototipo de herramienta que realiza dicha transformación. La elección de este lenguaje pretende que el código resultante tenga una estructura clara y familiar tanto para el personal de ingeniería como para el personal de planta, y permite, además, identificar fácilmente los diseños a partir de los que fue generado.

Por último, la plataforma presentada en [2] proporciona los beneficios de la sinergia entre la aplicación de la metodología **MeiA** para el análisis, diseño e implementación, con el uso de tecnologías MDE para la definición de ontologías de dominio y modelos de transformación, con objeto de generar automáticamente código PLCopen XML del aPS.

### 3 CICLO DE DESARROLLO DE SW **MeiA** 4.0

MeiA. 4.0 adopta el modelo en V [12] como ciclo de desarrollo para construir el software de control de los aPS (Figura 2).

El punto de partida son los **Requisitos de Usuario/a**, que deben contemplar la descripción de los siguientes aspectos: 1) el funcionamiento y las operaciones del

la tarea de análisis a través de una secuencia ordenada de pasos.

El resultado del análisis se recoge en los siguientes modelos que propone el estándar IEC 61512: el Modelo de Proceso, en el que se representan las operaciones a realizar sobre el aPS; el Modelo de Procedimientos con los procedimientos (DOUs) que realizarán las operaciones identificadas; el Modelo Físico en el que se encuentran agrupados los equipos físicos en función de las operaciones; y el Modelo Entidad Equipo donde se establece la relación entre los procedimientos que realizan las operaciones y los equipos físicos en los que se ejecutan dichos procedimientos (Figura 3). Las operaciones y procedimientos identificados, además de las operaciones de producción, incluyen las operaciones de mando que organizan el arranque y la parada de los distintos modos de funcionamiento, y coordinan todos los posibles estados del aPS, así como, las

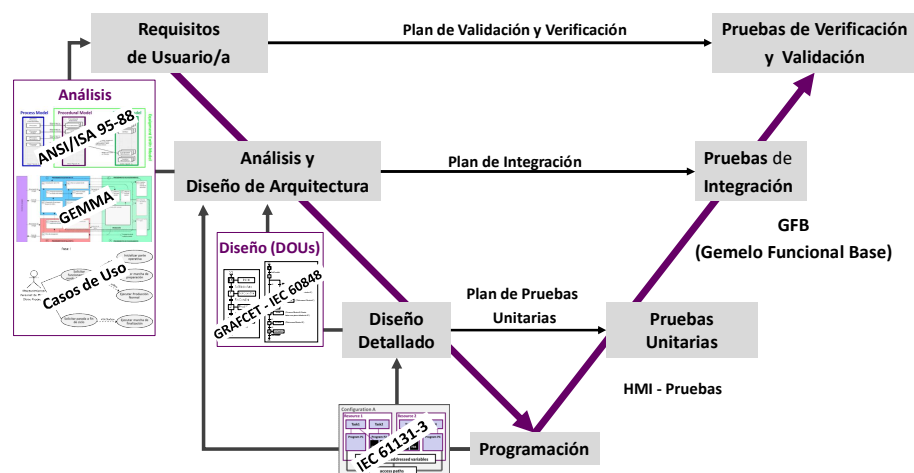


Figura 2: Ciclo de desarrollo de SW **MeiA** 4.0

aPS, que deben incluir el objetivo (qué hace), las operaciones que permiten alcanzar el objetivo (de qué forma) y el orden en que se deben realizar las operaciones, considerando tanto los requisitos funcionales como los no funcionales (restricciones de tiempos, prioridades, etc.); 2) los modos de operación automático, manual, paro de emergencia, paro a fin de ciclo, etc.; 3) las condiciones de arranque; 4) la información que procesará el sistema de supervisión referente al aPS, a la trazabilidad del aPS y a los controles a realizar sobre el mismo; 5) las señales, tanto las señales asociadas a los sensores y a los actuadores del aPS, como las señales de control del sistema de supervisión.

Partiendo de los requisitos de usuario/a, se realiza el **Análisis de Requisitos del software y Diseño de Arquitectura**, identificando los modos de operación que determinan las perspectivas a analizar en las distintas fases de **MeiA** 4.0. En cada fase se realiza

operaciones auxiliares de inicialización, preparación, paros, avisos, etc.

El Modelo Físico se construye en la Fase VI (Producción Normal) de **MeiA**, donde se identifican

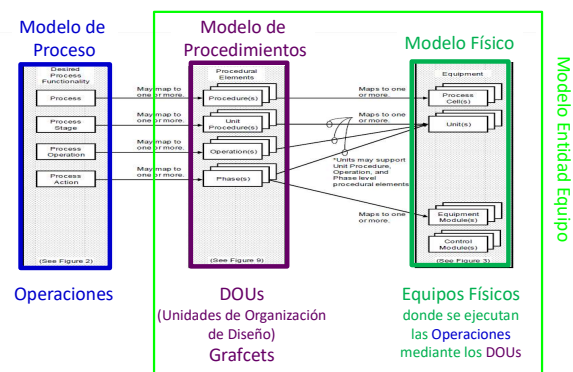


Figura 3: Relación entre los modelos IEC 61512

las operaciones de producción, los procedimientos y los equipos donde se realizan, así como su orden de ejecución. Para su realización se consideran los principios de subdivisión aportados por el estándar IEC 61512, ya que es en esta fase donde las subdivisiones de equipos inapropiadas pueden comprometer la efectividad del enfoque modular. El Modelo Entidad Equipo es el último en realizarse, ya que se construye conectando el Modelo Físico con el Modelo de Procedimientos.

La representación del análisis de los distintos estados del aPS se realiza con el Modelo de Estados del IEC 61512 adaptado a las necesidades de los aPS discretos [3]. No obstante, también se mantiene la representación con la guía GEMMA, ya que la semántica de IEC 61512 se centra en las máquinas automatizadas, mientras que GEMMA utiliza una semántica muy próxima al personal de planta.

También se sigue utilizando el Diagrama de Casos de Uso para describir las funcionalidades (operaciones) con los actores que intervienen en las mismas. Las solicitudes de los actores externos al sistema de control van a determinar las pre-condiciones de ejecución de los casos de uso y las condiciones de evolución entre los estados del aPS. Los casos de uso

permiten identificar los requisitos de control y supervisión, así como la configuración del panel de operación o HMI y demás paneles auxiliares necesarios.

En la Figura 4 se presentan las plantillas de la Fase I que deben ser particularizadas durante el análisis del sistema de control de un aPS. Además de las plantillas GEMMA y del diagrama de casos de uso, se han incorporado las correspondientes a los modelos de proceso, de procedimientos y de estados del IEC 61512.

El siguiente paso será realizar el **Diseño detallado de los procedimientos (DOUs)**, identificados en el análisis, que realizarán las operaciones. Para ello, se utiliza el lenguaje de modelado GRAFCET y, de cada una de las fases, se obtienen las plantillas correspondientes a los Grafcets de mando, junto con las señales de control para la coordinación con los Grafcets auxiliares y las señales que se deberán considerar en los Grafcets de producción. Estas plantillas se particularizan en función del análisis realizado a través de los pasos.

El **diseño del proyecto de automatización** se estructura siguiendo el Modelo de Software

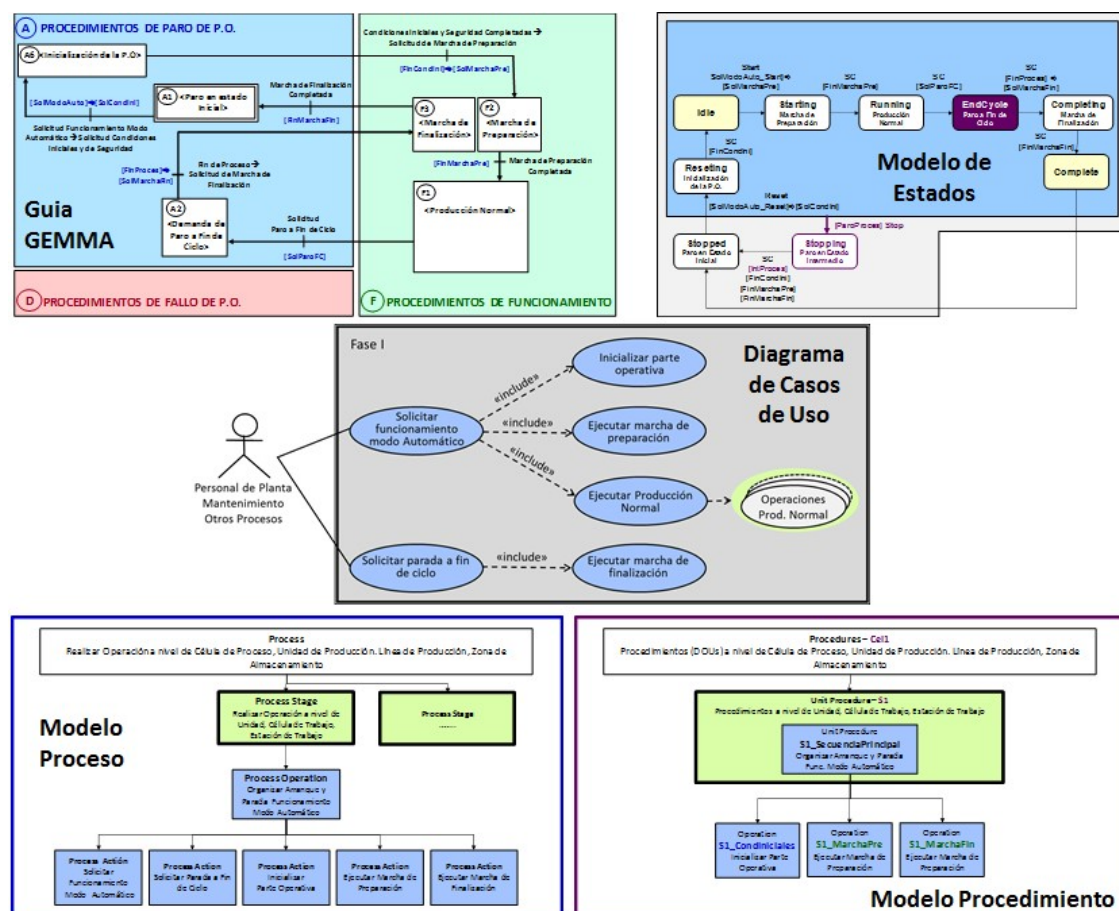


Figura 4: Plantillas de análisis para la Fase I



propuesto en el estándar IEC-61131-3 [8], y la **programación** se realiza utilizando los lenguajes que propone dicho estándar. La programación debe ser un reflejo exacto del diseño, así para cada DOU realizado en el diseño se genera un POU de tipo Bloque de Función (FB – Functional Block), donde se desarrolla la parte secuencial del Grafcet; en un POU de tipo PROGRAM se monta el sistema de control y se generan las acciones diseñadas. En [4] se describe con mayor detalle el proceso de transformación del diseño a código en texto estructurado (ST).

Las pruebas del software son un proceso fundamental dentro del ciclo de desarrollo. En la rama derecha del modelo en V de la Figura 2 se establecen tres fases de pruebas: pruebas unitarias, pruebas de integración, y pruebas de validación y verificación. Estas fases están relacionadas con las fases de la rama izquierda al mismo nivel en las que se definen las pruebas a realizar. Por ejemplo, en la fase de diseño detallado también se realiza el detalle de las pruebas unitarias que se ejecutarán en la fase de pruebas unitarias (al mismo nivel).

Las **pruebas unitarias** permitirán comprobar por separado el correcto funcionamiento de cada uno de los DOUs programados. A cada uno de ellos se le realizan dos tipos de pruebas: estructurales y funcionales. En las pruebas estructurales de la parte secuencial, se testea que la activación y desactivación de cada una de las etapas es correcta, probándose todos los posibles caminos de evolución y cerciorándose de que se recorren adecuadamente. En las pruebas funcionales de la parte combinacional se testea que las acciones asociadas a las etapas se realizan correctamente al estar éstas activadas.

Como herramienta para realizar las pruebas unitarias se proponen los sistemas de simulación que ofrecen los IDE de programación de PLCs, que permiten la activación de las entradas al SW (salidas del aPS) y la visualización del resto de señales. Otra opción es emplear el HMI o pantalla de explotación como herramienta de pruebas que permite activar las entradas al SW a través de pulsadores que representan los sensores y los controles de mando. Para las pruebas unitarias estas dos opciones pueden ser suficiente, no obstante, requiere tener un conocimiento preciso del comportamiento del aPS.

Las **pruebas de integración** garantizan la correcta coordinación y sincronización entre los DOUs programados. Para ello, por una parte, se realizan pruebas de sincronización que permiten testear las señales de coordinación entre los distintos DOUs y, por otra parte, pruebas de operaciones, en las que se deberá poner el aPS en todos los estados identificados y validar todas las operaciones

involucradas en cada uno de ellos (arranque, ejecución y parada correcta de cada operación).

Como herramienta para realizar las pruebas de integración se propone el uso de un componente software (Gemelo Funcional Base – GBF) cuya función es simular el comportamiento del aPS, creado como una entidad por sí sola y vinculada con el sistema físico en cuestión. Este componente software responde a las órdenes del SW (entradas al aPS) con la activación de las correspondientes entradas (salidas del aPS).

Finalmente, en las **pruebas de verificación y validación**, se realiza un proceso de revisión que verifica que el SW producido cumple con los requisitos funcionales y no funcionales especificados y cumple con las expectativas del cliente. Como herramienta para realizar estas pruebas también se propone el uso de un GFB para la simulación de fallos, sobre todo en aPS que ejecutan operaciones en paralelo.

Como alternativa al GFB se podría utilizar un gemelo digital (DT - Digital Twin) a modo de modelo virtual del aPS. En [13] se describe el desarrollo de un DT de una planta para realizar la puesta en marcha virtual que permite probar el sistema de control en simulación.

En la Figura 5 se distinguen las tres partes en las que se divide un sistema automatizado: la parte de mando o de control (en lila) que precisa el desarrollo metodológico del software de control; la parte operativa o de potencia (en verde) que contempla el aPS y los paneles de operación y/o HMI; y la parte de instrumentación y comunicaciones (en gris) que permite conectar las anteriores. Dicha figura también ilustra los modelos asociados a cada una de las partes, así como los modelos que sirven como nexo permitiendo establecer un vocabulario de unión entre las partes. Así, el Modelo de Proceso identifica las operaciones a realizar en el aPS, las cuales requerirán el desarrollo del SW con el consiguiente Modelo de Procedimientos. El Modelo Entidad Equipo conecta el Modelo Físico que identifica los equipos físicos del aPS con el Modelo de Procedimientos que engloba los procedimientos que las realizan las operaciones.

## 4 FORMACIÓN BASADA EN MeiA. 4.0

La metodología MeiA. está siendo aplicada, desde hace más de una década, en la formación en enseñanzas de ingeniería en automatización en la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Las competencias a adquirir por el alumnado se desarrollan integrándolas

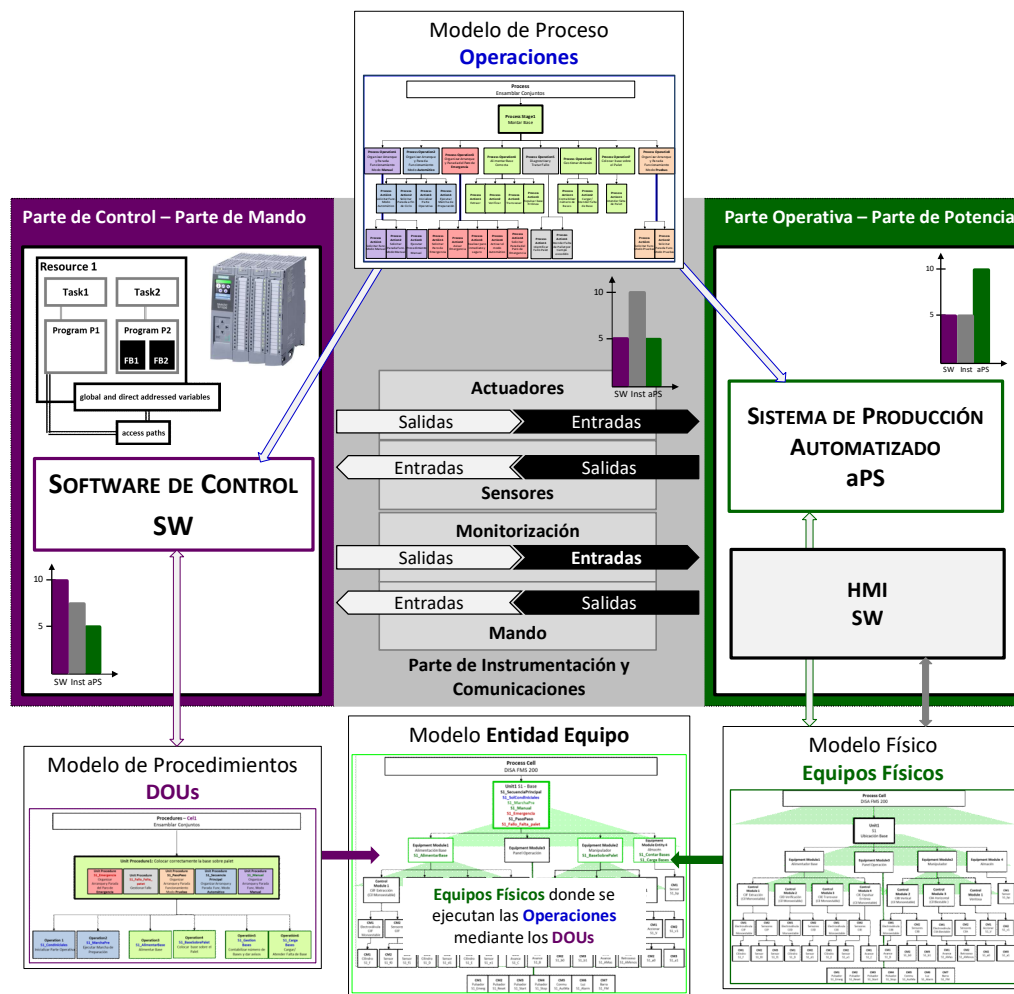


Figura 5: Modelos del estándar IEC 61512 relacionados con las partes de un sistema automatizado

de forma incremental en tres niveles [5]. En un nivel inicial en el que se consolidan conceptos sobre sistemas de control, se realiza el diseño mediante GRAFCET y la implementación conforme al estándar IEC 61131-3. En un segundo nivel o nivel de diseño, se integran operaciones en paralelo y tareas concurrentes que las controlan, resolviendo problemas de coordinación y sincronización, y se establecen, además, requisitos de información para monitorizar el sistema, los elementos de control e indicadores para los paneles de operación, HMI, sistemas de seguridad, etc. En el tercer nivel o nivel metodológico, se trabajan conceptos de jerarquía y se introducen aspectos fundamentales sobre las fases del ciclo de desarrollo de software, arquitecturas software de control conformes a los estándares del sector y nuevos conceptos del dominio de la ingeniería del software aplicados al área. Los casos de estudio o ejemplos aumentan en complejidad a medida que se avanza en los niveles.

En este trabajo, estos niveles se han adecuado con el objetivo de introducir la formación de los nuevos estándares y conceptos aportados por la Industria 4.0.

En el nivel inicial se adapta el vocabulario para emplear los términos utilizados en los modelos del IEC 61512 y se utilizan dichos modelos para explicar los problemas presentados en el aula. La presentación del análisis resultante se acompaña con las pautas para su correcta interpretación.

El nivel de diseño se ha dividido en dos subniveles. El primero coincide con el nivel 2 referenciado en el que se trabaja la identificación de los elementos que integran los distintos modelos del IEC 61512. En el segundo subnivel se trabaja con el ciclo completo de desarrollo de software, realizando el análisis de los problemas trabajados en el primer subnivel mediante los modelos del IEC 61512. También se presenta el estándar IEC-61131-3 identificando los elementos del modelo de software de las implementaciones realizadas, reforzando las fases de pruebas con el GFB, introduciendo conceptos de reutilización desde el análisis, pasando por el diseño detallado hasta los módulos de SW y aportando conceptos de gestión de proyectos de SW.

En el nivel metodológico también se trabaja con el ciclo completo, pero en este nivel se desarrollan



	Nivel Inicial	Nivel Diseño	Nivel Metodológico
<b>Grado de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática</b>			
2º Curso 2º Cuat.	Automatismos y Control Obli. (6cr/3cr)		
3º Curso 1º Cuat.		Informática Industrial Obli. (6cr/3cr)	
3º Curso 2º Cuat.			Automatización Industrial Obli. (6cr/6cr)
<b>Máster en Ingeniería de Control, Automatización y Robótica</b>			
2º Curso			Diseño de Sistemas de Automatización Industrial Opt. (3cr/3cr)
<b>Grado en Ingeniería Informática de Gestión y Sistemas de Información</b>			
3º Curso 1º Cuat.		Programación Práctica de PLCs Opt. (6cr/6cr)	
3º Curso 2º Cuat.			Automatización Industrial Opt. (6cr/6cr)
<b>Grado de Ingeniería Mecánica / Grado de Ingeniería Eléctrica</b>			
2º Curso 2º Cuat.	Automatismos y Control Obli. (6cr/3cr)		

Figura 6: Relación de los niveles con las asignaturas de las Titulaciones.

todos los modelos descritos en el apartado 3. Además, se presenta el modelo funcional del estándar IEC 62264 para contextualizar el control de la producción, y se introducen las recetas como herramienta para definir de manera única los requisitos para la fabricación de un producto específico. Se trabaja con los distintos tipos de recetas (general, sitio, maestra y control), contenedores de información según los tipos, procedimientos, etc. y su relación con los modelos del IEC 61512 trabajados en el análisis. También se introduce el modelo de estados del IEC 61512 conectándolo con GEMMA e identificando los estados no contemplados para los aPS discretos. Por último, se diseña e implementa el control de célula conectándolo con los controles directos del aPS, el planificador, supervisor y gestor de recetas.

En la Figura 6 se muestran las asignaturas que permiten obtener las competencias en cada uno de los niveles mencionados en las titulaciones de grado y máster de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Para cada una de las titulaciones se incluye un diagrama de barras que indica el grado de conocimiento requerido por la titulación en relación con las tres partes constituyentes de un aPS identificadas en la Figura 5 (software de control en lila, instrumentación y comunicaciones en gris, y aPS en verde). El mismo tipo de diagrama de barras se utiliza en la figura 5 para resaltar las necesidades de formación en cada una de las partes en relación a las restantes.

## 6 CONCLUSIONES

La versión actualizada de la metodología MeiA. permite desarrollar metodológicamente software de control de aPS de acuerdo a un modelo de desarrollo

en V. MeiA. 4.0 contempla, ya desde la fase de análisis, no sólo las funcionalidades de producción sino todas las funcionalidades transversales o código extrafuncional. Asimismo, MeiA. 4.0 pone especial atención en las fases de pruebas y en las herramientas que realizan cada tipo de pruebas (sistemas de simulación de los IDE de programación de PLCs y/o HMI o pantalla de explotación para pruebas unitarias; componente software GBF para pruebas de integración, verificación y validación).

El SW desarrollado está preparado para integrarlo dentro de las necesidades de digitalización del mundo físico, ofreciendo sus servicios de operación y de información (operaciones definidas en el Modelo de Proceso, información de sensores y actuadores definidos en el Modelo Físico, información del estado del aPS definido en el Modelo de Estados, etc.)

La necesidad de trabajar con diferentes modelos en los que se involucran conceptos similares desde diferentes vistas de dominio supone una dificultad, que se puede minimizar en parte mediante el uso del color asignado a cada una de las fases de la metodología. Los colores representados en los modelos facilitan la comprensión del análisis realizado y la conexión de conceptos en los distintos modelos resultantes.

La incorporación de MeiA. 4.0 en las enseñanzas de ingeniería permite abordar las necesidades de formación en estándares de la Industry 4.0 y en ingeniería del software que precisan las personas que se van a incorporar a la industria.

## Agradecimientos

Este trabajo está financiado por MCIU/AEI/FEDER, UE (proyecto RTI2018-096116-B-I00) y GV/EJ (proyecto IT1324-19).

## English summary

## MeiA. 4.0 TO ADDRESS CURRENT CHALLENGES IN AUTOMATION TRAINING

## Abstract

Control software for automated production systems is experiencing a rapid increase in quantity and complexity that makes it a key factor in the transition from a traditional vision to a more flexible one capable of meeting the new challenges of Industry

4.0. The industry requires trained personnel to meet these new challenges, with training in both technologies for digital transformation and control software development methodologies necessary to connect the information of the production process with management processes under this new paradigm. This article presents a control software development cycle based on an update of the MeiA methodology that includes the standards proposed by the reference architectures for the companies of the future. In addition, a proposal is made on how to introduce these concepts in engineering education.

**Keywords:** Automated Production Systems; Control software; MeiA. Methodology; Training in automation.

## Referencias

- [1] Álvarez, M.L., Burgos, A., Sainz de Murieta, J. y Sarachaga, M., *MeiA. Metodología para Ingeniería de Automatización. Nivel de Diseño*, Curso OCW - EHU/UPV, Bilbao, España (2017).
- [2] Álvarez, M.L., Sarachaga, I., Burgos, A., Estévez, E., Marcos, M., (2018) "A Methodological Approach to Model-Driven Design and Development of Automation Systems", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, pp. 711-725.
- [3] Burgos, A., Álvarez, M.L., Sarachaga, I., Marcos, M., (2016) "Metodología para el desarrollo de procesos de automatización según la norma ANSI/ISA-88", *XXXVII Jornadas de Automática*, 7-9 Sep., Madrid, España. pp. 987-994.
- [4] Burgos, Álvarez, M.L., A., Iriondo, N., Sarachaga, I., (2020) "Metodología para la transformación de diseños en GRAFCET a código IEC 61131-3", *Información Tecnológica*, 31(6), [dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000600133](https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000600133).
- [5] Burgos, A., Sarachaga, I., Álvarez, M.L., Estévez, E., Marcos, M., (2014) "A Training Proposal based on MeiA to face Automation Challenges", *International Journal of Engineering Education*, 30(5), pp. 1254-1270.
- [6] DIN/DKE - Deutsches Institut für Normung/Deutsche Kommission Elektrotechnik, (2016) "German Standardization Roadmap". Industry 4.0. [www.din.de/go/roadmapindustrie40-en](https://www.din.de/go/roadmapindustrie40-en)
- [7] Fraile, F., Sanchis, R., Poler, R. y Ortiz, A., (2019) "Reference Models for Digital Manufacturing Platforms", *Applied Sciences*, 9, pp. 4433-4357.
- [8] IEC 61131-3: Int. Electrotechnical Commission, (2003) *IEC 61131-3, Programmable Controllers, Part 3: Programming Languages*.
- [9] IEC 61512-1, (2001) "Batch Control-Part 1: Models and terminology".
- [10] IEC 62264, (2013) "Enterprise-control system Integration-Part 1: Models and terminology".
- [11] IEC 12207, (2017) "Systems and software engineering – Software life cycle processes".
- [12] Lu, Y., Morris, K. C., Frechette, S., (2016) "Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems". *National Institute of Standards and Technology (NIST 8107)*, <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.8107>
- [13] Orive, D., Iriondo, N., Burgos, A., Sarachaga, I., Álvarez, M.L., Marcos, M., (2019) "Fault injection in Digital Twin as a means to test the response to process faults at virtual commissioning", *24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 10-13 Sep. Zaragoza, Spain.
- [14] Vogel-Heuser, B., Fay, A., Schaefer, I., Tichy, M., (2015) "Evolution of software in automated production systems: Challenges and research directions", *The Journal of Systems and Software*, 110, pp. 54-84.
- [15] Vogel-Heuser, B., Fischer, J., Neumann, E. M., Kreiner, M., (2021) "Evolution of software in automated production systems: Challenges and research directions", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (Preprint)*, <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-168613/v1>
- [16] Vyatkin, V., (2013) "Software Engineering in Factory and Energy Automation: State of the Art Review", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(3), pp. 1234-1249.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa>)

# Aprende fundamentos de control construyendo un siguelíneas

I. Alvarado

J.A. Borja

F. Salas

D. Muñoz de la Peña

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla

Avd. de los Descubrimientos, s/n,

Sevilla 41092, ialvarado@us.es, jaborja@us.es, salas@us.es, dmunoz@us.es,

## Resumen

*En este artículo se presenta un robot siguelíneas basado en Arduino de bajo coste que se ha usado como proyecto en la asignatura Control Automático de segundo curso del Grado de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Sevilla. La idea es que los alumnos puedan aprender electrónica, programación, tratamiento de señales y control por medio de la construcción y control de este robot móvil tanto en las clases de docencia práctica en el laboratorio de la asignatura, como en sus horas de trabajo fuera del horario lectivo.*

**Palabras clave:** Educación, control, robótica móvil.

## 1. Introducción

La enseñanza del control no es, en general, una tarea sencilla. Realizar el control de cualquier sistema real conlleva aplicar conocimientos de distintas disciplinas. Hay que aplicar conocimientos de electrónica, de tratamiento y acondicionamiento de señales, de programación, de control. El control, a su vez, puede requerir el desarrollo de un modelo, la identificación del mismo, también puede requerir el aprendizaje del uso de herramientas de simulación, de programación y de control propiamente dicho.

Por este motivo, para que el alumno se concentre en el estudio de la dinámica del sistema controlado a menudo se simplifican los sistemas; se le da el sistema casi completo al que solo le falta la parte a estudiar o directamente trabaja en simulación. El problema de este enfoque es que, aunque el alumno aprende a controlar un sistema, cuando tiene que hacer el control de un sistema real, no sabe como atacar el problema.

Una pedagogía popular para abordar este problema es el aprendizaje basado en proyectos (ABP), [7] [5]. Esta metodología plantea un conjunto de cuestiones como punto de partida. Mediante la realización de un proyecto se van dando respuestas a dichas cuestiones dando proporcionando al alumno el conjunto de conocimientos requeridos.

El aprendizaje basado en proyecto involucra a los estudiantes en la exploración de preguntas importantes y significativas a través de un proceso de investigación y colaboración. Los estudiantes hacen preguntas, predicciones, diseñan soluciones y aprenden a recopilar y analizar datos, utilizar tecnología, fabricar productos y compartir ideas.

Uno de los problemas que enfrenta PBL en el campo de la automática es la necesidad de disponer de un sistema para analizar y controlar. Una opción es el uso de laboratorios virtuales, ver [3] y sus referencias. Sin embargo, los experimentos físicos tienen un valor pedagógico por sí mismos porque el alumno tiene que resolver numerosos problemas que no están presentes en los entornos virtuales. Otra posible solución son las prácticas de laboratorio, pero como ya comentamos, suelen ser sistemas simplificados donde el alumno solo resuelve el parte del sistema de control.

Hoy en día el precio actual de los componentes electrónicos brinda a los educadores la oportunidad de enseñar control mediante la construcción de plataformas de bajo costo. Por ejemplo, en [4] se presenta un robot autoequilibrado de dos ruedas, en [8] se muestra un ejemplo de una bola y una viga y en [6] se construye un levitador magnético para enseñar a controlar, [2] donde se presenta un robot móvil autoequilibrado.

El coste de algunos de estos dispositivos es tan bajo, que abre la posibilidad de que cada alumno pueda adquirir su propio equipo para trabajar fuera del horario lectivo y fuera del laboratorio, es decir, que cada alumno pueda tener su laboratorio en su propia casa.

Este artículo presenta los primeros resultados de un proyecto desarrollado en la Universidad de Sevilla con el objetivo de diseñar un robot siguelíneas de bajo coste que puede ser construido y controlado por los estudiantes de Control Automático en sus propias casas de forma independiente, siguiendo un enfoque PBL, aprendiendo electrónica, programación, modelado (tipo caja negra), control y procesamiento de señales. La figura 1 muestra el robot resultante.

Un robot siguelíneas es un robot que intenta se-

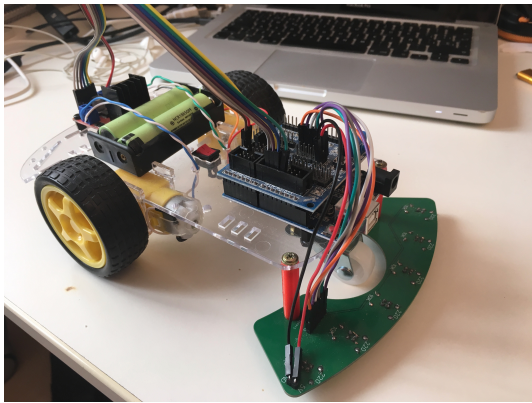


Figura 1: Fotografía del proyecto resultante

guir una línea que describe un camino. La idea es mantener el ángulo entre la línea y el eje del robot igual a cero durante el movimiento, aplicando a los motores, que mueven las ruedas, el voltaje para conseguir dicho objetivo.

Este dispositivo ofrece una serie de retos tecnológicos muy interesantes, además de poder expresar un objetivo de diseño muy directo y claro, ser capaz de diseñar el robot más rápido para un circuito determinado. Esta propiedad es importante, ya que permite que el alumno tenga un resultado claro de su trabajo, e incluso ofrece la oportunidad de realizar una competición entre los diferentes alumnos.

Este artículo se organizará de la siguiente manera; primero, se presenta el prototipo de hardware, a continuación, se presenta un esquema de control diseñado por estudiantes de la Universidad de Sevilla junto con unos resultados obtenidos. Y finalmente el artículo muestra algunas conclusiones y posibles mejoras.

## 2. Hardware

El robot ha sido diseñado de forma que pueda ser construido por alumnos incluyendo las conexiones entre las diferentes partes del mismo. Con objeto de reducir el precio del robot al mínimo se ha comprado un kit compuesto por el chasis, los motores, sus ruedas y el driver de los mismos, un Arduino Uno, un Arduino Uno Sensor Shield, un porta pilas, un interruptor de encendido y una rueda loca que se puede encontrar en internet a un precio muy reducido. A este kit se le ha añadido una placa, diseñada en el departamento, con un array de sensores infrarrojos para detectar la posición de la línea. El precio total del conjunto se puede conseguir entre 20€ y 60€ dependiendo del fabricante (OSOYO, ELEGOO, CEBEKIT entre otros). A continuación se presentan, por separado, las distintas partes del mismo:

### 2.1. Chasis

Placa de metacrilato de 2mm de espesor multi-propósito. En la figura 2 Puede verse el chasis. A media altura a la derecha pueden verse también los soportes de los motores en metacrilato, la rueda loca y el porta-pilas. El kit también incluye los tornillos, aunque no aparezcan en las figuras.



Figura 2: Chasis

### 2.2. Motores

Motores de continua con reductora. En el kit también proporciona las ruedas para los mismos. En la figura 3, pueden verse los motores y las ruedas del kit.



Figura 3: Motores y ruedas

Las únicas soldaduras que este proyecto requiere son los cables que conectan los motores con los drivers, en el lado de los motores. El driver dispone de terminales con tornillos, mediante los cuales se conectan los motores. El resto de las conexiones se pueden hacer mediante cables DuPont con terminales hembra-hembra.

### 2.3. Driver L298N

En la figura 4, puede verse el driver. Los jumpers que en la figura aparecen como *Motor A,B activo* los vamos a quitar y los conectaremos a dos salidas digitales PWM del Arduino (son las que llevan el símbolo ~). En la placa del driver vienen denotados con las etiquetas *ENA* y *ENB* (enable A, enable B, son los pines más cercanos al borde

de la placa). Mediante estas dos señales controlaremos el módulo de la velocidad de los motores.

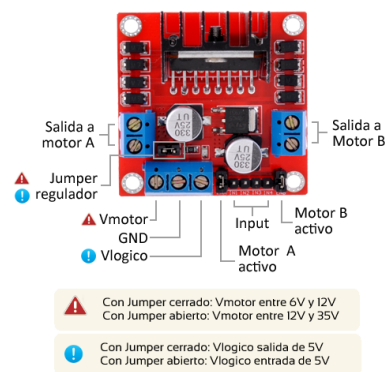


Figura 4: Pines L298N

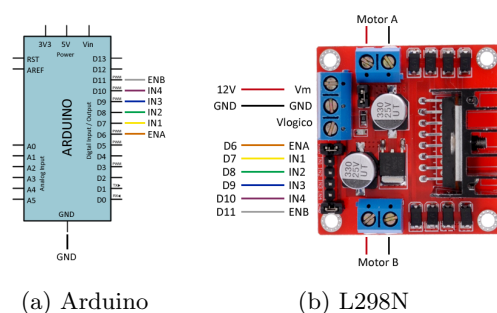
Los 4 pines etiquetados en la imagen como *input* controlaran la dirección de giro de los motores, el freno eléctrico de los mismos o que queden libres. En la placa del driver están etiquetados como *IN1*, *IN2* para controlar el motor A y *IN3* e *IN4* para controlar el motor B de la siguiente manera (véase el cuadro 1).

	Adelante	Atrás	Freno
IN1 (IN3)	HIGH	LOW	LOW
IN2 (IN4)	LOW	HIGH	LOW

Cuadro 1: Configuración dirección de giro de los motores.

Si ponemos el *jumper regulator* podemos alimentar nuestro Arduino a 5V mediante el pin *Vlogico*

En la figura 5 puede verse la conexión con el Arduino:



(a) Arduino

(b) L298N

Figura 5: Conexión L298N - Arduino

## 2.4. EL sensor CNY70

El sensor CNY70, esta compuesto por un diodo led y un foto transistor; es un sensor analógico y nos da un valor de voltaje proporcional a la luz

rebotada. La utilización de un sensor de infrarrojos puede ser de gran utilidad en proyectos en los que haya que hacer distinción entre superficies de color blanco y negro.

El sensor se sitúa a unos milímetros de la superficie a detectar, mientras tanto el diodo interno emite una señal de infrarrojos que absorberá la superficie en el caso de que sea negra o bien rebotará en el caso en el que la superficie sea blanca. Si la señal de infrarrojos rebota, activará la base del fototransistor entrando éste en conducción.

Se montará primero un único sensor para probar como funciona. Realizamos a continuación el montaje de la figura 6 y conectamos la fecha etiquetada como *ARDUINO* a cualquier entrada analógica del Arduino, por ejemplo a la *A0*.

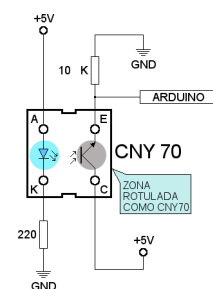


Figura 6: Circuito básico para usar el CNY70

La idea es encontrar un umbral por el cual la lectura del CNY70 se considerará TRUE o 1 cuando encuentre línea y por debajo FALSE o 0 en caso contrario

## 2.5. Placa con sensores CNY70

Con la idea de ser capaces de medir el ángulo que forman la línea y el robot siguelíneas, se crea el siguiente circuito (véase figura 7).

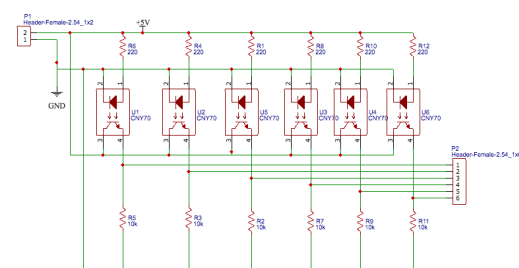


Figura 7: Circuito placa para montar 6 sensores CNY70

Los sensores *cny70* se colocan de modo y forma que estén a  $-25^\circ$ ,  $-15^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $+5^\circ$ ,  $+15^\circ$  y a  $+25^\circ$  respecto al eje de giro del robot. Véase la parte sombreada en azul de la figura 8. En rojo puede verse el diseño de la placa de metracilato. Se con-



sidera el eje de giro el punto medio de la línea que une los centros de las dos ruedas motrices.

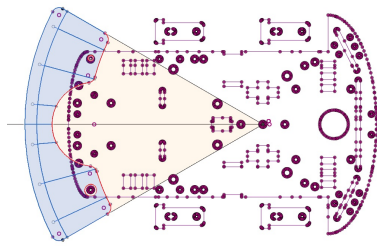


Figura 8: Localización de los sensores CNY70

En la figura 9 puede verse el diseño de la PCB y la placa, ya montada, puede verse en la figura 10

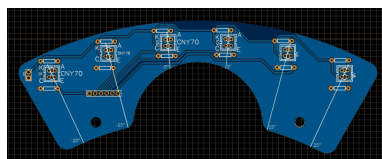


Figura 9: PCB placa sensores cny70

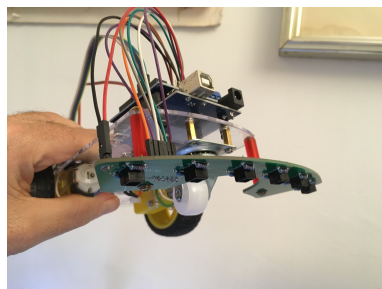


Figura 10: Placa montada

Cada sensor nos proporcionará un 1 si detecta línea y 0 en caso contrario. Almacenaremos la información proporcionada por los sensores ordenados de izquierda a derecha en un vector de enteros *vec\_cny70*. Sea *ang* un entero que contendrá la medida del ángulo y *n* almacenará el número de sensores que valen 1. El ángulo se puede medir mediante el siguiente código:

```
ang=0;
n=0;
for ( i=0;i <6;i++)
{
    ang+=vec_cny70 [ i ]*10*( i+1);
    n+=vec_cny70 [ i ];
}
ang=ang/n;
ang=ang - 35;
```

Al final de este código *ang* tendrá un valor que irá de  $-25^\circ$  a  $+25^\circ$  en incrementos de  $5^\circ$ . Quedará

pendiente programar que pasa si ningún sensor no detecta línea u otras situaciones anómalas.

El conexionado de esta placa al Arduino es sencillo puesto que la salida de cada uno de los sensores CNY70 va conectado a una entrada analógica del Arduino y los dos pines de alimentación van a 5V y a GND del mismo.

## 2.6. Arduino Uno sensor Shield

El *Arduino sensor shield* viene con el kit del robot. Nos va a proporcionar la posibilidad de hacer todo el circuito del robot sin necesidad de hacer ninguna soldadura (exceptuando los cables de los motores). En la figura 11 se puede ver la descripción de los pines del mismo.

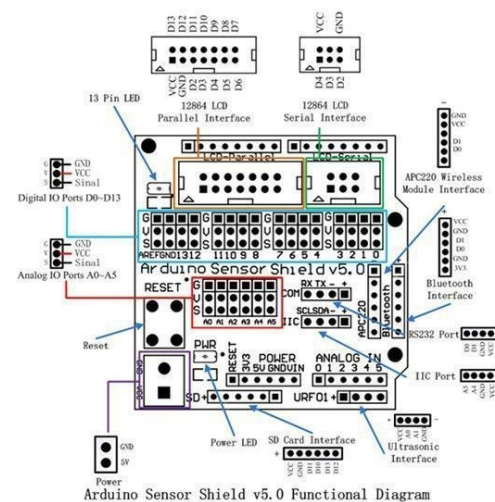


Figura 11: Arduino Sensor Shield V5

## 2.7. Arduino Uno

Arduino Uno es un microcontrolador basado en un ATmega328P. Tiene 14 pines digitales (6 de ellos PWM) y 6 entradas analógicas de 10bits. La velocidad del microcontrolador es  $16MHz$ . La placa contiene toda la electrónica adicional para poder usar los recursos del microcontrolador.

En este proyecto usaremos esta placa porque es la que nos proporciona el kit y porque es muy robusta ante errores en el conexionado, lo que la hace muy apropiada para un alumno que no tiene experiencia trabajando con este tipo de dispositivos.

Vamos a usar el Arduino para leer los 6 sensores CNY70, decidir si están o no detectando línea y construir la medida del ángulo. Por otro lado controlaremos la velocidad y sentido de giro de los motores por medio de dos señales PWM para el módulo y dos pines digitales, por motor, para el sentido. Por último controlaremos el ángulo a



medida que el robot se mueve mediante un PID discretizado que intentará mantener el mismo en un valor próximo a cero para que el robot pueda seguir la línea.

## 2.8. Modulo bluetooth HC-06

Si se quieren sacar datos o monitorizar el ensayo, se puede conectar un módulo bluetooth a los conectores dispuestos para ello en el *Arduino Sensor Shield*.

## 3. Software

El esquema de control es el típico problema de regulación en el que el objetivo de control es mantener el ángulo entre el vehículo y la línea igual a cero a pesar de las perturbaciones (que van a venir por los cambios de dirección en la línea a seguir). En la figura 12 vemos los bloques a programar:

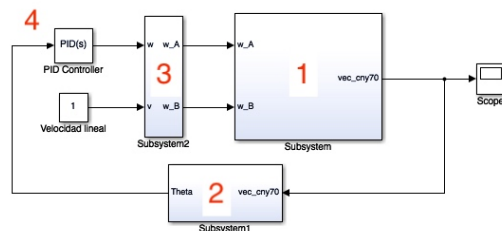


Figura 12: Esquema de control

El bloque 1, recibe como entrada  $\omega_A$  y  $\omega_B$  que son las señales que van a controlar la velocidad de cada motor. Serán dos enteros con signo que irán de -255 a 255 (ya que los controladores de las señales PWM del Arduino son de 8 bits). El módulo de estas señales controlará la señal PWM que se aplican los motores y el signo los pines de dirección. Asimismo este lo que se encarga de leer los 6 sensores CNY70 y los almacenará en un vector de unos y ceros que proporciona al bloque 2.

El bloque 2 construirá el ángulo  $\theta$  (ángulo entre la línea a seguir y el robot) a partir de las medidas del vector como se describe en la sección 2.5. Puede añadirse código adicional para tener en cuenta cuando no se detecta una línea o cuando se llega a un cruce.

El bloque 3 recibe la velocidad angular  $\omega$  del PID y la velocidad lineal  $v$ . Esta segunda magnitud puede ser ajustada como un parámetro más de diseño puesto que cuanto más rápido va el siguelíneas más difícil es sintonizar el controlador. A partir de estas dos magnitudes decidirá las consignas para los dos motores por separado sin más que hacer

$$\omega_A = v + \omega$$

$$\omega_B = v - \omega$$

Se puede tener en cuenta también las posibles saturaciones de las señales de control descritas en el bloque 1.

El bloque 4 es el controlador PID que recibiendo el ángulo entre robot y línea a seguir decidirá la velocidad angular  $\omega$  que ha de adquirir el robot para que el ángulo  $\theta$  sea lo más próxima a 0.

## 4. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos por el siguelíneas siguiendo el circuito exterior de la figura 13

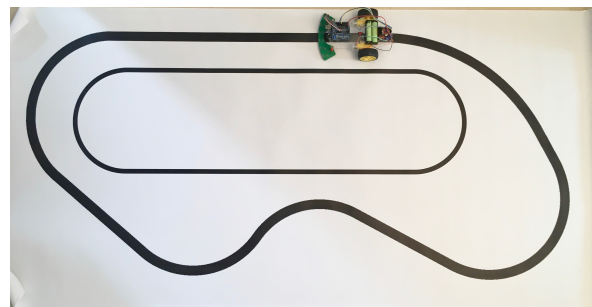


Figura 13: Circuito

Para poder mostrar los resultados se le ha añadido al robot siguelíneas un módulo bluetooth con objeto de mandar el ángulo  $\theta$  y la señal de control  $\omega$  durante un ciclo del mismo. En la figura 14 se pueden ver los resultados. La velocidad lineal en este ensayo es la máxima admisible. Tarda en completar el circuito unos 8 segundos.

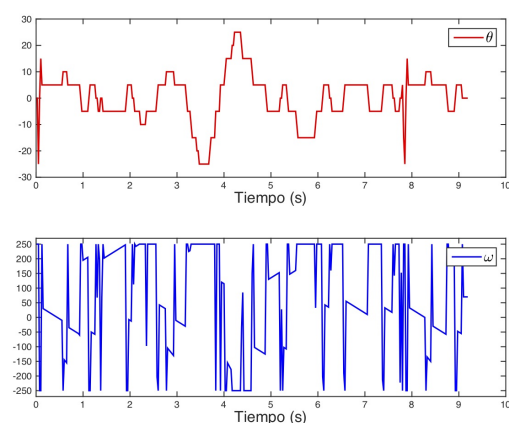


Figura 14: Ensayo

El control utilizado es un PID con un tiempo de muestreo de 25ms. Es un control muy agresivo con un término derivativo muy grande razón por la cual satura mucho.

## 5. Resultados docentes

El año 2020-21 se ha usado este prototipo como experiencia piloto voluntaria para 4 grupos de 3 alumnos de la asignatura Control Automático del grado de Ingeniería en Telecomunicaciones.

La experiencia ha sido positiva, consideran un buen complemento a la asignatura de control. Asimismo han hecho una serie de comentarios o críticas constructivas. La más relevante es que la realización del proyecto consume mucho tiempo por lo que habrá que tenerlo en cuenta en el currículo de la asignatura. Se han hecho 4 ejercicios previos a la realización del robot:

- 1 - Toma de contacto con Arduino.
- 2 - Pulsadores, puerto serie y funciones.
- 3 - Sensores y actuadores del siguelíneas.
- 4 - Control de un ventilador de un PC [1]. Con esta práctica los alumnos aprenden a programar un PID en tiempo discreto, garantizando el tiempo de muestreo mediante interrupciones temporales. Además también tienen que programar un filtro de media para poder generar la medida de la velocidad de giro a partir de la señal que proporciona el encoder integrado en el propio ventilador.

Los alumnos han hecho hincapié en que necesitan más formación previa con Arduino y una última sesión para montar el robot y orientar como programar un PID para el seguimiento de la línea.

Este año que entra van a hacer este proyecto en grupos de 3, todos los alumnos de la asignatura, y se va a realizar una evaluación competitiva con objeto de incentivar un ajuste fino de los parámetros del PID

### Agradecimientos

Los autores de este artículo desean darle las gracias a *Luis Llamas* por todos sus tutoriales sobre Arduino, algunos de los cuales han sido usados para crear este prototipo

### English summary

#### Line following robot as a control subject project

### Abstract

*This article presents a low-cost Arduino-based line-following robot that has been used as a project in the automatic control subject of the Telecommunications Engineering degree. The idea is that students can learn electronics, programming, signal processing and control through the construction and control of this mobile robot.*

**Keywords:** Education, control, mobile robotics.

## Referencias

- [1] I. Alvarado, J.A. Borja, R. Haes, D. Muñoz de la Peña (2021). Control de velocidad de un ventilador de una CPU. Jornadas de Automática, Castellón, España Septiembre 1-3.
- [2] C. Gonzalez, I. Alvarado, D. Muñoz La Peña (2017). Low cost two-wheels self-balancing robot for control education. 20th IFAC World Congress, Toulouse, France July 9-14.
- [3] Goodwin, G.C., Mediol, A.M., Sher, W., Vlacic, L.B. and Welsh, J.S., (2011). Emulation-based virtual laboratories: a low-cost alternative to physical experiments in control engineering education. IEEE Transactions on Education, 54(1), pp.48-55.
- [4] Hau-Shiue, J. and Kai-Yew, L. (2013). Design and control of a two-wheel self-balancing robot using the arduino microcontroller board. 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), 634-639.
- [5] M. Lehmann , P. Christensen , X. Du & M. Thrane (2008) Problem-oriented and project-based learning (POPBL) as an innovative learning strategy for sustainable development in engineering
- [6] Lilienkamp, K.A. and Lundberg, K. (2004). Low-cost magnetic levitation project kits for teaching feedback system design. Proceedings of the American Control Conference.
- [7] Perrenet, J.C., Bouhuijs, P.A.J. and Smits, J.G.M.M., (2000) The suitability of problem-based learning for engineering education: theory and practice. Teaching in higher education, 5(3), pp.345-358.
- [8] Rashied, Z., Hamees, M., Hassan, M.U., Hameed, S., and Khatri, N.A. (2016). Real time implementation of Robust PID controller for stabilization of Ball Balancing Beam. International Journal of Conceptions on Information Technology and Computing. 6-9.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Control de velocidad de un ventilador de una CPU

I. Alvarado.

J.A. Borja.

R. Haes.

D. Muñoz de la Peña.

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla.

Avd. de los Descubrimientos, s/n,

Sevilla 41092, ialvarado@us.es, jaborja@us.es, richard9661h@gmail.com, dmunoz@us.es,

## Resumen

*En este artículo se presenta un sistema de control minimalista que puede estar al alcance de todos los alumnos. Este sistema presenta un reto multidisciplinar en el que los alumnos necesitan aplicar conocimientos de electrónica, programación, tratamiento de señales y control. Mediante el montaje y el control de este sencillo equipo, que consta solo de cuatro componentes, los alumnos aprenderán los elementos básicos de un sistema de control.*

**Palabras clave:** Educación, control, aprendizaje basado en proyectos, laboratorio en casa.

## 1. Introducción

Cualquier rama educativa tiene como objetivo principal dotar a los estudiantes de la capacidad de traducir los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo de su formación en casos prácticos de la vida real. Sin embargo, no es una tarea sencilla, pues es un problema tan amplio y subjetivo, además de dependiente de las necesidades de los alumnos y de la rama del saber, que sería imposible definir un método único con el que afrontarlo.

Este reto se hace más complejo si se enfoca en la enseñanza del control de sistemas, ya que, para aplicar un algoritmo de control en un sistema real, es necesario tener conocimientos de diversas disciplinas independientes de la teoría de control, como electrónica, tratamiento y acondicionamiento de señales, programación, modelado e identificación de sistemas, uso de herramientas de simulación, etc.

Por lo tanto, en las prácticas de laboratorios de las asignaturas de control, en las que el tiempo disponible suele ser muy limitado, es típico que a los alumnos, para evitar que tengan que adquirir y aplicar los conocimientos de las disciplinas anteriormente mencionadas y puedan centrarse en la cuestión en estudio, se les proporcione un sistema totalmente simplificado y acondicionado, de forma que la única labor pendiente sea introducir el algoritmo de control en cuestión y analizar el correcto funcionamiento.

El gran problema que supone este enfoque viene cuando el alumno tiene que controlar un sistema real: aunque sabe cómo diseñar un controlador, no sabe cómo implementarlo.

Una estrategia educativa que trata de abordar este problema es el aprendizaje basado en proyectos (ABP), [7] [5]. Esta metodología consiste en abordar el problema entorno a un sistema real, resolviendo cada una de las cuestiones que se presentan para el mismo y adquiriendo el alumno el conjunto de conocimientos requeridos. Esto se consigue gracias a la investigación y colaboración de los estudiantes a lo largo del proyecto: formulando y explorando preguntas importantes y significativas, realizando hipótesis y predicciones, diseñando y analizando posibles soluciones, compartiendo ideas, etc.

No obstante, para algunos campos, y concretamente para el campo de la automática, esta solución da lugar a un nuevo problema: disponer de un sistema real para analizar y controlar.

Para solucionar esto último, una posible opción es el uso de laboratorios virtuales, ver [3] y sus referencias. El problema de estos es que suelen estar preparados para que el usuario solo tenga que introducir las directrices del ensayo que desea, pues no tiene acceso físico para abordar el problema de cero. Por lo tanto, el alumno no aprenderá a atacar a un sistema de la vida real, pues no estará acondicionado. Es decir, se tiene el mismo problema que se comentó para las prácticas de laboratorio en las que se usaban sistemas simplificados para poder centrar la práctica en la cuestión en estudio dentro del horario disponible.

Por otro lado, otra potencial solución que ha surgido recientemente, debido a la exponencial reducción del precio de los componentes electrónicos en los últimos años, es el desarrollo de plataformas de bajo costo. Por ejemplo, en [4] se presenta un robot autoequilibrado de dos ruedas, en [8] se muestra un ejemplo de una bola y una viga, en [6] se construye un levitador magnético para enseñar a controlar, y en [2] se presenta un robot móvil autoequilibrado.

En resumen, se tienen accesible todos los disposi-

tivos necesarios a un precio tan reducido que cada alumno podría adquirir su propio equipo para trabajar fuera del centro educativo y en horario no lectivo. Es decir, cada alumno podría tener un laboratorio en su propia casa, con acceso físico y sin un horario limitado.

Este artículo presenta un sistema de control compuesto por solo 4 elementos. Un ventilador de una CPU de 4 hilos (2 de alimentación, el tercero es la salida del encoder interno y el cuarto es una señal de control de la velocidad del mismo); un potenciómetro de 10K (que usaremos para identificar el sistema primero y para proporcionar la referencia después), una fuente de alimentación de 12V y cualquier Arduino. Los alumnos van a aprender a controlar la velocidad del ventilador mediante un PID. El tiempo de muestreo se garantizará mediante interrupciones temporales. Interrupciones asociadas al cambio de un pin serán usadas para medir la velocidad y además tendrán que programar un filtro para tener una medida aceptable de la velocidad (tratamiento de señales). El sistema es un sistema estable de primer orden, por lo que sintonizar el control es muy sencillo. Esta práctica es interesante como un primer contacto con un sistema de control. Usamos este ejercicio como ejercicio previo a cualquier sistema de control más complejo. La figura 1 muestra el montaje resultante.

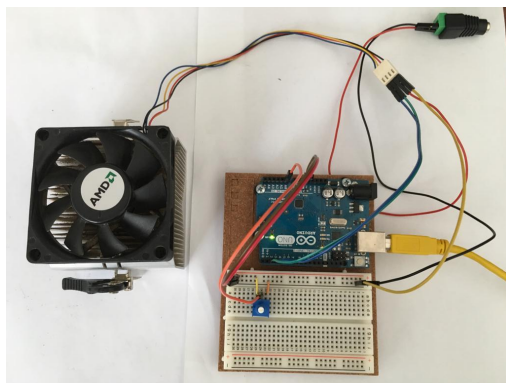


Figura 1: Fotografía del proyecto resultante

Aún siendo un sistema con una dinámica muy sencilla, este laboratorio tiene como propiedad fundamental que por su coste y por la sencillez del montaje, es posible que cada alumno adquiera su propio equipo para trabajar en casa y resolver los diferentes problemas que propongan.

Esto permite realizar prácticas con una mayor profundidad, incluyendo un análisis más completo de lo que sería posible realizar en el laboratorio en una sesión de tiempo limitada. Además el trabajo con el equipo se convierte en multidisciplinar, aplicando conocimientos no sólo de control, si no también de electrónica, programación y señales.

Este artículo se organizará de la siguiente manera; Primero, se presenta el prototipo de hardware. A continuación, se presenta el conexionado, la etapa de identificación, el esquema de control y finalmente algunos resultados. El artículo finaliza con algunas conclusiones.

## 2. Hardware

El equipo ha sido diseñado de forma que pueda ser construido por alumnos incluyendo las conexiones entre las diferentes partes del mismo. La mayoría de las partes se pueden reciclar de equipos viejos, pero, si no, se pueden conseguir por 13€ sin incluir el Arduino.

En nuestro caso el ventilador es de un PC en desuso, la fuente de 12V puede ser la misma del PC o cualquier transformador que tengamos por casa. La clave está en que el ventilador de la CPU ya viene preparado para ser controlado por una señal PWM y como esta es una señal digital, aunque el ventilador funcione a 12V, los 5V la señal PWM del Arduino son suficientes. También tiene un encoder interno que vamos a usar para medir la velocidad, con lo que ya tenemos todo lo necesario para controlar la velocidad del mismo. A continuación se presentan, por separado, las distintas partes del mismo.

### 2.1. Ventilador CPU

Tiene que ser un ventilador de 4 hilos, si no, no es válido para esta práctica. Estos ventiladores son capaces de modificar su velocidad porque incorporan una señal PWM de control. Además, incorporan un encóder que se cierra una o dos veces por vuelta en el interior del mismo y cuya salida también es accesible para poder medir la velocidad de giro. Casi todos los ventiladores de las CPUs los incorporan. Suelen venir unidos al disipador de calor del micro. En la figura 2 puede verse el ventilador usado para este artículo.



Figura 2: CPU FAN

## 2.2. Potenciómetro de 10K

En la figura 3 puede verse un potenciómetro como el usado en la práctica.

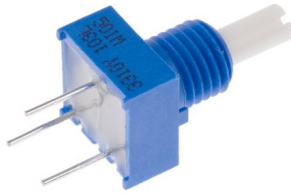


Figura 3: Potenciómetro

Utilizaremos el potenciómetro como divisor de tensión. Conectando un pin a 5V, el otro a GND y el pin intermedio a una de las entradas analógicas del Arduino. De esta forma tendremos un número que va de 0 a 1023 (ya que la entrada analógica del Arduino es de 10 bits) controlable por el usuario.

Esta entrada analógica será utilizada para fijar la señal de actuación en el modo de control manual y la referencia en el modo de control automático.

## 2.3. Fuente de alimentación de 12V

Nos vale cualquier fuente de continua de 12V, lo único a tener en cuenta es que se necesita un adaptador para poder conectar fácilmente la fuente al resto del circuito. En la figura 4 puede verse la fuente de alimentación usada.



Figura 4: Fuente de alimentación y adaptador.

## 2.4. Arduino

Para este ejercicio usamos un Arduino Uno, pero puede ser cualquier Arduino. Es un microcontrolador basado en un ATmega328P. Tiene 14 pines digitales (6 de ellos PWM) y 6 entradas analógicas de 10bits. La velocidad del microcontrolador es 16MHz. La placa contiene toda la electrónica adicional para poder usar los recursos del microcontrolador. En la figura 5 puede verse una foto de un Arduino UNO.

En este proyecto usaremos esta placa porque es la más común, y ya la tenemos de otros equipos de prácticas.

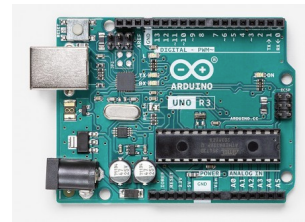


Figura 5: Arduino Uno

Vamos a usar el Arduino para procesar la información proveniente del encoder y generar la señal PWM necesaria para que el motor gire a la frecuencia de referencia determinada por el potenciómetro. Además, sacará por el puerto serie la referencia, la velocidad actual y la acción de control. Estas tres variables podrán visualizarse por medio de la herramienta *Serial Plotter* que trae el IDE de Arduino.

## 3. Conexionado

El circuito eléctrico a montar es muy sencillo como puede verse en la figura 6. Es muy importante tener cuidado que el terminal con 12V de la fuente de alimentación no se conecte al Arduino de ninguna manera pues podría dañarlo. También es muy importante conectar la tierra de la fuente con la del Arduino.

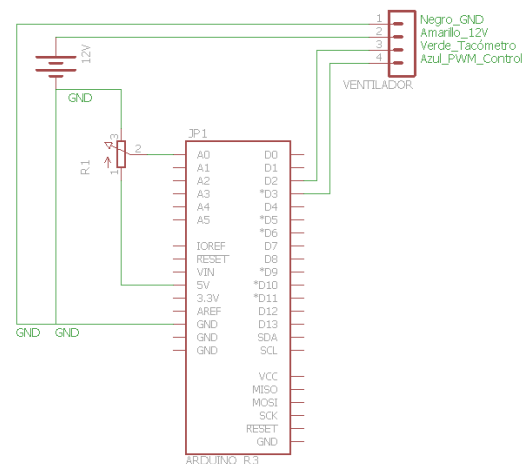


Figura 6: Conexionado

## 4. Identificación

Antes de empezar a controlar el motor, se enseña al alumno cómo trabajar con interrupciones temporales, y cómo trabajar con interrupciones asociadas al cambio de estado de un pin. Utilizaremos estas segundas para ir incrementando un contador que chequearemos cada 100ms (tiempo de muestreo). Llamaremos  $np_{100}$  a esta cantidad. Aparte



se conecta el potenciómetro y se conecta a una entrada analógica. En este primer ejercicio mapearemos la medida del potenciómetro a  $[0, 255]$  y aplicaremos este valor a la señal PWM del pin que controla la velocidad. Anotaremos la  $np_{100}$  mínima y  $np_{100}$  máxima.

Veremos que  $np_{100}$  solo puede coger 8 o 10 valores diferentes. Con esta precisión en el la medida es imposible hacer un control fino de la velocidad. Hace falta programar una etapa de acondicionamiento de la señal como se verá en bloque 2 de la sección 5.

## 5. Esquema de control

El esquema de control es el típico problema de regulación en el que el objetivo de control es mantener la velocidad de giro del motor igual a la de la referencia actuando sobre el motor mediante una señal PWM. En la figura 7 vemos los bloques a programar:

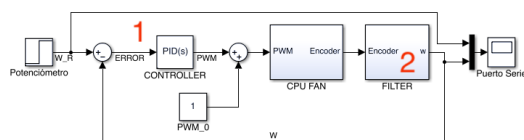


Figura 7: Esquema de control

El bloque 1, es el controlador PID, que se va a ejecutar cada  $100ms$ . Recibe el error de seguimiento y genera  $\Delta PWM = PWM - PWM_0$ , Siendo  $PWM_0$  El valor de la PWM en el punto de trabajo y  $\Delta PWM$  la salida del PID que es el incremento de la señal PWM respecto al punto de trabajo.

El bloque 2 construirá la velocidad de giro del motor  $\omega$  a partir de  $np_{100}$ . La idea es crear un buffer que almacene las 10 últimas medidas de  $np_{100}$ . En cada periodo de muestreo se añadirá una medida nueva y se desechará la más antigua. En cada periodo de muestreo se sumarán los valores de las 10 medidas del buffer y esa será la medida de  $\omega$  es decir las revoluciones por segundo.

$$\omega(k) = \sum_{i=0}^{i=9} np_{100}(k-i)$$

## 6. Resultados docentes

Este equipo de prácticas se ha usado como ejercicio de iniciación al control con Arduino en múltiples ocasiones. Se empezó usando con los alumnos que realizaban los proyectos de fin de grado y de fin de master relacionados con la construcción de algún dispositivo de control basado en Arduino.

Es un ejercicio sencillo que asienta muy bien las bases de cualquier sistema de control.

Sorprendentemente lo que más les cuesta de este ejercicio es programar el buffer y entender cómo funciona la función *map* de Arduino (que hace un mapeo de una variable en un dominio a otro dominio).

El año académico 2020-21 se usó como entrenamiento de los alumnos que hicieron el proyecto voluntario de la asignatura de Control Automático del grado en Ingeniería de Telecomunicaciones que consistía en la realización de un robot siguelíneas que ha dado lugar a otra publicación en este mismo congreso [1].

Los resultados han sido buenos y el año académico 2021-22 dicho proyecto pasa a ser obligatorio en la misma asignatura, aunque ha habido que adaptar el currículo para dar cabida al mismo.

## 7. Resultados del control

A continuación se presentan los resultados obtenidos. En las figuras 8 y 9 puede verse una captura de la herramienta Serial Plotter de Arduino mostrando la evolución de la referencia, de la velocidad del motor y de la señal PWM que controla el motor.

En la figura 8 puede verse como se comporta el sistema ante varios cambios en la referencia.

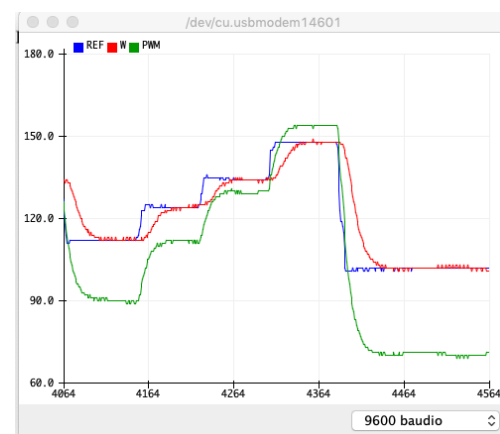


Figura 8: Gráfica con los resultados del control en seguimiento

En la figura 9 puede verse la respuesta del controlador cuando se somete al sistema a una perturbación, en concreto, se pone una hoja de papel encima del ventilador obstaculizando el paso del aire. Puede verse como la velocidad se mantiene y como la acción de control varía para compensar el efecto de la perturbación. En la última parte del ensayo se vuelve a retirar la hoja de papel.



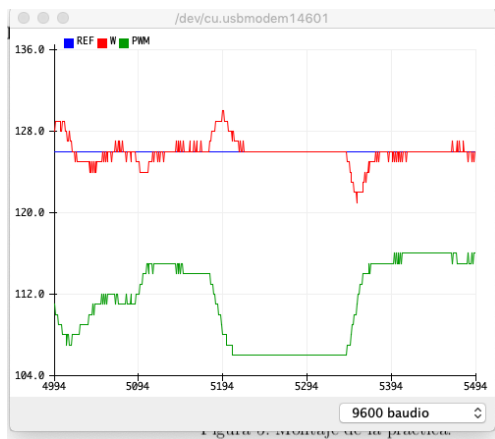


Figura 9: Gráfica con los resultados del control en regulación

## English summary

### Speed control of a CPU fan as a first control exercise

#### Abstract

*This article presents a minimalist control system that can be available to everyone, including students. As all control projects are multidisciplinary projects, students need to apply knowledge of electronics, programming, signal processing, and control. By assembling and controlling this simple kit, which consists of only 4 components, students will learn the basic elements of a control system.*

**Keywords:** Education, control, project-based learning, home lab.

## Referencias

- [1] I. Alvarado, J.A. Borja, F. Salas, D. Muñoz de la Peña (2021). Aprende fundamentos de control construyendo un siguelíneas. Jornadas de Automática, Castellón, España Septiembre 1-3.
- [2] C. Gonzalez, I. Alvarado, D. Muñoz La Peña (2017). Low cost two-wheels self-balancing robot for control education. 20th IFAC Word Congress, Toulouse, France July 9-14.
- [3] Goodwin, G.C., Medioli, A.M., Sher, W., Vlacic, L.B. and Welsh, J.S., (2011). Emulation-based virtual laboratories: a low-cost alternative to physical experiments in control engineering education. IEEE Transactions on Education, 54(1), pp.48-55.

- [4] Hau-Shiue, J. and Kai-Yew, L. (2013). Design and control of a two-wheel self-balancing robot using the arduino microcontroller board. 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), 634-639.
- [5] M. Lehmann, P. Christensen, X. Du & M. Thrane (2008) Problem-oriented and project-based learning (POPBL) as an innovative learning strategy for sustainable development in engineering
- [6] Lilienkamp, K.A. and Lundberg, K. (2004). Low-cost magnetic levitation project kits for teaching feedback system design. Proceedings of the American Control Conference.
- [7] Perrenet, J.C., Bouhuijs, P.A.J. and Smits, J.G.M.M., (2000) The suitability of problem-based learning for engineering education: theory and practice. Teaching in higher education, 5(3), pp.345-358.
- [8] Rashied, Z., Hamees, M., Hassan, M.U., Hameed, S., and Khatri, N.A. (2016). Real time implementation of Robust PID controller for stabilization of Ball Balancing Beam. International Journal of Conceptions on Information Technology and Computing. 6-9.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Implementación virtual de prácticas de asignaturas de control como alternativa a las prácticas de laboratorio presenciales

Álvaro Michelena Grandío, Francisco Zayas-Gato, Esteban Jove, José-Luis Casteleiro-Roca,  
Héctor Quintián and José Luis Calvo-Rolle

University of A Coruña, CTC, CITIC,

Department of Industrial Engineering, Ferrol, A Coruña, Spain

{alvaro.michelena, f.zayas.gato, esteban.jove, jose.luis.casteleiro, hector.quintian, jlcalvo}@udc.es

## Resumen

*La enfermedad del coronavirus (COVID-19) ha provocado una grave crisis de salud con consecuencias socio-económicas sin precedentes. Desde la declaración de pandemia por parte de la Organización Mundial de la Salud, la mayoría de los gobiernos aplicaron políticas de control como el confinamiento, la restricción de la movilidad, el distanciamiento social, etc. En este contexto, adaptar la planificación educativa a ese escenario conlleva un gran desafío para la comunidad educativa global. Además, dado que las prácticas presenciales de laboratorio en la educación superior fueron canceladas temporalmente, la creación de escenarios virtuales realistas mediante modernas aplicaciones software representa una alternativa interesante y necesaria. Este enfoque práctico se puede lograr mediante el uso de dos herramientas de software interesantes, como Node-RED y Factory I/O. En este trabajo se propone la implementación de una planta de laboratorio virtual utilizando las herramientas mencionadas anteriormente, con características muy similares a las plantas de laboratorio reales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de A Coruña.*

**Palabras clave:** Laboratorio virtual, prácticas de control y docencia en sistemas de control.

## 1 Introducción

El reciente estallido de la enfermedad del coronavirus (COVID-19) ha condicionado las metodologías de programación y enseñanza de la educación superior. Siguiendo las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), los gobiernos de la mayoría de los países decretaron restricciones de movilidad y distanciamiento social para prevenir la transmisión del virus. Además, se cerraron muchas instalaciones universitarias en un intento por controlar la propagación del virus. En consecuencia, las clases presenciales fueron suspendidas temporalmente y la enseñanza *online* se convirtió en obligatoria, lo que implicó un cambio drástico en un periodo de tiempo muy corto. Esta situación ha impactado

dramáticamente a la comunidad educativa en todo el mundo [35, 15, 20, 19].

Uno de los campos más afectados en la educación en ingeniería has sido la práctica de laboratorio así como su planificación. Este es un punto clave, ya que las clases de teoría se complementan con prácticas de laboratorio en la mayoría de las asignaturas. Esta metodología fomenta el aprendizaje colaborativo promoviendo el aprendizaje basado en proyectos.

Generalmente, los laboratorios tienen equipos específicos dedicados para clases prácticas. Sin embargo, en muchos casos, debido a las limitaciones del material disponible, es necesario organizar grupos de trabajo para realizar las tareas. En este contexto, debido a la naturaleza infecciosa del coronavirus, los grupos de trabajo ahora se han reducido o incluso has sido prohibidos para prevenir la transmisión del virus. De ahí que muchos profesores se esforzaran por rediseñar sus métodos de enseñanza, apoyándose en recursos tecnológicos para ofrecer una alternativa a los laboratorios reales [38, 37, 25, 3, 46].

Las lecciones de laboratorio fomentan la interacción de los estudiantes y el manejo de equipos físicos. Si bien las lecciones teóricas *online* son una alternativa a las presenciales, acceder a los laboratorios de forma remota no es una práctica común y no es posible en muchos casos. Es por ello que, una alternativa interesante a los laboratorios reales son los laboratorios virtuales. Hoy en día, muchos de los sistemas basados en técnicas de inteligencia artificial como los que se explican en [31, 1, 9, 17, 39, 7, 28, 26, 33, 13, 45, 29, 36, 40, 44, 34, 27, 4, 47, 4, 16, 14] se pueden verificar, en las primeras fases de diseño, mediante este tipo de laboratorios.

Hoy en día, gracias al progreso constante en computación y digitalización, muchas herramientas software pueden ser usadas para implementar escenarios virtuales. [42, 11, 12, 22, 24, 30]. En este trabajo se propone la integración de las herramientas de software Node-RED y Factory I/O para crear un escenario virtual lo más parecido posible a las plantas de control de nivel reales del

Laboratorio de Optimización y Control de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de A Coruña (UDC).

## 2 Contexto

El Laboratorio de Optimización y Control es uno de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de A Coruña (UDC). Este laboratorio cuenta con algunos equipos que emulan muchos procesos industriales reales, como lazos de control de temperatura y nivel de agua. En él, los estudiantes realizan prácticas de varias asignaturas de diferentes cursos con diversos niveles de dificultad, interactúan con el equipo, experimentan con sensores y actuadores, y prueban sus proyectos finales de grado y máster.

Uno de los equipos de laboratorio es el sistema de control de temperatura. Este sistema está formado por un cubo de metracrilato, en cuyo interior dos bombillas incandescentes actúan como elemento calefactor. Además, un ventilador de CC (corriente continua) actúa como un elemento enfriador (ver Figura 1). Para medir la temperatura en el interior del cubo se usa un sensor de temperatura LM35. La adquisición de datos de esta planta se puede realizar con un dispositivo DAQ (sistema de adquisición de datos) multifunción USB-6008 de National Instruments (ver Figura 2).

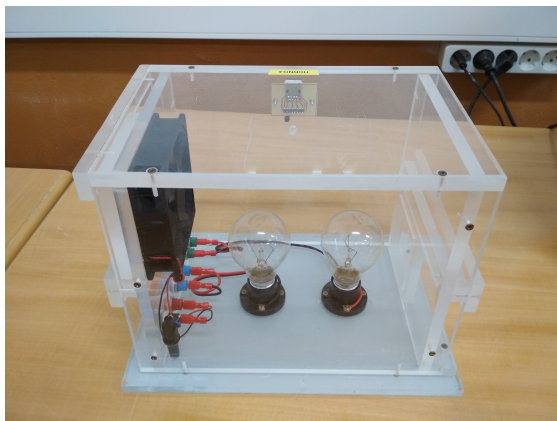


Figura 1: Planta de control de temperatura

Los estudiantes pueden organizarse por parejas o individualmente para trabajar con los sistemas de control de temperatura, porque hay suficientes unidades para este propósito.

Otro de los equipos disponibles en el laboratorio son los diversos sistemas de control de nivel en depósitos disponibles. A diferencia de los sistemas de control de temperatura, hay menos plantas de control de nivel disponibles. Es por ello que los grupos de trabajo de estudiantes deben ser



Figura 2: Tarjeta de adquisición de datos

más grandes. Además de lo anterior, es necesario tener en cuenta que se debe respetar el distanciamiento social debido a la pandemia de COVID-19 [41, 32, 6, 23, 10, 8].

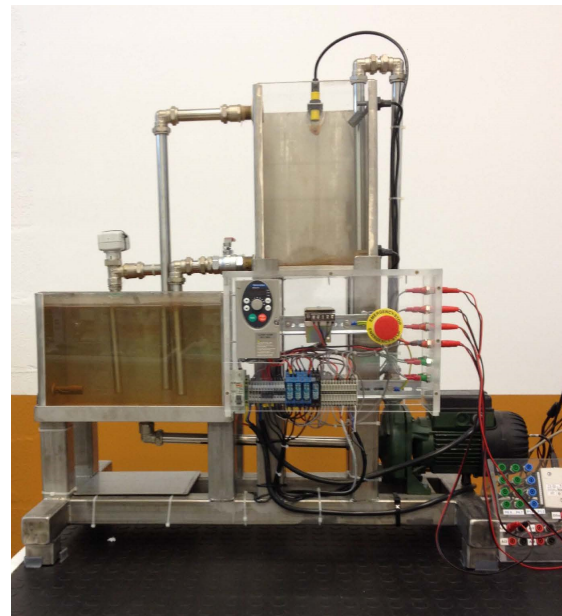


Figura 3: Planta de control de nivel

## 3 Caso de estudio

Esta sección describe la planta de control de nivel así como el y el circuito de control que se implementará virtualmente.

### 3.1 Planta de control de nivel

Como se mencionó anteriormente, uno de los sistemas disponibles en el Laboratorio de Optimización y Control es el circuito de control del nivel de depósitos, que se utiliza para fijar el nivel del líquido en un depósito o tanque.

El sistema (ver Figura 3) tiene dos depósitos a



Figura 4: Planta de control de nivel doble



Figura 5: Planta de control de nivel con intercambiadores

diferentes niveles. El depósito inferior se utiliza para almacenar el agua que se usa para llenar y descargar el depósito superior, que se utiliza como objetivo de control de nivel de líquido. Se utiliza una bomba centrífuga alimentada desde el depósito inferior para bombear agua al depósito superior. Para vaciarlo, se puede utilizar una válvula proporcional tanto manual como servopilotada. Un variador de frecuencia (VFD), conectado al motor trifásico de la bomba, controla la velocidad de llenado del depósito superior. Además, el nivel del agua en este depósito se mide con un sensor ultrasónico. Como DAQ se utiliza un Arduino Uno para adquirir las señales del proceso.

### 3.2 Sistema de control

El sistema de control es un controlador digital implementado por software, desarrollado usando un

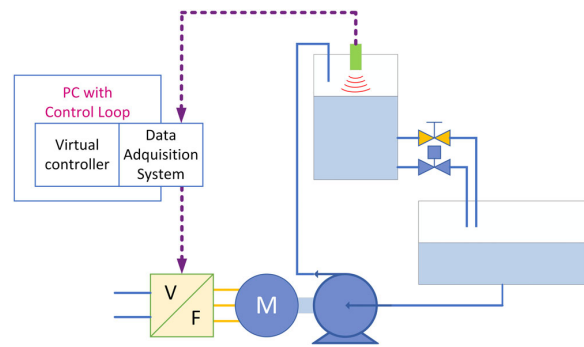


Figura 6: Esquema simplificado de la planta de control de nivel

ordenador y un DAQ (ver Figuras 6 y 7). Se basa en un controlador PID, siendo la consigna el nivel de agua deseado y la variable de proceso el nivel de agua actual medido en el depósito superior. El nivel del agua se mide con el sensor ultrasónico que envía un voltaje al DAQ. Gracias a eso, la ordenador recibe y procesa la señal recibiendo así el nivel de agua en un rango 0% (vacío) a 100% lleno.

La señal de error (consigna menos nivel actual) es la entrada al controlador digital, el cual calcula la señal de control y la envía a través de una de las salidas analógicas del DAQ al VFD de la planta, cerrando el circuito de control de nivel.

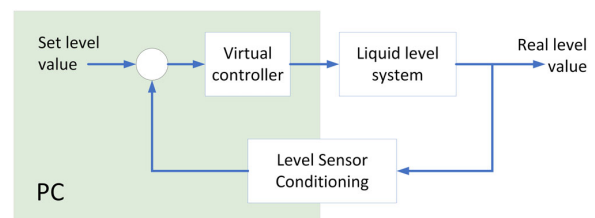


Figura 7: Arquitectura del sistema de control de nivel

## 4 Integración de herramientas

Dado que la planta de control de nivel del Laboratorio de Optimización y Control no está disponible para operar debido a la pandemia COVID-19, se propone el uso de un modelo virtual del sistema real [42, 21, 2, 43, 18, 5].

Esta sección presenta las herramientas de software que se utilizan para crear una planta de control de nivel virtual, así como el sistema de control virtual implementado.



#### 4.1 Planta de nivel virtual con Factory I/O

Factory I/O es un software de diseño 3D para simulación de fábrica. Es una herramienta con gran potencia para complementar el aprendizaje de la ingeniería de automatización y control. Como software de fácil uso, Factory I/O permite a los estudiantes crear escenarios virtuales rápidamente y comprender el funcionamiento de la fábrica desde un punto de vista más realista (Figura 8).

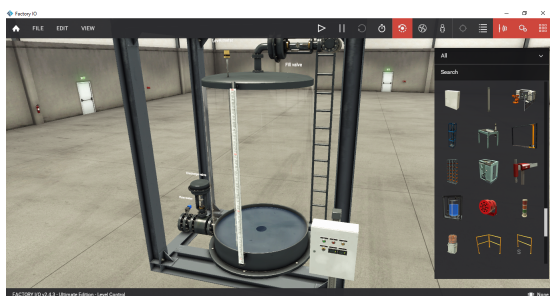


Figura 8: Planta de nivel con Factory I/O

Factory I/O dispone de muchos de los elementos más comunes de la industria modelados y virtualizados. Algunos de ellos son: cintas transportadoras, cuadros eléctricos, elevadores, paletizadores, cisternas, sensores, etc. Todos estos elementos se pueden ensamblar para configurar un proceso industrial específico y así construir una fábrica virtual.

Uno de los escenarios más interesantes es el uso de Factory I/O como plataforma de validación para sistemas de control basados en PLC. Permite probar cómo se comportaría un proceso industrial antes de ser implementado en un entorno real. Además, cuenta con una amplia gama de protocolos de comunicación industrial, permitiendo conexiones con PLC, microcontroladores, Ordenadores de Placa Única (SBC) o incluso con otro tipo de aplicaciones de escritorio.

La planta de control de nivel disponible en Factory I/O y la planta de control de nivel real del Laboratorio de Optimización y Control tienen muchas características en común. Además de tener un tanque para fijar el nivel del agua, la planta virtual de control de nivel cuenta con sensores y actuadores con entradas y salidas analógicas industriales. Sin embargo, estas señales de entrada y salida no están disponibles por hardware. Por lo tanto, una interfaz entre la planta virtual y el controlador real no es posible utilizando una tarjeta de adquisición de datos de hardware.

Una alternativa a la tarjeta de adquisición hardware es una interfaz de comunicación industrial. Factory I/O tiene varios controladores de comu-

nicación estándar para leer y escribir las señales de entrada y salida generadas por las sistemas virtuales. Algunos de estos controladores de comunicación son Modbus TCP Client, Modbus TCP Server, OPC Client DA/UA, Siemens S7-1200/1500, etc. Por lo tanto, cualquier aplicación software compatible con dichos controladores de comunicación se puede utilizar como alternativa a un sistema basado en DAQ.

#### 4.2 Interfaz y control con Node-RED

Node-RED es un software de programación gráfica para conectar dispositivos de hardware y también establecer comunicaciones entre aplicaciones. Desarrollado originalmente por el equipo de servicios de tecnología emergente de IBM, Node-RED es ahora parte de la Fundación OpenJS.

La programación gráfica, o, en este caso, la programación “basada en flujo”, es una forma de desarrollar aplicaciones interconectando bloques o “nodos” (ver Figura 9). Node-RED no solo ofrece una paleta de nodos predefinidos, también tiene la posibilidad de personalizar los nodos para realizar funciones específicas. Cada nodo dentro de la aplicación recibe datos a través de sus entradas, ejecuta acciones basadas en esos datos y envía datos a través de sus salidas. La forma y el orden de las interconexiones de nodos definen el comportamiento de la aplicación.

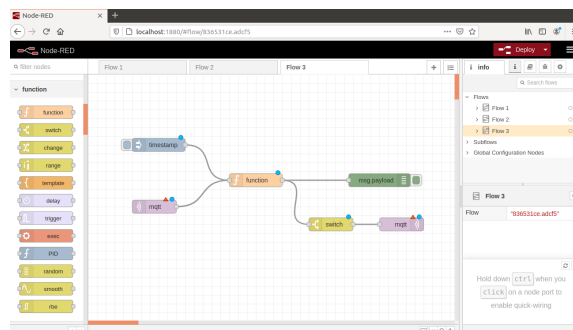


Figura 9: Entorno de programación de Node-RED

El entorno de desarrollo integrado (IDE) está basado en un servidor web, por lo que no es necesario instalar ninguna aplicación de escritorio dedicada. Solo se requiere un navegador web para acceder al entorno de programación. Por lo tanto, para desarrollar aplicaciones para un dispositivo conectado a una red, se puede utilizar un teléfono inteligente, una tableta, un ordenador portátil, etc.

Node-RED facilita el desarrollo de aplicaciones y ayuda a comprender el orden de ejecución del programa. Puede considerarse como una herramienta de apoyo, por lo tanto, los estudiantes no deben

de preocuparse por dominar un nuevo lenguaje de programación.

El aspecto clave de utilizar Node-RED para esta propuesta es que sirve como el primer paso del enfoque de integración. Además, al contar con los controladores de comunicación necesarios, es posible la implementación de un controlador PID virtual.

Sin embargo uno de los aspectos más interesantes es la facilidad con la que se puede hacer la integración con otros programas de control de procesos de los que ya se disponga a través de una comunicación Modbus TCP en tiempo real.

Ello permite usar programas ya diseñados y que funcionen en procesos reales sobre los mismos procesos pero virtualizados, para comprobar el grado de similitud entre ambos.

## 5 Solución implementada

Esta sección describe los métodos para lograr la integración de la aplicación y la solución virtual desarrollada como una alternativa al actual sistema de plantas de control de nivel real.

### 5.1 Comunicación de aplicaciones a través de Modbus TCP

Modbus es uno de los protocolos de comunicación más populares de la industria. Después de más de cuarenta años desde su publicación, todavía se usa ampliamente para conectar millones de dispositivos en todo el mundo. Es un estándar industrial de facto creado por Modicon y posteriormente adoptado por muchos otros fabricantes ya que no tiene derechos de autor.

Modbus es un protocolo robusto y fácil de implementar, ofreciendo, además, una arquitectura cliente/servidor que permite la conexión de múltiples dispositivos a través de un bus de campo. También admite múltiples versiones como Modbus RTU, Modbus ASCII, Modbus TCP, etc. Independientemente de la versión utilizada, el objetivo principal es el intercambio de datos entre dispositivos o aplicaciones.

Factory I/O y Node-RED disponen de controladores para comunicarse a través de Modbus TCP. Estas aplicaciones pueden utilizar este protocolo de comunicación para realizar el intercambio de datos. Por lo tanto, las señales de control y variable de proceso del controlador y la planta virtual se pueden enviar a través de este enlace. En este caso, el lado del cliente Modbus lo realiza la aplicación Node-RED y el lado del servidor por la planta virtual de nivel como se puede ver en las

Figuras 10 y 11.

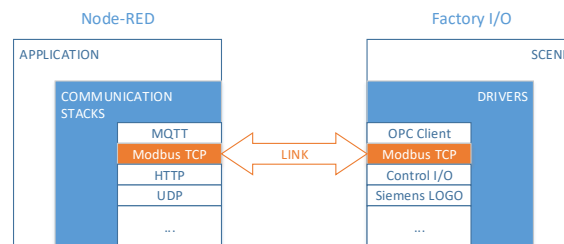


Figura 10: Enlace de comunicación entre Node-RED y Factory I/O

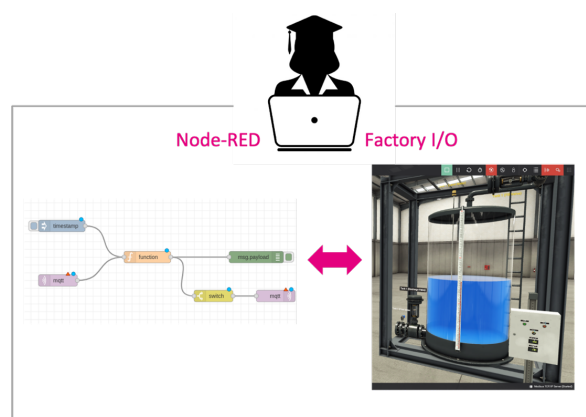


Figura 11: Integración de Node-RED en un único equipo

### 5.2 Contro PID con Node-RED

Como se mencionó anteriormente, el sistema de control de la planta de nivel real se basa en un controlador PID desarrollado con Matlab/Simulink, el cual si bien dispone de herramientas para diseñar y ajustar controladores PID, este tiene algunas limitaciones en términos de interfaces de comunicación industrial.

Por otro lado, Node-RED dispone de algunos nodos predefinidos que implementan algoritmos de control PID así como nodos de interfaz de comunicación. Esto permite la integración de la comunicación y el control en el mismo paquete de software. Similar a un bloque PID Matlab/Simulink, un nodo de control PID recibe la consigna y la variable de proceso a través de sus entradas y envía la señal de control a través de su salida. Luego, los usuarios pueden concentrarse en aprender y ajustar el controlador, en lugar de codificar el algoritmo PID por sí mismos.

La variable de proceso de la planta virtual y la señal de control PID de Node-RED se pueden intercambiar utilizando la interfaz Modbus TCP. Esto hace posible cerrar el circuito de control y



ejecutar el proceso en un solo ordenador (Figura 12). El sistema implementado consiste en un depósito de agua que mediante un regulador PID permite controlar un nivel determinado fijado por el usuario.

La evolución de la respuesta del sistema es mostrada mediante la interfaz gráfica incluida también en la figura 12. Dicha interfaz es totalmente configurable, permitiendo mostrar otras variables en tiempo real.

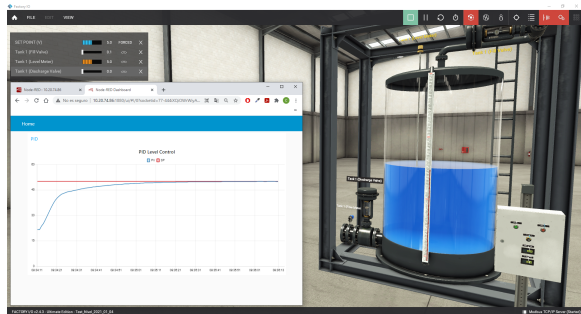


Figura 12: Integración de Node-RED y Factory I/O

### 5.3 Visualización, análisis y resultados

El funcionamiento de la planta virtual creada con Factory I/O se puede visualizar en tiempo real una vez cerrado el lazo de control. Antes de esto, es necesario ejecutar ambas aplicaciones y configurar los parámetros de la interfaz de comunicación. Cada aplicación debe fijar su propia dirección IP y puerto, así como el mapa de memoria requerido para el intercambio de datos. Además, es importante verificar la escala de todas las variables del sistema para garantizar un funcionamiento correcto.

La visualización de la respuesta de la planta virtual es un aspecto clave. De hecho, un tema de la ingeniería de control es el ajuste empírico de los controladores PID en función de los parámetros de respuesta en el dominio del tiempo. Las técnicas de ajuste de PID de bucle abierto y de bucle cerrado, así como los métodos de oscilación sostenida o “relay-feedback”, son ampliamente aceptadas y siguen utilizándose debido a su simplicidad. El ajuste de los controladores PID con estas técnicas se basa en una representación precisa de la respuesta de la planta. Por lo tanto, se requiere una herramienta de adquisición y visualización de datos.

Node-RED tiene un subconjunto de nodos node-red-dashboard para trazar datos en tiempo real. Además de gráficos circulares, gráficos de líneas e indicadores, este subconjunto también tiene elementos de interfaz de usuario como botones, con-

troles deslizantes, entradas de texto, etc. Combinando estos nodos con las funciones de control y comunicación, se puede implementar una interfaz gráfica de usuario completa (GUI) junto con un conjunto de análisis y control, como la mostrada en la figura 12, en la que se grafica tanto la acción de control, el error y el setpoint, después de diseñar y aplicar un regulador PID ajustado mediante el método de “relay-feedback” en cadena cerrada.

## 6 Conclusiones y trabajos futuros

Este trabajo presenta una solución para impartir prácticas de laboratorio online, como alternativa a las clases presenciales con una planta de laboratorio real. Además, aprovechando la tecnología de la información (TI) y las herramientas de software modernas, los estudiantes pueden simplemente diseñar su propia planta de laboratorio virtual y realista, trabajar individualmente y compartir los resultados con sus compañeros y profesores.

Todo ello permite que los estudiantes pongan en práctica sus conocimientos teóricos aumentando de forma significativa el número de horas que pueden dedicar a la parte práctica de las asignaturas en un entorno virtual muy similar a uno industrial, facilitando de este modo el enfrentarse posteriormente a las plantas industriales reales.

Por otro lado, también sirve como solución a la problemática derivada de la situación de restricción de capacidades como consecuencia del COVID-19, lo que limita de forma significativa el número de puestos disponibles para realización de prácticas, así como posibilita una ampliación de los horarios, de forma no presencial, en el que los alumnos pueden realizar tanto sus prácticas como sus trabajos sobre procesos industriales simulados pero muy realistas.

El sistema virtual, no solo permite una interacción en tiempo real de forma visual, sino que también dispone de sonido en tiempo real, de forma que la experiencia es todavía más inmersiva.

Dada la similitud entre el sistema virtual con el caso real mostrado en el apartado de solución implementada, se puede concluir que esta propuesta se presenta como un método interesante para evitar un cambio mayor en la programación de las prácticas de laboratorio como consecuencia de la pandemia COVID-19.

Después de validar la solución propuesta, podemos concluir que se han obtenido muy buenos resulta-

dos. Además, se ha logrado una gran aceptación por parte de estudiantes y profesores.

Desde el punto de vista de los estudiantes cabe destacar una mayor implicación por su parte al disponer de una mayor flexibilidad de horarios

Desde el punto de vista de los docentes, lo más destacable es la flexibilidad del escenarios que se pueden plantear, pudiendo configurar desde sistema industriales sencillos, hasta otros más complejos con múltiples variables de control y medida.

Como trabajos futuros, la virtualización de otras plantas de laboratorio y sistemas como lazos de control de temperatura, podrían ayudar a mitigar el impacto de la pandemia en la modalidad presencial. Además, los estudiantes también se benefician al aprender otras herramientas de software de gran utilidad.

## English summary

### VIRTUAL IMPLEMENTATION OF PRACTICES OF CONTROL SUBJECTS AS AN ALTERNATIVE TO FACE-TO-FACE LABORATORY PRACTICES

#### Abstract

*The coronavirus disease (COVID-19) has caused a serious health crisis with unprecedented socio-economic consequences. Since the declaration of a pandemic by the World Health Organization, most governments have applied control policies such as confinement, restriction of mobility, social distancing, etc. In this context, adapting educational planning to this scenario poses a great challenge for the global educational community. In addition, given that the face-to-face laboratory practices in higher education were temporarily canceled, the creation of realistic virtual scenarios using modern software applications represents an interesting and necessary alternative. This practical approach can be achieved by using two interesting software tools, such as Node-RED and Factory I / O. In this work, the implementation of a virtual laboratory plant is proposed using*

*the tools mentioned above, with characteristics very similar to the real laboratory plants of the Faculty of Engineering of the University of A Coruña.*

**Keywords:** Virtual laboratory, control practices and teaching in control systems.

## Referencias

- [1] Aláiz-Moretón, H., Castejón-Limas, M., Casteleiro-Roca, J.L., Jove, E., Fernández Robles, L., Calvo-Rolle, J.L.: A fault detection system for a geothermal heat exchanger sensor based on intelligent techniques. *Sensors* **19**(12), 2740 (2019)
- [2] Alaiz-Moretón, H., Jove, E., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., López García, H., Benítez-Andrades, J.A., Novais, P., Calvo-Rolle, J.L.: Bioinspired hybrid model to predict the hydrogen inlet fuel cell flow change of an energy storage system. *Processes* **7**(11), 825 (2019)
- [3] Basurto, N., Arroyo, Á., Vega, R., Quintián, H., Calvo-Rolle, J.L., Herrero, Á.: A hybrid intelligent system to forecast solar energy production. *Computers & Electrical Engineering* **78**, 373–387 (2019)
- [4] Calvo-Rolle, J.L.: Data collection description for evaluation and analysis of engineering students academic performance. In: *The 11th International Conference on European Transnational Educational (ICEUTE 2020)*. vol. 1266, p. 317. Springer Nature (2020)
- [5] Calvo-Rolle, J.L., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., del Carmen Meizoso-Lopez, M.: A hybrid intelligent system for pid controller using in a steel rolling process. *Expert Systems with Applications* **40**(13), 5188–5196 (2013)
- [6] Casteleiro-Roca, J.L., Barragán, A.J., Segura, F., Calvo-Rolle, J.L., Andújar, J.M.: Fuel cell output current prediction with a hybrid intelligent system. *Complexity* **2019** (2019)
- [7] Casteleiro-Roca, J.L., García-Ordás, M.T., Jove, E., Zayas-Gato, F., Quintián, H., Alaiz-Moretón, H., Calvo-Rolle, J.L.: A solar thermal system temperature prediction of a smart building for data recovery and security purposes. In: *International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning*. pp. 468–476. Springer (2020)

- [8] Casteleiro-Roca, J.L., Gómez-González, J.F., Calvo-Rolle, J.L., Jove, E., Quintián, H., Martín, J.F.A., Perez, S.G., Diaz, B.G., Calero-Garcia, F., Méndez-Perez, J.A.: Prediction of the energy demand of a hotel using an artificial intelligence-based model. In: International conference on hybrid artificial intelligence systems. pp. 586–596. Springer (2018)
- [9] Casteleiro-Roca, J.L., Javier Barragan, A., Segura, F., Luis Calvo-Rolle, J., Manuel Andujar, J.: Intelligent hybrid system for the prediction of the voltage-current characteristic curve of a hydrogen-based fuel cell. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* **16**(4), 492–501 (2019)
- [10] Crespo-Turrado, C., Casteleiro-Roca, J.L., Sánchez-Lasheras, F., López-Vázquez, J.A., De Cos Juez, F.J., Pérez Castelo, F.J., Calvo-Rolle, J.L., Corchado, E.: Comparative study of imputation algorithms applied to the prediction of student performance. *Logic Journal of the IGPL* **28**(1), 58–70 (2020)
- [11] Daniel, J.: Education and the covid-19 pandemic. *Prospects* **49**(1), 91–96 (2020)
- [12] Fernández-Serantes, L.A., Vázquez, R.E., Casteleiro-Roca, J.L., Calvo-Rolle, J.L., Corchado, E.: Hybrid intelligent model to predict the soc of a lfp power cell type. In: International conference on hybrid artificial intelligence systems. pp. 561–572. Springer (2014)
- [13] Gonzalez-Cava, J.M., Arnay, R., Pérez, J.A.M., León, A., Martín, M., Jove-Perez, E., Calvo-Rolle, J.L., Casteleiro-Roca, J.L., de Cos Juez, F.J.: A machine learning based system for analgesic drug delivery. In: International Joint Conference SOCO'17-CISIS'17-ICEUTE'17 León, Spain, September 6–8, 2017, Proceeding. pp. 461–470. Springer (2017)
- [14] Gonzalez-Cava, J.M., Reboso, J.A., Casteleiro-Roca, J.L., Calvo-Rolle, J.L., Méndez Pérez, J.A.: A novel fuzzy algorithm to introduce new variables in the drug supply decision-making process in medicine. *Complexity* **2018** (2018)
- [15] Jena, P.K.: Impact of covid-19 on higher education in india. *International Journal of Advanced Education and Research (IJAER)* **5** (2020)
- [16] Jove, E., Casteleiro-Roca, J., Quintián, H., Méndez-Pérez, J., Calvo-Rolle, J.: Anomaly detection based on intelligent techniques over a bicomponent production plant used on wind generator blades manufacturing. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* **17**(1), 84–93 (2020)
- [17] Jove, E., Aláiz-Moretón, H., Casteleiro-Roca, J.L., Corchado, E., Calvo-Rolle, J.L.: Modeling of bicomponent mixing system used in the manufacture of wind generator blades. In: International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning. pp. 275–285. Springer (2014)
- [18] Jove, E., Aláiz-Moretón, H., García-Rodríguez, I., Benavides-Cuellar, C., Casteleiro-Roca, J.L., Calvo-Rolle, J.L.: Pid-its: an intelligent tutoring system for pid tuning learning process. In: International Joint Conference SOCO'17-CISIS'17-ICEUTE'17 León, Spain, September 6–8, 2017, Proceeding. pp. 726–735. Springer (2017)
- [19] Jove, E., Blanco-Rodríguez, P., Casteleiro-Roca, J.L., Moreno-Arboleda, J., López-Vázquez, J.A., de Cos Juez, F.J., Calvo-Rolle, J.L.: Attempts prediction by missing data imputation in engineering degree. In: International Joint Conference SOCO'17-CISIS'17-ICEUTE'17 León, Spain, September 6–8, 2017, Proceeding. pp. 167–176. Springer (2017)
- [20] Jove, E., Blanco-Rodríguez, P., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., Moreno Arboleda, F.J., López-Vázquez, J.A., Rodríguez-Gómez, B.A., Meizoso-López, M.D.C., Piñón-Pazos, A., De Cos Juez, F.J., et al.: Missing data imputation over academic records of electrical engineering students. *Logic Journal of the IGPL* **28**(4), 487–501 (2020)
- [21] Jove, E., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., Méndez-Pérez, J.A., Calvo-Rolle, J.L.: A new approach for system malfunctioning over an industrial system control loop based on unsupervised techniques. In: The 13th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications. pp. 415–425. Springer (2018)
- [22] Jove, E., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., Méndez-Pérez, J.A., Calvo-Rolle, J.L.: Outlier generation and anomaly detection based on intelligent one-class techniques over a bicomponent mixing system. In: International Workshop on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications. pp. 399–410. Springer (2019)

- [23] Jove, E., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., Méndez-Pérez, J.A., Calvo-Rolle, J.L.: Virtual sensor for fault detection, isolation and data recovery for bicomponent mixing machine monitoring. *Informatica* **30**(4), 671–687 (2019)
- [24] Jove, E., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., Méndez-Pérez, J.A., Calvo-Rolle, J.L.: A new method for anomaly detection based on non-convex boundaries with random two-dimensional projections. *Information Fusion* **65**, 50–57 (2021)
- [25] Jove, E., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., Simić, D., Méndez-Pérez, J.A., Luis Calvo-Rolle, J.: Anomaly detection based on one-class intelligent techniques over a control level plant. *Logic Journal of the IGPL* **28**(4), 502–518 (2020)
- [26] Jove, E., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., Zayas-Gato, F., Casado-Vara, R., Baruque, B., Méndez-Pérez, J.A., Calvo-Rolle, J.L.: A hybrid one-class topology for non-convex sets. In: *International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems*. pp. 341–349. Springer (2020)
- [27] Jove, E., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., Zayas-Gato, F., Novais, P., Méndez-Pérez, J.A., Calvo-Rolle, J.L.: A comparative study to detect flowmeter deviations using one-class classifiers. In: *Computational Intelligence in Security for Information Systems Conference*. pp. 66–75. Springer (2019)
- [28] Jove, E., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., Zayas-Gato, F., Vercelli, G., Calvo-Rolle, J.L.: A one-class classifier based on a hybrid topology to detect faults in power cells. *Logic Journal of the IGPL* (2021)
- [29] Jove, E., Gonzalez-Cava, J.M., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., Méndez-Pérez, J.A., Calvo-Rolle, J.L.: Anomaly detection on patients undergoing general anesthesia. In: *International Joint Conference: 12th International Conference on Computational Intelligence in Security for Information Systems (CISIS 2019) and 10th International Conference on European Transnational Education (ICEUTE 2019)*. pp. 141–152. Springer (2019)
- [30] Jove, E., Gonzalez-Cava, J.M., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., Méndez Pérez, J.A., Vega Vega, R., Zayas-Gato, F., de Cos Juez, F.J., León, A., Martín, M., et al.: Hybrid intelligent model to predict the remifentanyl infusion rate in patients under general anesthesia. *Logic Journal of the IGPL* **29**(2), 193–206 (2021)
- [31] Jove, E., Vázquez, J.A.L., Fernández-Ibáñez, I., Casteleiro-Roca, J.L., Rolle, J.L.C.: Hybrid intelligent system to predict the individual academic performance of engineering students. *The International journal of engineering education* **34**(3), 895–904 (2018)
- [32] Laal, M., Laal, M.: Collaborative learning: what is it? *Procedia-Social and Behavioral Sciences* **31**, 491–495 (2012)
- [33] Leira, A., Jove, E., Gonzalez-Cava, J.M., Casteleiro-Roca, J.L., Quintián, H., Zayas-Gato, F., Álvarez, S.T., Simić, S., Méndez-Pérez, J.A., Luis Calvo-Rolle, J.: One-class-based intelligent classifier for detecting anomalous situations during the anesthetic process. *Logic Journal of the IGPL* (2020)
- [34] Luis Casteleiro-Roca, J., Quintián, H., Luis Calvo-Rolle, J., Méndez-Pérez, J.A., Javier Perez-Castelo, F., Corchado, E.: Lithium iron phosphate power cell fault detection system based on hybrid intelligent system. *Logic Journal of the IGPL* **28**(1), 71–82 (2020)
- [35] Marinoni, G., Van't Land, H., Jensen, T.: The impact of covid-19 on higher education around the world. *IAU Global Survey Report* (2020)
- [36] Martinez-Álvarez, F., Troncoso, A., Quintián, H., Corchado, E.: A data structure to speed-up machine learning algorithms on massive datasets francisco. In: *International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems*. vol. 9648, pp. 365–376. Springer, Cham, (2016)
- [37] Nicola, M., Alsafi, Z., Sohrabi, C., Kerwan, A., Al-Jabir, A., Iosifidis, C., Agha, M., Agha, R.: The socio-economic implications of the coronavirus and covid-19 pandemic: a review. *International journal of surgery* (2020)
- [38] Pérez-López, E., Atochero, A.V., Rivero, S.C.: Educación a distancia en tiempos de covid-19: Análisis desde la perspectiva de los estudiantes universitarios. *Revista Iberoamericana de Educación a Distancia* **24**(1), 331–350 (2021)
- [39] Quintián, H., Casteleiro-Roca, J.L., Perez-Castelo, F.J., Calvo-Rolle, J.L., Corchado, E.: Hybrid intelligent model for fault detection of a lithium iron phosphate power

- cell used in electric vehicles. In: International conference on hybrid artificial intelligence systems. pp. 751–762. Springer (2016)
- [40] Quintián, H., Rolle, J.L.C., Romero, Ó.F.: Aplicación de un robot comercial de bajo coste en tareas de seguimiento de objetos. DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín **79**(175), 24–33 (2012)
- [41] Ray, S., Srivastava, S.: Virtualization of science education: a lesson from the covid-19 pandemic. Journal of proteins and proteomics **11**, 77–80 (2020)
- [42] Vasiliadou, R.: Virtual laboratories during coronavirus (covid-19) pandemic. Biochemistry and Molecular Biology Education **48**(5), 482–483 (2020)
- [43] Vega Vega, R., Quintián, H., Calvo-Rolle, J.L., Herrero, Á., Corchado, E.: Gaining deep knowledge of android malware families through dimensionality reduction techniques. Logic Journal of the IGPL **27**(2), 160–176 (2019)
- [44] Vega Vega, R., Quintián, H., Cambra, C., Basurto, N., Herrero, Á., Calvo-Rolle, J.L.: Delving into android malware families with a novel neural projection method. Complexity **2019** (2019)
- [45] Vega Vega, R.A., Chamoso-Santos, P., González Briones, A., Casteleiro-Roca, J.L., Jove, E., Meizoso-López, M.d.C., Rodríguez-Gómez, B.A., Quintián, H., Herrero, Á., Matsui, K., et al.: Intrusion detection with unsupervised techniques for network management protocols over smart grids. Applied Sciences **10**(7), 2276 (2020)
- [46] Zayas-Gato, F., Quintián, H., Jove, E., Casteleiro-Roca, J.L., Calvo-Rolle, J.L.: Diseño de controladores PID. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións (2020)
- [47] Zayas-Gato, F., Simic, D., Calvo-Rolle, J.L.: Hybrid approximate convex hull one-class classifier for an industrial plant. In: 13th International Conference on Computational Intelligence in Security for Information Systems (CISIS 2020). vol. 1267, p. 282. Springer Nature (2020)



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible open  
access publication under the  
terms and conditions of the  
Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0  
license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa>)

# Evaluación automática de código para prácticas de modelado y control utilizando Matlab Grader

Yadira Boada<sup>a,b</sup>, Lissette Boada Acosta<sup>c</sup>, Alejandro Vignoni<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universitat Politècnica de València, Camí de Vera S/N, 46022, Valencia, España.

<sup>b</sup> Centro Universitario EDEM, Escuela de Empresarios

La Marina de València, Muelle de la Aduana s/n, 46024, Valencia, España.

<sup>c</sup> Centros Médicos Especializados Cruz Roja Ecuatoriana

Papallacta Oe 1 -66 entre Avenida 10 de Agosto y Prensa, Quito, Ecuador

## Resumen

*La calificación automática de código y prácticas informáticas ofrece varias ventajas prácticas y pedagógicas beneficiosas y en la actualidad es posible mediante una variedad de técnicas. Recientemente, MathWorks ha introducido una solución nativa para el código de MATLAB: MATLAB Grader. Esta interfaz basada en la web facilita el envío de tareas y la calificación automática basada en criterios preprogramados. Las asignaturas de Control Automático (DISA-ETSID-UPV) y Tecnologías Automáticas (CU-EDEM), se han utilizado como prueba en donde la calificación en clase de alguno de los laboratorios informáticos basados en MATLAB se ha sustituido por tareas calificadas automáticamente, principalmente utilizando la plataforma MATLAB Grader.*

**Palabras clave:** calificación automática, prácticas informáticas, matlab grader, innovación docente.

## 1 INTRODUCCIÓN

La calificación automatizada de las tareas de programación en un entorno de educación superior es ya algo habitual, y se ha detallado ampliamente en la literatura [1, 5, 9] - el primer uso documentado hace unos 60 años[3]. Aunque existen herramientas similares para una amplia gama de aplicaciones (por ejemplo, para tareas de Matemáticas, circuitos eléctricos, informática, etc. [2, 10, 7, 4], las tareas de programación se prestan a la calificación automática inherentemente bien - particularmente en entornos donde se fomenta la modularidad del código y/o el desarrollo impulsado por pruebas. En este documento discutimos nuestras experiencias durante el último año implementando herramientas para la calificación automática de tareas de programación basadas en MATLAB en las asignaturas de Control Automático, del Grado en Ingeniería Aeroespacial, Escuela Técnica Superior del Diseño, en la Universidad Politécnica de Valencia y de Tecnologías de Automatización, del Grado de Ingeniería y Gestión Empresarial, Centro Universitario EDEM.

La calificación automática ofrece una serie de posibles beneficios prácticos y pedagógicos [1, 4] en comparación con el enfoque tradicional en el laboratorio o enviar y devolver:

- Un coste operativo reducido, que permite reasignar recursos y presupuesto para seguir apoyar otras actividades docentes.
- Una menor carga cognitiva para el personal, que se ve liberado de la inherentemente onerosa tarea de corregir el código informático.
- Calificación y retroalimentación consistentes y preprogramadas en cohortes independientemente de la cantidad de alumnos.
- Mayor accesibilidad a las evaluaciones, ya que los estudiantes pueden completarlas cuando les resulte conveniente y recibir la información en función de otros compromisos laborales o vitales.
- La posibilidad de recibir información instantánea sobre los envíos.
- Posibilidad de realizar múltiples envíos de mejora continua.
- Incentivación de soluciones de programación modulares o basadas en pruebas: habilidades valoradas por la industria.

Además de estos beneficios potenciales, la crisis de COVID-19 y la reducción de la interacción presencial entre los docentes y los alumnos asociada a ésta ha hecho que la demanda de soluciones de corrección automatizada siga aumentando. Hay algunas áreas potenciales de preocupación con cualquier enfoque de la calificación automatizada:

- El diseño de las preguntas/tareas para que sean compatibles con un esquema de calificación automatizado puede ser demasiado prescriptivo y limitar la creatividad en la solución.



- Los programas de calificación automática son sensibles a los errores u omisiones, se requiere una determinada supervisión humana para garantizar la calidad de las soluciones.
- La gran inversión de tiempo por adelantado necesaria para desarrollar/implementar un esquema de este tipo.
- La retroalimentación automática puede eliminar parte del aprendizaje asociado al enfoque tradicional en el laboratorio, en el que una conversación con el alumno sobre su solución permite obtener una comprensión más profunda.
- Algunas formas de plagio pueden ser más difíciles de detectar.

Anteriormente y en otras asignaturas similares se utilizaban tanto metodologías de calificación de envío y devolución de tareas de MATLAB como así también de evaluación de las practicas en el laboratorio. Impulsados principalmente por la sustitución de los laboratorios presenciales por laboratorios online en el contexto de las clases online, y la necesidad de proporcionar una retroalimentación oportuna y consistente a los estudiantes, en las asignaturas mencionadas se ha implementado la calificación automática de las tareas de laboratorio principalmente utilizando la plataforma MATLAB Grader. MATLAB Grader es la solución nativa de MathWorks para la calificación automática del código MATLAB. En este documento se discuten nuestras experiencias en el desarrollo de tareas utilizando MATLAB Grader, la implementación de este paquete, las percepciones de los estudiantes y el personal docente en torno a esta herramienta y las limitaciones actuales junto con ideas de mejora.

## 2 MATLAB Grader

MATLAB Grader es una interfaz basada en el navegador para el diseño, distribución, envío, calificación y análisis. Mientras que una biblioteca de problemas de ejemplo basados en la programación está disponible para su despliegue/adaptación, en la asignatura en cuestión se utilizó principalmente el servicio para diseñar evaluaciones personalizadas centradas en la modelización matemática de sistemas físicos utilizando función de transferencia.

Utilizamos la versión “gratuita” de MATLAB Grader 2020. Esta versión emplea una estructura por niveles: Curso, Tarea, Problema y Prueba. Dentro de un Curso, las asignaciones tienen fechas de publicación y vencimiento, ponderaciones, y

cada una puede albergar varios problemas. Un problema en este contexto implica escribir un script de MATLAB o una función de MATLAB en respuesta a un informe proporcionado. Estas instrucciones se especifican a través de un campo de texto enriquecido, en el que imágenes y ecuaciones LaTeX.

Cada problema puede tener varias pruebas (unitarias). Esto permite un enfoque de andamiaje en el diseño del problema y que se otorguen notas parciales si es necesario. Las pruebas unitarias pueden:

- Comparar la igualdad de las variables del alumno elemento por elemento con una solución de referencia.
- Comprobar la igualdad/desigualdad de las variables del alumno con un valor dentro de una banda de tolerancia.
- Comprobar la existencia o ausencia de variables o el uso de funciones intrínsecas específicas.
- Realizar una evaluación más complicada utilizando el código de MATLAB.

MATLAB Grader permite proporcionar una retroalimentación preprogramada para cada prueba de unidad, y el número de intentos permitidos. Cuando se limita el número de intentos, también se pueden implementar pre-pruebas no calificadas para proporcionar algún nivel de orientación/retroalimentación antes de la presentación y la evaluación. MATLAB Grader funciona a través de un navegador web y no requiere que se instale una copia local del software de MATLAB, aunque proporciona un mecanismo para descargar las pruebas previas como un archivo ejecutable de MATLAB fuera de línea que oculta la solución pero sigue proporcionando de la solución, pero que proporciona información a los estudiantes que prefieren trabajar sin conexión. La aplicación de esta herramienta a la enseñanza de la programación de MATLAB y de la ingeniería ya se ha discutido en la literatura.

Por ejemplo, MATLAB Grader (conocido entonces como ‘Cody Coursework’) se discutió ampliamente en [8], donde se utilizó para un subconjunto de las evaluaciones en un curso de curso de modelado y control de sistemas. Nuestras observaciones y experiencias coinciden en gran medida con las presentadas en el trabajo. Algunos de los puntos débiles específicos de Grader mencionados (por ejemplo errores específicos del envío de código) han sido rectificados por MathWorks, mientras que otros (por ejemplo, la detección de plagio) son características aún no implementadas.

The screenshot shows the MATLAB Grader interface. On the left, there's a sidebar with 'CONTENTS' and 'Close' buttons. Below it, the course 'PFT\_GRA\_11887\_2020-Control Automático (PL-2\_832)' is listed. The main area displays the title 'Linearization of the TRMS model using symbolic math and transfer function calculation' and a description: 'Consider the following simplified model of the TRMS:'. Below the text is a diagram of a mechanical system with three masses (m1, m2, m3) and various forces and displacements (Fp, r1, r2, r3, Tp, Ref, α). The diagram shows mass m1 at the top with force Fp and displacement r1. Mass m2 is below it with displacement r2. Mass m3 is at the bottom with displacement r3. A reference line 'Ref' is shown, and an angle α is indicated between a vertical line and the line connecting m1 and m2. The text below the diagram states: 'The parameters have been defined in the solution template for you as the variables, along with the variables of the system and the Laplace variable s. We want to obtain the Transfer function of the system for the'.

Figura 1: Presentación del problema en MATLAB Grader

En [11] utilizaron principalmente MATLAB Grader como una herramienta de revisión/estudio para los ejercicios formativos en clase. Los ítems de evaluación todavía se marcaban "a mano", y una combinación de Grader y scripts de "comprobación" personalizados estaban disponibles como recursos adicionales. En particular, descubrieron que la mayoría de los estudiantes utilizaban estas herramientas opcionales para validar sus respuestas a pesar de tener que modificar su código para cumplir con las restricciones necesarias para la "calificación" automática.

MATLAB Grader también se utilizó para los elementos evaluables en [6] para calificar las tareas basadas en MATLAB relativas a las vibraciones. Esta herramienta fue seleccionada debido al limitado tiempo disponible para proporcionar retroalimentación y un nivel variable de habilidad de programación en la clase. En las observaciones finales, el autor señaló que la plataforma era fácil de usar y una herramienta de enseñanza eficaz, aunque subrayó que debe prestarse una atención especial a la elaboración del enunciado del problema y de las pruebas de la unidad, una evaluación que también se puede realizar en el caso de los estudiantes. de los problemas y las pruebas de la unidad, una apreciación que también coincide con nuestra experiencia.

### 3 CASO DE ESTUDIO

En las asignaturas Control Automático y Tecnología de Automatización se utilizó MATLAB Grader para una de las evaluaciones de prácticas de laboratorio en 2020. El principal obstáculo

para una transición completa a MATLAB Grader fue y sigue siendo la falta de integración interactiva de Simulink. En esta sección, describimos nuestra experiencia con las asignaciones basadas en Grader a través de un estudio de caso de la asignatura Control Automático. Esta tarea de laboratorio implicaba el modelado matemático y la simulación de sistemas mecánicos simples. Un componente de pre-laboratorio enseñaba las habilidades necesarias junto con la metodología para plantear el modelado de sistemas mecánicos y consistía en un script de MATLAB en vivo (archivo .mlx) de demostración interactiva y un vídeo de 30 minutos de duración. Después de trabajar en el pre-laboratorio (no calificado), los estudiantes completaron una evaluación relacionada usando MATLAB Grader.

The screenshot shows the MATLAB Grader interface with the student's code. The code is a MATLAB script that defines the transfer function of the system. It starts with 'eq\_laplace=' and then defines the transfer function 'TF' using symbolic variables. The code includes comments explaining the steps: 'Solve for the output (a)', 'Collect the terms with the variable V, and divide by the input (V)', 'Minimal realization of the transfer function (to compare with the one calculate by hand)', and 'Plotting code below:'. The code ends with 'Run Script' button.

Figura 2: Vista del Alumno. Aquí el alumno debe ingresar su código y puede ejecutar el script para ver el resultado.

La evaluación del Laboratorio consistía en un

problema (Figura 1) que evaluaba los resultados de aprendizaje fundamentales: Modelado de un sistema mecánico utilizando el Symbolic Toolbox, cálculo del punto de equilibrio, linealización y obtención de la función de transferencia. Para problema, se permitió solo un intento y, aproximadamente el 50% de los estudiantes hicieron la entrega y obtuvieron la máxima puntuación. Las pruebas dentro del problema incluían cuatro pruebas no evaluadas (pretest) y tres evaluadas. Los estudiantes podían trabajar en una parte del problema, ejecutar el código correspondiente (Figura 2) asegurarse de que su código superaba la(s) prueba(s) no evaluadas necesaria(s) antes de continuar (Figura 3).

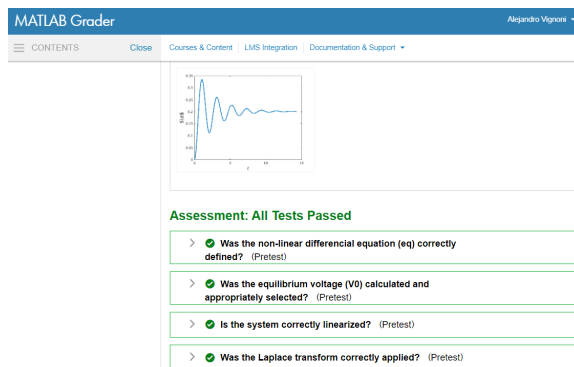


Figura 3: Pruebas no evaluadas. El alumno puede saber si su código cumple con las pruebas no evaluadas propuestas por el profesor antes de hacer la entrega definitiva.

En cada prueba se codificaron comentarios sobre los errores más comunes y se mostraron cuando la prueba fallaba. Esta retroalimentación era adicional a la salida por defecto de MATLAB y mensajes de retroalimentación/error de MATLAB Grader. En la Figura 3 se muestra una vista de las pruebas aprobadas/no aprobadas, mientras que en la Figura 4 se ve la ventana del docente, donde hay que ingresar la retroalimentación correspondiente en caso de que el alumno responda incorrectamente.

MATLAB Grader ofrece un conjunto de herramientas para el análisis básico de las soluciones de los alumnos. Encontramos la vista de 'Resumen de estado' de cuántos estudiantes habían empezado y completado la tarea como un valioso recordatorio durante las clases programadas, y el mapa de soluciones (Figura 5) donde se pueden ver todas las soluciones entregadas por los alumnos en un mapa de tamaño y orden de entrega. Además se puede ver también las soluciones de manera individual como se ve en la Figura 6. También se puede ver toda la estadística de un curso con muchas tareas, con los desgloses específicos del

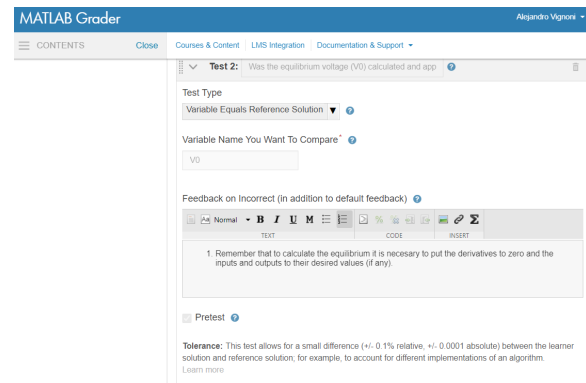


Figura 4: Vista del docente, evaluación (retroalimentación al alumno cuando su respuesta es incorrecta).

problema y de las pruebas son útiles para identificar los "puntos más confusos" y las pruebas potencialmente mal planteadas, o pruebas insuficientemente granulares.

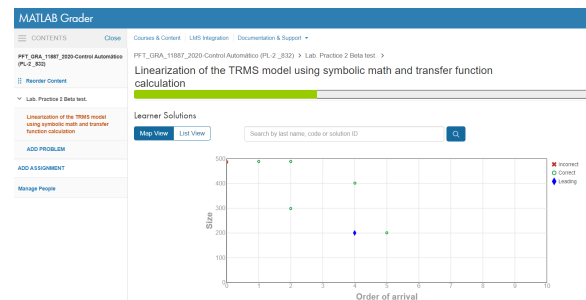


Figura 5: Vista de Mapa de Soluciones. Cada solución presentada por un alumno se representa por un punto en el mapa.

### 3.1 Comentarios/resultados/experiencias

La respuesta de los estudiantes a MATLAB Grader ha sido generalmente positiva, aunque todavía no hemos realizado encuestas a gran escala. Los estudiantes comunicaron su apreciación por la naturaleza de las tareas para llevar a casa y la retroalimentación instantánea/consistente. También apreciaron que la interfaz estuviera basada en la web y no requiriera una instalación local de MATLAB o un ordenador con una potencia de procesamiento significativa. Sin embargo, los estudiantes señalaron varios problemas con la plataforma/implementación, por ejemplo:

- El tiempo de respuesta: en algunos casos (especialmente para problemas complicados) el tiempo para evaluar un problema podía acercarse o superar el minuto. Esto era especialmente complicado para problemas en los que

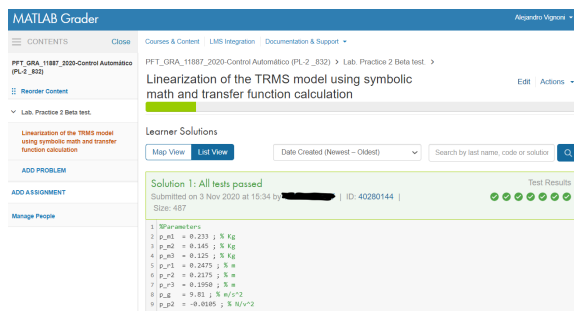


Figura 6: Vista de Solución individual. Ejemplo de una solución presentada por un alumno, su código y su respectiva evaluación.

la iteración/ajuste/prueba y error era fundamental para el proceso.

- Errores del sistema: el sistema MATLAB Grader parece en general robusto, pero no infalible. Por ejemplo, en algunos casos el problema consistía en que se "bloqueaba" el cuadro de texto de entrada y se requería un cierre de sesión para poder resolver el problema. Anecdóticamente, estos problemas parecen haber sido más comunes en nuestra primera implementación de asignaciones basadas en MATLAB Grader (cuando el producto era razonablemente nuevo) ya que la estabilidad/robustez parecen haber mejorado con el tiempo.
- Un fallo por nuestra parte a la hora de explicar que prácticas comunes de codificación de MATLAB (por ejemplo borrar la ventana de comandos usando el `clc` o la memoria usando `clear` en la parte superior de un script) causaban errores en el código de evaluación en MATLAB Grader y darían lugar a mensajes de error poco útiles o poco claros.
- Errores con nuestra implementación - como con cualquier corrección y evaluación automatizada, los errores en nuestras pruebas unitarias o nuestra incapacidad de imaginar otros mecanismos potenciales para resolver el problema, condujeron a la frustración de los alumnos. Afortunadamente, la interfaz de MATLAB Grader permite modificar las pruebas y la recalificación de la cohorte "sobre la marcha" sean razonablemente rápidas y sencillas.

Durante esta prueba se utilizó la versión "gratuita" de Grader, requiriendo que los estudiantes se registraran para obtener una cuenta de MathWorks e "inscribirse" en MATLAB Grader en la primera semana del semestre.

La evaluación se realizó a través de la interfaz web y las calificaciones se exportaron a una hoja de cálculo y se cargaron manualmente en PoliformaT-UPV periódicamente a lo largo del semestre. Estas limitaciones no se consideraron una carga sustancial, además los alumnos manifestaron que no les importaba registrarse en una cuenta o que las calificaciones no fueran visibles inmediatamente en PoliformaT, ya que poder ver su nota en la plataforma MATLAB Grader era suficiente. Además, el personal desarrolló un código para reformatear la salida de Excel de MATLAB Grader a un formato que pudiera subirse a PoliformaT (la plataforma basada en Sakai utilizada en la UPV) redujo el trabajo que suponía transferir manualmente las notas. EN el futuro se prevee utilizar la versión "premium" de MATLAB Grader que se incluye ahora con la MathWorks Campus-Wide, que viene con la integración del Sistema de Gestión de Aprendizaje (LMS)(por ejemplo, PoliformaT, Moodle, Blackboard, Canvas, etc.). El acceso a través del LMS no requeriría una cuenta de MathWorks y se ejecutaría completamente a través de PoliformaT. Las fechas de vencimiento y la ponderación de las tareas también se establecen en PoliformaT y las calificaciones se actualizan automáticamente en el libro de notas.

Tanto en la versión "gratuita" como en la "premium", la principal limitación que encontramos en MATLAB Grader era una integración incompleta/insuficiente de Simulink. Simulink es el producto de MATLAB para la simulación de sistemas físicos mediante diagramas de bloques. Actualmente, MATLAB Grader sólo permite un archivo Simulink proporcionado por el instructor para ser llamado de forma no interactiva a través de la línea de comandos.

## 4 CONCLUSIONES

MATLAB Grader ha demostrado ser una herramienta útil para lograr los resultados señalados al principio de este trabajo. Se ha conseguido una reducción sustancial de los costes de corrección. En general, el personal se siente más feliz enseñando que corrigiendo, y aunque se requirió una importante inversión inicial para desarrollar las tareas de las asignaciones, se ha recuperado en gran medida en una iteración del curso. Hasta este punto, el desarrollo de las tareas basadas en MATLAB Grader fue en general más fácil y más rápido. La interfaz para escribir problemas es sencilla, basada en el navegador/GUI y no requiere un conocimiento profundo del marco de pruebas unitarias o del backend de MATLAB un usuario inexperto podría "escribir" evaluaciones para comparar las soluciones de los alumnos con un resul-

tado de referencia en un par de *clicks*.

La funcionalidad de evaluación se limita a las calificaciones de igualdad/tolerancia y la integración interactiva de Simulink aún no se ha implementado. También se ha logrado una retroalimentación y calificación consistente e instantánea entre los estudiantes de las asignaturas en cuestión. También se ha conseguido que las tareas de laboratorio basadas en MATLAB Grader reciban comentarios y calificaciones para cada uno de los estudiantes. Los alumnos y alumnas apreciaron la retroalimentación inmediata, y la autonomía proporcionada por la plataforma MATLAB Grader, aunque entendían que sólo estaba disponible la retroalimentación posterior a la evaluación utilizando la de las pruebas unitarias o de las pruebas no evaluadas. Otro beneficio importante de la plataforma Grader fue la posibilidad de que los estudiantes enviaran múltiples soluciones, continuamente mejoradas, sin intervención del/los profesores - un paso hacia la independencia en el aprendizaje.

MATLAB Grader ha fomentado e incentivado, al menos, una comprensión/apreciación rudimentaria de la modularidad del código y el desarrollo basado en pruebas, aunque estos no son los principales resultados de aprendizaje de nuestro curso. Si bien los problemas iniciales en torno a la fiabilidad/robustez/velocidad del MATLAB Grader de MATLAB creemos que la utilización de estas herramientas ha sido un esfuerzo que ha merecido la pena.

### Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por MINECO/AEI, EU DPI2017-82896-C2-1-R y MICINN/AEI, EU PID2020-117271RB-C21. Además los autores agradecen la ayuda de José Luís Navarro por su ayuda en los inicios de la utilización de MATLAB Grader.

### Referencias

- [1] Christopher Douce, David Livingstone, and James Orwell. Automatic test-based assessment of programming: A review. *Journal on Educational Resources in Computing (JERIC)*, 5(3):4–es, 2005.
- [2] Ronald H Heck. *Studying educational and social policy: Theoretical concepts and research methods*. Routledge, 2004.
- [3] Jack Hollingsworth. Automatic graders for programming classes. *Communications of the ACM*, 3(10):528–529, 1960.

- [4] Stephan Krusche and Andreas Seitz. Artemis: An automatic assessment management system for interactive learning. In *Proceedings of the 49th ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, pages 284–289, 2018.
- [5] Xiao Liu, Shuai Wang, Pei Wang, and Dinghao Wu. Automatic grading of programming assignments: an approach based on formal semantics. In *2019 IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering Education and Training (ICSE-SEET)*, pages 126–137. IEEE, 2019.
- [6] PE Natasha Smith. Integration of instructional technology tools including matlab grader to enhance learning in a hybrid vibrations course.
- [7] Sagar Parihar, Ziyaan Dadachanji, Praveen Kumar Singh, Rajdeep Das, Amey Karkare, and Arnab Bhattacharya. Automatic grading and feedback using program repair for introductory programming courses. In *Proceedings of the 2017 ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education*, pages 92–97, 2017.
- [8] Rebecca M Reck. Student and faculty reflections after using mathworks' Cody coursework in a control systems course. In *2018 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, pages 1–5. IEEE, 2018.
- [9] C Sánchez, D Muñoz de la Peña, and F Gómez-Estern. Generación automática de problemas de diseño de controladores para sistemas lineales autoevaluables con doctus. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 17(1):1–9, 2020.
- [10] CJ Sangwin. New opportunities for encouraging higher level mathematical learning by creative use of emerging computer aided assessment. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 34(6):813–829, 2003.
- [11] James E Toney and Adithya Jayakumar. Utilizing the full range of matlab capabilities in the classroom. 2019.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Rediseño de una plataforma de control de temperatura de bajo coste para la educación en ingeniería de control

Javier Rico-Azagra, Montserrat Gil-Martínez

{javier.rico, montse.gil}@unirioja.es

Grupo de Investigación en Ingeniería de Control, Universidad de La Rioja

## Resumen

*Se presenta el diseño y fabricación de una versión mejorada de la plataforma docente de bajo coste Temperature Control Laboratory (TCLab), para la instrucción y el auto-aprendizaje del control automático. Un menor coste de fabricación-adquisición, un menor tamaño y volumen, y las mejoras en el interface de conexión con el PC, facilitan el uso y la portabilidad del dispositivo. La mejora lograda en el comportamiento dinámico resulta especialmente útil en sistemas térmicos para acortar el tiempo de los experimentos. El nuevo desarrollo forma parte de un proyecto de innovación docente de la Universidad de La Rioja, y se distribuye de forma libre para que pueda ser fabricado y modificado por cualquier usuario.*

**Palabras clave:** Educación, Control de procesos, Bajo coste, Práctica de control.

## 1. Introducción

En la docencia relacionada con el control automático existe una brecha entre la teoría y la práctica [1], que dificulta la comprensión y asimilación de conceptos. Las asignaturas de esta rama del conocimiento estudian mediante formalismos matemáticos el comportamiento dinámico de diferentes sistemas físicos, independientemente de la tecnología concreta empleada en los mismos. Esta abstracción reporta indudables beneficios para los ingenieros de control, sin embargo, supone un problema en las etapas formativas del estudiante, advirtiéndose carencias para después trasladar los conceptos estudiados a un sistema real concreto.

Para paliar estos inconvenientes, tradicionalmente se han empleado maquetas, que representan procesos reales a escala de laboratorio. Sobre estos dispositivos se desarrollan prácticas que mejoran la asimilación de conocimientos y favorecen la adquisición de competencias [5, 12]. Sin embargo, las maquetas comerciales presentan un elevado coste económico, sobre todo en las soluciones *plug and play* [11]. Además, la crisis sanitaria actual ha puesto en evidencia la dependencia del laboratorio

en el que se encuentran instalados los equipos, generando numerosos problemas cuando la docencia debe impartirse de forma no presencial o cuando el aforo de los laboratorios debe reducirse.

Una alternativa es su incorporación en laboratorios remotos [14] o su sustitución por laboratorios virtuales [7, 2]. En este último caso, las estrategias del control se implementan sobre un *software* que representa fielmente el comportamiento del proceso, evitando muchos de los problemas citados. Sin embargo, esta solución dista mucho de ser ideal. La motivación del alumno disminuye, dado que sigue sin trasladar los conceptos estudiados a un sistema real. Además, un simulador impide adquirir competencias relacionadas con la adquisición y el procesamiento de señales, fundamentales en la profesión del ingeniero de control.

Por todos estos motivos, otra tendencia actual son las soluciones de bajo coste y tamaño reducido, que el estudiante pueda transportar y emplear en diferentes lugares [13, 4, 8]. Un ejemplo, es el dispositivo TCLab (Temperature Control Lab) [6]. Este persigue controlar temperaturas, enfocando el problema como simple-entrada simple salida (SISO) o como múltiple-entrada múltiple-salida (MIMO), utilizando un dispositivo de tamaño y coste reducidos (Figura 1), que ha dado lugar a un gran número de recursos docentes para la instrucción en control automático [9, 10, 3].

En este marco, el presente trabajo presenta un rediseño de la plataforma TCLab, adaptándola a las necesidades de las asignaturas impartidas en la Universidad de La Rioja y que posteriormente se pretende utilizar en materias de control impartidas por la Universidad de Almería (Grupo de Automática, Robótica y Mecatrónica). En concreto, el nuevo diseño presenta un menor tamaño, un menor coste de adquisición y un sistema diferente de conexionado con el PC. Además de las mejoras anteriores, cambios en la disposición de los sensores y en la potencia disipada en los transistores permiten obtener dinámicas más rápidas, que facilitan el desarrollo de las prácticas de laboratorio.

La exposición del trabajo se organiza en tres secciones. En la segunda sección se analizan los pro-



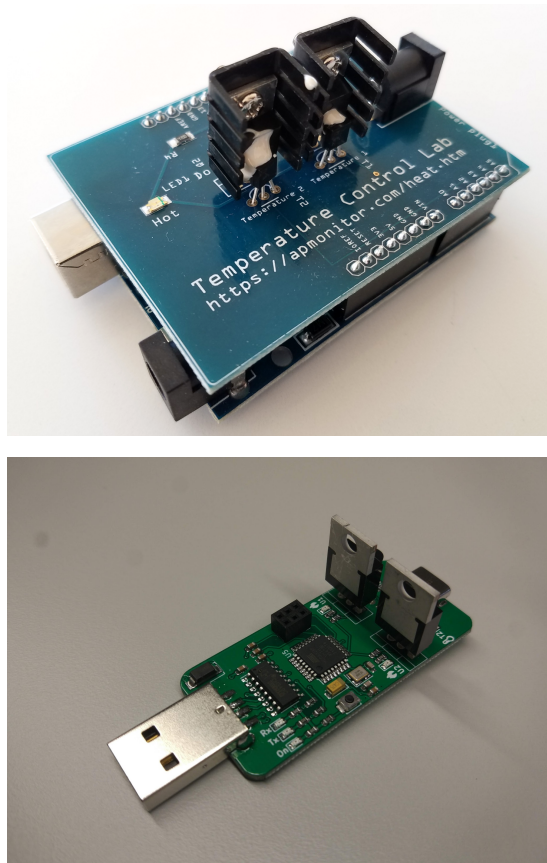


Figura 1: (arriba) Dispositivo TCLab, (abajo) Prototipo presentado en el trabajo.

blemas del dispositivo TCLab y se muestra el diseño del nuevo dispositivo. La tercera sección muestra la fabricación de los primeros prototipos ensamblados.

## 2. Diseño del dispositivo

### 2.1. Análisis del dispositivo TCLab

Como muestra la Figura 1, la plataforma TCLab está compuesta por una placa de desarrollo Arduino® Leonardo y un *shield* en el que se encuentran los componentes sobre los que se realiza el control. En concreto, este *shield* incorpora dos transistores NPN dotados de unos disipadores de calor con aletas y dos sensores de temperatura TMP36. Además, el *shield* incorpora un indicador LED que advierte al usuario si la temperatura de los transistores es elevada.

A primera vista puede comprobarse como la arquitectura empleada para desarrollar el sistema embebido no es eficiente, dado que el *shield* incorpora un escaso número de componentes y la placa de desarrollo Arduino® Leonardo se encuentra sobredimensionada para el número de entradas/salidas

que intervienen en el control<sup>1</sup>. Este tipo de montaje incrementa el tamaño y el coste del desarrollo de forma innecesaria, dado que deben adquirirse dos placas de circuito impreso para construir un dispositivo.

Otro punto de mejora se observa en el sistema de conexionado del dispositivo. Para ejecutar un ensayo, la plataforma debe conectarse de forma simultánea al ordenador (PC) y a la fuente de alimentación que suministra la energía a los transistores. Para realizar las conexiones se emplea un cable USB que conecta el dispositivo al PC y un cable con conector *Jack* para la fuente de energía. Este montaje incrementa de forma innecesaria los cables a emplear, incrementado los costes, el espacio necesario para ubicar la plataforma y las probabilidades de fallo en los diferentes cables.

Por último, los sensores se encuentran ligeramente separados de los transistores, y orientados de forma que la cara plana de los sensores no está enfrentada con los transistores. Esta disposición dificulta la transferencia de calor entre los dos componentes, que en este caso se realiza principalmente por conducción a través de la resina epoxi, dando lugar a un comportamiento dinámico que en la práctica se traduce en un retardo en la medida.

### 2.2. Diseño del *hardware* del dispositivo

Se plantea como objetivo el diseño de un nuevo dispositivo que implemente el mismo tipo de proceso a controlar, sea compatible con el material didáctico actual, y solviente algunas de las desventajas de la plataforma TCLab descritas en la Sección 2.1.

Para solucionar el primer problema antes descrito, se opta por integrar el nuevo diseño en una única PCB, evitando el empleo de un *shield* externo. Esta nueva arquitectura permite reducir el tamaño del dispositivo, pasando de unas dimensiones de 70×52 mm a sólo 25×52 mm. La reducción del tamaño inicial en un tercio tiene varias ventajas asociadas: un menor coste de fabricación y un menor consumo de materiales, lo que reporta un diseño más ecológico; y finalmente, resulta un dispositivo de mas fácil transporte y almacenaje.

Después de analizar diferentes opciones, se ha realizado un diseño *ad-hoc* basado en el microcontrolador ATmega 328p-AU®. Este presenta las mismas características técnicas que el microcontrolador ATmega32u4®, empleado en la placa de prototipos Arduino® Leonardo. Por lo tanto, las prestaciones y compatibilidad entre los dos dis-

<sup>1</sup>Téngase en cuenta que la plataforma de desarrollo Arduino® Leonardo incorpora componentes que no se emplean en esta aplicación.

positivos se mantiene. La diferencia principal entre ambos radica en que el ATmega 32u4<sup>®</sup> incorpora un enlace USB nativo. Esta desventaja se soluciona incorporando en el diseño un driver CH340-C para hacer de enlace entre el puerto USB y el micro-controlador.

Además, se incorpora en el diseño un conector macho de tipo USB A, que permite acoplar el dispositivo directamente al PC, eliminando la necesidad (y el coste) de un cable adicional; la conexión directa ha sido posible gracias a la reducción de volumen y peso. Como en el dispositivo TCLab, este enlace USB será empleado para alimentar la lógica de control y para realizar la transferencia de datos. Como innovación, los transistores pueden alimentarse desde el puerto USB A, aunque no se recomienda hacerlo por esta vía, excepto para pequeñas pruebas, ya que los puertos del PC no ofrecen la corriente de salida suficiente, reduciéndose la capacidad de generación de calor de los transistores y, además, se comprueba un aumento del ruido en la medida de los sensores.

Para la alimentación se ha optado por un puerto USB C hembra, en lugar de un puerto *Jack*, con el fin de que los usuarios puedan utilizar los cables y cargadores que hoy día son los más habituales en la electrónica de consumo (fundamentalmente en los *smartphone*).

Para mejorar la transferencia de calor entre los transistores y los sensores de temperatura, se han orientado estos últimos de forma que su cara plana incida directamente sobre el transistor. Con esta medida se consigue un mejor contacto térmico, que en la práctica se traduce en una reducción del tiempo de retardo para apreciar un crecimiento de la temperatura; TCLab presenta retardos de 15-20 segundos que se reducen a 5-10 segundos en el nuevo dispositivo.

Por último, se ha optado por incrementar el número de indicadores luminosos del dispositivo. Además de los indicadores propios que muestran el estado *On* y de la comunicación (*Rx*, *Tx*), se han incluido dos indicadores LED para vigilar si los transistores superan una cierta temperatura y otros dos indicadores LED cuya intensidad luminosa es proporcional a la acción de control inyectada en los transistores.

Teniendo en cuenta todas las premisas anteriores, el esquema eléctrico del dispositivo se ilustra en la Figura 2.

### 2.3. Ajuste de la potencia disipada en los transistores

El ajuste de la potencia disipada en los transistores determina en gran medida el comportamiento

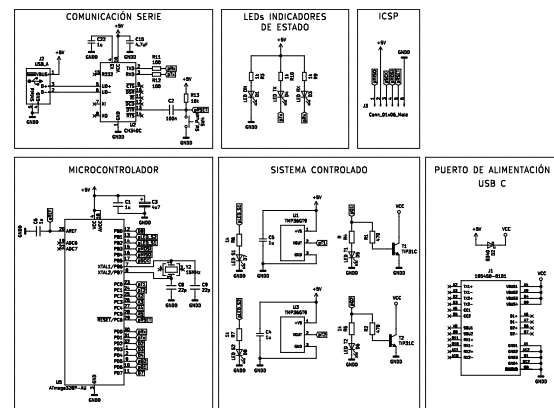


Figura 2: Esquema eléctrico del dispositivo desarrollado.

del sistema. Por lo tanto, su elección es fundamental para una respuesta dinámica adecuada.

Los transistores empleados en el sistema de control corresponden con el modelo TIP31CG, comercializado por On Semiconductor<sup>®</sup>. Dado que estos se encuentran conectados en modo emisor común, la potencia disipada por cada transistor esta determinada por

$$Q_{i=1,2}(t) = \frac{u_{i=1,2}(t)}{100R_b} \times 5 \times (1 + h_{fe}), \quad (1)$$

siendo  $Q_{i=1,2}$  la potencia en vatios disipada por cada transistor,  $u_{i=1,2}$  las acciones de control en porcentaje y  $R_b$  la resistencia (ohmios) de base empleada para excitar los transistores ( $R_1$  y  $R_2$  en el esquema de la Figura 2), y  $h_{fe}$  es la ganancia de corriente directa del transistor.

La ecuación (1) muestra como la potencia disipada por los transistores depende directamente de la resistencia de base. Por lo tanto, empleando una resistencia de base menor puede lograrse que el transistor disipe más potencia, y finalmente alcance una mayor temperatura.

Para determinar cual es el valor más adecuado, se realiza el experimento de la Figura 3. En el puede observarse el comportamiento que presenta la plataforma TCLab y el sistema desarrollado, empleando en este diferentes valores de resistencia de base: 470Ω, 1kΩ, 1k5Ω y 1k8Ω. A la vista de los resultados, con  $R_b=470\Omega$  se alcanzan valores de temperatura cercanos a los 100 °C si  $u_1$  se mantiene en el 80 %, superándose este valor de temperatura cuando la acción de control toma el 100 %. Estas temperaturas pueden resultar peligrosas para la integridad del dispositivo y pueden causar lesiones a los usuarios o el entorno. Desde este punto de vista, parece adecuado optar por resistencias a partir de 1kΩ y hasta 1k8Ω, valor con el que se igualarían las temperaturas del dispositivo TCLab. Sin embargo, debe tenerse en cuenta

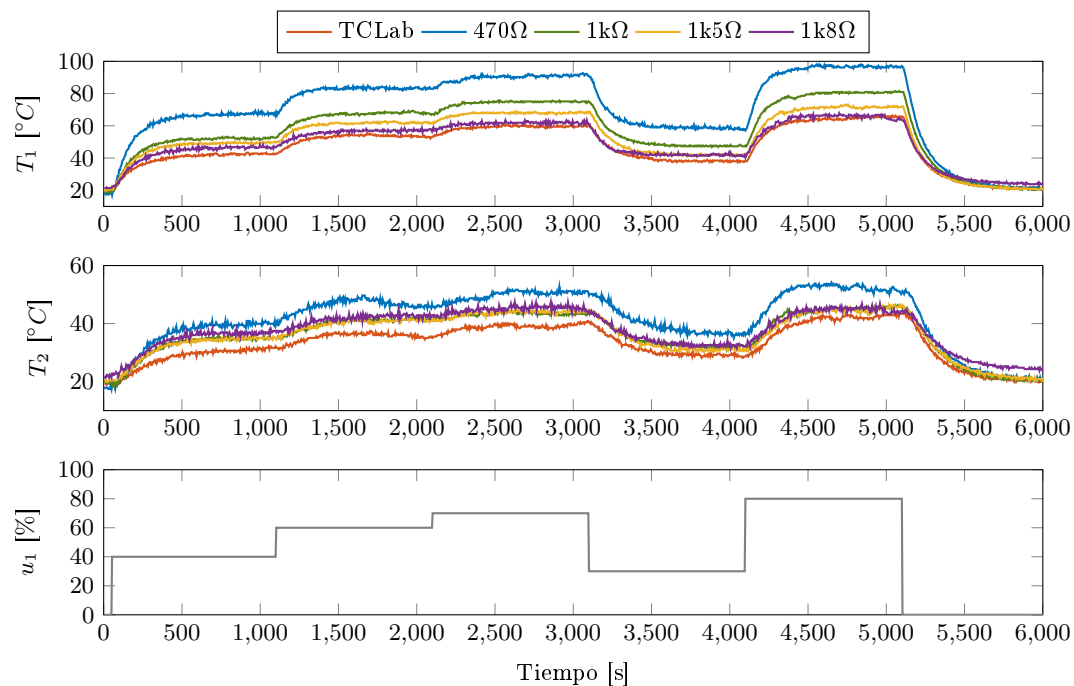


Figura 3: Comparativa para distintas resistencias de base y acciones de control.

que la ganancia (salida/entrada) del sistema condicionará el control automático de temperatura, como se justifica a continuación.

Si se analizan las ganancias de régimen permanente de la función de transferencia  $T_1/u_1$  en el penúltimo tramo, puede comprobarse como esta aumenta cuando la resistencia decrece. En concreto, se obtienen ganancias ( $^{\circ}\text{C}/\%$ ) de 0.586 para  $1\text{k}\Omega$ , de 0.596 par  $1\text{k}5\Omega$  y de 0.665 para  $1\text{k}\Omega$ . Con el fin de adoptar una solución de compromiso entre que la temperatura del dispositivo no alcance valores perniciosos para los materiales y a la vez conseguir la mayor ganancia posible, debe seleccionarse un valor comprendido entre  $1\text{k}\Omega$  y  $1\text{k}5\Omega$ . La Figura 4 muestra cómo con estos valores las temperaturas que se alcanzan, si se mantiene la acción de control  $u_1$  al 100 %, no superan los  $100^{\circ}\text{C}$ .

De acuerdo a toda la argumentación anterior, la elección de la resistencia de  $1\text{k}5\Omega$  es la más adecuada bajo el criterio de evitar que se alcancen temperaturas por encima de los  $85^{\circ}\text{C}$  y manteniendo la ganancia del sistema original de valor aproximado 0.6 ( $^{\circ}\text{C}/\%$ ).

Por otro lado, una mayor ganancia del sistema a controlar permitirá alcanzar las temperaturas objetivo en tiempos más pequeños. Para validar esta idea, se realiza un experimento de control en lazo cerrado sobre la plataforma TCLab y sobre el nuevo dispositivo con una resistencia de base de  $470\Omega$ . Para cerrar el lazo de control se emplea el

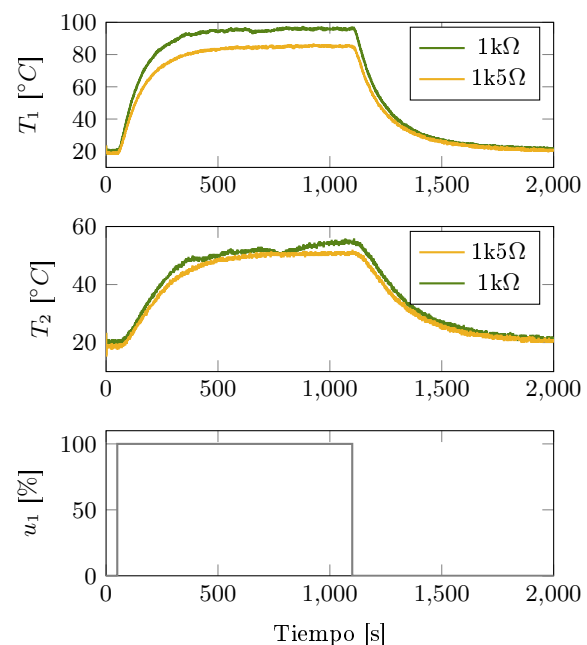


Figura 4: Temperaturas máximas obtenidas empleando resistencias de base  $1\text{k}\Omega$  y  $1\text{k}5\Omega$ .

controlador PI

$$c(s) = \frac{1}{40} \times \frac{1 + 91s}{s}, \quad (2)$$

provisto de un mecanismo anti-wind-up integral de tipo *clamping*. Los resultados mostrados en la Figura 5 verifican la conclusión anterior. En concreto, y pese a que se aprovecha un 10 % menos

el rango de control máximo, se alcanza por primera vez la temperatura de referencia 122 segundos antes con el nuevo desarrollo, lo que hace que el tiempo de subida sea 0.4 veces inferior. Esta reducción de tiempo permite realizar un número mayor de ensayos en cada práctica de laboratorio, aspecto fundamental para un adecuado desarrollo de las sesiones prácticas.

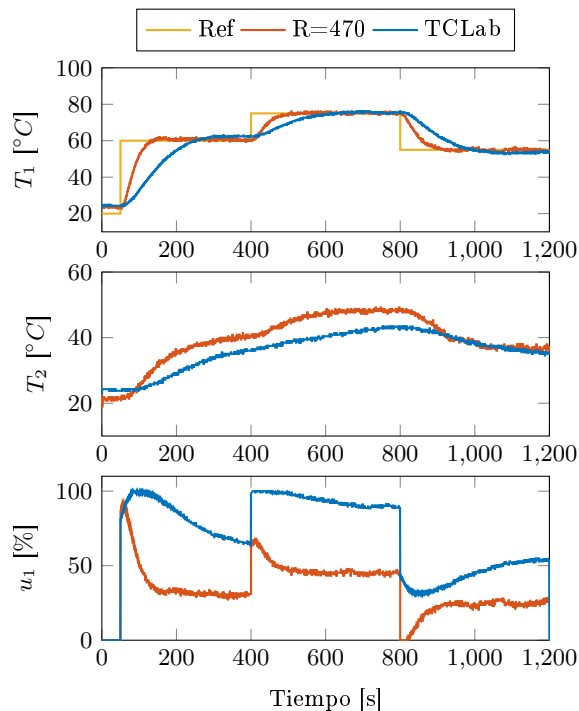


Figura 5: Experimento de control con controlador PI. Comparativa con resistencia de 470k $\Omega$  vs TCLab.

Teniendo en cuenta los estudios anteriores, la decisión final de diseño debe valorar el empleo de resistencias de 1k5 $\Omega$  o 470 $\Omega$  como resistencias de base en los transistores:

- La resistencia de 1k5 $\Omega$  garantiza que para actuaciones mantenidas en sus valores máximos (100%), los elementos calefactores no sobrepasan los 85 grados Celsius. La contrapartida es que la ganancia del sistema controlado se reduce a la mitad y el tiempo mínimo de control es el doble o mayor, en comparación con el obtenido con resistencias de 470 $\Omega$ . En comparación con el dispositivo TCLab, empleando un diseño de control adecuado, y haciendo uso de todo el rango de control (100%), se necesitan 200 segundos para alcanzar por primera vez la temperatura de referencia, y más de 600 segundos para observar el régimen permanente.
- La resistencia de 470 $\Omega$  aumenta considerable-

mente la ganancia del sistema controlado, lo que permite reducir el tiempo de control a la mitad. Con un diseño de control adecuado, y haciendo uso de un 90 % del rango de control, se necesitan 90 segundos para alcanzar por primera vez la temperatura de referencia, y en 200 segundos es posible visualizar el régimen permanente. Este es un aspecto muy valorable a la hora de realizar prácticas de laboratorio, en las que el tiempo es un recurso muy valioso. La contrapartida a este beneficio es que se alcanzan temperaturas perniciosas (por encima de los 100 grados Celsius) si la actuación se mantiene en su valor máximo.

Para compaginar seguridad y rapidez, se puede optar por el dispositivo *hardware* más agresivo ( $R_b=470\Omega$ ) incorporando una limitación *software* tal que cuando la temperatura supera un valor máximo, por ejemplo, 80°C la señal de control (ciclo de trabajo del transistor) bascula al 0 %. Para asegurar que el usuario no manipule de forma inconveniente este valor (y evitar responsabilidades), las funciones de control para el micro-controlador, libres y accesibles en la versión TCLab, son encriptadas en formato *p-code*. La Figura 6 muestra un experimento donde se prueba la efectividad de esta restricción. En este caso se ha limitado la temperatura máxima a 50 °C.

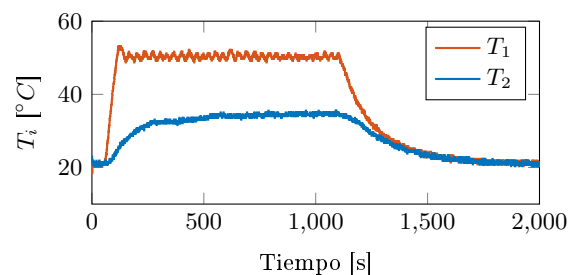


Figura 6: Resultados experimentales con limitación *software* de la temperatura.

### 3. Fabricación de los prototipos

Una vez validado el diseño del dispositivo, se inicia el proceso de fabricación. En esta ocasión se ha desarrollado la placa PCB (*Printed Circuit Board*) empleando KiCAD<sup>®</sup>, *software* gratuito que se adapta perfectamente a las especificaciones del diseño.

Para reducir el tamaño del dispositivo se ha optado por emplear principalmente componentes discretos de tamaño 0603, con un largo de  $1,55 \pm 0,05$  mm y ancho de  $0,85 \pm 0,05$  mm. Este tamaño es el más pequeño que permite un ensamblado de componentes de forma manual sin la necesidad de

adquirir equipamiento específico. El diseño final del dispositivo se muestra en la Figura 7, donde puede observarse en la parte superior el ruteado de las pistas y en la parte inferior el montaje 3D del dispositivo.

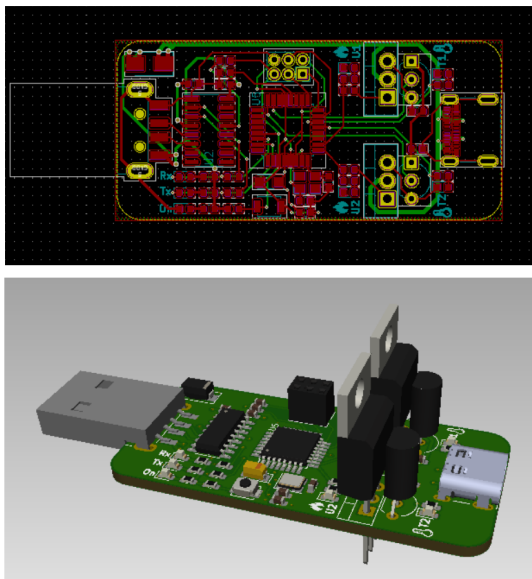


Figura 7: Diseño final del dispositivo.

Las primeras treinta unidades del dispositivo se han ensamblado manualmente en los laboratorios de la Universidad de La Rioja. Para abaratar costes y simplificar el proceso de fabricación de los prototipos, se ha optado por fabricar las placa de circuito impreso panelizadas en una matriz 2×4, tal como se observa en la Figura 8.

Para el soldado de los componentes de montaje superficial se emplea un procedimiento manual que consiste en aplicar estaño en pasta mediante un *stencil*<sup>2</sup>. Posteriormente, los componentes se sitúan en su posición de forma manual y se hornean siguiendo un perfil de temperaturas definido por el fabricante del estaño para que este se funda y los componentes queden adheridos en la posición adecuada.

Una vez finalizado el procedimiento anterior, se sueldan manualmente los componentes THT (*Through-Hole Technology*), en este caso los transistores, los sensores de temperatura, el bornero del puerto ICSP y el conector USB A.

Por último, para que los dispositivos sean funcionales debe programarse en el micro-controlador el *bootloader* empleado por el ecosistema Arduino®. Para realizar esta tarea se emplea una placa de prototipos Arduino® que se conecta al puerto

<sup>2</sup>Lamina de acero con perforaciones para depositar el estaño en los puntos adecuados. Ver la imagen de la esquina superior izquierda de la Figura 8.

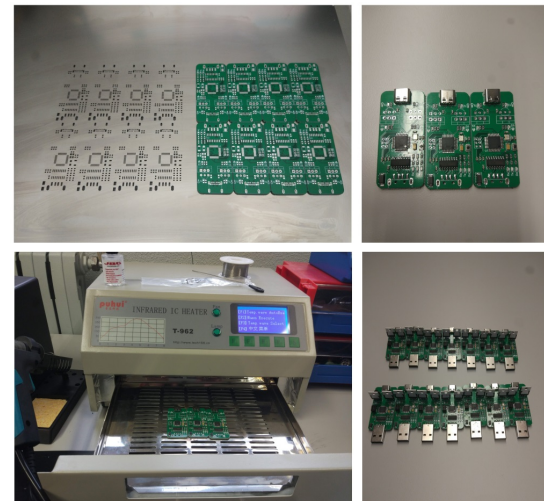


Figura 8: Imágenes obtenidas durante el proceso de ensamble de los prototipos.

ICSP del dispositivo. Este proceso de programación se realiza en pocos segundos.

Para mejorar el proceso de fabricación se están desarrollando los archivos necesarios para el montaje automatizado de los componentes SMT (*Surface-Mount Technology*). Estos ficheros, junto con el resto de materiales del proyecto se harán públicos próximamente empleando un repositorio en la plataforma GitHub.

### Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda de la Universidad de La Rioja a través de la Ayuda para realización de Proyectos de Innovación Docente PID48.

### English summary

#### Redesign of a low-cost temperature control platform for control engineering education

#### Abstract

*The work presents the design and manufacture of an update of the low-cost teaching platform Temperature Control Lab (TCLab) for self-learning and instruction on automatic control. A lower acquisition cost, smaller size, and improvements in the interface of connection with the PC facilitate the use and portability of the device. Beyond that, an improved dynamic behaviour is especially useful in thermal systems to shorten the time of the experi-*



*ments. The new development is part of a teaching innovation project at the University of La Rioja, and is freely distributed so that it can be manufactured and modified by any user.*

**Keywords:** Education, Process Control, Low-cost, Testbed

## Referencias

- [1] B.W. Bequette. Process control practice and education: Past, present and future. *Computers and Chemical Engineering*, 128:538–556, 2019.
- [2] J. Chacón, M. Guinaldo, J. Sánchez, and S. Dormido. A new generation of online laboratories for teaching automatic control. volume 48, pages 140–145, 2015.
- [3] P.B. de Moura Oliveira, J.D. Hedengren, and J. Boaventura-Cunha. Bridging theory to practice: Feedforward and cascade control with tclab arduino kit. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 695 LNEE:23–32, 2021.
- [4] Tomas Docek and Matej Golembiowski. Low cost laboratory plant for control system education. *IFAC-PapersOnLine*, 51(6):289–294, 2018. 15th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems PDeS 2018.
- [5] M. Gil-Martínez and J. Rico. A course on MIMO time delay process control from practice. In *2009 IEEE Conference on Emerging Technologies Factory Automation*, pages 1–8, 2009.
- [6] J.D. Hedengren. Temperature control lab kit. <http://apmonitor.com/heat.html>, 2020. Visitado 25.06.2021.
- [7] Ruben Heradio, Luis de la Torre, and Sebastian Dormido. Virtual and remote labs in control education: A survey. *Annual Reviews in Control*, 42:1–10, 2016.
- [8] E. Lerma, R. Costa-Castelló, R. Griño, and C. Sanchis. Duino-based learning (dbl) in control engineering courses. volume 2019-September, pages 798–803, 2019.
- [9] Paulo Moura Oliveira and John D. Hedengren. An apmonitor temperature lab pid control experiment for undergraduate students. In *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pages 790–797, 2019.
- [10] Junho Park, R. Abraham Martin, Jeffrey D. Kelly, and John D. Hedengren. Benchmark temperature microcontroller for process dynamics and control. *Computers & Chemical Engineering*, 135:106736, 2020.
- [11] Quanser. Control systems. <https://www.quanser.com/solution/control-systems/>, 2020. Visitado 25.06.2021.
- [12] J.A. Rossiter, B. Pasik-Duncan, S. Dormido, L. Vlacic, B. Jones, and R. Murray. A survey of good practice in control education. *European Journal of Engineering Education*, 43(6):801–823, 2018.
- [13] J.A. Rossiter, S.A. Pope, B.L. Jones, and J.D. Hedengren. Evaluation and demonstration of take home laboratory kit. volume 52, pages 68–73, 2019.
- [14] Unilabs. University network of interactive laboratories. <https://unilabs.dia.uned.es/>, 2021. Visitado 25.06.2021.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



# UNA INTEGRACIÓN A SISTEMAS DE GESTIÓN DE APRENDIZAJE BASADA EN ESTÁNDARES DE UN SISTEMA BARRA-BOLA

A. Montoro, I. Ruano-Ruano, E. Estévez, J. Gómez Ortega, J. Gámez García  
Escuela Politécnica Superior de Jaén.  
Universidad de Jaén

Email: aml00074@red.ujaen.es, {alonso, eestevez, juango, jggarcia}@ujaen.es

## Resumen

*Los laboratorios de tipo online tienen cada vez más aceptación dentro de la educación universitaria relacionada con las ciencias, tecnologías, ingenierías y matemáticas (CTIM o STEM en inglés), donde el trabajo práctico es de vital importancia para los estudiantes. El presente trabajo trata un ejemplo de integración de un laboratorio online en un sistema de gestión de aprendizaje (LMS-Learning Management System). Los estándares SCORM (Shareable Content Object Reference Model) y LTI (Learning Tool Interoperability) ofrecen la posibilidad de integrar laboratorios online en un LMS. Este trabajo, ha adaptado un sistema barra-bola convencional para posteriormente tratarlo como ejemplo de integración de un laboratorio online virtual y remoto al LMS de la Universidad de Jaén a través del estándar SCORM.*

**Palabras Clave:** e-learning, plataforma de aprendizaje, integración de sistemas, laboratorio online, LMS, SCORM, LTI

## 1 INTRODUCCIÓN

La creación de laboratorios docentes es fundamental para la realización de trabajos prácticos en todas las áreas de enseñanza. Para los estudios universitarios STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics), donde el uso de laboratorios docentes es habitual, es mucho más relevante [3]. Sin embargo, la realización de este tipo de laboratorios lleva consigo un coste elevado, cuyo origen suele ser la puesta en marcha y el mantenimiento, además de ser imprescindible el uso de un espacio físico. Este último condicionante, se ha visto agravado por la situación de pandemia mundial vivida durante el año pasado, que imposibilita el uso de los espacios universitarios por parte de los alumnos. Gracias a ello, se ha podido demostrar y ratificar las amplias ventajas de los laboratorios online dentro de la enseñanza. [4], [7]. Dentro de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), uno de los elementos TIC más importantes para la docencia serían las plataformas de docencia o LMS (Learning Management System). Los LMS, que se encuentran instaurados en las instituciones universitarias y a los cuales los

estudiantes se encuentran habituados, suelen ser denominados también como entornos de aprendizaje virtual o VLE (Virtual Learning Environment).

En el entorno tecnológico, la finalidad de un estándar es implantar normas que permitan el entendimiento y la colaboración entre los diferentes sistemas.

El uso de estándares como SCORM (Shareable Content Object Reference Model) y LTI (Learning Tool Interoperability) se ha utilizado en diferentes trabajos para la integración de este tipo de laboratorios online y LMS, y su uso tiene muchas ventajas. [1]

Debido al uso del LTI los estudiantes pueden acceder a un laboratorio online, que se encuentra alojado en un servidor externo al LMS, como si estuviera en el mismo LMS. Por otro lado, mediante el uso de SCORM los estudiantes pueden acceder a un laboratorio online que se encuentra alojado en el mismo LMS, embebido en el interior de un paquete SCORM. En ambos casos los estudiantes deben identificarse en el LMS, con LTI acceden al laboratorio al iniciar un elemento enlazado con la aplicación del laboratorio, mientras que con SCORM acceden a la aplicación del laboratorio al iniciar un paquete SCORM.

El presente trabajo se centra precisamente en facilitar unas pautas para la integración de un laboratorio a un LMS a través de dichos estándares. Por ello, el segundo apartado presenta una idea general sobre los estándares LTI y SCORM. En el tercero se indican los pasos a seguir para integrar un laboratorio a través de los estándares anteriormente mencionados. El apartado 4 se centra en caracterizar y adaptar un sistema barra-bola para posteriormente, en el apartado 5, describir cómo se produce su integración en el LMS de la UJA usando LTI y SCORM. Finalmente, se incluye un apartado de Conclusiones.

## 2 ESTÁNDARES LTI Y SCORM.

Como anteriormente se ha mencionado los estándares son la manera de establecer unas normas para el entendimiento y la colaboración entre sistemas. Dentro de la comunidad e-learning también tienen esa propiedad de establecer normas, pero relacionados con sistemas educativos, y se pueden clasificar según categorías como serían: Accesibilidad, Arquitectura, Calidad, Competencias, Contenidos y Evaluación,

Derechos digitales, Información del alumno, Interactividad, Metadatos; Proceso de Aprendizaje, Repositorios y Vocabulario y Lenguajes. [2]

Los estándares se encuentran ligados con la interactividad y arquitectura que facilitan la integración de contenidos de carácter educativo como son los laboratorios con las plataformas de aprendizaje. Los más extendidos y habituales son los denominados LTI y SCORM.

A continuación, en los siguientes sub-apartados se va a detallar el carácter funcional de los estándares LTI y SCORM.

## 2.1 SCORM

Tiene origen en la secretaría de defensa de los Estados Unidos de América y fue creado por Advanced Distributed Learning (ADL).

El estándar SCORM tiene varias versiones, la última de ellas es la versión SCORM 2004 4th edition.

SCORM introduce pautas para crear y empaquetar contenido de tipo e-learning, con la posibilidad de comunicación entre el contenido y el LMS (por ejemplo, ILIAS o Moodle) del que se encuentre instalado el paquete para el intercambio de datos y, por último, las indicaciones para realizar la secuenciación y navegación entre los componentes educativos que se encuentran incluidos.

La última versión tiene 3 sub-especificaciones:

- CAM (Content Aggregation Model). Determina cómo describir la estructura de un elemento educativo, en base a componentes más pequeños, y la forma de empaquetar ese contenido para después se pueda ejecutar en LMS.
- RTE (Run-Time Environment). Determina cómo efectuar el contenido, la comunicación con el LMS y cómo realizar el seguimiento del progreso que estaría realizando el alumno.
- SN (Sequencing and Navigation). Determina como definir la secuencia de ejecución y la navegación entre componentes de un paquete SCORM.

El uso de SCORM no es algo novedoso, desde 2007 se han realizado trabajos integrándolos en LMS [6], [12], sin embargo, la implementación de estos trabajos de forma real no se obtuvo hasta años más tarde. [8]-[10]. En ellos, si se tenía un uso más profundo de SCORM RTE, utilizando el intercambio de datos entre LMS y el laboratorio [11], [15], ya que, cuando la integración es más avanzada el intercambio de datos de aprendizaje con la base del LMS es realizada por el propio software.

## 2.2 LTI

Este estándar está desarrollado por el IMS Global Learning Consortium (IMS) [13], su objetivo es la

integración entre aplicaciones de aprendizaje con plataformas de aprendizaje. Las aplicaciones o herramientas se encuentran alojadas de modo remoto en las plataformas de aprendizaje, como podrían ser LMSs o cualquier otro tipo de entorno.

Los tres términos que utiliza LTI son:

- Tool: referente a la aplicación de aprendizaje enriquecida
- Tool Provider: referente a los sistemas que proporcionan las herramientas.
- Tool Consumer: referente a los sistemas que consumen las herramientas que proporcionan los Tool Providers, por ejemplo, LMSs aunque podría ser otro tipo de plataforma de aprendizaje e-learning.

Habitualmente, el uso que se le da al LTI suele ser que un Tool Consumer ofrece a un usuario contenidos externos con apariencia de estar alojados en el LMS, pero el usuario en realidad cuando accede a un elemento LTI del LMS, es el LMS que usa el estándar LTI para lanzar la Tool ubicada de forma externa en el Tool Provider. Se produce por tanto un intercambio de datos entre el LMS y la Tool utilizada.

LTI al ser tan popular y conocido, se pueden encontrar muchas plataformas e-learning que lo utilizan, o bien con el rol de consumidoras (Tool Consumer), o bien con el rol de ser consumidas (Tool Provider).

Al igual que ocurre con SCORM existen varias versiones de LTI, pero algunas versiones son más conocidas que otras. De hecho, la recomendación de IMS (el desarrollador de LTI) es saltar las versiones 1.1.1, 1.2 y 2.0, pasando así de la versión 1.1 a la 1.3.

## 3 PAUTAS PARA INTEGRAR LABORATORIOS ONLINE USANDO ESTÁNDARES LTI Y SCORM

Existen diferentes estándares que pueden ayudar a alcanzar la integración de un laboratorio online y un LMS. En este trabajo se han tratado los 2 estándares más utilizados y conocidos para este fin, LTI y SCORM.

### 3.1 INTEGRACIÓN CON LTI

La integración de un laboratorio online y un LMS usando el estándar LTI se puede alcanzar de 3 modos diferentes que se explicarán a continuación.

- NATIVA.** Es el modo más natural e intuitivo de realizar la integración entre el laboratorio online y el LMS. En este modo el LMS actúa como un consumidor de herramientas LTI, siendo la herramienta una aplicación de laboratorio online

ubicada en un servidor externo al LMS (proveedor de herramientas LTI).

El usuario realiza su conexión con el LMS donde se tiene alojado el elemento LTI que al ser iniciado ejecuta un laboratorio virtual que se encuentra alojado en un servidor externo que aparece en la pantalla del usuario.

Si además de ser un laboratorio online es remoto la forma de acceder al servidor es un poco diferente, pues el software del laboratorio LTI debe de tener acceso al sistema real (maqueta), que podría ser el mismo servidor u otro externo.

II. **INVERSA.** Es una forma menos intuitiva de realizar la integración entre un laboratorio online y un LMS. En este modo el laboratorio actúa como consumidor de recursos de un LMS mediante el uso del estándar LTI.

Los recursos de un LMS que se pueden consumir desde la aplicación del laboratorio pueden ser muy variados, por ejemplo, un test del LMS que sirva para evaluar los conocimientos del usuario que entra en el laboratorio o una encuesta de valoración del laboratorio (ambos tipos de recursos pueden usarse antes y/o después de trabajar en el laboratorio).

III. **MIXTA.** Este modo combina los dos modos anteriores de forma que se produce una integración en 2 sentidos: de forma nativa e inversa. En este caso, el usuario se identifica en el LMS y al iniciar un objeto LTI se produce la ejecución de la aplicación del laboratorio online, que se ubica en un servidor externo. Hasta aquí coincide con la integración nativa. Adicionalmente, la aplicación de laboratorio actúa como enlace LTI de forma que inicia recursos ubicados en otro sistema (LMS) que son ofrecidos al estudiante desde el software del laboratorio.

### 3.2 INTEGRACIÓN CON SCORM

La integración de un laboratorio online en un LMS utilizando el estándar SCORM se consigue editando un paquete SCORM. El software del laboratorio debe incluirse dentro de uno de sus componentes con capacidad de usar el modelo de datos de SCORM y comunicarse con el LMS (SCO o Sharable Content Object).

Los SCOs se implementan como páginas Web, por lo que la aplicación del laboratorio debe estar en el interior de la página web del SCO y haber sido programada usando una tecnología compatible.

Para lograr una integración avanzada laboratorio-LMS la aplicación del laboratorio debe usar las funciones JavaScript de la sub-especificación RTE de SCORM. Con estas funciones se pueden obtener y manipular los datos del modelo SCORM, aunque es recomendable usar alguna librería que facilite este trabajo [10].

## 4 SISTEMA BARRA-BOLA

Se ha trabajado en un sistema barra-bola que se ha caracterizado y adaptado para ofrecerse como laboratorio online en dos versiones: virtual y remota.

Este tipo de laboratorio es de gran utilidad para los Grados de Ingeniería Electrónica Industrial, en aquellas asignaturas que tienen relación con el control automático.

El sistema barra-bola está compuesto por tres módulos principales: el motor, la barra y la bola tal y como ilustra la Figura 1.

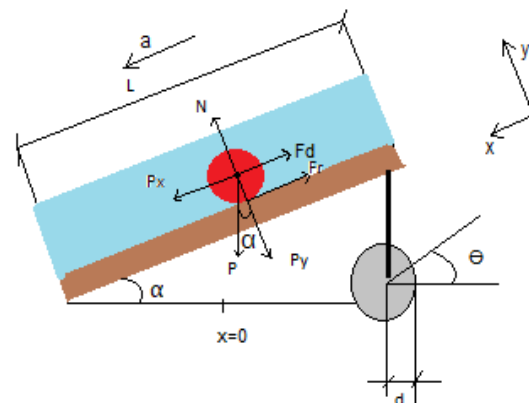


Figura 1. Sistema barra-bola

La bola se encuentra situada encima de la barra. La función de este sistema es mover la bola sobre la barra. Para ello, el motor rota un ángulo,  $\Theta$ , y, por consecuencia, la barra se inclina un ángulo,  $\alpha$ , que termina generando el movimiento de la bola sobre la barra.

Debido a que este sistema de barra-bola iba a ser implementado como un laboratorio online remoto se han introducido unas modificaciones para mejorar su funcionamiento en remoto.

Unas de las modificaciones es transformar la barra en un tubo de metacrilato donde se introducirá la bola y hará dentro del sistema el papel de barra, con la ventaja de que si la bola está dentro del tubo jamás podría caerse fuera. Esto es una gran ventaja porque al ser un laboratorio online remoto no tendría que tener una persona vigilando que el sistema esté funcionando correctamente y, por consecuencia, el mantenimiento es menor.

La segunda modificación sería introducir dentro del tubo de metacrilato, junto con la bola, una mezcla con un cierto porcentaje de glicerina con agua. De esta forma el sistema se ralentizará y será mucho más visual y no tan brusco su movimiento.

Antes de realizar el laboratorio online remoto, al principio se realizó un laboratorio virtual. Para ello se hizo uso del software de Easy Java/JavaScript Simulations (EJSs) [5] para crear la simulación de control del sistema barra-bola. Este laboratorio se muestra en la Figura 2.

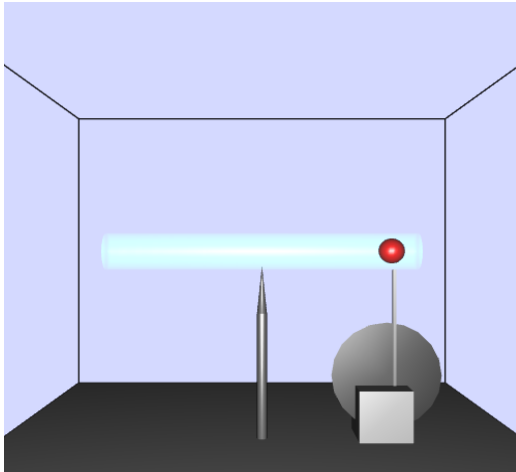


Figura 2. Laboratorio virtual (sistema barra-bola)

Las constantes del motor en corriente continua, tanto  $K_m$ , ganancia estática y  $T_m$ , constante de tiempo, se han personalizado de forma que según el estudiante que acceda al laboratorio tendrán unas constantes distintas. Al igual ocurre con el porcentaje de glicerina que se ha mencionado anteriormente que también era un parámetro personalizado.

Otra función destacable es la evaluación automática que se realiza del estudiante a medida que se introducen los resultados en los apartados de evaluación. Y se muestra al estudiante su calificación.

La Figura 3 muestra una imagen de la maqueta del sistema Barra-Bola.



Figura 3. Maqueta del sistema barra-bola

La segunda modificación realizada en el laboratorio remoto, en la que se introduce la mezcla de glicerina con agua, se utiliza en el laboratorio virtual para crear un parámetro personalizado según el estudiante. Por

ello, cada estudiante tendría un sistema barra-bola personalizado sobre el que realizar su experimento.

Para el sistema real (maqueta) se han utilizado los siguientes componentes:

- **Actuador:** Un motor en corriente continua con escobillas capaz de funcionar a 12V que contiene una caja de engranajes con relación 70:1 (Figura 4). Esta caja de engranajes está compuesta principalmente de engranajes rectos, pero en la primera etapa cuenta con engranajes helicoidales que reduce el ruido y lo vuelve más eficiente.



Figura 4. Motor en corriente continua

Al motor se le acopla un puente en H por el cual se realiza el movimiento de giro hacia derecha e izquierda del motor (Figura 5).

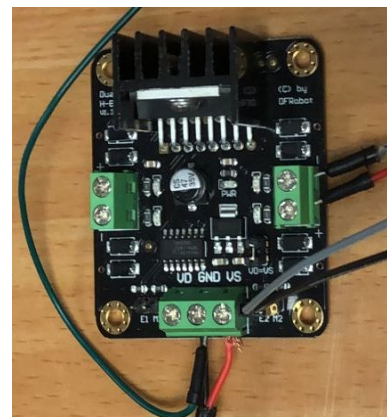
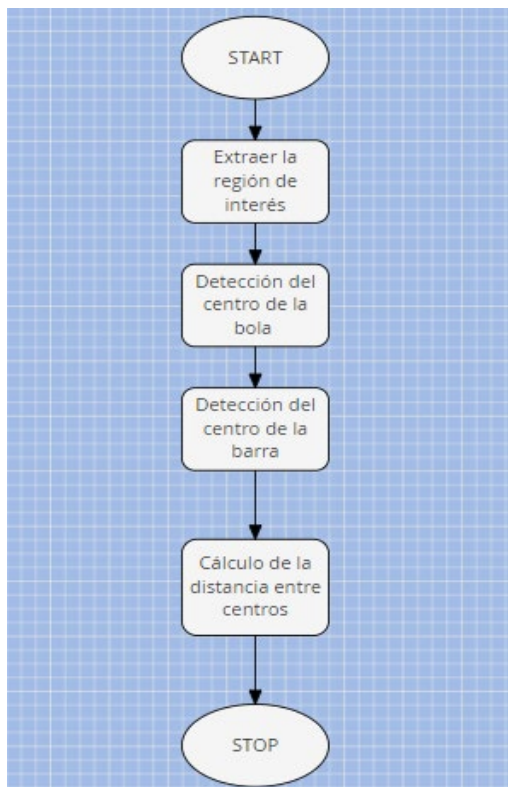


Figura 5. Puente H

- **Planta:** Formada por la barra y la bola.
- **Sensor de posición:** Se trata de un sensor virtual creado por software por el cual mediante visión se calcula la distancia desde el centro de la bola al centro de la barra siguiendo el diagrama de la Figura 6.

Este sistema podría ser utilizado para crear ejemplos prácticos de control. Por ejemplo, un control en posición de la bola o el control en velocidad de la bola. En el laboratorio remoto se ha adaptado el software desarrollado con EJSs para la versión virtual para obtener el programa cliente que usarán los estudiantes para poder realizar los experimentos remotos en la

planta real. Para la comunicación entre este software y la planta real se ha usado el protocolo RIP (Remote Interoperability Protocol) [14].



**Figura 6. Diagrama de flujo del software de medida por visión.**

## 5 INTEGRACIÓN DEL SISTEMA BARRA BOLA EN EL LMS DE LA UJA CON ESTÁNDARES

El desarrollo de los laboratorios online del sistema barra-bola (virtual y remoto) se han realizado dentro del proyecto UniLabs (University Network of Interactive Laboratories, <https://unilabs.dia.uned.es/>). En este proyecto están involucradas 14 universidades españolas, entre las que se encuentra la UJA, y está siendo dirigido por la UNED.

La integración de los laboratorios se va a llevar a cabo usando los dos estándares tratados en este trabajo. Los siguientes sub-apartados presentan brevemente los pasos a seguir.

### 5.1 INTEGRACIÓN CON LTI

El software EJS con el que se desarrolló la aplicación de laboratorio que usa el estudiante, tanto para el laboratorio virtual como para el laboratorio remoto, permite generar un fichero comprimido ZIP que incluye toda la estructura necesaria.

Este fichero se ubica en un repositorio externo que se comporta como el proveedor de herramientas de LTI, en este caso el LMS de la UNED que alberga el proyecto UNILabs. Se trata de un sistema Moodle en el que se sube el fichero del laboratorio y configura como accesible a través del estándar LTI.

El LMS de la UJA actúa como un consumidor de herramientas; en una ubicación accesible por los estudiantes se crea un elemento LTI que se enlaza con el laboratorio accesible por LTI ubicado en el LMS de UniLabs.

De esta forma los estudiantes de la UJA acceden a su LMS para trabajar con el laboratorio ubicado en el LMS de UniLabs.

### 5.2 INTEGRACIÓN CON SCORM

El mismo software de EJS, también en este caso para la modalidad virtual y remota, ofrece la posibilidad de exportarlo como paquete SCORM. Este paquete ya podría ser importado en cualquier LMS compatible. Desde el LMS de la UJA debe importarse el fichero ZIP para crear un paquete SCORM en una ubicación accesible por el alumno. Este módulo SCORM incluye en su interior la aplicación del laboratorio (virtual o remoto).

Antes de realizar la exportación en EJS se tiene la posibilidad de adaptar el código a SCORM-RTE para poder realizar el intercambio de datos entre LMS y la simulación.

## 6 CONCLUSIONES

Está demostrada la importancia de realizar prácticas dentro de la educación universitaria relacionada con las ciencias, tecnologías, ingenierías y matemáticas, para poder asimilar los conceptos teóricos. En este sentido, cada vez están siendo más aceptados el uso de los laboratorios online. Además, la situación y alarma social vivida en estos dos últimos cursos académicos debido al COVID-19 ha obligado a docentes a agudizar el ingenio para que el alumnado pudiera asimilar los conceptos a través de dichos laboratorios. El presente trabajo ha presentado las pautas para conseguir la integración de un laboratorio online en el correspondiente sistema de gestión de aprendizaje a través de los estándares más expandidos como son LTI y SCORM. Para ello, se ha tomado como ejemplo de laboratorio un sistema convencional barra-bola, se ha condicionado y posteriormente se ha en el LMS utilizado en la UJA a través de LTI y SCORM.

### Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la subvención parcial de este trabajo a través de los proyectos PIMED01\_201921, PID2019-110291RB-I00.



## English Summary

### AN INTEGRATION TO LEARNING MANAGEMENT SYSTEMS BASED ON STANDARDS OF A BALL AND BEAM SYSTEM

#### Abstract

*Online labs are increasingly accepted within science, technology, engineering and mathematics (STEM) college education, where practical work is vitally important to students. This paper deals with an example of integrating an online laboratory into a Learning Management System (LMS). For the integration of these, the use of standards is essential. The SCORM (Shareable Content Object Reference Model) and LTI (Learning Tool Interoperability) standards offer the possibility of integrating online laboratories in an LMS (Learning Management System). For this paper, as an example of integration, the virtual and remote online laboratory, the classic bar-ball system is used.*

**Keywords:** e-learning, learning platform, systems integration, online laboratory, Learning Tool Interoperability (LTI), Learning Management Systems (LMS).

#### Referencias

- [1] Advanced Distributed Learning (ADL), “SCORM 2004 4th Ed. (Shared Content Object reference model)”, 2009. [Online]. Available: <https://www.adlnet.gov/adl-research/scorm/scorm-2004-4th-edition/>. [Accessed: 21-Jun-2016].
- [2] A. Berlanga Reyes, B. Fernández Manjón, I. Martínez Ortiz, P. Moreno Ger, and J. L. Sierra Rodríguez, “Estándares en e-learning y diseño educativo”, 2011.
- [3] M.P. Clough, “Using the laboratory to enhance student learning” *Learn. Sci. Sci. Learn.*, no. JANUARY 2002, pp. 85–94, 2002.
- [4] J.E. Corter, J. V. Nickerson, S.K. Esche, C. Chassapis, S. Im, and J. Ma, “Constructing reality: A Study of Remote, Hands-On, and Simulated Laboratories” *ACM Trans. Comput. Interact.*, vol. 14, no. 2, pp. 7-es, Aug. 2007.
- [5] F. Esquembre, “Easy Java Simulations: a software tool to create scientific simulations in Java”, *Comput. Phys. Commun.*, vol. 156, no. 2, pp. 199–204, Jan. 2004.
- [6] L. Gomes and S. Bogosyan, “Current Trends in Remote Laboratories”, *Ind. Electron. IEEE Trans.*, vol. 56, no. 12, pp. 4744–4756, 2009.
- [7] J. Ma and J. V. Nickerson, “Hands-on, simulated, and remote laboratories: A Comparative Literature Review” *ACM Comput. Surv.*, vol. 38, no. 3, pp. 7-es, Sep. 2006.
- [8] V. Mateos, A. Gallardo, and T. Richter, “LiLa Booking System: Architecture and Conceptual Model of a Rig Booking System for On-Line Laboratories” *Int. J. Online Eng.*, vol. 7, no. 4, 2011.
- [9] T. Richter, Y. Tetour, and D. Boehringer, “Library of Labs – A European Project on the Dissemination of Remote Experiments and Virtual Laboratories”, in *2011 IEEE International Symposium on Multimedia*, 2011, pp. 543–548.
- [10] I. Ruano, P. Cano, J. Gamez, and J. Gomez, “Advanced LMS Integration of SCORM Web Laboratories”, *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6352–6363, 2016.
- [11] I. Ruano-Ruano, J. Gamez, S. Dormido, and J. Gomez, “A Methodology to Obtain Learning Effective Laboratories with Learning Management System Integration”, *IEEE Trans. Learn. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 391–399, 2016.
- [12] E. Sancristobal Ruiz, M. Castro, J. Harward, P. Baley, K. DeLong, and J. Hardison, “Integration view of Web Labs and Learning Management Systems”, in *IEEE EDUCON 2010 Conference*, 2010, vol. 81, pp. 1409–1417.
- [13] F. Schauer et al., “REMLABNET IV – LTI Federated Remote Laboratory Management System with Embedded Multiparameter Simulations”, *Int. J. Online Eng.*, vol. 13, no. 10, p. 103, Nov. 2017.
- [14] L. de la Torre, J. Chacon, and D. Chaos, “Remote Interoperability Protocol for online laboratories” *Universidad Nacional de Educacion a Distancia (UNED), ETS. Ingenieria Informatica, Madrid (Spain)*, 2019.
- [15] H. Wuttke, M. Hamann, and K. Henke, “Integration of remote and virtual laboratories in the educational process”, in *Proceedings of 2015 12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, 2015, vol. 11, no. February, pp. 157–162.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).



## SopORTE Para la Generación de Maquetas Virtuales de Automatización Industrial

A. Sánchez, E. Estévez, I. Ruano Ruano, Juan Gómez Ortega, Javier Gámez García

Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Universidad de Jaén

Email: {asgarcia,eestevez, alonso,juango, jggarcia }@ujaen.es

### Resumen

*Está demostrada la importancia que tienen la realización de prácticas de laboratorio en la educación universitaria relacionada con las ciencias, tecnologías, ingenierías y matemáticas. En el caso de las ingenierías y en particular en conceptos de automatización se hace aún más notorio. Lamentablemente, situaciones como las vividas en estos dos últimos cursos académicos, en los que la docencia presencial no ha sido posible, ha puesto a prueba tanto a docentes como a alumnos. Este trabajo presenta unas directrices y una herramienta de soporte para que el profesorado de este tipo de asignaturas pueda generar maquetas virtuales y por tanto realizar las prácticas de forma online de la misma manera que presencialmente.*

**Palabras Clave:** Docencia Virtual, Automatización industrial.

### 1 INTRODUCCIÓN

Las prácticas de laboratorio constituyen un recurso docente muy importante en la docencia universitaria [1]. En los estudios universitarios de ciencias y tecnologías la importancia de los laboratorios es aún mayor, ya que sus actividades suelen ser eminentemente prácticas [2]-[3]. De hecho, el trabajo de laboratorio ayuda a los alumnos a entender la realidad a la que se deben enfrentar, estableciendo un nexo de unión entre el mundo teórico docente y el mundo real.

Algunos autores han llegado a afirmar que las experiencias de laboratorio constituyen el corazón del aprendizaje científico [4], o que las experiencias de laboratorio hacen que la ciencia “cobre vida” [5]. El trabajo práctico constituye un pilar esencial en la formación de los estudiantes de ingeniería, que deben tener un conocimiento que vaya más allá de la propia teoría [2]. La comunidad científica presenta un acuerdo explícito sobre los beneficios que aportan los laboratorios en la enseñanza de ciencias e ingenierías [3],[6]-[9].

Por otro lado, los profesionales de ingeniería llevan mucho tiempo siendo artífices de muchos cambios que se han producido gracias a la explotación de avances tecnológicos y sus innovaciones relacionadas [10]. La aplicación de estos avances tecnológicos en la educación, especialmente de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), que posibilitan la formación online, es una línea de actuación muy importante que fomentan ampliamente organismos públicos y privados, tanto internacionalmente [11]-[12] como en España [13].

El avance y la aplicación de las TIC ha traído consigo la aparición de nuevos tipos de laboratorios con los que los alumnos pueden trabajar a través de Internet en lo que se ha venido a llamar laboratorios online (LoL) o en línea [14]. Es más, en la literatura se pueden encontrar muchas propuestas de laboratorios online muy útiles para la disciplina de ISA (Ingeniería de Sistemas y Automática) [15]-[21] siendo la mayoría de ellos para temas de fundamentos de control.

Lamentablemente, en la temática de Automatización industrial, al menos hasta donde los autores conocen, no se dispone de dicha batería de laboratorios. Fundamentalmente se debe a que para esta materia se requiere de herramientas propietarias de fabricantes (e.g. TIA Portal para autómatas de Siemens, Twincat para Beckhoff...) que dan soporte a la codificación de los proyectos de automatización y posteriormente descargarlos en el correspondiente Autómata Programable (PLC –Programmable Logic Controller) o en una herramienta que simule el PLC (también propietaria, e.g., PLCsim de Siemens). Hoy en día, para impartir asignaturas de automatización industrial, los centros disponen de laboratorios dotados al menos de PLCs, manipuladores de dos grados de libertad (i.e., cilindros de simple o doble efecto gobernados por correspondientes electroválvulas) ...lo cual permite asegurar una docencia de calidad, aunque de recursos limitados y compartidos por todo el alumnado.

Estos dos últimos años donde la situación de alarma que se ha vivido en la sociedad debida al COVID-19 donde la docencia presencial no ha sido posible [22], ha dificultado muy mucho la impartición de dichas asignaturas. En el mejor de los casos; suponiendo que el alumnado tenía recursos suficientes y conexión a red y la universidad ofrecía conexión a PC remotos con licencias para codificar el proyecto de automatización; se ha podido diseñar y codificar los ejercicios propuestos. Aun así, no se tenía disponible ni planta real ni virtual a automatizar y controlar. Ello, ha dificultado muy notoriamente la comprensión del alumnado.

En el mercado, se dispone de productos comerciales como Factory I/O [23] o Fluidsim [24] que podrían ser utilizados para emular la planta a automatizar y posteriormente establecer la conexión con el PLC (real o virtual). El software Factory IO permite una perfecta simulación de los sistemas de transporte, distribución y almacenaje de paquetería en entornos industriales, pero no permite añadir nuevos objetos, muy utilizados en asignaturas básicas de automatización como pueden ser cilindros o motores. Fluidsim permite añadir dichos manipuladores, pero con una apariencia muy poco real. Además, hay que tener en cuenta el coste sus licencias.

Este trabajo propone una herramienta que da soporte a la generación de maquetas virtuales para prácticas de Automatización Industrial. Dicha herramienta está basada en librerías de libre distribución y permite al docente elaborar plantas de complejidad creciente que sirvan de prácticas de automatización para el alumnado.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: el apartado 2 lista las pautas para conseguir la virtualización de maquetas de automatización; el apartado 3 presenta la herramienta desarrollada que guía a la implementación de las pautas previamente indicadas. El apartado 4 hace uso de la herramienta propuesta para la virtualización de una maqueta utilizada en la asignatura de Automática Industrial impartida en los Grados de Ingeniería Industrial de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería (EPSi) de Universidad de Jaén (UJA). Finalmente, el apartado 5 recoge las conclusiones.

## 2 PAUTAS PARA LA VIRTUALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE AUTOMATIZACIÓN

La virtualización de maquetas de automatización está directamente ligada con un concepto de gran repercusión en el contexto de la industria 4.0 como es

el Gemelo Digital (DT-Digital Twin). Hoy en día, no hay un consenso en cuanto a las funcionalidades y alcance que debe tener un DT, es más, en la literatura se han dado tres interpretaciones: (1) modelo de simulación de alta precisión [25]-[26]; (2) representación virtual del estado y comportamiento de un activo de fabricación para su integración en la I4.0 [27]-[28] y (3) una combinación de las dos primeras [29]-[30].

Este trabajo, concretamente está en concordancia con la primera de las interpretaciones de DT, ya que con la maqueta virtual se pretende obtener un modelo de simulación de alta precisión para el análisis y optimización de proceso de fabricación. Las interfaces de E/S de la maqueta virtual son las mismas que las del proceso que replica/virtualiza, así para el controlador la interacción con el proceso real y con su virtualización es la misma.

Las acciones para desarrollar un gemelo digital de estas características son las siguientes:

1. *Modelado de la planta a automatizar.* El primer paso consiste en la generación del modelo de simulación de la planta a automatizar.
2. *Proyecto de automatización.* Destacar que la lógica de dicho proyecto ha de ser válida tanto para el DT como para el activo de fabricación real (i.e., Maqueta real en nuestro caso).
3. *Integración en arquitecturas para la Industria 4.0.* Este paso, consiste dotar al proyecto de automatización de recursos para procesar los datos que recibe del proceso (real o el simulado).

## 3 HERRAMIENTA SOPORTE DE VIRTUALIZACIÓN

Este apartado presenta una herramienta de soporte que permita al profesorado generar DT para fomentar las prácticas de automatización, de tal manera que no requiera de licencias adicionales. En concreto está basada en software abierto y de libre distribución.

La Figura 1 presenta un escenario general haciendo énfasis en las librerías empleadas. En la actualidad da soporte para automatizar y controlar plantas virtuales cuyo proyecto de automatización se haya desarrollado en dos de las herramientas más extendidas en el mundo de la automatización como son TIA Portal (Siemens) y TwinCAT (Beckhoff).

Los siguientes apartados detallan cómo permite modelar la planta a controlar, definir las E/S que van a intercambiarse con el proyecto de automatización, así como su integración y puesta en marcha.



Figura 1: Escenario general de la herramienta propuesta

### 3.1 Modelado de la planta a automatizar y controlar

El Modelado de la planta a automatizar, requiere de un CAD por cada módulo que la compone. En caso de tratarse de un módulo con movimiento (e.g., un cilindro), son necesarios dos CAD, uno para la parte fija (estructura) y otro para la parte móvil (émbolo).

El núcleo de la herramienta maneja un fichero de configuración en formato yaml [31] para cada elemento de la maqueta y otro general donde se hace la composición de la misma. De esta manera, se consigue una mayor flexibilidad. La Figura 2 presenta un ejemplo de fichero de configuración de dos elementos clásicos en cualquier planta como son los cilindro y pulsadores. En el caso de los cilindros además de su ubicación, es necesario indicar la longitud del émbolo (*carreraMax*, *carreraMin*), la *velocidad* de movimiento, el gráfico de la parte fija y móvil (*ficheroFijo*, *ficheroMovil*) y los correspondientes finales de carrera (*indicador1*, *indicador2*).



Figura 2: Ejemplos de parametrización: (a) cilindro y (b) pulsador.

### 3.2 Proyecto de Automatización

Tal y como ilustra la Figura 1 la herramienta se ha de encargar de comunicar la maqueta con el proyecto de automatización que se estará ejecutando en un real o virtual. Por tanto, la herramienta es responsable de consultar las salidas y actualizar las entradas del controlador. Para ello, se ha de conocer las direcciones de E/S con las que se trabaja, así como la dirección IP del controlador.

Si el proyecto de automatización se ejecuta en un PLC real o virtual de Siemens (PLCSim):

- Hace falta una configuración específica del proyecto de automatización codificado en TIA Portal para dejar que desde el exterior se pueda acceder a la memoria de E/S. Consiste en otorgar a la CPU un nivel de acceso completo.
- El acceso a las direcciones de E/S se hace uso de Snap7 [32]; una suite de comunicaciones Ethernet multiplataforma de código abierto cuya API posibilita la interconexión con los PLC Siemens S7. En concreto se utilizan las funciones ilustradas en la Tabla 1.

Por otro lado, si el proyecto de automatización se ha realizado con Twincat, únicamente será necesario hacer uso de funciones facilitadas por ADS (Automation Device Specification) [33]. La Tabla 1 muestra las funciones necesarias.

Tabla 1: listado de funciones para lectura y escritura en PLCs

Snap 7	
Función	Propósito
<i>ConnectTo</i>	Conecta el objeto cliente nl PLC.
<i>SetConnectionType</i>	Establece el tipo de conexión (PG/OP/S7Basic).
<i>SetConnectionParams</i>	Establece los parámetros de la conexión.
<i>Disconnect</i>	Cierra la conexión con el PLC.
<i>ReadArea</i>	Lee el área de memoria del PLC indicado.
<i>WriteArea</i>	Escribe en el área de memoria del PLC indicado.
ADS	
Función	Propósito
<i>adsSyncReadReq</i>	Lee datos de forma síncrona del servidor ADS
<i>adsSyncWriteReq</i>	Escribe datos de forma síncrona

### 3.3 Integración y puesta en marcha

La herramienta propuesta se basa en Processing, un lenguaje de programación multiplataforma y entorno de desarrollo integrado, visual y gráfico, de código abierto basado Java orientado al diseño gráfico [34]. Processing va dirigido a gente creativa, sin tener que ser necesariamente programadores informáticos. Su entorno es muy similar al de Arduino IDE y destaca por permitir programar la visualización de elementos como figuras geométricas, vectores, imágenes, videos, etc.

Todo proyecto Processing (*sketch*) tiene dos funciones clásicas (*setup* y *draw*). La herramienta propuesta añade una tercera función (*setting*) encargada de interpretar los ficheros de configuración citados en apartados anteriores.

Las características y orden de ejecución de dichas funciones son:

1. *void setting()*: tiene como finalidad, la puesta en marcha del propio entorno Processing. Se ejecuta una sola vez y al comienzo del proyecto. Tras su ejecución, se conocen qué elementos/módulos forman la planta virtual.
2. *void setup()*: iniciación de cada uno de los módulos que componen la planta virtual. Se ejecuta una sola vez.
3. *void draw()*: se ejecuta cíclicamente y la secuencia de ejecución fijada es la siguiente:
  - a. Consultar las salidas del controlador. Para lo cual se hará uso de las funciones indicadas en la Tabla 1.
  - b. Aplicar lógica de los módulos de la maqueta virtual.
  - c. Refrescar el gráfico de la maqueta virtual.
  - d. Actualizar las entradas del controlador. Nuevamente, se hará uso de las funciones indicadas en la Tabla 1.

Se ha desarrollado una librería de clases java para facilitar el uso de los elementos básicos: cilindros, botoneras, señales luminosas... Estas clases están dotadas de métodos para aplicar tanto la lógica del módulo como su visualización, es decir, pasos b y c de la secuencia que se sigue dentro de la función *draw*.

## 4 CASO DE ESTUDIO

La Figura 3 presenta una maqueta real, muy utilizada en las prácticas de asignaturas de Grado y Másteres en la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Jaén de la UJA.

La asignatura de Automática Industrial se imparte en el segundo curso de todos los grados de Ingeniería Industrial de la UJA. Una de las prácticas realizada consiste en el presando de una pieza, para lo que se dispone de dos cilindros neumáticos (A y B) pilotados con válvulas electroneumáticas 5/2 una biestable y otra monoestable. El cilindro A (vertical) es el encargado de prensar la pieza, en tanto que el cilindro B (horizontal) tiene como objetivo expulsarla una vez que haya sido prensada. Inicialmente ambos cilindros han de encontrarse retraídos.

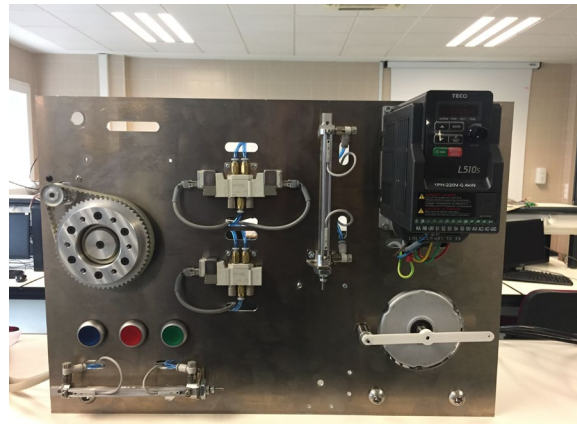


Figura 3: Maqueta disponible en laboratorios de la EPS

El operario tiene que colocar la pieza a prensar y posteriormente accionar el pulsador de marcha (PM). Una vez que el cilindro A se haya expandido, comienza la acción de prensado que tiene una duración de 6 segundos. Finalizado el prensado el cilindro A se contrae y se espera 2 segundos. Finalmente, se procede a expulsar la pieza para lo cual se ha de expandir el cilindro B durante 5 segundos, tras lo cual el cilindro se retrae y el automatismo queda listo para el siguiente prensado. Como se puede observar, los cilindros disponen de dos finales de carrera para saber si se encuentran contraídos o expandidos. El PLC utilizado para su automatización y control es S7 1200 de Siemens.

El curso académico 2020-2021 debido al COVID-19 el alumnado no pudo hacer uso de dicha maqueta. Y en su lugar se desarrolló la correspondiente maqueta virtual. La Figura 4 ilustra el fichero de configuración general, donde se hacen uso de dos cilindros y tres pulsadores, teniendo cada uno su correspondiente fichero de configuración (véase Figura 2).

```

1  ancho: 800
2  alto: 800
3  PLC: SIEMENS
4  ipAddress: 127.0.0.1
5  rack: 0
6  slot: 1
7  byteEntradas: 0
8  offsetEntradas: 2
9  byteSalidas: 0
10 offsetSalidas: 2
11
12 ## Parametros Cilindros
13 nombreCilindros:
14   - Config\\cilindroA.yml
15   - Config\\cilindroB.yml
16 nombrePulsadores:
17   - Config\\pulsadorRojo.yml
18   - Config\\pulsadorVerde.yml
19   - Config\\pulsadorAzul.yml

```

Figura 4: Fichero Configuración de maqueta de prensado

El proyecto generado automáticamente que permite generar la virtualización de la maqueta ilustrada en la Figura 3 sigue las pautas ilustrados en el apartado anterior.

En concreto, la función draw de dicha planta virtual, generada automáticamente a partir del fichero de configuración es la ilustrada en

```
@Override
public void draw() {
    //Limpiar pantalla.
    background(100);
    lights();
    // a. Consultar las salidas del controlador
    Client.ReadArea(S7.S7AreaPA, 0, dirBaseSalidas, offsetBaseSalidas, salidasPLC );
    // b. Actualizar posiciones objetos
    for (Cilindro cil : cilindros) {
        cil.update(entradasPLC, salidasPLC);
    }
    for (Pulsador pul : pulsadores) {
        pul.update(entradasPLC, salidasPLC);
    }
    //c. Dibujar Entorno
    for (Cilindro cil : cilindros) {
        cil.display();
    }
    for (Pulsador pul : pulsadores) {
        pul.display();
    }
    // d. Actualizar entradas PLC.
    Client.WriteArea(S7.S7AreaPE, 0, dirBaseEntradas, offsetBaseEntradas, entradasPLC );
}
```

Figura 5: Función Draw para la maqueta virtual de prensado.

Finalmente, la maqueta virtual tiene la apariencia ilustrada en la Figura 6

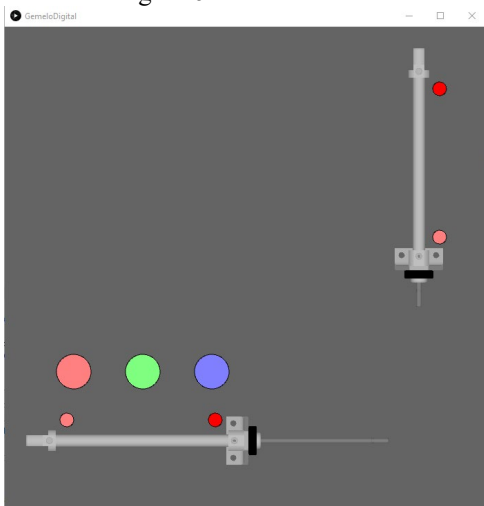


Figura 6: Maqueta virtual de prensado

## 5 CONCLUSIONES

El presente trabajo, se ha centrado en ofrecer unas pautas para la virtualización de maquetas de automatización. Aunque inicialmente tiene un carácter meramente docente, dicha aproximación también es válida para la definición de DT, entendido como modelo de simulación de alta precisión donde las E/S son las mismas que las de la planta real. La herramienta propuesta está basada en librerías de libre distribución y proporciona soporte para los fabricantes más extendidos en automatización, como son, Siemens y Beckhoff. Actualmente, las maquetas virtuales pueden estar formadas por elementos básicos como cilindro, sensores finales de carrera y pulsadores. En un futuro cercano se añadirán nuevas

clases para manejar objetos como cintas transportadoras...

La herramienta propuesta procesa la información del/los ficheros de configuración y genera automáticamente el código de proyecto Processing que da lugar a la maqueta virtual. Actualmente dicho(s) fichero(s) se generan a mano. Se está trabajando en ofrecer una interfaz gráfica que permita la generación automática del/los fichero(s) de configuración en formato yaml.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la subvención parcial de este trabajo a través de los proyectos PIMED01\_201921, PID2019-110291RB-I00.

## Referencias

- [1] S. Dormido, "Control learning: present and future," *Annu. Rev. Control*, vol. 28, no. 1, pp. 71–93, Jan. 2004.
- [2] L. D. FEISEL and A. J. ROSA, "The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education," *J. Eng. Educ.*, pp. 121–130, 2005.
- [3] S. R. Singer, M. L. Hilton, and H. A. Schweingruber, *America's Lab Report*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2005.
- [4] N. J. Nersessian, "Conceptual change in science and in science education," *Synthese*, vol. 80, no. 1, pp. 163–183, Jul. 1989.
- [5] M. P. Clough, "Using the laboratory to enhance student learning," *Learn. Sci. Learn.*, no. JANUARY 2002, pp. 85–94, 2002.
- [6] J. E. Corter, J. V. Nickerson, S. K. Esche, C. Chassapis, S. Im, and J. Ma, "Constructing reality: A Study of Remote, Hands-On, and Simulated Laboratories," *ACM Trans. Comput. Interact.*, vol. 14, no. 2, p. 7-es, Aug. 2007.
- [7] J. E. Corter, J. V. Nickerson, S. K. Esche, and C. Chassapis, "Remote versus hands-on labs: a comparative study," in *34th Annual Frontiers in Education, 2004. FIE 2004.*, 2004, pp. 595–599.
- [8] S. Chen, "The view of scientific inquiry conveyed by simulation-based virtual laboratories," *Comput. Educ.*, vol. 55, no. 3, pp. 1123–1130, Nov. 2010.
- [9] J. Ma and J. V. Nickerson, "Hands-on, simulated, and remote laboratories: A Comparative Literature Review," *ACM Comput. Surv.*, vol. 38, no. 3, p. 7-es, Sep. 2006.
- [10] H. Fry, S. Ketteridge, and S. Marshall, *A Handbook for Teaching and Learning in Higher Education*. 2009.
- [11] I. E. Allen, J. Seaman, R. Poulin, and T. T. Straut, "Online report card: Tracking online education in the United States," 2016.



- [12] E. Commission, "ICT in Education," Digital Single Market. Digital Economy & Society. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/ict-education>.
- [13] CRUE UNIVERSIDADES ESPAÑOLAS, "UNIVERSITIC 2015. Analisis de las TIC en las Universidades Españolas," 2015.
- [14] D. Olin, J. Bourne, F. Mayadas, and S. Consortium, "Online engineering education: Learning anywhere, anytime,," J. Eng. Educ., no. January, 2005.
- [15] I. Ruano Ruano, J. Gámez García, and J. Gómez Ortega, "Laboratorio Web SCORM de Control PID con Integración Avanzada," Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind. RIAI, vol. 13, no. 4, pp. 472–483, Oct. 2016.
- [16] J. Gómez-Ortega, I. Ruano-Ruano, J. Gámez-García, J. R. Balsas-Almagro, and A. Sánchez-García, "Laboratorio Remoto de un sistema de péndulo invertido sobre carro de trayectoria lineal." Jaén, p. 105, 2014.
- [17] B. Balamuralithara and P. C. Woods, "Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab," Comput. Appl. Eng. Educ., vol. 17, no. 1, pp. 108–118, Mar. 2009.
- [18] C. Martín-Villalba, A. Urquía, and S. Dormido, "Development of an industrial boiler virtual-lab for control education using Modelica," Comput. Appl. Eng. Educ., vol. 21, no. 1, pp. 36–45, Mar. 2013.
- [19] Dormido, R., Vargas, H., Duro, N., Sanchez, J., Dormido-Canto, S., Farias, G., & Dormido, S., 2008. Development of a web-based control laboratory for automation technicians: The three-tank system. Education, IEEE Transactions on, 51(1), 35-44.
- [20] Gómez-Estern, F., López-Martínez, M., & de la Peña, D. M., 2010. Sistema de Evaluación Automática VíaWeb en Asignaturas Prácticas de Ingeniería. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 7(3), 111-119. DOI: 10.1016/S1697-7912(10)70047-9.
- [21] UNILabs, Red de Laboratorios universitarios compartidos, 2021. Accesible online: <https://unilabs.dia.uned.es/blog/index.php?entryid=3>
- [22] García Aretio, Lorenzo (2021). COVID-19 y educación a distancia digital: preconfinamiento, confinamiento y posconfinamiento. Revista Iberoamericana de Educación a Distancia, 24(1), 9-25. Accesible online: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/3314/331464460001/331464460001.pdf>
- [23] Factory I/O, 2021. Accesible online: <https://factoryio.com/>
- [24] FluidSim, Festo ES, 2021. Accesible online: [https://www.festo.com/es/es/e/educacion/aprendizaje-digital/simulacion-virtual-y-modelacion-id\\_31275/](https://www.festo.com/es/es/e/educacion/aprendizaje-digital/simulacion-virtual-y-modelacion-id_31275/)
- [25] Gabor, T., Belzner, L., Kiermeier, M., Beck, M.T., Neitz, A., (2016) "A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems", 2016 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC), pp. 374-379.
- [26] Grieves, M., (2015) Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication.
- [27] Vachálek, J., Bartalský, L., Rovný, O., Šišmišová, D., Morháč, M., Lokšík, M., Hoffmeister, M., Zimmermann, P., (2017) "The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept", 2017 21st International Conference on Process Control (PC), pp. 258-262.
- [28] Schroeder, G., Steinmetz, C., Pereira, C.E., Muller, I., García, N., Espindola, D., Rodrigues, R., (2019) "Visualising the digital twin using web services and augmented reality", 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp 522-527.
- [29] Platenius-Mohr, M., Malakuti, S., Grüner, S., Goldsch, T., (2019) "Interoperable Digital Twins in IIoT Systems by Transformation of Information Models: A Case Study with Asset Administration Shell", Proceedings of the 9th International Conference on the Internet of Things, pp 1-8.
- [30] Weyer, S., Meyer, T., Ohmer, M., Gorecky, D., Zühlke, D., (2016) Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: an Example from the Automotive Industry, IFAC-PapersOnLine.
- [31] yaml, 2021. Accesible online: <https://yaml.org/>
- [32] Snap7, 2021. Accesible online: <http://snap7.sourceforge.net/>.
- [33] ADS - Automation Device Specification) 2021, Accesible online: [https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/ex8180\\_hw/5091854987.html&id=](https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/ex8180_hw/5091854987.html&id=).
- [34] Processing, 2021. Accesible online: <https://processing.org/>.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



# Desarrollo de un controlador predictivo con compensación por adelanto y garantía de estabilidad: Resultados preliminares

Igor M. L. Pataro<sup>a</sup>, Juan D. Gil<sup>a</sup>, Marcus V. Americano da Costa<sup>b</sup>, José L. Guzmán<sup>a</sup>,  
Manuel Berenguel<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Centro Mixto CIESOL, ceiA3, Universidad de Almería. Ctra. Sacramento s/n, Almería 04120, Spain

<sup>b</sup>Departamento de Ingeniería Química, Universidad Federal de Bahía, R. Prof. Aristides Novis, 2,  
Salvador, Bahía, Brazil

Correos: ilp428@inlumine.ual.es (Igor M. L. Pataro), juandiego.gil@ual.es (Juan D. Gil),  
marcus.americano@ufba.br (Marcus V. Americano da Costa), joseluis.guzman@ual.es (José L. Guzmán),  
beren@ual.es (Manuel Berenguel).

## Resumen

*Uno de los aspectos esenciales en el diseño de un sistema de control consiste en garantizar su estabilidad en bucle cerrado. Este artículo presenta un controlador predictivo basado en modelo de horizonte infinito con compensación por adelanto y garantía de estabilidad en bucle cerrado para sistemas estables. La estabilidad del controlador se garantiza mediante los conceptos de solución recursiva y disminución asintótica de la función de coste. La técnica desarrollada se prueba en simulación usando como sistema de referencia un campo de captadores solares de placa plana. Además, se presenta una comparación con el mismo enfoque de control pero sin incluir la compensación por adelanto. Los resultados obtenidos demuestran que la estrategia propuesta mejora el desempeño del controlador rechazando correctamente las perturbaciones y manteniendo las características de estabilidad nominal, lo que asegura la convergencia en bucle cerrado tanto para los problemas de seguimiento de referencia como de rechazo de perturbaciones.*

**Palabras clave:** Control predictivo basado en modelo, control por adelanto, control predictivo con horizonte infinito, energía solar.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las estrategias de control predictivo se basan en la minimización de un determinado criterio para mantener la salida del proceso lo más cerca posible a una trayectoria de referencia. Este criterio toma normalmente la forma de una función cuadrática del error entre la salida predicha y la trayectoria de referencia futura. Así, la función a minimizar depende esencialmente de un modelo del sistema, el cual se usa para predecir la salida de este a lo largo del horizonte de predicción considerado y de una serie de parámetros de ajuste, los cuales sirven para obtener el comportamiento deseado en bucle

cerrado. Independientemente de estos parámetros, cuando el modelo del sistema refleja fielmente el comportamiento de la planta real (caso nominal), se puede garantizar la estabilidad del controlador en bucle cerrado. Este tipo de controladores predictivos se conocen como estrategias de Control Predictivo basado en Modelo (MPC, por sus siglas en inglés) con garantía de estabilidad.

En la literatura, se pueden encontrar diferentes formulaciones MPC que garantizan la estabilidad en bucle cerrado del sistema de control [7]. Entre los diferentes enfoques, destacan las estrategias basadas en el uso de una función objetivo con horizonte de predicción infinito, las cuales se conocen como estrategias MPC de horizonte infinito (IH MPC, por sus siglas en inglés) [6]. En esta familia de controladores se pueden diferenciar dos categorías principales, (i) controladores por modo dual y (ii) controladores con restricción terminal, las cuales se diferencian entre sí en la formulación de la función objetivo y del propio problema de optimización [11]. Sin embargo, los enfoques basados en modo dual presentan varias limitaciones prácticas tales como un coste computacional alto, un dominio de atracción limitado, y un rendimiento del optimizador comprometido. Por este motivo, González et al. [4] propusieron añadir restricciones terminales para resolver los problemas de optimización incluidos en las técnicas IH MPC siguiendo las ideas presentadas en el trabajo de Rawlings y Muske [9] para sistemas lineales estables con restricciones politópicas. Por otro lado, la principal contribución del trabajo de Rodrigues y Odloak [10] fue la extensión de la formulación IH MPC para abordar de forma unificada los problemas de regulación y seguimiento para sistemas con polos estables, lo cual no se contempló en la formulación original de Rawlings y Muske [9]. Además, esta extensión aumentaba el dominio de atracción mediante el uso de variables de holgura que suavizan la restricción terminal del IH MPC, la cual asegura la factibilidad del problema de optimiza-

ción. De este modo, la formulación de Rodrigues y Odloak [10] se considera un hito en el desarrollo de controladores de horizonte infinito, destacando las formulaciones para sistemas con polos integradores inestables, únicos y múltiples.

La madurez actual de las técnicas de control IHMPC con garantía de estabilidad hace que estas estrategias tengan un atractivo especial para diferentes aplicaciones industriales, como el caso de campos solares térmicos [1, 2, 5]. Sin embargo, este tipo de plantas se caracterizan por estar constantemente afectadas por variables externas difícilmente predecibles, como la irradiación solar. Consecuentemente, las condiciones meteorológicas afectan directamente al sistema de control en forma de perturbación, lo cual justifica la búsqueda de técnicas que incluyan controladores por adelantado (FF, por sus siglas en inglés) para el rechazo de dichas perturbaciones.

Motivado por las necesidades específicas de control previamente mencionadas en plantas solares térmicas, este trabajo presenta un controlador predictivo nominal con compensación de perturbaciones y garantía de estabilidad. El controlador propuesto es una extensión de los trabajos de Rodrigues y Odloak [10] en el que se asegura la estabilidad nominal del controlador en base a los principios de solución recursiva y disminución asintótica de la función de coste. La estrategia se prueba en simulación usando como referencia un modelo validado de la planta termosolar del Centro Mixto CIESOL de la Universidad de Almería (España) [8] también utilizado en otros campos solares de placa plana en la Plataforma Solar de Almería [3] y se compara con un controlador basado en la formulación convencional IHMPC. Los resultados preliminares evidencian el buen desempeño de la técnica propuesta y las mejoras que se consiguen en presencia de perturbaciones medibles respecto a la formulación convencional.

Este trabajo se divide de la siguiente manera: La sección 2 presenta el modelo en estado de espacios parametrizado, incluyendo las perturbaciones medibles. La sección 3 detalla la formulación del controlador IHMPC con control por adelantado, el cual se referirá en adelante como IHMPC+FF (por sus siglas en inglés). Además, describe la prueba del teorema que garantiza la estabilidad nominal del controlador. La Sección 4 presenta los resultados en simulación, comparando el IHMPC+FF propuesto y el IHMPC sin compensaciones por adelantado. Finalmente, la Sección 5 resume las principales conclusiones del trabajo.

## 2. MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS

Esta sección presenta el modelado en espacio de estados extendido que se propone para la formulación del controlador IHMPC con compensación por adelantado. En primer lugar, se define el modelo de espacio de estados propuesto por Rodrigues y Odloak [10], el cual surge de la parametrización de la respuesta del sistema ante entradas en escalón:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}^i(k+1) \\ \mathbf{x}^s(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ny} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^i(k) \\ \mathbf{x}^s(k) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{B}^i \\ \mathbf{B}^s \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \Delta \mathbf{u}(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(k) = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ny} & \Psi \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^i(k) \\ \mathbf{x}^s(k) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

En este modelo,  $\mathbf{x}^s$  y  $\mathbf{x}^i$  reflejan, respectivamente, los estados integradores artificiales, que surgen por la formulación incremental de las entradas del modelo, y los estados estables, que provienen de los polos estables del sistema real. Las matrices auxiliares  $\mathbf{F}$  y  $\Psi$  se asocian con la respuesta libre del sistema y las salidas respectivamente. Las matrices de coeficientes  $\mathbf{B}^i$  y  $\mathbf{B}^s$  provienen de la expansión de la función de transferencia del sistema en forma de fracciones parciales, lo cual representa la influencia de los incrementos de la señal de control  $\Delta \mathbf{u}$ . Además, se definen  $ny$ ,  $ns$  y  $nu$  como el número de salidas, estados estables y entradas respectivamente.

Con base al modelo descrito anteriormente, el objetivo principal en este trabajo consiste en extender esta formulación para incluir el efecto de perturbaciones medibles. En esta extensión, se considera que las perturbaciones medibles no son variables manipulables del sistema, de forma que se mantiene el concepto básico del modelo presentado con anterioridad. Por lo tanto, el modelo en espacio de estados para la formulación del IHMPC+FF viene dado por la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}^i(k+1) \\ \mathbf{x}^s(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ny} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^i(k) \\ \mathbf{x}^s(k) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{B}^i \\ \mathbf{B}^s \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \Delta \mathbf{u}(k) + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{D}^i \\ \mathbf{D}^s \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}} \Delta \mathbf{d}(k), \quad (3)$$

$$\mathbf{y}(k) = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ny} & \Psi \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^i(k) \\ \mathbf{x}^s(k) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

En este caso,  $D^i$  y  $D^s$  provienen de la descomposición en fracciones parciales de la función de transferencia de las perturbaciones, y  $nd$  representa el número de perturbaciones que afectan al sistema, las cuales se engloban en el vector  $\Delta d$ . Se debe remarcar nuevamente que las ecuaciones (3) y (4) son una extensión de modelo presentado por Rodrigues y Odloak [10] incluyendo solo el término  $\Delta d$ , sin alterar la formulación básica del modelo.

### 3. DESARROLLO DEL CONTROLADOR IHMPC CON COMPENSACIÓN POR ADELANTO

Considerando el modelado descrito en las ecuaciones (3) y (4), y siguiendo la formulación IHMPC con variables de holgura propuesta en [10], la estrategia convencional IHMPC se puede formular como sigue:

**Problema 1:**

$$\min_{\Delta u_k, \delta_{y,k}} J_{k,1},$$

donde:

$$J_{k,1} = \sum_{j=1}^{\infty} \|y(k+j|k) - y_{sp} - \delta_{y,k}\|_{Q_y}^2 + \sum_{j=0}^{m-1} \|\Delta u(k+j|k)\|_{R}^2 + \|\delta_{y,k}\|_{S_y}^2 \quad (5)$$

sujeto a:

$$U = \begin{cases} \Delta u_{\min} \leq \Delta u(k+j|k) \leq \Delta u_{\max}, \\ \Delta u(k+j|k) = 0, j > m, \\ u_{\min} \leq u(k+j|k) \leq u_{\max}, \end{cases} \quad (6)$$

$$x^i(k|k) + B_m^i \Delta u_k - y_{sp} - \delta_{y,k} = 0 \quad (7)$$

donde

$$\Delta u_k = [\Delta u(k|k)^\top \Delta u(k+1|k)^\top \dots \Delta u(k+m-1|k)^\top]^\top,$$

$$\Delta d_k = [\Delta d(k|k)^\top \Delta d(k+1|k)^\top \dots \Delta d(k+m-1|k)^\top]^\top,$$

$y_{sp}$  es el vector de referencias del sistema y  $m$  es el horizonte de control. En esta formulación, las variables de holgura  $\delta_{y,k}$  se utilizan para suavizar la restricción terminal descrita en la ecuación (7), y, además, contribuyen a incrementar el dominio de atracción del problema y a hacer que este siempre

sea factible. Las matrices  $Q_y$ ,  $R$ , y  $S_y$  son matrices de pesos que se usan como parámetros de ajuste del controlador. Nótese que en la matriz  $S_y$  se deben usar pesos con valores altos para forzar que solo se usen las variables de holgura cuando sean estrictamente necesarias. El teorema y la prueba de estabilidad del controlador formulado se puede consultar en el trabajo de Rodrigues y Odloak [10].

De este modo, y siguiendo la misma idea que el IHMPC, el problema de optimización considerado en el controlador IHMPC+FF viene dado por la siguientes ecuaciones:

**Problema 2:**

$$\min_{\Delta u_k, \delta_{y,k}} J_{k,2},$$

donde:

$$J_{k,2} = J_{k,1} \quad (8)$$

sujeto a:

$$\text{Ec. (6)}, \quad (9)$$

$$x^i(k|k) + B_m^i \Delta u_k + D_m^i \Delta d_k - y_{sp} - \delta_{y,k} = 0. \quad (10)$$

En esta formulación, la función objetivo es la misma que la que se usa en la formulación convencional del IHMPC. Sin embargo, los modelos usados en  $J_{k,2}$  son los presentados en las ecuaciones (3) y (4). Esta diferencia en los modelos hace que la restricción terminal de la formulación clásica IHMPC se debe modificar, añadiendo un nuevo término que considere el efecto de las perturbaciones tal y como se presenta en la ecuación (10).

La garantía de estabilidad del controlador IHMPC+FF viene dada por la prueba del siguiente teorema:

**Teorema:** Dado un sistema con polos estables y perturbaciones medibles, y considerando que las perturbaciones se pueden predecir a lo largo del horizonte de predicción; si en el instante de muestreo  $k$  existe una solución factible del **Problema 2**, y el sistema se controla en el punto deseado en estado estacionario, entonces la solución al **Problema 2** originará señales de control que llevarán a las salidas del sistema al punto de equilibrio deseado en bucle cerrado, siendo asintóticamente convergente.

**Prueba:** La prueba del **Teorema** sigue los mismos principios que los usados en el trabajo de Rawlings y Muske [9] y en el trabajo de Rodrigues y Odloak [10], los cuales se basan en la solución recursiva y convergencia asintótica de la función

de coste. En primer lugar, para la solución recursiva, considerando que en el instante  $k$  se obtiene la siguiente solución óptima:

$$\Delta \mathbf{u}_k^* = [\Delta \mathbf{u}^*(k|k)^\top \Delta \mathbf{u}^*(k+1|k)^\top \cdots \cdots \Delta \mathbf{u}^*(k+m-1|k)^\top]^\top, \\ \delta_{y,k}^*,$$

la cual produce un valor mínimo de la función de coste  $J_k^*$ , y considerando también que la señal de control  $\Delta \mathbf{u}^*(k|k)$  se implementa en la planta real usando una estrategia de horizonte deslizante, de modo que en el instante  $k+1$  el **Problema 2** se resuelve de nuevo. Al trabajar con un escenario

nominal, la solución en el instante  $k+1$  será una solución heredada de la solución en el instante  $k$ :

$$\Delta \tilde{\mathbf{u}}_{k+1} = [\Delta \mathbf{u}^*(k+1|k)^\top \Delta \mathbf{u}^*(k+2|k)^\top \cdots \cdots \mathbf{0}^\top]^\top,$$

$$\tilde{\delta}_{y,k+1} = \delta_{y,k}^*.$$

Así, es fácil comprobar que  $\tilde{\mathbf{u}}_{k+1}$  puede satisfacer las restricciones del problema de optimización, ya que la única diferencia con el término  $\Delta \mathbf{u}_k^*$  es el  $\mathbf{0}$ , el cual se incluye en todo el conjunto de restricciones. De modo que, para satisfacer la ecuación (10) considerando la restricción terminal en el instante  $k+1$ :

$$\underbrace{\mathbf{x}^i(k+1|k+1)}_{\mathbf{x}^i(k+1|k)} + B_m^i \Delta \tilde{\mathbf{u}}_{k+1} + D_m^i \Delta \mathbf{d}_{k+1} - \mathbf{y}_{sp} - \tilde{\delta}_{y,k+1} = 0 \\ \underbrace{\mathbf{x}^i(k|k) + B^i \Delta \mathbf{u}^*(k|k) + D^i \Delta \mathbf{d}(k|k)}_{\mathbf{x}^i(k+1|k)} + B_m^i \Delta \tilde{\mathbf{u}}_{k+1} + D_m^i \Delta \mathbf{d}_{k+1} - \mathbf{y}_{sp} - \tilde{\delta}_{y,k+1} = 0 \quad (11) \\ \underbrace{\mathbf{x}^i(k|k) + B_m^i \Delta \mathbf{u}_k^* + D_m^i \Delta \mathbf{d}_k - \mathbf{y}_{sp} - \tilde{\delta}_{y,k}^*}_{E.c. (7)=0} + \underbrace{D^i \Delta \mathbf{d}(k+m|k+1)}_{= \Delta \mathbf{d}(k+m/k)=0} = 0$$

donde las matrices  $D_m^i$  y  $B_m^i$  se definen como sigue:

$$B_m^i = \begin{bmatrix} B^i & \cdots & B^i \\ m \end{bmatrix} \\ D_m^i = \begin{bmatrix} D^i & \cdots & D^i \\ m \end{bmatrix}$$

**Observación 1:** De la ecuación (11), se puede deducir que los incrementos predichos de las perturbaciones deben ser cero al final del horizonte de control. Esta afirmación se puede satisfacer siempre y cuando se escojan valores bajos para el horizonte de control  $m$ , de forma que las variaciones en las perturbaciones sean muy pequeñas y se puedan despreciar.

Como en la solución heredada  $\tilde{\mathbf{u}}_{k+1}$  y  $\tilde{\delta}_{y,k+1}$  son una solución factible, donde  $\tilde{J}_{k+1,2}$  es su coste asociado en el instante  $k+1$ . Se puede comprobar cómo la única diferencia en el valor de la función de coste en el instante  $k+1$  y en instante  $k$  es el primer término del vector de señales de control  $\Delta \mathbf{u}^*(k|k)$ , que será el implementado en la planta real. Por tanto, las diferencias en la función de coste se pueden describir como sigue:

$$J_{k,2}^* - \tilde{J}_{k+1,2} = \|\mathbf{y}(k+1|k) - \mathbf{y}_{sp}(k+1) - \delta_{y,k}^*\|_{Q_y}^2 \\ + \|\Delta \mathbf{u}(k|k)\|_{R}^2 + \|\delta_{y,k}^*\|_{S_y}^2 \quad (12)$$

Como  $Q_y$ ,  $R$  y  $S$  son matrices definidas positivas, se puede comprobar como  $J_{k,2}^* \geq \tilde{J}_{k+1,2}$ . Consecuentemente,  $\Delta \tilde{\mathbf{u}}_{k+1}$  y  $\tilde{\delta}_{y,k+1}$  representan una solución factible para el **Problema 2** en el instante  $k+1$ , de forma que  $J_{k,2}^* \geq \tilde{J}_{k+1,2} \geq J_{k+1,2}^*$ . Por tanto, la función de coste  $J_{k,2}$  va decreciendo, lo que prueba el teorema previamente formulado.

## 4. RESULTADOS EN SIMULACIÓN

Esta sección muestra diferentes resultados en simulación obtenidos con la estrategia de control propuesta (IHMP+FF) aplicada a un campo solar térmico de placas planas. Además, estos resultados se comparan con los obtenidos con la estrategia convencional IHMP+FF con el objetivo de demostrar las ventajas que se obtienen en el rechazo de perturbaciones. Se debe mencionar que los controladores se implementaron de acuerdo a los problemas de optimización establecidos en la Sec-

ción 3, en el cual IHMPC+FF es el problema formulado en **Problema 2** y IHMPC es el diseñado en el **Problema 1**. Además, con el fin de evidenciar las principales diferencias entre la estrategia de control propuesta (IHMPC+FF) y la estrategia convencional (IHMPC), en la Figura 1 se muestra un diagrama esquemático descriptivo que resume la forma en la que se implementaron ambas estrategias. Observe que el modelo de proceso es el mismo que el modelo interno del controlador, en el que se mantiene la simulación de caso nominal.

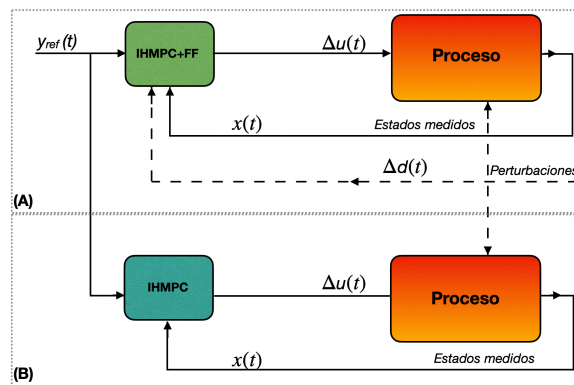


Figura 1: Estructuras de control IHMPC+FF (A) y IHMPC (B).

Se debe comentar también que el campo solar térmico es un sistema de especial interés para la prueba de la técnica propuesta ya que sufre constantes perturbaciones debidas a los cambios naturales de la radiación y temperatura ambiente. De este modo, considerando el modelo linealizado del campo solar [2], la matriz de funciones de transferencia en el punto de operación elegido para las pruebas es:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{-0,5304}{26,02 \cdot s + 1} & \frac{0,02474}{26,02 \cdot s + 1} & \frac{0,09728}{26,02 \cdot s + 1} & \frac{0,9027}{26,02 \cdot s + 1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

donde  $y(s) = T_{out}(s)$  es la temperatura de salida del campo de captadores, y las entradas y perturbaciones son  $u(s) = [\Delta q(s), \Delta I(s), \Delta T_a(s), \Delta T_{in}(s)]^T$ , las cuales corresponden con el caudal, la radiación, la temperatura ambiente y la temperatura de entrada respectivamente. Los estados iniciales de la simulación se establecen como  $u = [6,96 \text{ m}^3/\text{h}, 265,75 \text{ W/m}^2, 13,07^\circ\text{C}, 41,87^\circ\text{C}]^T$  y  $T_{out} = 45,73^\circ\text{C}$ . Además, para la comparación de los controladores, ambos se sintonizaron con los mismos parámetros de ajuste los cuales son:  $m = 8$ ,  $\mathbf{Q}_y = 20\text{diag}(m)$ ,  $\mathbf{R} = 10^{-3}\text{diag}(m)$ ,  $\mathbf{S}_y = 10^6$ ,  $\mathbf{u}_{\max} = 13,06 \text{ [m}^3/\text{h]}$ ,  $\mathbf{u}_{\min} = -3,94 \text{ [m}^3/\text{h]}$  y  $\Delta \mathbf{u}_{\max} = -\Delta \mathbf{u}_{\min} = 1 \text{ [m}^3/\text{h}]$ .

La simulación se realizó con un tiempo de muestreo de  $T_s = 1 \text{ s}$ . Las variaciones en las pertur-

baciones se implementaron con un orden de magnitud mayor que las que ocurren en experiencias reales con el objetivo de demostrar el buen desempeño de la estrategia propuesta. Por otro lado, solo se introdujeron variaciones puntuales en las perturbaciones con el objetivo de visualizar de una forma más clara su efecto. Así, en el instante  $t = 10 \text{ s}$ , se introdujo un pulso de perturbación por 30 s, en el que la  $I$  se redujo en  $350 \text{ W/m}^2$ , la  $T_a$  se redujo en  $2^\circ\text{C}$  y la  $T_{in}$  se redujo en  $3^\circ\text{C}$ . Finalmente, en el instante  $t = 70 \text{ s}$  se introdujo un cambio en la referencia para probar el desempeño del controlador ante esta situación. De esta forma, la referencia de  $T_{out}(t)$  se redujo en  $1.5^\circ\text{C}$ . Todo lo descrito se presenta en la Figura 2.

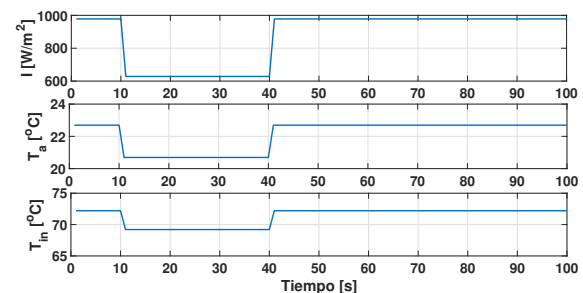


Figura 2: Variaciones en las perturbaciones durante la simulación.

La Figura 3 muestra las salidas del sistema y las entradas proporcionadas por cada controlador para el escenario de simulación descrito previamente. Como se puede apreciar, el controlador IHMPC+FF actuó un instante antes que el IHMPC en términos de  $q(t)$  y  $T_{out}(t)$ . Esto demuestra que la compensación por adelantado de la técnica IHMPC+FF funcionó correctamente, rechazando las perturbaciones antes de que estas alteraran al sistema. Para el caso de seguimiento de referencias, ambos controladores funcionaron de forma idéntica ya que no hubo perturbaciones durante el cambio de referencias.

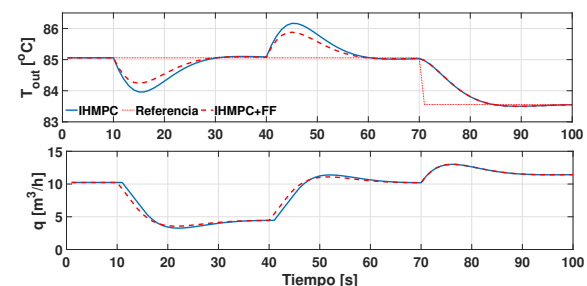


Figura 3: Entradas y salidas del sistema con los controladores IHMPC+FF e IHMPC.

Por otra parte, las Figuras 4 y 5 muestran la evolución de las variables de holgura y la función

de coste para ambos controladores durante la simulación. Se debe remarcar que el parámetro de ajuste  $S_y$  garantizó que las variables de holgura se usaran solo cuando fuera estrictamente necesario, siendo cero en estado estacionario (ver Figura 4). Además, se puede observar como la función de coste decreció asintóticamente (ver Figura 5).

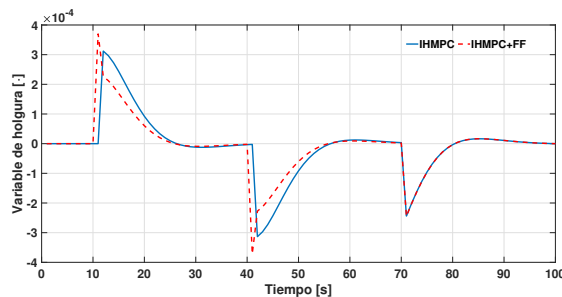


Figura 4: Evolución de las variables de holgura para el caso de IHMPC+FF y IHMPC durante la simulación.

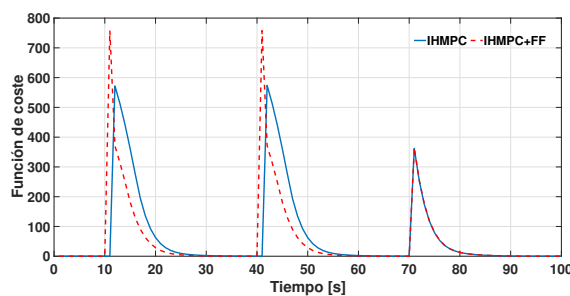


Figura 5: Evolución de la función de coste para el caso de IHMPC+FF y IHMPC durante la simulación.

Para cuantificar de forma numérica el desempeño de ambos controladores, en la Tabla 1 se presenta el valor de los índices IAE e ITAE para la simulación mostrada. El primer índice se calculó considerando la magnitud del error durante toda la simulación, mientras que en el segundo se consideró solo el tiempo durante el cual se produjo el error. Como se puede apreciar, el controlador IHMPC+FF presentó mejores resultados para ambos índices, con un valor de IAE del 10.74 % y de ITAE del 15.07 % más bajo que el IHMPC.

Cuadro 1: Índices de rendimiento para los controladores IHMPC+FF y IHMPC.

	IHMPC+FF	IHMPC
ITAE	$1.24 \cdot 10^3$	$1.46 \cdot 10^3$
IAE	29.10	32.60

## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un controlador predictivo con compensación por adelanto y garantía de estabilidad para sistemas estables. En concreto, se desarrolla una estrategia MPC de horizonte infinito que garantiza la estabilidad en bucle cerrado y que compensa las perturbaciones que afectan al sistema en una única capa de control. La estabilidad del controlador se garantiza utilizando los conceptos de solución recursiva y decrecimiento asintótico de la función de coste. La técnica propuesta se prueba en simulación usando como planta de referencia un campo solar de captadores de placa plana. Además, se presenta una comparación con la estrategia convencional MPC de horizonte infinito pero sin incluir la compensación por adelanto. Los resultados obtenidos evidencian que la estrategia propuesta mejora el desempeño del controlador rechazando adecuadamente las perturbaciones al mismo tiempo que mantiene las características nominales de estabilidad, lo que asegura la convergencia en bucle cerrado tanto para los problemas de seguimiento de referencia como de rechazo de perturbaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte económico del Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq, Brasil) que ha financiado parte de este trabajo bajo la beca con código 201143/2019-4. Además, este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto “Microrredes para el autoabastecimiento solar de entornos productivos aislados (Microprod-Solar)” con código PCI2019-103378, financiado por la Agencia estatal de Investigación del Gobierno de España y por el Programa Iberoamericano de Ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED).



## English summary

### A stabilizing predictive controller with feedforward action: Preliminary results

#### Abstract

*This paper presents a nominal stabilizing predictive controller with a feedforward action for stable systems. An infinite horizon model predictive controller is developed to guarantee closed-loop stability and compensating disturbances in a single layer controller. The controller stability is assured using the recursive solution and the asymptotical decreasing of the cost function concepts. The infinite horizon predictive controller with feedforward action is implemented in a simulation scenario of a solar collector field in which it is compared to the same control approach without the disturbance compensations. It is demonstrated that the novel strategy can improve the control performance by correctly rejecting the disturbances and keeping the nominal stability features, leading to the convergence of the closed-loop system both for the reference tracking and measured disturbances scenarios.*

**Keywords:** Model predictive controller, feedforward action, infinite horizon predictive controller, solar collector field.

#### Referencias

- [1] A. Alsharkawi and J. A. Rossiter. Dual mode MPC for a concentrated solar thermal power plant. *IFAC-PapersOnLine*, 49(7):260–265, 2016.
- [2] E. F. Camacho, M. Berenguel, and F. R. Rubio. *Advanced Control of Solar Plants*. Springer, London, England, 2012.
- [3] J. D. Gil, L. Roca, and M. Berenguel. Modelling and automatic control in solar membrane distillation: Fundamentals and proposals for its technological development. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 17(4):329–343, 2020.

- [4] A. H. González, E. J. Adam, M. G. Marcovecchio, and D. Odloak. Application of an extended IHMPC to an unstable reactor system: Study of feasibility and performance. *Journal of Process Control*, 21(10):1493–1503, 2011.
- [5] G. Marchante, A. Acosta, A. González, J. Zammarreño, and V. Álvarez. Evaluación de restricciones de confort en controlador predictivo para la eficiencia energética. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 18(2):146–159, 2021.
- [6] D. Q. Mayne. Model predictive control: Recent developments and future promise. *Automatica*, 50(12):2967–2986, dec 2014.
- [7] D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao, and P. O. Scokaert. Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36(6):789–814, 2000.
- [8] M. Pasamontes, J. Álvarez, J. Guzmán, and M. Berenguel. Hybrid modeling of a solar cooling system. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(17):26 – 31, 2009. 3rd IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems.
- [9] J. B. Rawlings and K. R. Muske. The stability of constrained receding horizon control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38:1512 – 1516, 1993.
- [10] M. A. Rodrigues and D. Odloak. MPC for stable linear systems with model uncertainty. *Automatica*, 39(4):569–583, 2003.
- [11] J. A. Rossiter. *Model-based predictive control: a practical approach*. Press, CRC, 1 edition, 2003.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

## Optimización de temperatura en reactores raceway para la producción de microalgas mediante regulación de nivel

José González<sup>1</sup>, Enrique Rodríguez<sup>2</sup>, José Luis Guzmán<sup>3</sup>, Manuel Berenguel<sup>3</sup>, Francisco Gabriel Acién<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dep. de Informática, Universidad de Almería, 04120, España, jgh043@ual.es

<sup>2</sup>Dep. of Mechanical and Industrial Engineering, Universidad de Brescia, 25123, Italia, e.rodriguezmiran@unibs.it

<sup>3</sup>Dep. de Informática, Universidad de Almería, CIESOL ceiA3, 04120 Almería, España, [joguzman,beren]@ual.es

<sup>4</sup>Dep. de Ingeniería Química, Universidad de Almería, CIESOL ceiA3, 04120 Almería, España, facien@ual.es

### Resumen

*Además del pH y el oxígeno disuelto, otros parámetros que afectan de forma considerable al crecimiento de las microalgas son la radiación solar y la temperatura. Una temperatura inadecuada reduce de manera notoria la productividad de biomasa en los fotobiorreactores y puede incluso causar el colapso total de los cultivos. El control directo de la temperatura en reactores abiertos a gran escala se considera inviable debido a la gran cantidad de energía requerida, por lo que solo queda la opción de usar sistemas pasivos o semipasivos. Este artículo presenta un método indirecto para la optimización de la temperatura en estos sistemas mediante la variación del nivel del cultivo haciendo uso de predicciones meteorológicas.*

**Palabras clave:** Microalgas; Reactores abiertos; Optimización de temperatura

### 1. INTRODUCCIÓN

La influencia de la temperatura en los cultivos de microalgas es un aspecto crucial, no solo en la producción de biomasa sino también en la elección de las zonas de producción, ya que puede afectar negativamente al cultivo cuando la temperatura supera ciertos límites [9]. Se ha demostrado que el efecto de las altas temperaturas es perjudicial para la producción de biomasa, como se describe en [2], donde se modela el impacto de las altas temperaturas sobre la actividad y la viabilidad de las algas. Por otro lado, las bajas temperaturas reducen el crecimiento hasta que se detiene, pero sin afectar negativamente a la salud celular. Es por ello que las altas temperaturas son más críticas.

A pesar de que la influencia de la temperatura en el cultivo de microalgas en exterior está ampliamente analizada y estudiada en la literatura, las técnicas de control de temperatura son escasas [6]. Es posible encontrar algunos estudios de control de temperatura en fotobiorreactores cerrados, como en [11], ya que es posible instalar intercambiadores de calor en las columnas de burbujeo. Por otro lado, en [7], se propone un intercambiador de calor basado en el calor obtenido de los gases de combustión para calentar el volumen del reactor con fines de regulación de la temperatura. Sin embargo, aunque esta solución está disponible desde un punto de vista técnico, requiere una instalación compleja y costosa. Una de las técnicas más interesantes se presenta en [4], donde se utiliza una estrategia de optimización basada en un modelo de predicción de la productividad de microalgas junto con previsiones meteorológicas. En este estudio, los caudales de cosechado y dilución se controlan para mantener la concentración de biomasa y la temperatura del reactor en sus valores óptimos en dos zonas de Francia. Posteriormente, esta estrategia se utilizó en [5] para analizar la mejora de la productividad en la operación del reactor.

En línea con el concepto presentado en [4] y [5], en este trabajo se presenta un método indirecto para la optimización de la temperatura en reactores abiertos de tipo raceway a partir de la regulación del nivel de cultivo mediante un modelo de estimación del crecimiento de microalgas y predicciones meteorológicas. El control del nivel de líquido en el reactor se realiza mediante los procesos de cosechado y dilución, siendo un método que no requiere el uso o instalación de nuevos dispositivos para enfriar o calentar el

cultivo en el reactor. La idea central se basa en la influencia de las condiciones atmosféricas y el nivel en la temperatura del reactor. Se ha diseñado un optimizador que determina el nivel de cultivo que minimiza la diferencia entre la temperatura del reactor y la temperatura óptima de cultivo para la cepa de microalgas seleccionada. Sin embargo, a diferencia de la estrategia presentada en [4, 5], donde el cosechado y la dilución se realizan al mismo tiempo con su correspondiente variable de flujo, en el enfoque presentado en este trabajo, estos procesos no son simultáneos, es decir, si el proceso de dilución está activo, no se realiza cosecha y viceversa. Una diferencia apreciable entre ambos enfoques reside en el cálculo de las tasas de dilución, en este caso fijas y establecidas en base a la experiencia de operación y dependiendo de la temporada del año. Por otro lado, se utiliza una función de coste diferente, donde en este enfoque se selecciona el nivel de líquido en el reactor como variable de decisión en lugar de los caudales.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Reactor abierto de microalgas

En este trabajo la producción de microalgas se ha realizado en dos reactores abiertos de tipo raceway de iguales características, localizados en el centro de investigación "IFAPA", próximo a la Universidad de Almería. De esta forma, ha sido posible implementar el optimizador en uno de ellos y comparar los resultados obtenidos frente a la operación tradicional.

Los reactores (ver Figura 1) están compuestos por dos canales de 40 metros de longitud, 1 metro de ancho y 0.3 metros de altura unidos por un acople en forma de U. Esto ofrece una superficie total de  $80 \text{ m}^2$  y esta característica constructiva proporciona una relación entre el volumen y el nivel del medio de 800 litros/cm.

La cepa de microalgas utilizada en el reactor corresponde a la especie *Scenedesmus almeriensis* (CCAP 276/24). Un estudio detallado sobre sus parámetros y condiciones característicos relacionados con el pH, el oxígeno disuelto y la



Figura 1: Reactores raceway (Centro IFAPA).

temperatura se puede encontrar en [1]. El valor de pH varía de 3 a 10, pero la tasa de fotosíntesis neta se alcanza a pH 8. Respecto a la temperatura, el valor varía de  $12$  a  $46^\circ\text{C}$ , pero la temperatura óptima es de  $28^\circ\text{C}$ , siendo el valor de referencia durante el proceso de optimización.

### 2.2. Modelos de temperatura y crecimiento

El núcleo de la metodología propuesta son el modelo de temperatura del reactor raceway y el modelo de velocidad de crecimiento de microalgas, que se utilizan durante la fase de optimización de nivel de cultivo. Estos dos modelos se describen brevemente en las siguientes secciones.

#### Modelo de temperatura

El modelo de temperatura utilizado en este trabajo se presenta en detalle en [10], donde se describe el modelo completo y se valida con datos de un año completo. La temperatura del cultivo se calcula a partir de un balance térmico en el reactor, de tal manera que la temperatura del cultivo se puede estimar a partir de una serie de variables de entrada ambientales que son la radiación solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa y la velocidad del viento. Otras variables de entrada son el nivel de cultivo y la temperatura del suelo, que pueden estimarse fácilmente, en lugar de medirse. Se utilizó un conjunto de datos extenso para validar el modelo en una amplia gama de condiciones de temperatura para diferentes meses.

Como se muestra en [10], la evolución dinámica

de la temperatura se obtiene a partir del balance térmico del reactor en equilibrio, representado con la siguiente ecuación (1):

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{Q_{acumulado}}{h \cdot A \cdot C_p \cdot \rho}$$

$$Q_{acumulado} = Q_{irradiancia} + Q_{radiación} + Q_{evaporación} + Q_{convección} + Q_{conducción} + Q_{dilución} - Q_{cosechado} \quad (1)$$

donde  $T_w$  [°C] es la temperatura del cultivo en el reactor,  $h$  [m] representa el nivel del cultivo,  $A$  [m<sup>2</sup>] es la superficie del reactor,  $C_p$  [J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>] es la capacidad calorífica específica del cultivo,  $\rho$  [kg m<sup>-3</sup>] es la densidad del cultivo,  $Q_{irradiancia}$  [W] representa el flujo de calor de irradiancia,  $Q_{radiación}$  [W] es el flujo de calor de la radiación de onda larga,  $Q_{evaporación}$  [W] muestra el flujo de calor producido por el proceso de evaporación en el reactor,  $Q_{convección}$  [W] es el flujo de calor causado por convección,  $Q_{conducción}$  [W] representa el flujo de calor entre el reactor y la capa bajo el mismo a través del proceso de conducción,  $Q_{dilución}$  [W] es el flujo de calor intercambiado cuando se añade nuevo medio al reactor durante la dilución, y  $Q_{cosechado}$  [W] es el flujo de calor que se elimina cuando se extrae medio del reactor durante el proceso de cosechado.

A partir del modelo descrito y las condiciones de temperatura iniciales, es posible estimar la temperatura en el reactor *raceway* a lo largo del tiempo. Como puede verse en la Ecuación (1), la temperatura depende del nivel ( $h$ ).

### Modelo de velocidad de crecimiento

El modelo de crecimiento específico de microalgas más utilizado establece que la tasa de crecimiento de microalgas,  $\mu_{alg}$ , se compone de cuatro factores que dependen de la disponibilidad de luz dentro del cultivo ( $I_{av}$ ), la temperatura del cultivo ( $T_w$ ), el pH y el oxígeno disuelto ( $DO$ ) en el reactor. El modelo de crecimiento específico se describe mediante la siguiente ecuación (2):

$$\mu_{alg} = \mu_{alg}(I_{av}) \cdot \overline{\mu_{alg}}(T_w) \cdot \overline{\mu_{alg}}(pH) \cdot \overline{\mu_{alg}}(DO) \quad (2)$$

El principal nutriente limitante que es característico de las microalgas es la limitación de la luz ( $\mu_{alg}(I_{av})$ ), que se describe en detalle por en [8], siendo una función que depende de la radiación fotosintética y la disponibilidad de luz en el reactor. Los factores referentes a la temperatura ( $\overline{\mu_{alg}}(T_w)$ ), pH ( $\overline{\mu_{alg}}(pH)$ ) y oxígeno disuelto ( $\overline{\mu_{alg}}(DO)$ ) son funciones normalizadas que dependen respectivamente de cada una de las variables y modifican la tasa de crecimiento. Para este trabajo, el pH y el oxígeno disuelto se consideran controlados y ponderados con un valor unitario en la ecuación de la tasa de fotosíntesis (2). Por lo tanto, el crecimiento de microalgas depende solo de la luz y la temperatura.

El índice de temperatura  $\overline{\mu_{alg}}(T_w)$ , expresado en [3], es un término normalizado que representa la influencia de la temperatura en el crecimiento de microalgas, directamente relacionado con el crecimiento de biomasa, donde la unidad significa el rendimiento máximo debido a una temperatura óptima del cultivo. El rendimiento del crecimiento de la biomasa puede verse disminuido por el efecto de la temperatura y, por tanto, temperaturas por encima o por debajo de los límites característicos de las microalgas darían como resultado un crecimiento nulo, o incluso provocar la muerte celular. El factor de temperatura se puede obtener de la siguiente ecuación (3):

$$\overline{\mu_{alg}}(T_w) = \frac{N_{alg,T}}{D_{alg,T}}$$

donde

$$N_{alg,T} = (T_w - T_{max,alg}) \cdot (T_w - T_{min,alg})^2$$

$$D_{alg,T} = (T_{opt,alg} - T_{min,alg}) \cdot ((T_{opt,alg} - T_{min,alg}) \cdot (T_w - T_{opt,alg}) - (T_{opt,alg} - T_{max,alg}) \cdot (T_{opt,alg} + T_{min,alg} - 2 \cdot T_w)) \quad (3)$$

donde  $T$  [°C] es la temperatura del cultivo en el reactor,  $T_{opt}$  [°C] es la temperatura de crecimiento óptima de las microalgas,  $T_{max}$  [°C] es la temperatura máxima que soporta la cepa de microalgas y  $T_{min}$  [°C] es la temperatura mínima para la cepa de microalgas.

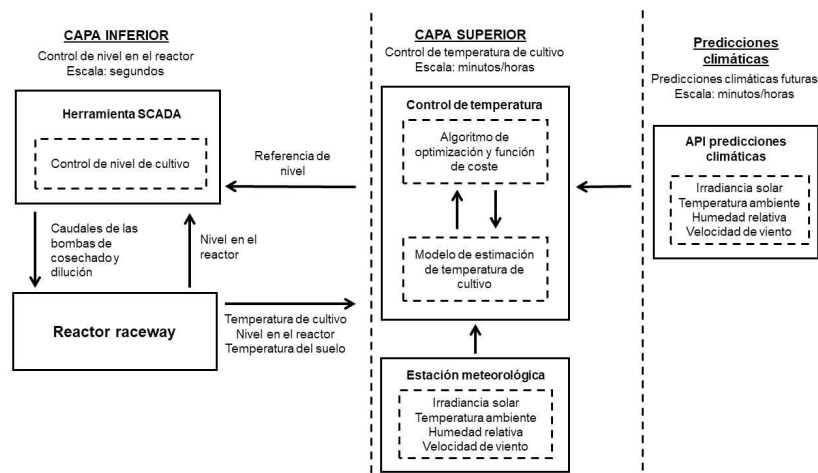


Figura 2: Esquema de control jerárquico.

### 2.3. Problema de optimización

El objetivo de la optimización consiste en mantener la temperatura del cultivo  $T_w$  lo más cercana posible a la temperatura óptima de crecimiento de la cepa  $T_{opt}$  ( $28^\circ\text{C}$ ). De esta forma, se incrementará el índice de temperatura normalizado dado por (3) y así se maximizará la velocidad de crecimiento y la productividad de la biomasa.

El problema de control se divide en dos capas, siguiendo el esquema de la Figura 2. La capa superior, donde el optimizador calcula el nivel de líquido óptimo en el reactor de acuerdo con la función de coste propuesta, las condiciones ambientales y las predicciones meteorológicas. En la capa inferior, se realiza un control Todo/Nada del nivel de cultivo mediante las bombas de cosechado y dilución.

De esta forma, en cada instante de optimización, se realiza una simulación de la temperatura del cultivo hacia el siguiente instante, teniendo en cuenta diferentes niveles de líquido. Como método para estimar la temperatura de cultivo, se ha utilizado el modelo previamente descrito (1), por lo que las entradas de la función objetivo son el calor neto acumulado en el reactor ( $Q_{total}$ ), el nivel en el reactor, las condiciones ambientales (radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento) y las predic-

ciones meteorológicas. La función de coste propuesta para el problema de optimización es la siguiente:

$$\min_h J = |T_w(t) - T_{opt}| \quad (4)$$

sujeto a:

$$\left( h(t) \cdot A \cdot C_p \cdot \rho \right) \frac{dT_w(t)}{dt} = Q_{total}(t) \quad (5)$$

$$h_{min} \leq h(t) \leq h_{max} \quad (6)$$

$$-\Delta h_{max} \leq \Delta h(t) \leq \Delta h_{max} \quad (7)$$

$$T_{min} \leq T_w(t) \leq T_{max} \quad (8)$$

donde  $Q_{total}$  es la suma de todos los términos de calor descritos en (1). Por otra parte, el nivel en el reactor debe limitarse para evitar el exceso de cosechado y dilución del reactor. Por tanto, el nivel mínimo ( $h_{min}$ ) y el máximo ( $h_{max}$ ) del cultivo se incluyen en el optimizador en función del parámetro de la tasa de dilución y en la variación del volumen del reactor. Asimismo, para evitar cambios bruscos en el nivel, se ha establecido un incremento máximo ( $\Delta h_{max}$ ) de 1 cm para cada iteración del optimizador, realizada con un periodo de media hora. Por último, la temperatura del reactor se limita entre  $T_{min}$  y  $T_{max}$  en función de la cepa de microalga.

La cantidad de volumen cosechado y diluido se establece mediante el parámetro de tasa de dilución, que determina el porcentaje de volumen

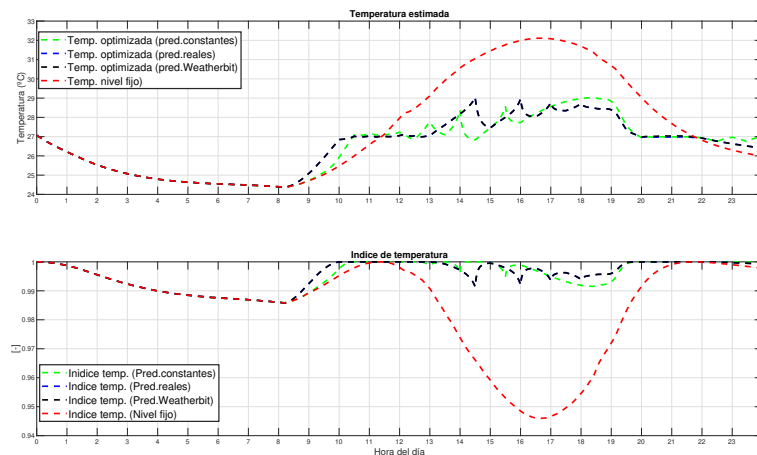


Figura 3: Comparativa del tipo de simulación en escenario ideal.

que puede retirarse del reactor y añadirse, de forma que la concentración de biomasa al final del día sea la misma que al principio. Durante el verano, este parámetro puede alcanzar valores de alrededor del 40%. Sin embargo, en invierno, debido a la baja productividad, la tasa de dilución se sitúa en torno al 15%. Como solución al problema de optimización, se han propuesto dos enfoques. Inicialmente, se ha establecido un horizonte de un solo paso para la optimización, de modo que la función objetivo se basa únicamente en los valores de las entradas actuales. Posteriormente, se ha incluido la previsión meteorológica y la optimización del horizonte deslizante para mejorar el rendimiento.

### 3. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en simulación y en la planta real aplicando el optimizador de temperatura para regular el nivel en el reactor, comparando dichos resultados con la operación tradicional del reactor a 15 cm de nivel. La Tabla 1 resume de forma cuantitativa los resultados. Las simulaciones se han realizado en tres escenarios distintos que permiten observar los factores que disminuyen la eficiencia del optimizador. En primer lugar, en el caso ideal, no se tienen en cuenta las restricciones de cosechado y dilución, además, se supone un caudal de las bombas ideal. El se-

gundo escenario incorpora el caudal real de cosechado y dilución disponible en los reactores reales. Y por último, en el tercer escenario se incluyen también las restricciones de nivel del reactor aplicando una tasa de dilución del 40%.

Se han realizado simulaciones con el optimizador configurado a un paso y con horizonte deslizante. En el caso de horizonte deslizante se han realizado tres tipos de simulaciones. En la primera se mantienen constantes los valores de las variables meteorológica a lo largo del horizonte de predicción. En la segunda se utilizan los datos reales del conjunto de datos como predicción y por último, en la tercera se utilizan los datos de predicciones meteorológicas obtenidos por la API Weatherbit.io ([12]). En la Figura 3 se pueden observar que los resultados obtenidos para las simulaciones ideales con datos reales y con predicciones obtenidas de la API se encuentran solapados, lo cual indica que las predicciones meteorológicas obtenidas satisfacen las necesidades de precisión del optimizador.

Para la selección del horizonte de predicciones se ha comparado el Error Integral Absoluto (IAE) obtenido para distintos horizontes, y posteriormente se ha escogido el que menor error ofrecía en cada uno de los escenarios descritos anteriormente (ver Tabla 1). En la Figura 4 se observa que las restricciones de cosechado y dilución disminuyen la eficiencia del optimizador



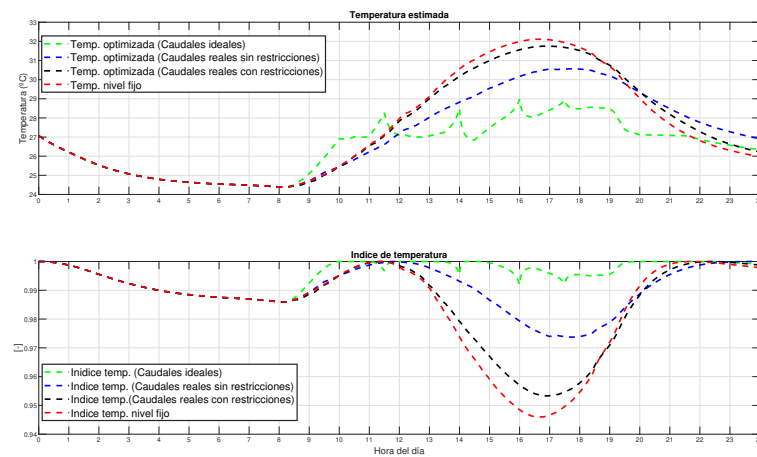


Figura 4: Comparativa en simulación con predicciones API con distintos escenarios.

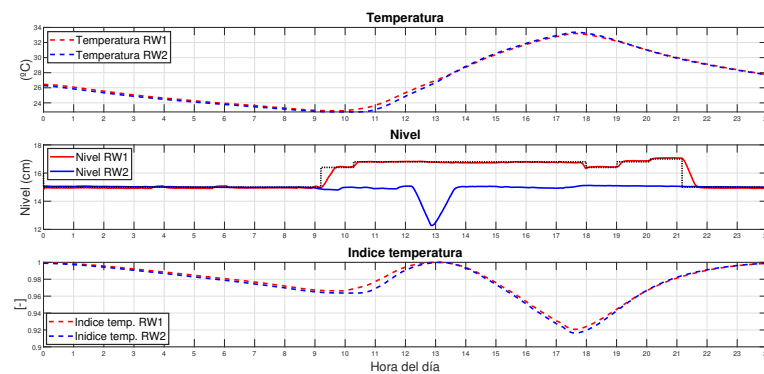


Figura 5: Ensayo real con optimización a un paso.

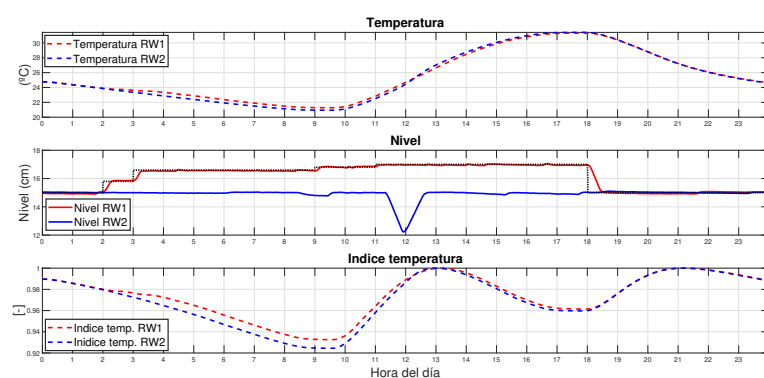


Figura 6: Ensayo real con horizonte deslizante de 4 horas y predicciones meteorológicas.

Caudales	Escenarios		IAE
Ideales	A un paso		651.11
	Predicciones constantes		395.53
	Predicciones reales		371.91
	Predicciones Weatherbit		366.48
Reales	Sin restricciones de dilución	A un paso	946.62
		Predicciones constantes	811.85
		Predicciones reales	805.75
		Predicciones Weatherbit	805.70
	Con restricciones de dilución	A un paso	1322.3
		Predicciones constantes	1179.2
		Predicciones reales	1188.2
		Predicciones Weatherbit	1189.4
Sin optimizador (nivel fijo = 15 cm)			1489.7

Cuadro 1: Comparativas del IAE para todos los escenarios y tipos de simulaciones.

en mayor medida que la incorporación de los caudales reales en la simulación. Tras la verificar el funcionamiento del optimizador en simulación, se han realizado ensayos en los reactores reales del centro IFAPA, con una tasa de dilución del 20 % siguiendo la operación tradicional. Para establecer comparaciones, se ha aplicado el optimizador en un reactor (RW1) mientras que el otro reactor se ha operado de manera tradicional (RW2). En la Figura 5 se observan los resultados obtenidos tras configurar el optimizador a un paso, en ella se observar una mejora en el índice de temperatura respecto al reactor a nivel fijo, que corresponde a una disminución del error integral absoluto del 7.56 %.

Posteriormente en la Figura 6 se observan los resultados obtenidos con el optimizador configurado con un horizonte de predicción de 4 horas haciendo uso de las predicciones proporcionadas por la API y se observa una mejora superior que en el caso anterior, disminuyendo el IAE un 11.4 % respecto al reactor con nivel fijo. En ambos caso se aprecia que la temperatura del agua de dilución se encuentra a una temperatura superior a la del medio del reactor, ya que el optimizador aprovecha la dilución para aumentar la temperatura del reactor en lugar de enfriarlo.

#### 4. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado la evaluación en simulación y experimental de un optimizador de temperatura para reactores raceway. En base a

los resultados, se puede afirmar que la eficiencia del optimizador depende notoriamente de las restricciones de nivel y la temperatura del agua de entrada.

Analizando los resultados reales mostrados en la Tabla 1, se observa una mejora notable en el error comparado con la operación tradicional. En especial, se aprecia que el error es menor aplicando el optimizador con horizonte deslizante y predicciones meteorológicas, respecto a la arquitectura de optimización a un paso. Sin embargo, el error es ligeramente mayor cuando se tienen en cuenta las predicciones meteorológicas respecto a valores constantes. Esto se debe a que la temperatura tiene una dinámica lenta y no se ve afectada de forma inmediata por cambios en las condiciones ambientales, por lo que un escenario constante reduce los cambios en las referencias de nivel, manteniendo la temperatura ligeramente más constante. Se observa que las restricciones de dilución disminuyen en gran medida la efectividad del optimizador, y este factor no puede ser solventado de una forma sencilla dimensionando las bombas correctamente de manera previa a la construcción del reactor. De hecho, limita el uso del optimizador en invierno ya que no proporciona una mejora significativa. En definitiva, una reducción del IAE alrededor del 11 % como se ha obtenido en los ensayos reales se puede considerar exitosa teniendo en cuenta que los reactores no precisan de una modificación para la implantación del optimizador.

## English summary

### Temperature optimization in microalgae raceway reactors by depth regulation

#### Abstract

*In addition to pH and dissolved oxygen, other parameters that significantly affect microalgae growth are solar radiation and temperature. Inadequate temperature significantly reduces biomass productivity in photobioreactors and can even cause total culture collapse. Direct temperature control in large-scale open reactors is considered unfeasible due to the large amount of energy required, leaving only the option of using passive or semi-passive systems. This paper presents an indirect method for temperature optimization in these systems by varying the culture depth using weather forecasts.*

**Keywords:** Microalgae; Open reactors; Temperature optimization.

#### References

- [1] M. Barceló-Villalobos, C. Gómez-Serrano, A. Sánchez-Zurano, L. Alameda-García, S. Esteve-Maldonado, J. Peña, and F. G. Acién. Variations of culture parameters in a pilot-scale thin-layer reactor and their influence on the performance of *Scenedesmus almeriensis* culture. *Bioresource Technology Reports*, 6:190 – 197, 2019. doi: 10.1016/j.biteb.2019.03.007.
- [2] Q. Béchet, M. Laviale, N. Arsapin, H. Bonnefond, and O. Bernard. Modeling the impact of high temperatures on microalgal viability and photosynthetic activity. *Biotechnology for Biofuels*, 10: 136, 2017. doi: 10.1186/s13068-017-0823-z.
- [3] O. Bernard and B. Rémond. Validation of a simple model accounting for light and temperature effect on microalgal growth. *Bioresource Technology*, 123:520 – 527, 2012. doi: 10.1016/j.biortech.2012.07.022.
- [4] R. De-Luca, Q. Béchet, F. Bezzo, and O. Bernard. Optimal operation of algal ponds accounting for future meteorology. *IFAC - PapersOnLine*, 49(7):1062 – 1067, 2016. doi: 10.1016/j.jprocont.2017.03.010.
- [5] R. De-Luca, F. Bezzo, Q. Béchet, and O. Bernard. Exploring meteorological forecast for the optimal operation of algal ponds. *Journal of Process Control*, 55:55 – 65, 2017. doi: 10.1016/j.jprocont.2017.03.010.
- [6] J. L. Guzmán, F. G. Acién, and M. Berenguel. Modelling and control of microalgae production in industrial photobioreactors. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 18(1): 1 – 18, 2021. doi: 10.4995/riai.2020.13604.
- [7] K. Hwan Ryu, J. Lee, S. Heo, and J. Lee. Improved microalgae production by using a heat supplied open raceway pond. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(21):9099 – 9108, 2019. doi: 10.1021/acs.iecr.9b00986.
- [8] E. Molina, F. García, J. A. Sánchez, J. M. Fernández, F. G. Acién, and A. Contreras. A mathematical model of microalgal growth in light-limited chemostat culture. *Chemical Technology and Biotechnology*, 61(2):167 – 173, 1994. doi: 10.1002/jctb.280610212.
- [9] M. Ras, J. P. Steyer, and O. Bernard. Temperature effect on microalgae: A crucial factor for outdoor production. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 12(2):153 – 164, 2013. doi: 10.1007/s11157-013-9310-6.
- [10] E. Rodríguez, F. G. Acién, J. L. Guzmán, M. Berenguel, and A. Visioli. A new model to analyze the temperature effect on the microalgae performance at large scale raceway reactors. *Biotechnology & Bioengineering*, 2021. doi: 10.1002/bit.27617.
- [11] E. van Esbroeck. Temperature control of microalgae cultivation under variable conditions. *Netherlands*, MSc Thesis, Wageningen University & Research, 2018.
- [12] Weatherbit API forecast. <https://www.weatherbit.io/>.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto del Plan Nacional DPI2017-84259-C2-1-R del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# FUSIÓN DE SENSORES PARA LOCALIZACIÓN ROBUSTA DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS EN ÁREAS URBANAS

Kerman Viana, Mikel Diez, Asier Zubizarreta

Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

kviana001@ehu.eus

## Resumen

*El posicionamiento por GPS en zonas urbanas densamente pobladas puede ser un reto, principalmente debido al bloqueo de señales por edificios o túneles. Es por ello que los vehículos autónomos necesitan implementar alternativas para estas situaciones mediante una estructura de localización tolerante a fallos. Este es un área de gran interés en la que predominan el uso de técnicas de duplicación-comparación en combinación con las belief function, además de técnicas de localización alternativas. Este trabajo propone una estructura de localización para zonas urbanas densamente pobladas que incluye tanto un algoritmo robusto de detección de errores, capaz de evaluar el rango de confianza de cada estimación, como una precisa técnica de localización alternativa basada en un algoritmo de map matching de bajo coste computacional. La validación en un entorno simulado ha verificado la funcionalidad de la propuesta.*

**Palabras clave:** Conducción autónoma, fusión de sensores, detección de errores, localización.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una localización precisa es fundamental para obtener un alto nivel de automatización en vehículos. En años recientes la tarea de localización ha sido habitualmente asignada a Sistemas de Posicionamiento Global o GPS, combinados con Sistemas de Navegación Inercial o INS [18]. Aun así, el posicionamiento de vehículos autónomos mediante el uso de estas técnicas requiere de una buena calidad de señal GPS. Esto no siempre es posible en áreas urbanas densamente pobladas, ya que la señal puede verse interrumpida o bloqueada en presencia de edificios o túneles; haciendo que el sistema de localización se vuelva poco fiable.

Por tanto, para poder obtener una localización precisa en áreas urbanas densamente pobladas, es necesario desarrollar técnicas de localización alternativas hasta que la señal GPS es recuperada. Las técnicas más comunes pueden agruparse en dos grandes grupos: aproximación basada en lo-

calización local, las cuales usan la última posición conocida para estimar una localización relativa; y las técnicas basadas en mapas digitales, que ofrecen una localización global mediante el uso de referencias globales a lo largo de la trayectoria del vehículo.

En la literatura se han propuesto diferentes aproximaciones basadas en técnicas de localización local en los últimos años. Una de las técnicas más tradicionales y todavía habituales es el uso de la odometría [10] y los sensores inerciales [2]. El uso de sensores visuales como las cámaras [12] y el LiDAR [20] también están aglutinando cada vez más interés, principalmente debido a la mejora en la precisión de sus mediciones. A pesar de ello, todas estas aproximaciones se basan en técnicas de integración a partir de una última posición conocida. En consecuencia, acumulan un error cada vez mayor con el tiempo y crean una deriva en la localización del vehículo respecto a su posición real.

Por otro lado, las técnicas basadas en mapas digitales consisten en obtener la localización del vehículo mediante el emparejamiento de su posición estimada con una red de carreteras y cruces globalmente referenciadas. Si los mapas usados son precisos, esta técnica puede aportar una localización global, convirtiéndola en un complemento interesante para el posicionamiento mediante GPS [14]. Es más, las técnicas previamente analizadas de localización local pueden ser combinadas con mapas digitales para crear algoritmos que permitan la corrección de la deriva o el error acumulado [19][8].

Como se puede observar, cada sensor o estrategia de localización tiene sus puntos fuertes y débiles. Es aquí donde la combinación de cada fuente de información se puede utilizar para lograr datos más precisos, lo cual es un campo ampliamente estudiado en la literatura [1]. En el caso del posicionamiento para vehículos, las estrategias de fusión suelen agruparse en dos grupos: técnicas de optimización y uso de filtros. En el caso del primero, técnicas como el *Bundle Adjustment* [21] son usadas habitualmente en la literatura, debido a su consistencia y precisión en una gran variedad de

escenarios. Por otro lado, el uso de filtros, principalmente basados en los filtros de Kalman o sus variantes extendidas (EKF), son también habituales debido a su fácil convergencia y consistencia. Además, éstos últimos también dan excelentes resultados a la hora de combinar sensores de naturaleza muy diferente [6]. Por último, los filtros de Kalman también ofrecen una gran versatilidad a la hora de estimar los diferentes estados de un mismo sistema [18], convirtiendo este grupo en la principal elección a la hora de fusionar información dentro del contexto de la localización para vehículos autónomos.

Por tanto, una correcta fusión de técnicas basadas en mapas digitales, posicionamiento local y sensores GPS/INS puede servir para obtener una correcta localización de vehículos en áreas urbanas densamente pobladas. Aun así, para poder sacar el máximo partido de todos los módulos de localización en la fusión, es necesario crear una estructura tolerante a fallos; es decir, tiene que ser capaz de detectar errores en el sistema y proponer estrategias adecuadas para cada situación. Además de lo anterior, es necesario implementar un sistema de toma de decisiones capaz de detectar y discriminar un módulo de localización erróneo, para evitar así que la deriva en la localización se acumule debido a un error.

La mayoría de las estructuras tolerantes a errores en los vehículos autónomos se basan en técnicas de duplicación-comparación y el uso de *belief function*, tal y como son definidas en el *Transferable Belief Model* (TBM) propuesto por Smets [16]. Estos modelos consisten en diseñar una estructura con módulos de localización redundantes que comparan entre sí sus estimaciones para desenmascarar posibles errores, y poder así discriminarlos para evitar una propagación del error en el posicionamiento. [7] y [9] ofrecen ejemplos de aplicación para estos modelos, donde se usa información redundante para detectar fuentes erróneas antes de fusionarlas en un filtro de Kalman. Aun así, estos enfoques suelen centrarse solamente en la detección de errores, y en contadas ocasiones abordan la problemática de desarrollar alternativas de posicionamiento realmente precisas. Además, la evaluación de fuentes de información suele realizarse mediante el análisis de señales de control, las cuales también pueden fallar en escenarios reales y llevar a conclusiones equivocadas.

Este trabajo propone una estructura de localización tolerante a errores para vehículos autónomos en áreas densamente pobladas. La estructura propuesta expone 2 principales aportaciones sobre los trabajos existentes en este área: 1) un sistema de localización alternativo y de bajo coste computacional basado en una técnica de *map matching*

[14], que también incluye un algoritmo de detección de cruces para limitar la deriva y mejorar su rendimiento; y 2) un sistema de detección de errores basado en la evaluación del conflicto entre las diferentes estimaciones de posicionamiento, el cual calcula una fiabilidad dinámica para cada fuente que, posteriormente, se implementa en un filtro de Kalman extendido o EKF a través de su matriz de covarianzas. Este filtro de Kalman trabaja tanto como método de fusión de información, como módulo de toma de decisiones. Esta estructura ha sido validada en un entorno de simulación donde un vehículo que transita a través de un área densamente poblada sufrirá una variedad de errores y tendrá que hacer frente a ellos.

El presente trabajo se organiza de la siguiente manera. En la Sección II, se explica la estructura de localización propuesta. En la Sección III se ofrece una detallada descripción del escenario de validación y un análisis de los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección IV se resumen las ideas más importantes de este trabajo.

## 2. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN

La estructura de localización propuesta se expone en la Figura 1. Se compone de 3 diferentes fuentes de información de entrada: GPS/INS, LiDAR y la odometría, la cual consiste en la velocidad de las ruedas y el ángulo de giro del volante. Además de esto, se hace uso de un detallado mapa digital del entorno de conducción. Al mismo tiempo, se implementa un bloque de detección de errores con el objetivo de desenmascarar módulos erróneos y transmitir la información al EKF trabajando como módulo de toma de decisiones.

Esta propuesta considera la estimación del módulo GPS/INS como la más fiable en circunstancias normales. Aun así, en paralelo, se implementan dos estrategias de localización: un algoritmo de *map matching* en conjunto con el LiDAR y la odometría; y una técnica de *dead reckoning* [13] basada en las lecturas de la odometría. Las tres estimaciones son comparadas por un módulo de detección de errores, el cual permite usar la estimación más fiable en cada caso en base a la detección de señales erróneas.

En consecuencia, la estrategia de localización puede dividirse en 4 etapas, tal y como se describen a continuación (Figura 1).

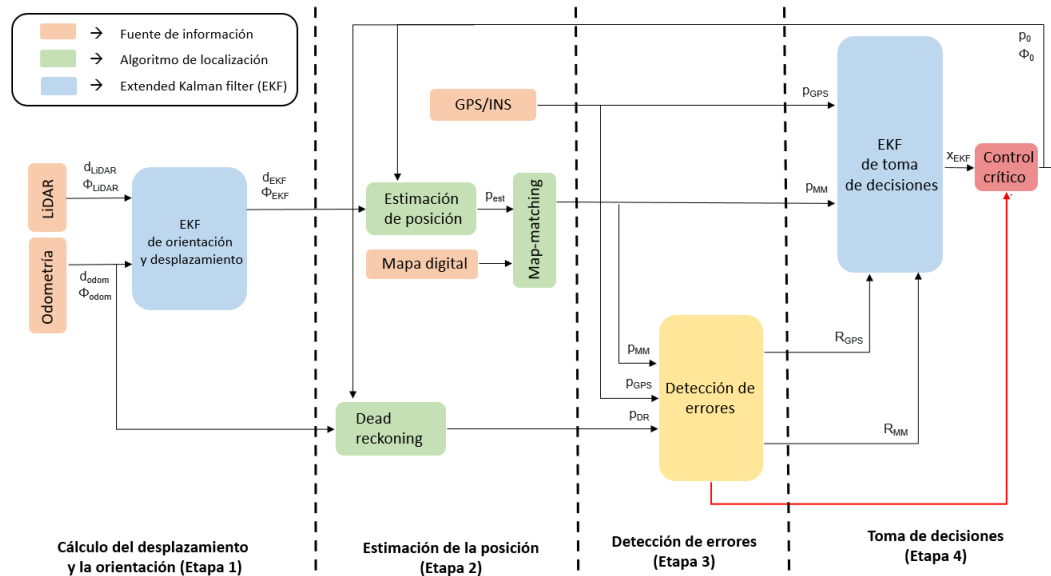


Figura 1: Estructura de localización

## 2.1. Cálculo del desplazamiento y la orientación

El desplazamiento y la orientación se calculan en base a las mediciones del LiDAR y la odometría. Para el primero, se aplica un algoritmo de *point-cloud matching*, donde el algoritmo de registro se basa en el *Normal-Distributions Transform* (NDT) [11]. De esa forma, se calcula el ángulo *Yaw*,  $\phi_{LiDAR}$ , y el desplazamiento,  $d_{LiDAR}$ . De forma parecida, para la odometría, se calculan los respectivos valores del ángulo *Yaw*,  $\phi_{odom}$ , y la odometría,  $d_{odom}$ , en base a la integración de las mediciones de la velocidad y el ángulo de giro del volante, asumiendo un modelo de bicicleta para el vehículo según se describe en [13]. Ambos valores de desplazamiento y ángulo *Yaw* son introducidos entonces en un EKF, el cual proporciona una estimación más precisa de ambas variables,  $\phi_{EKF}$  and  $d_{EKF}$ .

## 2.2. Estimación de la posición

Tal y como se expuso en la sección anterior, en la estructura propuesta se implementan 3 estrategias de localización distintas.

La primera estrategia se basa en el uso de un módulo GPS/INS, el cual combina las estimaciones del GPS con las mediciones del INS en un filtro de Kalman integrado [18]. Se asume que esta señal no necesita más computación que la expuesta hasta ahora.

La segunda estrategia parte de la salida en forma de desplazamiento y ángulo *Yaw* del EKF,  $\phi_{EKF}$  y  $d_{EKF}$ . Usando estas mediciones, se calcula una

estimación global del vehículo,  $p_{est}$ , mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = d \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi + \phi_0) \\ \sin(\phi + \phi_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde se usan las estimaciones globales que proporciona la estructura de localización en los instantes anteriores ( $x_0$ ,  $y_0$  y el ángulo *Yaw*  $\phi_0$ ) como posiciones iniciales conocidas para el cálculo relativo.

Este valor calculado se combina en un algoritmo *point-to-point* geométrico de *map matching* [14], mediante el cual se puede estimar la localización global del vehículo. Esta aproximación busca el punto más cercano a la red de carreteras del mapa digital,  $p_{MM}$ , respecto a la estimación correspondiente a la posición de la relativa,  $p_{est}$ . De esa forma, usando la distancia Euclídea como criterio, el algoritmo logra mejorar la estimación de  $p_{est}$ , posicionando el vehículo de forma global en el mapa con la estimación  $p_{MM}$ .

Con el objetivo de reducir la deriva inherente a las estimaciones, se propone una sencilla corrección basada en la identificación de elementos del entorno de la carretera o *feature navigation*; en particular, mediante la detección de cruces de carreteras. El algoritmo de corrección detecta la presencia de un cruce siempre que la variación, o valor derivado, del ángulo *Yaw* supera un umbral. Entonces, con la estimación del *map matching* como punto de partida,  $p_0$ , se busca una nueva posición en la carretera,  $p'$ , con un ángulo *Yaw* más cercano al calculado y alrededor de una distancia de



control,  $d$ ; tal y como se explica en detalle en el Algoritmo 1. La distancia de control  $d$  es seleccionada buscando un compromiso entre dos aspectos: la cantidad mínima de puntos necesarios para una correcta identificación de la posición real; y el exceso de puntos a analizar, lo cuál puede aumentar el coste computacional hasta el punto de ralentizar la ejecución el algoritmo. De esta forma se obtiene una solución para 2 fuentes de errores de todos los algoritmos de *map matching*: errores en la elección de carreteras cuando muchas carreteras se encuentran; y la deriva longitudinal que se acumula con el tiempo, la cual es compensada gracias al algoritmo descrito en presencia de cruces. Estas suposiciones son ciertas siempre y cuando la carretera se encuentre libres de obstáculos, lo cuál entra dentro del presente marco.

### Algoritmo 1 Corrección de cruces

**Require:**  $\Delta_\phi \geq \text{threshold}$

```

 $p_0, \phi_0 \leftarrow$  Estimación map-matching previa
 $d \leftarrow$  Distancia de control desde estimación  $p_0$ 
for all puntos del mapa  $x'$  a la distancia  $d$  desde  $p_0$  do
     $\phi' \leftarrow$  Orientación de los nuevos puntos  $p'$ 
    if  $|\phi' - \phi_0| < \Delta_\phi$  then
         $p \leftarrow p'$ 
    else
         $p \leftarrow p_0$ 
return  $x$  nueva estimación
    
```

Por último, el tercer algoritmo de localización se basa en una técnica de *dead reckoning* similar a la descrita en [10], y basada en los valores de desplazamiento y ángulo *Yaw* previos al EKF,  $\phi_{odom}$  and  $d_{odom}$ . De esta forma se obtiene la estimación de la odometría,  $p_{DR}$ . Es importante reseñar que esta estimación tan solo será utilizada por el bloque de detección de errores para desenmascarar fallos en la señal GPS; pero nunca como estimación de la estructura de localización.

### 2.3. Detección de errores

El algoritmo de detección de errores, descrito en la Figura 2, se basa en una técnica de duplicación-comparación que calcula la precisión dinámica de cada fuente [4]. De esa forma, el algoritmo puede dividirse en 3 etapas que contienen las siguientes modificaciones respecto al trabajo referenciado:

- **Cálculo de conflicto:** el conflicto se define como la diferencia relativa entre dos estimaciones de distintas estrategias de localización. En este trabajo, se utilizan los valores absolutos y derivados en el tiempo para calcular dicho conflicto. Estos últimos valores son especialmente interesantes para una rápida de-

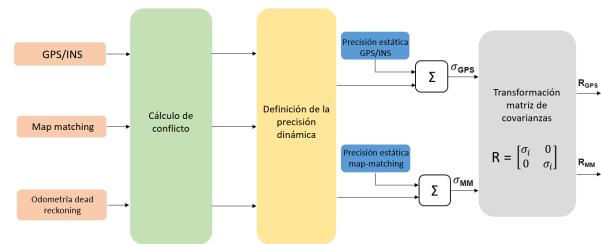


Figura 2: Algoritmo de detección de errores

tección de errores, ya que los valores derivados tienden a crecer a mayor velocidad en presencia de conflicto entre fuentes.

- **Definición de la precisión dinámica:** la precisión dinámica es un valor escalar dependiente del tiempo que pretende medir la fiabilidad de una fuente de información de forma instantánea. Para ello, se basa en el conflicto que existe entre dicha fuente y el resto; penalizando su medida si el conflicto con todas las demás fuentes crece. De esa forma, el conflicto se utiliza para evaluar si ha ocurrido algún tipo de error. Esta estrategia ofrece una doble comprobación en situaciones como giros bruscos en curvas o cruces, donde puede haber grandes variaciones en las derivas mientras los valores absolutos se mantienen constantes.
- **Precisión global ( $\sigma_i$ ):** cada fuente tiene su propia precisión estática, basada en la calidad y precisión esperada del sensor. De esa forma, tanto la precisión dinámica como la estática se combinan para obtener la precisión global en un instante en particular. Esta precisión global se representa mediante un valor escalar y posteriormente se transforma a la matriz de covarianza correspondiente al ruido de las mediciones para cada fuente,  $R$ , y se combina en un EKF. Esta transformación, tal y como se describe en la Figura 2, permite el uso del EKF como un módulo de toma de decisiones, lo cual es una contribución importante de este trabajo.

El algoritmo de error propuesto necesita un mínimo de 3 fuentes diferentes de información para detectar un error en el sistema [15]. En este contexto, el caso de estudio consiste en detectar errores en el GPS/INS; para lo cual, se utilizará el conflicto entre las siguientes 3 señales: el GPS/INS, el *map-matching* y la odometría en combinación con el *dead reckoning*. Aun así, esta propuesta no se restringe solamente a esta estructura, ya que puede ser ampliada a diferentes cantidades y combinaciones de fuentes de información y errores.

Escenario	Longitud (m)	Errores detectados / reales / falsos positivos	$error_{lat}$ (m) max.	$error_{long}$ (m) max.	$error_{lat}$ (m) medio	$error_{long}$ (m) medio
1	878.78	15 / 15 / 0	0.5985	3.5402	0.2683	0.6284
2	878.78	6 / 6 / 0	0.7855	5.2408	0.3031	1.4186
3*	511.79	6+1 / 6+1 / 0	0.545	5.153	0.3394	1.3543

Cuadro 1: Métricas de error para los escenarios (el Escenario 3 incluye un error crítico).

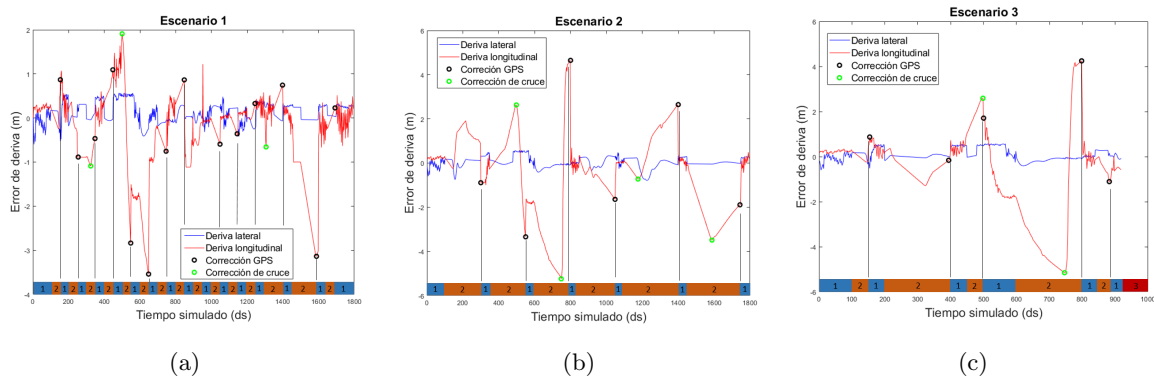


Figura 3: Deriva lateral y longitudinal para los 3 escenarios.

## 2.4. Toma de decisiones

En la última etapa de la estructura de localización, se introduce un EKF que combinará las tareas de fusión de información y toma de decisiones. Este módulo combina las estimaciones de la posición del *map matching* y del GPS/INS. Además de eso, es capaz de elegir como salida la estimación de la localización más precisa en todo momento. Para ello, se basa en los valores de la precisión global calculados en el bloque de detección de errores, que posteriormente son introducidos en forma de matriz de covarianza,  $R$ .

Además del módulo GPS/INS, en las simulaciones se han contemplado posibles errores o desviaciones en el resto de sistemas de localización. Por tanto, se ha implementando una señal crítica para cuando el conflicto entre todas las señales crece por encima del límite y el sistema de localización no puede funcionar correctamente con el objetivo de ordenar la detención del vehículo.

## 3. VALIDACIÓN

Con el objetivo de validar la estructura propuesta se hace uso del entorno de simulación Carla [5]. Se ha partido de un modelo Tesla 3 como caso de estudio, equipado con GPS/INS, LiDAR y sensores de odometría tanto para la velocidad como el giro del volante. La información obtenida en Carla es transferida mediante la Python API a Matlab/Simulink, donde la estrategia de localización será implementada y validada.

Se han propuesto 3 escenarios en este entorno, todos ellos incluyendo el mismo recorrido tal y como se describe en la Figura 4. El primer escenario considera fallos intermitentes de corta duración (10 s) en el módulo GPS/INS, con el objetivo de probar la funcionalidad del bloque de detección de errores. En el segundo escenario, la duración de los errores se extiende hasta los 30s, para validar la precisión del algoritmo *map matching*. Por último, en el tercer escenario se implementan errores en el módulo del GPS/INS y en el de la odometría, llevando el vehículo a estado crítico.

Los resultados para los 3 escenarios se resumen en la Tabla 1. De esta tabla se pueden obtener 2 conclusiones principales: 1) la estructura de localización es consistente en la tarea de detectar

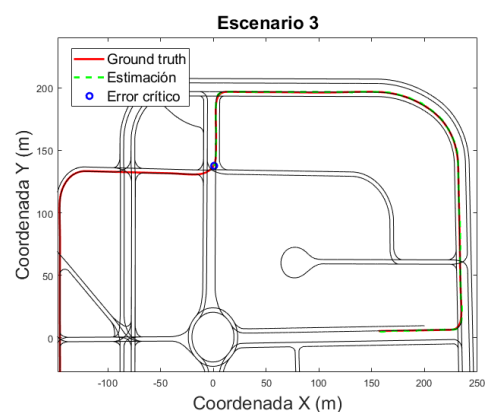


Figura 4: Escenario y trayectoria (correspondiente al Escenario 3)

toda la variedad de posibles errores en el sistema; y 2) la deriva del error de posicionamiento siempre permanece acotada, tanto en valores medios a lo largo de todo el trayecto como en picos de error. En la Figura 3 se muestra en detalle la evolución de los errores longitudinales (en el mismo eje del movimiento) y laterales (en el eje perpendicular al movimiento) en las tres simulaciones. En estas figuras, los diferentes modos de funcionamiento a lo largo de las simulaciones se caracterizan con una barra de colores horizontal que determina el error actual en el sistema y el modo de funcionamiento así como su extensión en el tiempo. El *Modo 1*, en azul, corresponde a un funcionamiento normal del GPS, el *Modo 2*, en naranja, a la estrategia de localización alternativa con el algoritmo *map matching*, y el *Modo 3*, en rojo, a un fallo crítico y la detención del vehículo.

Para el Escenario 1, donde se han simulado la mayor cantidad de errores, los resultados de la Tabla 1 prueban que el bloque de detección de errores trabaja de forma consistente. En cuanto a la deriva del error, tal y como se ve en la Figura 3a, los valores tanto longitudinales como laterales permanecen acotados, principalmente por la frecuente reconexión del GPS/INS y su corrección correspondiente; siempre que el Modo de funcionamiento cambia al Modo 1, reflejado en azul en las Figuras.

En el escenario 2, los errores en el GPS se extienden hasta los 30s. Durante ese periodo, la estructura de localización usa como salida el algoritmo de *map matching*. Tal y como se puede ver en la Tabla 1, los errores durante estos periodos permanecen acotados. Es más, tal y como se explicó en la sección anterior, el error longitudinal es corregido en la fase de *map matching* mediante el algoritmo de detección de cruces; tal y como se comprueba en los instantes  $t = 500ms$ ,  $t = 1200ms$  o  $t = 1600ms$  de la Figura 3b. Esta corrección siempre se evalúa en el Modo 2, de color naranja en las Figuras, ya que requiere de que el mapa digital esté disponible y una variación del ángulo *Yaw* sea detectada por la presencia de un cruce. Por otro lado, en el instante  $t = 750ms$ , el algoritmo de detección de cruces se activa, corrige la deriva longitudinal, pero inmediatamente después de la recuperación, el algoritmo de *map matching* empieza a acumular error de nuevo debido a errores en el cálculo del desplazamiento y el ángulo *Yaw* durante ese periodo. Con el tiempo, el GPS se reconecta y permite una corrección de dicha deriva. Por tanto, el algoritmo de detección de cruces ha demostrado que mejora la precisión de la estimación y estabiliza la estructura de localización eliminando la excesiva desviación siempre que el GPS no está disponible.

Por último, en el Escenario 3, se simulan los errores de los dos escenarios previos junto con un fallo crítico. Tal y como se describe en la Figura 3c, los errores longitudinales y laterales permanecen acotados a lo largo de la trayectoria del vehículo; con un comportamiento similar al descrito para el Escenario 2 en los instantes  $t = 500ms$  y  $t = 750ms$ .

Además de lo anterior, respecto al modulo de detección de errores, en la Figura 5 se pueden ver las 6 señales de conflicto para el Escenario 3; con 4 señales, 2 absolutas y 2 derivadas en el tiempo, para cada estimación. Tal y como se expuso en secciones anteriores, para desenmascarar una fuente errónea se aplica un protocolo de doble verificación; es decir, tanto las 2 señales absolutas como las 2 señales derivadas en el tiempo deben superar sus correspondiente límites al mismo tiempo. Siempre que esto ocurre, la Figura 5 lo señala con una línea roja. Los resultados prueban que el fallo de la señal GPS es detectado siempre que se implementa un error en el sistema, ya que tanto las señales de control absolutas como derivadas en el tiempo superan sus límites al mismo tiempo; mientras que el resto de señales correspondientes al *map matching* o a la odometría no se solapan. Por otro lado, tal y como se describe en los últimos instantes ( $t > 900ms$ ) de la Figura 5, en presencia de un error crítico, donde coexiste más de un sistema en fallo, todas las señales de control de todas las fuentes superan el límite y, por tanto, se envía una señal de detección de vehículo.

Los resultados descritos hasta ahora prueban la validez de la propuesta. Es más, al contrario de los sistemas tolerantes a errores que se encuentran en la literatura, esta propuesta no solo se centra en detectar correctamente los errores a lo largo de la trayectoria, sino que además acota el efecto de dichos errores mejorando la precisión del sistema. Las métricas de errores obtenidas en las simulaciones se han comparado con trabajos de localización parecidos basados en algoritmos de *map matching* en escenarios equivalente [17][3], y los resultados demuestran que la precisión obtenida es correspondiente a otras propuestas de la literatura (5-7 metros para el error longitudinal máximo, y 1-2 para los valores medios del error).

## 4. CONCLUSIONES

Este trabajo propone una estructura de localización tolerante a errores para vehículos autónomos en áreas densamente pobladas, donde la fiabilidad de los sensores GPS/INS suele estar comprometida. Se ha diseñado un algoritmo de *map matching* como técnica alternativa de localización durante bloqueos de la señal GPS. Además, se ha implementado un algoritmo de cruces para abordar las

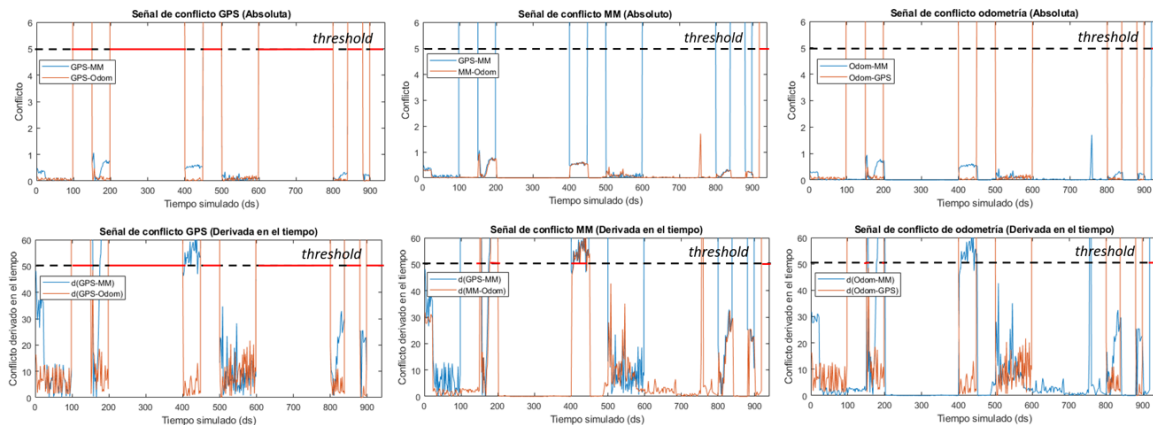


Figura 5: Señales de conflicto, absolutas y derivadas para todas las fuentes a lo largo del Escenario 3.

limitaciones más comunes de las técnicas basadas en mapas y relacionadas con la deriva longitudinal. La validación de la estructura, en base a un entorno de simulación, ha demostrado excelentes resultados en cuanto a la detección de errores, validando el uso del EKF como módulo de toma de decisiones; el cual está basado en una estimación de la fiabilidad dinámica de las fuentes y su posterior implementación a la matriz de covarianzas del ruido en las mediciones. Como trabajo futuro, se estudiará la implementación de mapas digitales más detallados en combinación con la detección y segmentación de objetos mediante sensores visuales. Esto permitirá incluir más elementos del entorno de conducción para una mejor corrección de la deriva longitudinal.

### Agradecimientos

Este trabajo es subvencionado por la Universidad del País Vasco, UPV/EHU (proyecto GIU19/045 y beca PIF19/181), y por el Gobierno Vasco mediante la subvención IT914-16 y el proyecto AUTOEVAL KK-2021/00123.

### English summary

## SENSOR FUSION FOR ROBUST LOCALIZATION OF AUTONOMOUS VEHICLES IN URBAN AREAS

### Abstract

*Localization in dense urban areas may be difficult, as GPS signal usually gets blocked by buildings or tunnels. Therefore, autonomous vehicles need to implement alternatives for those circumstances with a fault-tolerant localization structure. This*

*is an area of great interest that most works address by combining duplication-comparison techniques and the use of belief functions and alternative localization algorithms such as map-matching or visual odometry. This paper proposes a localization framework for dense urban areas that includes both a robust fault-tolerant algorithm capable of determining the reliability of every position estimation, and a computationally low demanding map matching algorithm as an accurate alternative localization strategy. Validation on simulation environment has proved that the proposed approach is functional.*

**Keywords:** Autonomous driving, sensor fusion, error detection, localization.

### Referencias

- [1] M. B. Alatis and G. P. Hancke. A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods. *IEEE Access*, 8:39830–39846, 2020.
- [2] M. Brossard, A. Barrau, and S. Bonnabel. AI-IMU Dead-Reckoning. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 5(4):585–595, 2020.
- [3] Lucas de Paula Veronese, Claudine Badue, Fernando Auat Cheein, Jose Guivant, and Alberto Ferreira De Souza. A single sensor system for mapping in GNSS-denied environments. *Cognitive Systems Research*, 56:246–261, 2019.

- [4] F. Delmotte and G. Gacquer. Detection of defective sources with belief functions. In *2th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, pages 337–344, Malaga, Spain, 2008.
- [5] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. Lopez, and Vladlen Koltun. CARLA: An open urban driving simulator. In *Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning*, pages 1–16, 2017.
- [6] P. J. Escamilla-Ambrosio and N. Mort. A hybrid Kalman filter-fuzzy logic architecture for multisensor data fusion. In *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pages 364–369, Mexico City, Mexico, 2001.
- [7] S. Grubmüller, G. Stettinger, M. A. Sotelo, and D. Watzenig. Fault-tolerant environmental perception architecture for robust automated driving. In *IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, pages 1–6, Graz, Austria, 2019.
- [8] J. Guivant, M. Whitty, and A. Robledo. *Robust Global Urban Localization Based on Road Maps*, chapter 14, pages 267–284. IntechOpen, 2010.
- [9] B. Kaci, L. Benjamin, and S. Walter. A fault tolerant architecture for data fusion targeting hardware and software faults. In *IEEE 20th Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing*, pages 1–10, Singapore, 2014.
- [10] M. Kochem, N. Wagner, C. Hamanna, and R. Isermann. Data fusion for precise Dead-Reckoning of passenger cars. In *IFAC*, volume 35, pages 397–402, 2002.
- [11] M. Magnusson. *The Three-Dimensional Normal-Distributions Transform — an Efficient Representation for Registration, Surface Analysis, and Loop Detection*. PhD thesis, Örebro University, Örebro, Sweden, 2013.
- [12] M. Magnusson, H. Andreasson, A. Nuchter, and A. J. Lilienthal. Appearance-based loop detection from 3D laser data using the Normal Distributions Transform. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 23–28, Kobe, 2009.
- [13] Jose A. Matute, Mauricio Marciano, Sergio Diaz, and Joshue Perez. Experimental validation of a kinematic bicycle model predictive control with lateral acceleration consideration. *IFAC-PapersOnLine*, 52(8):289–294, 2019.
- [14] M. Quddus. *High Integrity Map Matching Algorithms for Advanced Transport Telematics Applications*. PhD thesis, Imperial College London, 2006.
- [15] V. Riquebourg, M. Delafosse, L. Delahoche, B. Marhic, A.M. Jolly-Desodt, and D. Menga. Fault detection by combining redundant sensors: a conflict approach within the TBM framework. In *COGNITIVE systems with Interactive Sensors (COGIS)*, Stanford, 2007.
- [16] P. Smets. Data fusion in the transferable Belief Model. In *3rd International Conference on Information Fusion*, volume 1, pages 21–33, 2000.
- [17] J. K. Suhr, J. Jang, D. Min, and H. G. Jung. Sensor fusion-based low-cost vehicle localization system for complex urban environments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(5):1078–1086, May 2017.
- [18] T. P. Van, T. N. Van, D. A. Nguyen, T. C. Duc, and D.-T. Tran. 15-state extended Kalman filter design for INS/GPS navigation system. *Journal of Automation and Control Engineering*, 3(2):109–114, 2015.
- [19] J. Wahlström, I. Skog, J. G. P. Rodrigues, P. Händel, and A. Aguiar. Map-aided Dead-Reckoning using only measurements of speed. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1(3):244–253, 2016.
- [20] M. Yan, J. Wang, J. Li, and C. Zhang. Loose coupling visual-lidar odometry by combining VISO2 and LOAM. In *36th Chinese Control Conference (CCC)*, pages 6841–6846, Dalian, 2017.
- [21] Z. Zhang and Y. Shan. Incremental motion estimation through modified Bundle Adjustment. In *International Conference on Image Processing*, pages II–343, Barcelona, Spain, 2003.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE BUCLES Y AJUSTE DE CONTROLADORES MEDIANTE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

Víctor Huilcapi

Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, vhuilcapi@ups.edu.ec

Xavier Blasco - Juan M. Herrero - Alberto Pajares

Universitat Politècnica de València, España, xblasco@isa.upv.es; juaherdu@isa.upv.es; alpafer1@upv.es

## Resumen

*En este artículo se presenta la aplicación de una metodología de selección de lazos de control y ajuste de controladores para controlar un sistema multivariable no lineal denominado unidad caldera-turbina. Se plantearon dos escenarios y se definieron dos conceptos de diseño (combinaciones de lazos de control), cada uno con seis objetivos. Se muestra como la metodología permite establecer un marco de comparación global de cada concepto de diseño y ofrece información detallada a un diseñador para que de acuerdo con sus preferencias pueda seleccionar una solución adecuada para controlar el sistema bajo estudio.*

**Palabras clave:** Sistemas de control multivariable, sistemas no lineales, lazos de control, optimización evolutiva multiobjetivo.

## 1 Introducción

Los sistemas con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) demandan cada vez exigencias más altas para su control. Para controlar este tipo de sistemas existen dos grandes enfoques, control centralizado [6], y control descentralizado [2], [22]. En un esquema de control descentralizado se tienen varios controladores independientes, y se establecen lazos de control entre sus variables de entrada y salida. Esto tiene una ventaja implícita ya que por ejemplo en caso de mantenimiento o fallo de algún lazo de control es posible aislarlo sin dejar toda la planta fuera de servicio [15], [21]. Así también debido a que existen técnicas sencillas para sintonizarlos, los controladores descentralizados son de amplio uso [16].

En los esquemas de control descentralizados clásicos (como por ejemplo RGA [5]), se requiere generalmente medir las interacciones que ocurren entre las variables de entrada y salida del sistema para establecer lazos de control de forma conveniente. Es importante mencionar que las metodologías tradicionales de selección de lazos de control pueden sugerir diferentes combinaciones de lazos de control para un mismo sis-

tema. Además analizan la selección de lazos de control independientemente del ajuste de los controladores del sistema.

Los aspectos mencionados anteriormente indican que el problema de seleccionar adecuadamente lazos de control en sistemas multivariables es una tarea no trivial y compleja [14]. Debido al conflicto de resultados que ofrecen las metodologías tradicionales de selección de lazos de control es recomendable abordar esta problemática desde un enfoque de optimización multiobjetivo. Los enfoques de diseño basados en optimización multiobjetivo permiten analizar problemas que tienen objetivos de diseño en conflicto. Estos enfoques se han aplicado satisfactoriamente al modelado y control de sistemas como por ejemplo en [12], [13].

En este artículo se muestra una metodología que aplica un enfoque de optimización multiobjetivo para realizar un control descentralizado de sistemas multivariables [10], [11], [14]. La metodología fusiona tanto la selección de lazos de control como el ajuste de los controladores en lo que se denomina un *concepto de diseño*. Está formada por tres etapas, en la primera se plantea cada problema multiobjetivo (MOP) y se establecen los *conceptos de diseño*. La segunda etapa corresponde al proceso de optimización, aquí se usó para encontrar los frentes de Pareto el algoritmo evolutivo multiobjetivo *ev-MOGA* [9],[17], (sin embargo la metodología puede ser aplicada con diferentes algoritmos de optimización). La tercera etapa corresponde al análisis y visualización de los frentes de Pareto para la toma de decisiones. En esta etapa se usó la herramienta de visualización de frentes de Pareto multidimensionales denominado *level diagrams* (LD) [3], [4].

Este artículo está estructurado de la siguiente manera: la sección 2 describe la metodología de selección de lazos de control y ajuste de controladores. En la sección 3 se muestra la aplicación de esta metodología sobre el sistema multivariable no lineal denominado unidad caldera-turbina. En la sección 4 se muestran los resultados obtenidos y se realiza una discusión de los mismos. Finalmente algunas conclusiones se muestran en la sección 5.



## 2 Metodología multiobjetivo para el control de sistemas multivariables

Dado un sistema con  $n$  entradas  $(u_1, \dots, u_n)$  y  $n$  salidas  $(y_1, \dots, y_n)$ , como se muestra en la ecuación (1).

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} &= h(\mathbf{x}, \mathbf{u})\end{aligned}\quad (1)$$

Donde  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in \mathbf{R}^m$  representa el vector de estado,  $\mathbf{u}_i, \mathbf{y}_i \in \mathbf{R}^n$  son los vectores con las entradas y salidas del sistema. El control multivariable descentralizado para el sistema descrito en (1) (la metodología es aplicable para otras formas de representación de un sistema multivariable mientras pueda ser simulado) en una determinada zona de operación está definido por:

- Un vector  $\mathbf{c}_k$  cuyos elementos representan los controladores para estabilizar las salidas del sistema como se muestra en (2). El vector  $\mathbf{c}_k$  representa una alternativa al control del sistema, lo que se denomina un *concepto de diseño*.
- Una matriz de selección de lazos de control  $L_p^{c_k}$  que conecta las salidas  $\hat{u}_i$  de cada controlador con las entradas  $u_i$  del sistema MIMO como se muestra en (3).

$$\mathbf{c}_k = [C_{y_1, \hat{u}_1}^{c_k}, \dots, C_{y_i, \hat{u}_i}^{c_k}, \dots, C_{y_n, \hat{u}_n}^{c_k}] \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = L_p^{c_k} \cdot \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \vdots \\ \hat{u}_i \\ \vdots \\ \hat{u}_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$k \in \{1, \dots, w\}; k, w \in \mathbb{Z}^+$$

El elemento  $C_{y_i, \hat{u}_i}^{c_k}$  en la ecuación (2) representa el controlador de la salida  $y_i$  del vector de control  $\mathbf{c}_k$  (el superíndice  $c_k$  está asociado a cada concepto de diseño  $\mathbf{c}_k$ , por ejemplo para  $\mathbf{c}_1$  se asocia  $c_1$ ). Por lo cual el controlador  $C_{y_i, \hat{u}_i}^{c_k}$  genera la salida  $\hat{u}_i$  la cual se conecta con la entrada  $u_i$  del sistema multivariable usando la matriz de selección de lazos de control  $L_p^{c_k}$  como se muestra en la figura 1.  $L_p^{c_k}$  es una matriz Booleana como se muestra en (4). La matriz  $L_p^{c_k}$  está formada únicamente por un valor lógico 1 en cada una de sus filas o columnas como se muestra en (4).

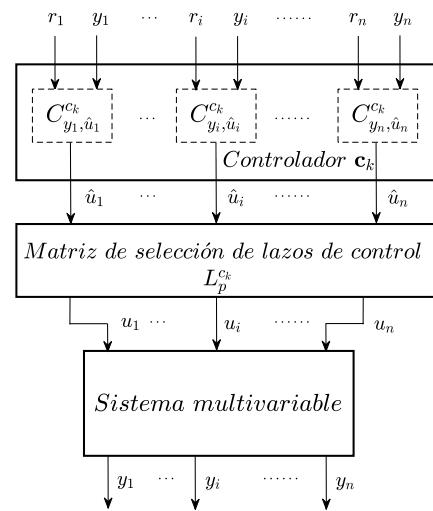


Figura 1: Diagrama de bloques del sistema de control multivariable descentralizado definido en (2) y (3).

$$L_p^{c_k} = \begin{bmatrix} l_{11} & \dots & l_{1n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ l_{n1} & \dots & l_{nn} \end{bmatrix}; l_{ij} = 0, 1; \forall i, j = 1 \dots n \quad (4)$$

$$\text{Para cada fila, } \sum_{i=1}^n (l_{ij}) = 1$$

$$\text{Para cada columna, } \sum_{j=1}^n (l_{ij}) = 1$$

Cada controlador  $C_{y_i, \hat{u}_i}^{c_k}$  se ajusta de forma óptima a través de un vector de parámetros  $\mathbf{x}^{c_k}$  y teniendo en consideración la combinación de lazos de control de acuerdo con  $L_p^{c_k}$ . Por lo tanto, el control del proceso se parametriza por el vector que se muestra en (8). Para cada concepto de diseño, se plantean MOPs como se muestra en (5)-(7).

$$\mathbf{X}^{c_k} = \arg \min_{\mathbf{x}^{c_k}} \mathbf{J}(\mathbf{x}^{c_k}) \quad (5)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}^{c_k}) = [J_1(\mathbf{x}^{c_k}), \dots, J_s(\mathbf{x}^{c_k})] \quad (6)$$

$$\underline{\mathbf{x}}^{c_k} \leq \mathbf{x}^{c_k} \leq \bar{\mathbf{x}}^{c_k} \quad (7)$$

Donde,  $\underline{\mathbf{x}}^{c_k}$  y  $\bar{\mathbf{x}}^{c_k}$  representan los límites superiores e inferiores del espacio de búsqueda del vector de parámetros  $\mathbf{x}^{c_k}$  para el concepto de diseño  $\mathbf{c}_k$ .

$$\mathbf{x}^{c_k} = [\mathbf{x}_{y_1}^{c_k}, \dots, \mathbf{x}_{y_n}^{c_k}] \quad (8)$$

Al aplicar la metodología se genera para cada concepto de diseño un conjunto de soluciones óptimas de Pareto  $\mathbf{X}^{c_k}$  y los correspondientes frentes de

Pareto  $\mathbf{J}(\mathbf{X}^{ck})$ . Finalmente se comparan los frentes de Pareto obtenidos para cada MOP (que corresponden a distintos lazos de control, cada uno con una estructura de control). La metodología se resume en la tabla 1 (se pueden encontrar todos los detalles en [14]).

Tabla 1: Metodología multiobjetivo para ajustar las estructuras de control en sistemas MIMO.

<b>ETAPA A: Definición del problema</b>
1: Definir el escenario
Objetivos $\mathbf{J}(\mathbf{x}^{ck}) = [J_1(\mathbf{x}^{ck}), \dots, J_s(\mathbf{x}^{ck})]$
Conjunto de restricciones sobre $\mathbf{J}(\mathbf{x}^{ck})$
2: Definir conceptos de diseño a considerar $\{c_1, \dots, c_k\}$
3: Plantear MOPs
$MOP_{c_1}, MOP_{c_2}, \dots, MOP_{c_k}$
<b>ETAPA B: Optimización multiobjetivo</b>
Optimizar cada $MOP_{c_k}$ para obtener:
4: Los frentes de Pareto $\mathbf{J}(\mathbf{X}_p^{*ck})$
5: Los conjuntos de Pareto para cada concepto $\mathbf{X}_p^{*ck}$
<b>ETAPA C: Toma de decisiones</b>
6. Compara conceptos de diseño $\mathbf{J}(\mathbf{X}_p^{*ck})$ , $\mathbf{X}_p^{*ck}$
7. Usando preferencias selecciona los controladores para el sistema MIMO
<b>¿El procedimiento y los controladores son satisfactorios?</b>
Si, entonces finaliza el procedimiento
No, puede regresar a la etapa A y considerar agregar nuevos conceptos y/o nuevos objetivos de diseño.

### 3 Ejemplo de aplicación

En esta sección se aplica la metodología mostrada en este artículo (ver tabla 1) a un sistema multivariable no lineal denominado unidad caldera-turbina [1]. El sistema propuesto en [1] presenta tres entradas  $u_1, u_2, u_3$  y tres salidas  $y_1, y_2, y_3$  y se usó para la generación de energía eléctrica.

La dinámica del sistema fue modelada en [1], y se fundamentó en el grupo caldera-turbina P16/G16 de la planta Sydvenska Kraft AB en Malmö, Suecia [7], [8]. El modelo en primeros principios del sistema se muestra en las ecuaciones (9)-(13).

$$\dot{x}_1 = -0.0018u_2x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \quad (9)$$

$$\dot{x}_2 = (0.073u_2 - 0.016)x_1^{9/8} - 0.1x_2 \quad (10)$$

$$\dot{x}_3 = (141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1)/85 \quad (11)$$

$$y_1 = x_1; y_2 = x_2 \quad (12)$$

$$y_3 = 0.05(0.13073x_3 + 100a_{cs} + q_e/9 - 67.975) \quad (13)$$

Donde:  $x_1, x_2$ , y  $x_3$  son las variables de estado del sistema y representan;  $x_1$ : presión de la caldera [ $Kg/cm^2$ ];  $x_2$ : potencia eléctrica de salida [ $MW$ ];  $x_3$ : densidad del fluido [ $Kg/m^3$ ].

Las entradas se denotan por  $u_1, u_2$ , y  $u_3$  y representan;  $u_1$ : posición de la válvula para el flujo de combustible;  $u_2$ : posición de la válvula para el control del vapor;  $u_3$ : posición de la válvula para el control de flujo de agua de alimentación.

La salida  $y_1$  representa la presión de la caldera en [ $Kg/cm^2$ ];  $y_2$  es la potencia eléctrica de salida en [ $MW$ ]; y la salida  $y_3$  representa el nivel del agua en el colector de la caldera en [ $m$ ] con respecto del nivel de referencia para el punto de operación nominal del sistema. La salida  $y_3$  puede ser tanto positiva como negativa y depende de  $a_{cs}$  y  $q_e$  que representan la calidad del vapor y la tasa de evaporación en [ $Kg/s$ ] respectivamente y se detallan en las ecuaciones (14), (15).

$$a_{cs} = \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)} \quad (14)$$

$$q_e = (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \quad (15)$$

Los actuadores del sistema presentan restricciones como se detalla en [1]. Algunos puntos de operación ( $\wp$ ) del sistema descrito en [1] son propuestos en [18], [20] y se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Puntos de operación de la unidad caldera-turbina.

$\wp$	$\wp_1$	$\wp_2$	$\wp_3$	$\wp_4$	$\wp_5$	$\wp_6$	$\wp_7$
$x_1^0$	75.60	86.40	97.20	108	118.8	129.6	140.4
$x_2^0$	15.27	36.65	50.52	66.65	85.06	105.8	128.9
$x_3^0$	299.6	324.4	385.2	428	470.8	513.6	556.4
$u_1^0$	0.156	0.209	0.271	0.34	0.418	0.505	0.6
$u_2^0$	0.483	0.552	0.621	0.69	0.759	0.828	0.897
$u_3^0$	0.183	0.256	0.340	0.433	0.543	0.663	0.793
$y_3^0$	-0.97	-0.65	-0.32	0	0.32	0.64	0.98

El punto de operación nominal del sistema es usualmente el punto  $\wp_4$  (de acuerdo con [1], [20]). Si se linealiza el sistema en este punto de operación se obtiene la planta propuesta en [8], que se muestra en la ecuación (16).

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Donde:

$$G_{11} = \frac{0.9}{s + 0.002509} \quad (17)$$

$$G_{12} = \frac{-0.34904}{s + 0.002509} \quad (18)$$

$$G_{13} = \frac{-0.15}{s + 0.002509} \quad (19)$$

$$G_{21} = \frac{-1.3878 \cdot 10^{-17}(s - 4.502 \cdot 10^{15})}{(s + 0.002509)(s + 0.1)} \quad (20)$$

$$G_{22} = \frac{14.1555(s + 0.0007969)}{(s + 0.002509)(s + 0.1)} \quad (21)$$

$$G_{23} = \frac{-0.010414}{(s + 0.002509)(s + 0.1)} \quad (22)$$

$$G_{31} = \frac{0.25328(s - 0.003871)(s + 0.02892)}{(s + 0.002509)s} \quad (23)$$

$$G_{32} = \frac{0.5124(s - 0.01535)(s + 0.0007)}{(s + 0.002509)s} \quad (24)$$

$$G_{33} = \frac{-0.013967(s - 0.4918)(s + 0.003539)}{(s + 0.002509)s} \quad (25)$$

El cálculo de RGA del sistema de acuerdo con [8] se muestra en la ecuación (26). Se puede observar en (23)-(25) que la salida  $y_3$  tiene un polo en el origen ( $s = 0$ ), por lo cual el RGA calculado en [8] podría ser un poco ambiguo.

$$\Lambda = \begin{matrix} & u_1 & u_2 & u_3 \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.3119 & \mathbf{0.6824} & 0.0058 \\ \mathbf{0.9294} & 0.3176 & -0.2474 \\ -0.2413 & 0 & \mathbf{1.2413} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (26)$$

De acuerdo con RGA la combinación de lazos entrada-salida sugerido para controlar el sistema de manera descentralizada es:  $y_1 - u_2; y_2 - u_1; y_3 - u_3$ . Analizando la ecuación (26) se puede ver que existen otras combinaciones de lazos de control que posibilitan controlar el sistema como por ejemplo  $y_1 - u_1; y_2 - u_2; y_3 - u_3$ .

De forma general la metodología mostrada puede ser aplicada directamente sobre sistemas multi-variables no lineales, aunque para delimitar el análisis del conjunto de posibles combinaciones de bucles de entrada-salida puede ser útil indagar inicialmente las ganancias relativas del sistema en cada punto de operación (calculando RGA o aplicando cualquier metodología clásica de selección de lazos de control). De esta forma se analizaría solo aquellos bucles de control en donde los elementos de RGA sean mayores que cero (que en principio son las combinaciones viables para controlar el sistema). Esto también reduce el número de MOP a analizar y por tanto el coste computacional de la metodología. Es válido mencionar que la selección de un bucle de control u otro puede estar influenciada por el punto de operación del sistema como se mostró en [11].

Para analizar detalladamente como seleccionar lazos entrada-salida óptimos para controlar el sistema propuesto en [1] y ajustar los controladores se aplica la metodología propuesta en [10], [11], [14].

Se analizan dos combinaciones de lazos de control para reducir el número de conceptos de diseño y el coste computacional de la metodología (sin embargo puede ser aplicada para analizar múltiples combinaciones de lazos de control).

Se establecen dos conceptos de diseño  $\mathbf{c}_1$  (laços de control  $LP_1 : y_1 - u_2; y_2 - u_1; y_3 - u_3$ ); y  $\mathbf{c}_2$

(laços de control  $LP_2 : y_1 - u_1; y_2 - u_2; y_3 - u_3$ ). Se usan controladores PIs de un grado de libertad con anti-windup como se muestra en (27)-(34).

$$\mathbf{c}_1 = [C_{y_1, \hat{u}_1}^{c_1}, C_{y_2, \hat{u}_2}^{c_1}, C_{y_3, \hat{u}_3}^{c_1}] \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$C_{y_1, \hat{u}_1}^{c_1} = \frac{K_1^{c_1}(s + 1/T_1^{c_1})}{s} \quad (29)$$

$$C_{y_2, \hat{u}_2}^{c_1} = \frac{K_2^{c_1}(s + 1/T_2^{c_1})}{s}$$

$$C_{y_3, \hat{u}_3}^{c_1} = \frac{K_3^{c_1}(s + 1/T_3^{c_1})}{s}$$

$$\mathbf{x}^{c_1} = [K_1^{c_1}, T_1^{c_1}, K_2^{c_1}, T_2^{c_1}, K_3^{c_1}, T_3^{c_1}] \quad (30)$$

$$\mathbf{c}_2 = [C_{y_1, \hat{u}_1}^{c_2}, C_{y_2, \hat{u}_2}^{c_2}, C_{y_3, \hat{u}_3}^{c_2}] \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$C_{y_1, \hat{u}_1}^{c_2} = \frac{K_1^{c_2}(s + 1/T_1^{c_2})}{s} \quad (33)$$

$$C_{y_2, \hat{u}_2}^{c_2} = \frac{K_2^{c_2}(s + 1/T_2^{c_2})}{s}$$

$$C_{y_3, \hat{u}_3}^{c_2} = \frac{K_3^{c_2}(s + 1/T_3^{c_2})}{s}$$

$$\mathbf{x}^{c_2} = [K_1^{c_2}, T_1^{c_2}, K_2^{c_2}, T_2^{c_2}, K_3^{c_2}, T_3^{c_2}] \quad (34)$$

Para cada concepto de diseño se plantea un MOP ( $k = 1$  para el concepto  $\mathbf{c}_1$ ; laços  $LP_1$ , y  $k = 2$  para el concepto  $\mathbf{c}_2$ ; laços  $LP_2$ ), donde cada MOP tiene seis objetivos de diseño. Tres objetivos se plantean para analizar el desempeño de cada una de las salidas ( $y_1, y_2, y_3$ ) aplicando el indicador IAE y los tres objetivos restantes analizan los esfuerzos de control del sistema ( $u_1, u_2, u_3$ ) aplicando el indicador IADU. De esta forma se evalúa el desempeño de cada salida del sistema de manera independiente, es decir, sin mezclar desempeños con esfuerzos de control del sistema, para evitar enmascarar información que podría ser importante para que un diseñador tome una decisión. Se plantea cada MOP como se detalla en las ecuaciones (35)-(41).

$$\min_{\mathbf{x}^{ck}} \mathbf{J}(\mathbf{x}^{ck}) \quad (35)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}^{ck}) = [J_1(\mathbf{x}^{ck}), J_2(\mathbf{x}^{ck}), J_3(\mathbf{x}^{ck}), J_4(\mathbf{x}^{ck}), J_5(\mathbf{x}^{ck}), J_6(\mathbf{x}^{ck})] \quad (36)$$

$$J_\eta(\mathbf{x}^{ck}) = \int_0^{t_f} |e_\eta| \Big|_{r_1=y_1^0+\Delta y_1}^{(r_2, r_3)=(y_2^0, y_3^0)} dt + \int_0^{t_f} |e_\eta| \Big|_{r_2=y_2^0+\Delta y_1}^{(r_1, r_3)=(y_1^0, y_3^0)} dt \quad (37)$$

$$J_{\eta+3}(\mathbf{x}^{ck}) = \int_0^{t_f} \left| \frac{du_\eta}{dt} \right| \Big|_{r_1=y_1^0+\Delta y_1}^{(r_2,r_3)=(y_2^0,y_3^0)} dt + \int_0^{t_f} \left| \frac{du_\eta}{dt} \right| \Big|_{r_2=y_2^0+\Delta y_2}^{(r_1,r_3)=(y_1^0,y_3^0)} dt \quad (38)$$

$\eta = 1$  hasta 3

$t_f = 500$  segundos

$$\underline{\mathbf{x}}^{ck} \leq \mathbf{x}^{ck} \leq \overline{\mathbf{x}}^{ck} \quad (39)$$

$$J_1(\mathbf{x}^{ck}) \leq 12 \cdot 10^4, J_2(\mathbf{x}^{ck}) \leq 2.5 \cdot 10^5$$

$$J_3(\mathbf{x}^{ck}) \leq 600, J_4(\mathbf{x}^{ck}) \leq 150, \quad (40)$$

$$J_5(\mathbf{x}^{ck}) \leq 50, J_6(\mathbf{x}^{ck}) \leq 200$$

$$\mathbf{x}^{ck} = [K_1^{ck}, T_{i1}^{ck}, K_2^{ck}, T_{i2}^{ck}, K_3^{ck}, T_{i3}^{ck}] \quad (41)$$

Los límites del vector de decisión  $\mathbf{x}^{ck}$  se muestran en la tabla 3. Estos límites se establecieron tomando en consideración los controladores de referencia propuestos en [20]. Si no se dispone de experimentos previos, es posible ajustar un controlador de referencia usando alguna técnica de sintonización clásica. El objetivo de usar un controlador de referencia es acotar el espacio de búsqueda de soluciones del algoritmo *ev-MOGA* [9] y disminuir el coste computacional de la metodología.

Tabla 3: Límites de los vectores de decisión  $\mathbf{x}^{c1}$  y  $\mathbf{x}^{c2}$  para el ajuste de controladores del sistema caldera-turbina.

$\mathbf{x}^{c1}$	$K_1^{c1}$	$T_{i1}^{c1}$	$K_2^{c1}$	$T_{i2}^{c1}$	$K_3^{c1}$	$T_{i3}^{c1}$
$\underline{\mathbf{x}}^{c1}$	0.001	10	0.001	5	5	15
$\overline{\mathbf{x}}^{c1}$	1	50	1	20	10	30
$\mathbf{x}^{c2}$	$K_1^{c2}$	$T_{i1}^{c2}$	$K_2^{c2}$	$T_{i2}^{c2}$	$K_3^{c2}$	$T_{i3}^{c2}$
$\underline{\mathbf{x}}^{c2}$	0.001	40	-1	50	5	50
$\overline{\mathbf{x}}^{c2}$	1	60	0.1	70	10	150

## 4 Resultados y discusión

Luego de la optimización multiobjetivo de cada MOP se obtuvieron los frentes de Pareto que se muestran mediante LD en las figuras 2 y 3. En la figura 2 se aplicó la norma- $\infty$  para representar los frentes, ya que esta permite realizar un análisis de compensaciones entre los objetivos de diseño de cada MOP (un incremento en esta norma indica un degradamiento de al menos uno de los objetivos del MOP). Se puede observar en los objetivos  $J_1$ ,  $J_2$ , y  $J_3$  de la figura 2 que el control  $LP_1$  tiene mejores prestaciones para seguimiento de referencias de las salidas  $y_1, y_2, y_3$  comparado con el control  $LP_2$  ya que  $LP_1$  cubre una región que  $LP_2$  no alcanza y que corresponde a los mejores desempeños para cada una de las salidas, especialmente para  $y_1$  y  $y_2$ . Esta región corresponde a:  $J_1(\mathbf{x}^{c1}) < 2557, J_2(\mathbf{x}^{c1}) < 9476, J_3(\mathbf{x}^{c1}) < 2.47$ .

Con respecto a las acciones de control del sistema se puede observar en los objetivos  $J_4, J_5$ , y  $J_6$  de la figura 2 que el control  $LP_1$  consigue menores esfuerzos de control para controlar el sistema comparado con el control  $LP_2$ . En la figura 3 se muestra los frentes de Pareto de  $LP_1$  y  $LP_2$  aplicando la norma  $QI$  (detalles de la norma  $QI$  se muestran en [17], [19]). Es posible observar que el control  $LP_1$  tiene una región que domina al control  $LP_2$ , esta zona corresponde a las soluciones del frente de  $LP_1$  donde  $QI < 1$  (es decir, las soluciones que están bajo la unidad). Para analizar con mayor detalle el desempeño de  $LP_1$  y  $LP_2$  se seleccionó una solución en cada frente de Pareto. La solución  $PA$  del concepto de diseño  $LP_1$  y  $PB$  del concepto de diseño  $LP_2$ .

Se analizó el comportamiento del sistema cuando se mueve de su punto de operación nominal ( $\varphi_4$ ) a un punto de operación cercano. Para lo cual en  $t = 100$  s, la presión de la caldera  $y_1$  cambia de 108  $Kg/cm^2$  hasta 120  $Kg/cm^2$ , la potencia eléctrica de salida  $y_2$  de 66.65  $MW$  a 100  $MW$  y el nivel de agua en el colector de caldera  $y_3$  se mantiene en su valor nominal (0 m). Las respuestas del sistema se muestran en la figura 4. Aquí se puede observar que tanto el controlador  $PA$  como el  $PB$  estabilizan el sistema, pero está claro que el controlador en  $PA$  (control  $LP_1$ ) tiene un mejor desempeño que el controlador en  $PB$  (control  $LP_2$ ). Esto también se muestra en la tabla 4 (ver objetivos  $J_1, J_2, J_3$ ). Los esfuerzos de control del controlador  $PA$  son menos agresivos que los del  $PB$  (ver objetivos  $J_4, J_5, J_6$ ).

Tabla 4: Parámetros y desempeños de controladores PIs seleccionados en las figuras 2 y 3.

Parámetros	$PB (PIs - LP_2)$	Parámetros	$PA (PIs - LP_1)$
$K_1^{c2}$	0.0236	$K_1^{c1}$	0.0382
$T_{i1}^{c2}$	59.17	$T_{i1}^{c1}$	49.42
$K_2^{c2}$	-0.01673	$K_2^{c1}$	0.00187
$T_{i2}^{c2}$	59.98	$T_{i2}^{c1}$	11.66
$K_3^{c2}$	7.31	$K_3^{c1}$	9.83
$T_{i3}^{c2}$	145.35	$T_{i3}^{c1}$	16.42
$J_1(\mathbf{x}^{c2})$	11913.2	$J_1(\mathbf{x}^{c1})$	<b>5618.2</b>
$J_2(\mathbf{x}^{c2})$	19357.5	$J_2(\mathbf{x}^{c1})$	<b>18719.3</b>
$J_3(\mathbf{x}^{c2})$	158.09	$J_3(\mathbf{x}^{c1})$	<b>41.76</b>
$J_4(\mathbf{x}^{c2})$	3.474	$J_4(\mathbf{x}^{c1})$	<b>1.103</b>
$J_5(\mathbf{x}^{c2})$	0.9462	$J_5(\mathbf{x}^{c1})$	<b>0.2999</b>
$J_6(\mathbf{x}^{c2})$	4.96	$J_6(\mathbf{x}^{c1})$	<b>2.30</b>

Para analizar el sistema en un punto de operación alejado del punto nominal de trabajo, se simula su comportamiento cuando en  $t = 100$  s,  $y_1$  cambia de 108  $Kg/cm^2$  a 150  $Kg/cm^2$ ,  $y_2$  de 66.65  $MW$  a 100  $MW$ , y el nivel de agua en el colector de caldera  $y_3$  cambia de 0 m a 0.5 m. Las respuestas del sistema se muestran en la figura 5, donde se puede observar que el controlador en  $PA$  (lazo de control  $LP_1$ ) sigue manteniendo un mejor desempeño para estabilizar el sistema comparado con el controlador en  $PB$  (lazo de control  $LP_2$ ).

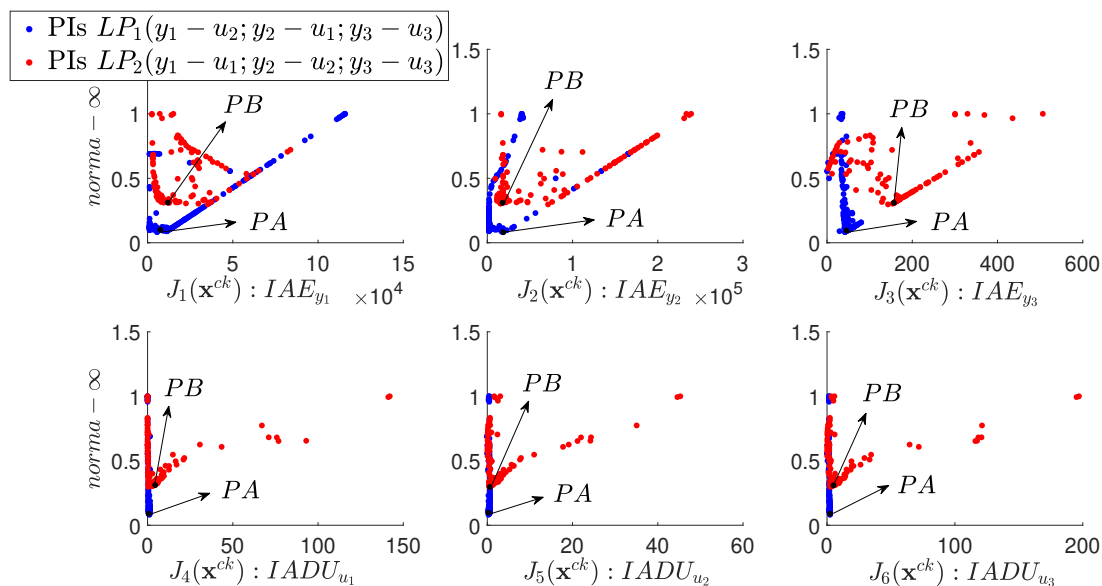


Figura 2: Frentes de Pareto para los lazos  $LP_1$  y  $LP_2$  usando LD con norma- $\infty$ . Los objetivos  $J_1(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_2(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_3(\mathbf{x}^{ck})$  evalúan el desempeño de  $y_1, y_2, y_3$  respectivamente.  $J_4(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_5(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_6(\mathbf{x}^{ck})$  evalúan los esfuerzos de control  $u_1, u_2, u_3$  respectivamente.

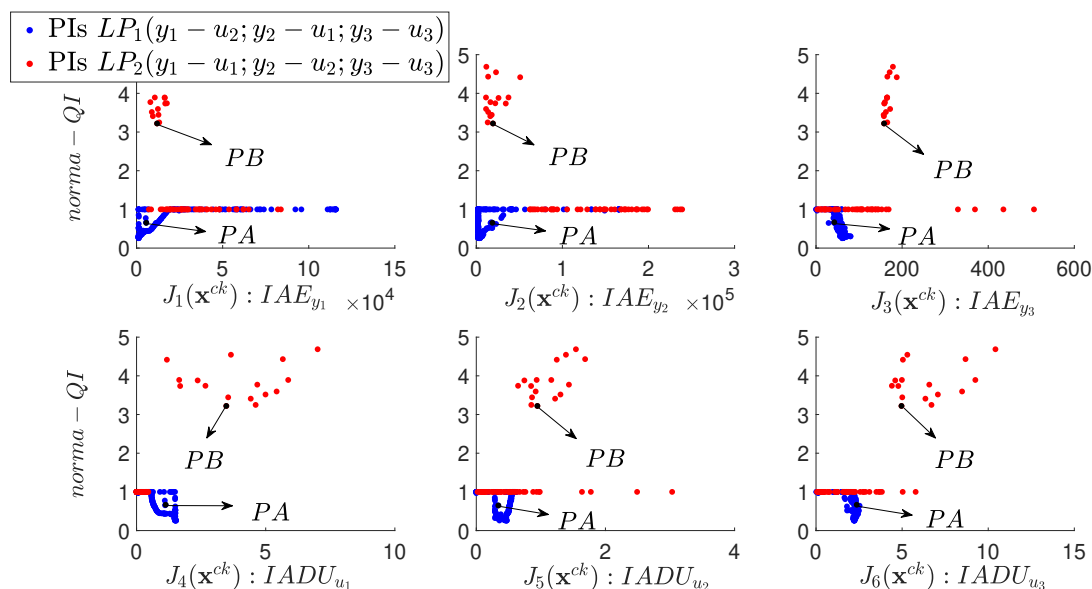


Figura 3: Frentes de Pareto para los lazos  $LP_1$  y  $LP_2$  usando LD con norma- $QI$ . Se grafican solamente las soluciones donde  $QI < 5$ .  $J_1(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_2(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_3(\mathbf{x}^{ck})$  evalúan el desempeño de  $y_1, y_2, y_3$  respectivamente.  $J_4(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_5(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_6(\mathbf{x}^{ck})$  evalúan los esfuerzos de control  $u_1, u_2, u_3$  respectivamente.

## 5 Conclusiones

En este artículo se muestra un ejemplo de aplicación para controlar de forma descentralizada sistemas multivariables con un enfoque de optimización multiobjetivo. La metodología usada permite tanto la selección de lazos de control como el ajuste óptimo de sus controladores. Se aplicó la metodología a un sistema multivariable no lineal denominado unidad caldera-turbina, para lo

cual se plantearon dos conceptos de diseño ( $LP_1$  y  $LP_2$ ). Se mostró detalladamente que el concepto  $LP_1$  tiene un mejor desempeño para controlar el sistema que el concepto  $LP_2$ . Un aspecto interesante es que la metodología se aplicó directamente sobre el sistema no lineal, es decir no fue necesario linealizarlo. En el ejemplo de aplicación se muestra como la metodología ofrece a un diseñador información detallada para que en base a sus preferencias pueda elegir tanto los lazos de control como

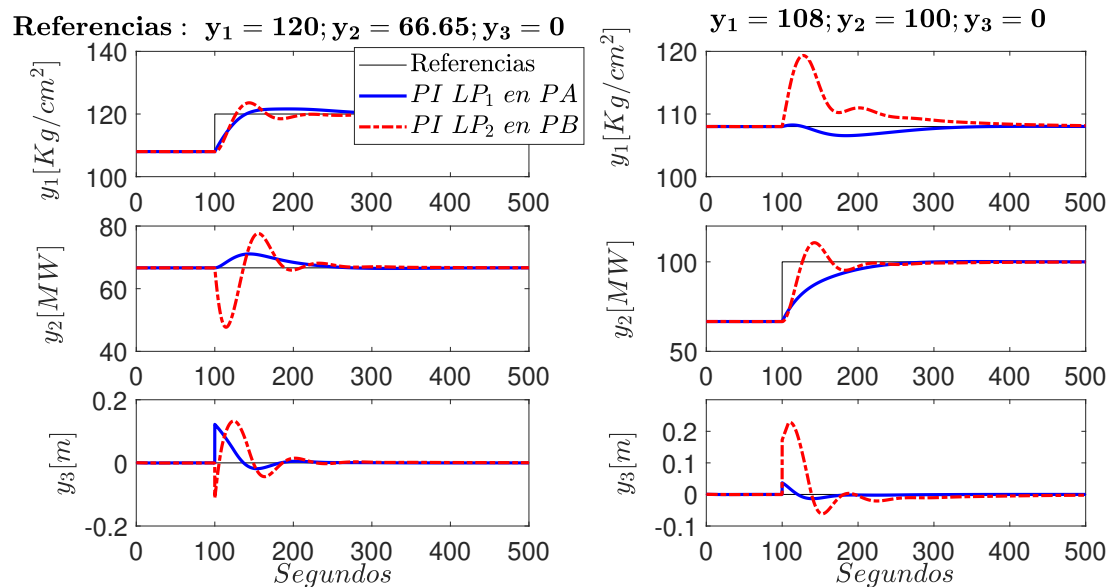


Figura 4: Salidas del sistema para los controladores  $PA$ ,  $PB$  en un punto de operación cercano al punto de operación nominal de la unidad caldera-turbina.

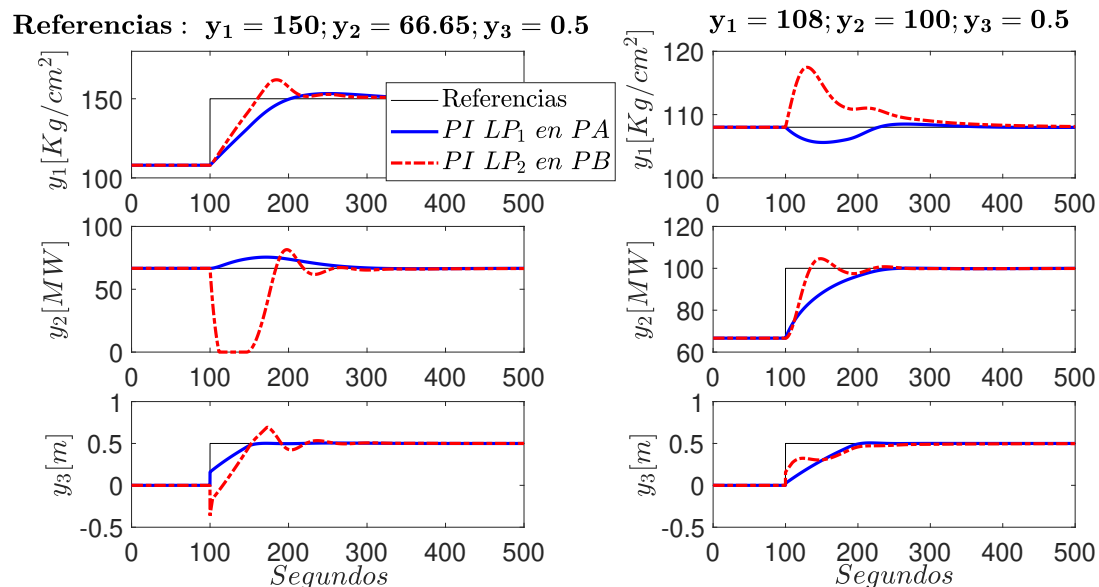


Figura 5: Salidas del sistema para los controladores  $PA$ ,  $PB$  en un punto de operación alejado del punto nominal de trabajo de la unidad caldera-turbina.

el ajuste óptimo de los controladores del sistema bajo estudio.

### Agradecimientos

A la Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador) y al grupo de investigación en sistemas de control y robótica (GISCOR). Trabajo parcialmente financiado por proyecto RTI2018-096904-B-I00 del plan estatal de I+D+i orientada a los retos de la sociedad, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (España) .

### Referencias

- [1] Karl Johan Åström and Rod Bell. Dynamic models for boiler-turbine alternator units: Data logs and parameter estimation for a 160 mw unit. *Research Reports TFRT-3192*, 1987.
- [2] Lubomir Bakule. Decentralized control: Status and outlook. *Annual Reviews in Control*, 38(1):71–80, 2014.
- [3] Xavier Blasco, Juan M Herrero, Javier Sanchis, and Manuel Martínez. A new graphical



- visualization of n-dimensional pareto front for decision-making in multiobjective optimization. *Information Sciences*, 178(20):3908–3924, 2008.
- [4] Xavier Blasco, Juan Manuel Herrero, Gilberto Reynoso-Meza, and Miguel A Martínez Iranzo. Interactive tool for analyzing multiobjective optimization results with level diagrams. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, pages 1689–1696, 2017.
- [5] Edgar Bristol. On a new measure of interaction for multivariable process control. *IEEE transactions on automatic control*, 11(1):133–134, 1966.
- [6] Eduardo F Camacho and Carlos Bordons Alba. *Model predictive control*. Springer science & business media, 2013.
- [7] Pang-Chia Chen and Jeff S Shamma. Gain-scheduled  $\ell_1$ -optimal control for boiler-turbine dynamics with actuator saturation. *Journal of process control*, 14(3):263–277, 2004.
- [8] Juan Garrido, Fernando Morilla, and Francisco Vazquez. Centralized pid control by decoupling of a boiler-turbine unit. In *2009 European Control Conference (ECC)*, pages 4007–4012. IEEE, 2009.
- [9] JM Herrero, Xavier Blasco, M Martínez, C Ramos, and J Sanchis. Non-linear robust identification of a greenhouse model using multi-objective evolutionary algorithms. *Biosystems Engineering*, 98(3):335–346, 2007.
- [10] Víctor Huilcapi, Xavier Blasco, Juan Manuel Herrero, and Gilberto Reynoso-Meza. A loop pairing method for multivariable control systems under a multi-objective optimization approach. *IEEE Access*, 7:81994–82014, 2019.
- [11] Víctor Huilcapi, Xavier Blasco, Juan Manuel Herrero, and Gilberto Reynoso-Meza. A loop pairing method for non-linear multivariable control systems under a multi-objective optimization approach. *IEEE Access*, 8:41262–41281, 2020.
- [12] Victor Huilcapi, Juan Manuel Herrero, Xavier Blasco, and Miguel Martínez-Iranzo. Non-linear identification of a peltier cell model using evolutionary multi-objective optimization. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):4448–4453, 2017.
- [13] Víctor Huilcapi, Byron Lima, Xavier Blasco, and Juan Manuel Herrero. Multi-objective optimization in modeling and control for rotary inverted pendulum. *RIAI-Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, pages 363–373, 2018.
- [14] Victor Huilcapi Subia. *Desarrollo de una metodología para la selección de lazos de control en sistemas multivariables mediante técnicas de optimización multiobjetivo*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2021.
- [15] Ali Khaki-Sedigh and Bijan Moaveni. *Control configuration selection for multivariable plants*, volume 391. Springer, 2009.
- [16] Štefan Kozák. State-of-the-art in control engineering. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 1(1):1–9, 2014.
- [17] Gilberto Reynoso Meza, Xavier Blasco Ferragud, Javier Sanchis Saez, and Juan Manuel Herrero Durá. *Controller tuning with evolutionary multiobjective optimization: A holistic multiobjective optimization design procedure*, volume 85. Springer, 2016.
- [18] Babatunde A Ogunnaike. *Process dynamics, modeling, and control*. Number 660.28 O48. 1994.
- [19] Gilberto Reynoso-Meza, Xavier Blasco, Javier Sanchis, and Juan M Herrero. Comparison of design concepts in multi-criteria decision-making using level diagrams. *Information Sciences*, 221:124–141, 2013.
- [20] Wen Tan, Horacio J Marquez, Tongwen Chen, and Jizhen Liu. Analysis and control of a nonlinear boiler-turbine unit. *Journal of process control*, 15(8):883–891, 2005.
- [21] Gang Tao. Multivariable adaptive control: A survey. *Automatica*, 50(11):2737–2764, 2014.
- [22] Yarai E Tlatelpa-Osorio, H Rodríguez-Cortés, and JÁ Acosta. A decentralized approach for the aerial manipulator trajectory tracking. In *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 504–511. IEEE, 2020.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Estudio preliminar de los métodos de evaluación del control compartido

Joseba Sarabia, Mauricio Marcano, Joshué Perez Rastelli, Sergio Diaz Briceño, Asier Zubizarreta  
TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA)

Escuela de Ingeniería de Bilbao (EIB)

joseba.sarabia@tecnalia.com, mauricio.marcano@tecnalia.com, joshue.perez@tecnalia.com,  
sergio.diaz@tecnalia.com, asier.zubizarreta@ehu.eus

## Resumen

*La conducción automatizada es un área en auge, con múltiples ventajas para el transporte de personas y mercancías. A pesar de que el objetivo es lograr una automatización total, los niveles intermedios de automatización requieren desarrollar el concepto de Control Compartido, en el que el vehículo y el conductor ejercen simultáneamente una acción de control sobre uno (o más) de los actuadores del vehículo (ej., el volante). Con el fin de poder definir metodologías adecuadas para evaluar y verificar estos sistemas, en este trabajo se analizan las métricas más relevantes de la literatura y se propone una metodología que constituirá la base para futuros desarrollos.*

**Palabras clave:** Conducción automatizada, Control Compartido, Métricas de Evaluación

## 1. Introducción

La conducción automatizada (Automated Driving en inglés, AD), ha captado una gran atención en la actualidad. Los principales fabricantes de automoción ya están testeando sus prototipos y ciertos sistemas de ayudas a la conducción (ADAS). La oferta de estos es cada vez más amplia. Ya no sólo se trata de sistemas ABS, sistemas de estabilidad ESP o el control de crucero. Actualmente, existen modelos comerciales con sistemas de ayuda activa a la conducción como los sistemas de mantenimiento de carril (LKA) o el aparcamiento automatizado.

Si bien estos sistemas traen consigo beneficios como una mejora en la fluidez del tráfico [10], una reducción en el consumo de combustible [3] o la reducción de la densidad de tráfico en las ciudades y el uso compartido de vehículos [12], el principal beneficio que aportan está en la seguridad. Los coches con sistemas de ayuda a la conducción son (y serán [4, 5, 7]) mucho más seguros que los únicamente controlados por personas. Numerosos estudios demuestran que un alto porcentaje de los accidentes de carretera están causados por errores humanos [9, 8]. Ya sean distracciones, conducir en

un estado inadecuado o hacer otras tareas paralelamente a la conducción son causas que comprenden más del 90 % de los siniestros [29, 24].

La mejor forma de entender la conducción automatizada es a través de los niveles definidos por la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE). En 2014 la SAE estableció una terminología común que fue acogida por tanto gobiernos como la industria [1]. Esta especifica 6 niveles de automatización, desde “sin automatizar” (nivel 0) hasta “automatización completa” (nivel 5). Los niveles del 1 al 3 aumentan progresivamente el uso de la automatización, pero implican al conductor en la tarea de conducción. En el nivel 3 los vehículos deben ser capaces de conducir solos en determinadas situaciones, siempre y cuando haya un conductor que se haga cargo en situaciones de emergencia. Algunas compañías como Tesla y GM lanzaron en su momento los primeros modelos de nivel 3, pero por problemas legales en accidentes tomaron la precaución de llamarlo nivel 2 [13], donde el responsable último es el conductor y no el vehículo. En la actualidad, muchas compañías abogan por saltarse el nivel 3, y desarrollar directamente los niveles 4 y 5, donde el vehículo es completamente responsable de la tarea de conducción [18]. El nivel 4 se ha visto retrasado a una fase donde requiere un mayor estudio y desarrollo.

Por otra parte, estos niveles no consideran una interacción continua y constante entre la automatización y el conductor. En este sentido, la principal rama de AD que estudia la interacción entre el conductor y el sistema es el Control Compartido (Shared Control, SC) [15, 17]. Este concepto recoge que tanto el conductor como el vehículo deben controlar simultáneamente el volante o los pedales, lo que es un requisito en etapas intermedias de automatización. Esta cooperación requiere un entendimiento de la intención de ambas partes, dado que ambas están capacitadas para tomar decisiones sobre el control del vehículo. Como se muestra en la (Figura 1), los principales agentes son el sistema automatizado y el conductor. Dentro del marco del SC, ambos cuentan con las herramientas necesarias para guiar el vehículo.

El vehículo automatizado, por un lado, cuenta con

el esquema convencional de 6 bloques (incluyendo el módulo de actuación) [16] donde el vehículo recibe la información del entorno, genera una trayectoria acorde y la sigue mediante el lazo de control. El conductor, por el otro, está sujeto a la monitorización de su estado a través del Sistema de Monitorización del conductor (o Driver Monitoring System, DMS). Además, el sistema de interacción humano-máquina (o Human Machine Interface, HMI) le permite intercambiar información con el vehículo de forma bidireccional. Entre ambos agentes se encuentra el módulo de arbitraje. Mediante este se regula la cooperación entre ambos sistemas. En función del estado y la actitud del conductor, se adecua el nivel de asistencia ofrecida por el vehículo, de manera que se cumplan los objetivos de conducción previamente definidos en el diseño del sistema.

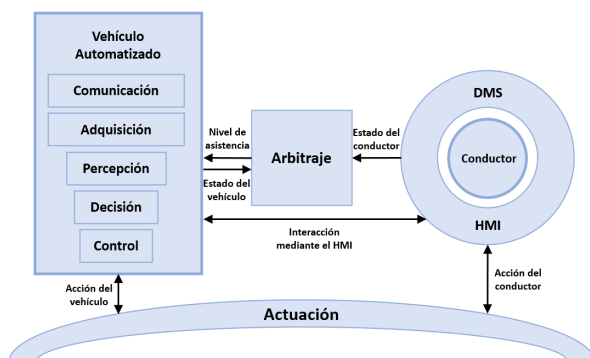


Figura 1: Marco del Control Compartido.

Diferentes sistemas basados en SC han sido desarrollados en los últimos años con múltiples aplicaciones para vehículos automatizados. Sin embargo, la mayoría han sido probados en plataformas de simulación driver-in-the-loop (DiL). Por lo tanto, el siguiente avance tecnológico consiste en una futura implementación en vehículos reales. Para ello, un paso fundamental es establecer una metodología de evaluación y validación bien definida de dichas funcionalidades.

En el mundo de automoción, la validación de componentes sigue una estructura muy específica y estandarizada: El método V de verificación y validación. Esto es un proceso secuencial marcadamente rígido que describe las actividades y resultados que deben producirse en el desarrollo de componentes de automoción. Se trata de un proceso lento, pero con resultados contrastados. El desarrollo de ADAS, en cambio, sigue una estructura diferente. Al tratarse de una tecnología no madura, cada año existen nuevas variantes de cada sistema, por lo que deben desarrollarse nuevas formas de validarlos. Tanto es así que instituciones internacionales como la SAE, ISO, UNE y NHTSA

están lanzando y actualizando frecuentemente los nuevos estándares de los ADAS [2, 1, 11], y han hecho un llamamiento a las instituciones relacionadas para participar en su desarrollo.

Dentro de este contexto, el SC es un caso complejo, ya que requiere de la validación de los sistemas con el conductor dentro del loop (DiL) de control. Esto implica que asegurar el funcionamiento del sistema no es suficiente, sino que debe ser a su vez capaz de ajustarse a las decisiones y necesidades de cualquier conductor. Numerosos estudios apuntan a hacer modificaciones en la estructura de validación de estas tecnologías, adoptando estrategias “Human-Centred Design” (HCD) [19]. De esta manera el modo de validación se ajusta más a las condiciones del usuario. HCD concretamente es una metodología que implica al usuario final en todo el proceso de desarrollo, desde la gestación de ideas iniciales y requisitos, hasta la validación. Utiliza una estructura iterativa, donde cada sistema se actualiza en base a las valoraciones de sus usuarios. La validación se lleva a cabo mediante tres métodos: Testeo con usuarios, inspecciones basadas en pautas de uso y accesibilidad, y monitorización en uso prolongado. Actualmente, HCD es una metodología inmadura, en algunos casos acuñada más bien como una filosofía, de uso mayoritario en investigación. Es por esto que su utilidad reside en marcar las pautas de lo que se posteriormente se definirá como la metodología de validación del SC.

Tomando el HCD y el llamamiento de la SAE como base, este documento muestra una propuesta de metodología de validación para los sistemas de SC basada en 5 pasos, definiendo métricas y procedimientos para sentar una base futura a los desarrollos en el área.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente forma: En la Sección 2, se detalla la estructura general de la metodología, que abarca 5 fases, detalladas en las secciones 3-6. La sección 7 resume las ideas más importantes.

## 2. Visión General de la Metodología

La metodología propuesta, basada en el llamamiento de la SAE [6] se muestra en la Figura 2. Está compuesta por 5 bloques, con una estructura secuencial iterativa. En primer lugar, se describen los objetivos que el sistema busca alcanzar. En segundo lugar, se definen las métricas para alcanzar dichos objetivos. Esto se trata de un proceso iterativo, por lo que en la primera iteración se definen unas métricas basadas en la experiencia. En el siguiente paso, se describe el entorno operativo (Operational Design Domain en inglés, ODD)

en el que se deben cumplir estos objetivos. Posteriormente, se hace un análisis de las métricas obtenidas y, en función del resultado, se modifican o añaden nuevas métricas. Se repite este proceso hasta obtener unas métricas que ofrezcan unos resultados satisfactorios. Estas fases serán analizadas en las secciones siguientes.

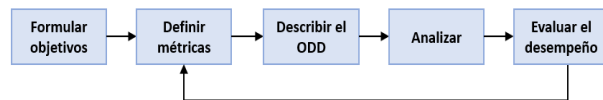


Figura 2: Proceso recomendado por la SAE para la obtención de pruebas de desempeño [6].

### 3. Formulación de Objetivos

El primer paso es definir los beneficios que el SC debe reportar. Para ello, se han clasificado en cuatro grupos los principales objetivos estudiados en el estado del arte del SC. Si bien pudiera existir un quinto que es el relacionado con los aspectos legales y la gestión de la responsabilidad, ese apartado queda fuera de este estudio:

- Seguridad: Es el objetivo principal para cualquier sistema en automoción, y el más difícil de cumplir en una arquitectura con dos agentes tomando decisiones al mismo tiempo. En situaciones de emergencia se debe establecer una gestión de la autoridad clara sobre el control del vehículo, siendo el conductor el principal capacitado para asumir el control, y el vehículo, en caso de que el conductor muestre signos de no estar capacitado para ello.
- Control: El sistema debe estar capacitado para mantener el control del vehículo siempre que esté activo. Ya sea en situaciones de conducción normal como en situaciones donde el conductor pudiese perder el control, el sistema protegería al conductor. El hecho de que el sistema pueda corregir al conductor en determinadas situaciones requiere que este deposite su confianza en el sistema [28]. Darle confianza al usuario implica dos cosas. En primer lugar, el sistema debe mostrar fiabilidad y fallar el mínimo número de veces posible. En segundo lugar, el sistema debe mostrar un desempeño confiable. Es decir, que el usuario entienda en todo momento las acciones del sistema y sienta que estas son correctas.
- Cooperación: El conductor debe ser capaz de interpretar en todo momento las decisiones del vehículo de forma intuitiva. Para facilitar esa labor, el intercambio de información entre

ambos es primordial. Esta función la cumple el HMI, que gana un especial protagonismo en el SC [27].

- Aceptación: Al tratarse de un sistema orientado al conductor, es importante que este genere una sensación de satisfacción por parte del usuario, algo que haga que prefiera usar dicho sistema a no usarlo. Este objetivo está compuesto de una serie de subobjetivos como el confort del conductor, el esfuerzo o carga de trabajo que requiera utilizar el sistema, la sensación de seguridad que tenga al utilizarlo (que no necesariamente está asociada con la seguridad real) e incluso el nivel de entretenimiento que el sistema pueda ofrecer [28].

### 4. Definición de Métricas

Según el estado del arte, las formas más comunes de clasificar los diferentes tipos de métricas mediante dos enfoques. Por un lado, se pueden clasificar en función de la realidad y la percepción de esta. Es decir, en cuanto a si se trata de una métrica objetiva o subjetiva. En el primer caso se incluyen lo relativo a las medidas obtenidas de forma cuantitativa. Aquí se encuentran las variables relacionadas con el vehículo y las obtenidas por el DMS, del conductor. En cuanto a las variables subjetivas, se tratan de las relacionadas con la percepción del conductor. La mayoría de los estudios del SC incluyen una serie de cuestionarios para obtener esta información. Por el otro lado, se pueden clasificar en función del objeto de estudio, como se muestra en la Tabla 1. En este caso, se trata del vehículo, el conductor y la situación que los rodea. A continuación, se detallan las más relevantes.

#### 4.1. Métricas del vehículo

En cuanto al vehículo, el *desempeño de la conducción* es el concepto más estudiado. Este hace referencia a la precisión con la que el vehículo es capaz de llevar a cabo la tarea deseada. Esta métrica está estrechamente relacionada con la conducción automatizada. Principalmente, trata de medir la eficiencia en el *seguimiento de carril*. En relación al SC, se encuentran métricas relacionadas con la *estrategia colaborativo*, tales como el *nivel de asistencia* proporcionado por el vehículo, el *fuerza aplicado por el sistema en el actuador* y la *frecuencia de intervenciones* de este. Finalmente, una visión subjetiva de todas ellas reflejan el *confianza en el sistema* que el vehículo es capaz de ofrecer [20, 21, 22, 23].

Cuadro 1: Tipos de métricas según el agente de estudio.

Vehículo	Conductor	Entorno
Desempeño de la conducción	Guiado del vehículo	Evaluación de la situación
Seguimiento de carril	Capacidad del conductor	Probabilidad de accidente
Transferencia de control	Modificadores de la capacidad del conductor	Grado de exigencia
Estrategia colaborativo	Estado del conductor	Dificultad
Nivel de asistencia	Carga de trabajo	Criticidad
Confianza en el sistema	Demanda visual	Evasión de obstáculos
Frecuencia de intervenciones del sistema	Nivel de atención	Maniobras
Fuerza del sistema en el actuador	Respuesta ante sucesos	Tareas secundarias
	Tiempo de reacción	

#### 4.2. Métricas del conductor

En lo relativo a las métricas del conductor, la actividad de la conducción se clasifica en dos modos. Por un lado, está el *guiado del vehículo*, donde se evalúa la *capacidad del conductor* para manejar el vehículo, ya sea en condiciones normales, sin alteraciones por parte del entorno ni del propio conductor, o en condiciones donde sí se modifique la capacidad del conductor. Aquí entran métricas relacionadas con el *estado del conductor* (somnolencia, fatiga, estrés, cansancio, etc.) [29], su *carga de trabajo* [25] y la *demanda visual requerida* [27]. Por otro lado, están los eventos concretos (como podrían ser una transición de manual a automático, realizar alguna tarea secundaria, evitar un accidente, etc.). En este caso se miden variables como el nivel de *atención del conductor*, la *respuesta ante sucesos* y el *tiempo de reacción*.

#### 4.3. Métricas del entorno

Finalmente, respecto a las métricas del entorno, se pretende hacer una *evaluación de la situación*, donde se valore el *grado de exigencia* que esta requiere, su *nivel de dificultad*, y si se trata de una *situación crítica* o no. También se busca medir *probabilidad de accidente* de una situación [30], que principalmente suelen estar causados por *distracciones*, las cuales a su vez son la consecuencia del conductor realizando *tareas secundarias*.

### 5. Descripción del Entorno: Fuentes de información

Una vez obtenidas dichas métricas, es necesario establecer el entorno en el que desean ser estudiadas. Ya sea una situación de carretera como la autopista, un caso de uso de un conductor distraído o la gestión de una maniobra como un cambio de carril, en cualquier caso, existen métodos para la obtención de información de dichas situaciones [31].

En primer lugar, están los estudios en carretera. Consisten en utilizar un vehículo equipado por la

institución investigadora para llevar a cabo el experimento. Se trata de los estudios más complejos de realizar, ya que requieren de los permisos legales para llevar un vehículo experimental a la carretera. Por ello, deben estar equipados con sistemas de seguridad y personas cualificadas para dichas labores. Los principales casos de uso de estas pruebas consisten en pruebas de baja velocidad, donde se prueban métricas orientadas al vehículo. Esto se debe a que las pruebas orientadas al conductor pueden requerir que este pierda el control (o simule hacerlo) durante la conducción.

En segundo lugar, se encuentran los estudios naturalistas [32]. Estos son los más similares a los anteriores, en tanto que también se llevan a cabo en vehículos reales. Se trata de colocar sistemas de medición en los vehículos de los particulares dispuestos a hacer las pruebas. Esto permite que se hagan estudios más amplios, con muchos más kilómetros recorridos. El principal inconveniente es la distribución de los equipos en estos vehículos, y la obtención de datos estandarizada. Un ejemplo muy común de estos son los estudios del conductor, donde se le coloca una cámara para monitorizar su actividad. En este caso en particular, el inconveniente principal suele ser la ubicación de la cámara. Ya que posteriormente todos los datos obtenidos tendrán el mismo post-procesado, y pequeños cambios en la posición u orientación puede derivar en errores de precisión en las medidas de sistemas de IA [33].

En tercer lugar, están los estudios más frecuentes, que son los llevados a cabo en un simulador. Estos permiten la máxima flexibilidad a la hora de diseñar las situaciones y añadir eventos, dado que siempre se trabaja sobre un entorno seguro. Es por esto que la mayor parte de los estudios de control compartido se llevan a cabo en simuladores [34, 35, 36]. Abarca estudios de todo tipo, ya sea de métricas del vehículo, del conductor y del entorno. A pesar de ello, los resultados corren el riesgo de estar sesgados, ya que no se realizan en condiciones reales para ninguno de los tres tipos

de métricas.

En cuarto lugar, están los estudios de las bases de datos de las instituciones. Gobiernos como el de EEUU ponen a disposición de las instituciones los datos de accidentes de carretera para su estudio. Esto permite obtener información de casos reales de situaciones de emergencia, probablemente los casos más difíciles de estudiar en pruebas en carretera o en simuladores. De aquí también es posible extraer información de los tres tipos de métricas, ya sea porque el accidente se haya dado por un fallo del vehículo, del conductor y de la situación que se diese. De todos modos, pueden llegar a ser más difíciles de estudiar dado que no tienen por qué adecuarse exactamente al caso de estudio concreto, por lo que las conclusiones obtenidas pueden ser sesgadas.

Finalmente, se encuentran los estudios llevados a cabo mediante encuestas. Estos permiten obtener la perspectiva subjetiva de los conductores. Pueden llegar a ser muy útiles para medir el nivel de confianza y de aceptación de un sistema, y también para relacionar esa perspectiva subjetiva con datos empíricos obtenidos en métricas objetivas. Ofrecen un amplio abanico de posibilidades, pero también requieren de un uso extensivo. Es decir, es necesario que la muestra poblacional encuestada sea lo suficientemente extensa como para que los datos obtenidos sean asimilables al resto de la población. También es habitual que se tomen datos personales de los participantes (como edad, años de experiencia al volante, sexo, capacidades sensoriales, estado de salud, etc.) para poder crear perfiles de conducción.

## 6. Análisis y Evaluación del desempeño

En muchos casos, el análisis individual de las métricas ofrece una visión sesgada. Es cuando estas se interrelacionan cuando realmente se consigue inferir información. Como se mencionaba previamente, resulta muy útil relacionar estudios empíricos con resultados de encuestas, ya que amplían la perspectiva y las conclusiones obtenidas. En cuanto a las pruebas empíricas, ya sea en estudios en carretera o en simulador, es muy importante acotar el alcance y las condiciones de la prueba, de forma que esta quede segmentada y sea fácilmente replicable por un estudio de otra institución. Respecto a los cuestionarios, resulta conveniente tomar tantos datos como resulte conveniente de los participantes, para definir en la mejor medida los perfiles de cada conductor.

En cuanto el tamaño de la muestra poblacional, en términos de estadística se estima que alrededor de

200 participantes [37] es un número adecuado para poder inferir información de toda la población, y a partir de 2000 el margen de error se estima como nulo. Estas cifras son viables a la hora de realizar cuestionarios. A la hora de realizar pruebas en carretera o simulador, en cambio, puede resultar problemático montar a tantos participantes en el asiento del conductor. Por ello, es habitual que se hagan estudios más reducidos (entre 15 y 50 participantes), donde los perfiles estudiados sean específicos respecto a lo que se busque medir.

A la hora de comparar los datos obtenidos de diferentes conductores, es frecuente el uso de estudios ANOVA (Análisis de la Varianza) [38] para probar la hipótesis de si las medias de una o varias poblaciones son iguales o no.

## 7. Conclusiones

La conducción automatizada actualmente cuenta con varios años de desarrollo y está entrando en una fase de evaluación de sus sistemas. Comparativamente, el control compartido es una disciplina compleja de estudio y que, como se muestra en este artículo, toma de una serie de consideraciones diferentes a la del vehículo automatizado. Por parte del vehículo, requiere de un sistema que sea capaz de transferir el control del conductor al sistema de forma fluida. Por parte del conductor, se realiza un estudio más exhaustivo de sus capacidades, dando pie a que en un futuro se alcance un consenso de qué requisitos se le pueden exigir a una persona a la hora de gestionar la responsabilidad de la tarea de conducción. Como propuesta para trabajos futuros, se pretende ampliar el estudio de las métricas del control compartido, de manera que se definan las principales variables medibles y se relacionen con los métricas y los objetivos aquí mostrados, de manera que se obtenga un extenso estudio del estado del arte del diseño y evaluación de los sistemas de control compartido. Además, también es ampliable desde el punto de vista legal, donde todavía no se ha definido una forma clara de definir los tiempos de los que dispone el conductor para tomar el control en situaciones donde el vehículo ya no sea capaz de tomar dicha responsabilidad.

### Agradecimientos

Este trabajo cuenta con el apoyo del proyecto HADRIAN, el cual ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención No 875597.

### English summary



## Preliminary study of the evaluation methods for Shared Control

### Abstract

*Focus on Automated Driving has increased in the last years due to the advantages in people and good transports. Although full automatization is the goal of vehicle manufacturer's, the technological development requires to share control between the vehicle and the driver in intermediate automation levels. In order to define proper validation methodologies for this complex strategy, in this paper the most relevant works are analysed and a methodology is proposed to set the basis for future developments.*

**Keywords:** Automated Driving, Shared Control, evaluation metrics.

### Referencias

- [1] "J3016C: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles - SAE International," 2021. Accessed: May 24, 2021. [Online]. Available: <https://www.sae.org/standards/content/j3016202104/>
- [2] "Automated Vehicles — National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)." <https://one.nhtsa.gov/Research/Crash+Avoidance/Automated+Vehicles> (accessed Aug. 31, 2020).
- [3] M. S. Young, S. A. Birrell, and N. A. Stanton, "Safe driving in a green world: A review of driver performance benchmarks and technologies to support 'smart' driving," *Appl. Ergon.*, vol. 42, no. 4, pp. 533–539, May 2011, doi: 10.1016/j.apergo.2010.08.012.
- [4] N. A. Stanton and P. Marsden, "From fly-by-wire to drive-by-wire: Safety implications of automation in vehicles," *Saf. Sci.*, vol. 24, no. 1, pp. 35–49, Oct. 1996, doi: 10.1016/S0925-7535(96)00067-7.
- [5] N. Highway Traffic Safety Administration and U. Department of Transportation, "TRAFFIC SAFETY FACTS Crash • Stats Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey," 2015. Accessed: May 24, 2021. [Online]. Available: <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/81211>
- [6] AVSC Best Practice for Metrics and Methods for Assessing Safety Performance of Automated Driving Systems (ADS). AVSC00006202103 2021-03-25. Accessed: May 19, 2021. [Online]. Available: <https://www.sae.org/standards/content/avsc00006202103/>
- [7] I. Y. Noy, D. Shinar, and W. J. Horrey, "Automated driving: Safety blind spots," *Safety Science*, vol. 102. Elsevier B.V., pp. 68–78, Feb. 01, 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2017.07.018.
- [8] S. Shen and D. M. Neyens, "Assessing drivers' response during automated driver support system failures with non-driving tasks," *J. Safety Res.*, vol. 61, pp. 149–155, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.jsr.2017.02.009.
- [9] F. Hartwich, M. Beggiato, and J. F. Krems, "Driving comfort, enjoyment and acceptance of automated driving—effects of drivers' age and driving style familiarity," *Ergonomics*, vol. 61, no. 8, pp. 1017–1032, Aug. 2018, doi: 10.1080/00140139.2018.1441448.
- [10] Liu, Peng, Yang, Run, Xu, Zhigang (2018). Public Acceptance of Fully Automated Driving: Effects of Social Trust and Risk/Benefit Perceptions. *Risk Analysis*, 39(2) (pp. 326-341), ISSN 0272-4332, Wiley, doi:10.1111/risa.13143
- [11] Intelligent transport systems — Low-speed automated driving (LSAD) systems for pre-defined routes — Performance requirements, system requirements and performance test procedures, Working Document, ISO 22737
- [12] S. Shaheen, "Shared Mobility: The Potential of Ridehailing and Pooling," in *Three Revolutions*, Island Press/Center for Resource Economics, 2018, pp. 55–76.
- [13] "Tesla driver dies in first fatal crash while using autopilot mode — Tesla — The Guardian." <https://www.theguardian.com/technology/2016/jun/30/tesla-autopilot-death-self-driving-car-elon-musk> (accessed May 31, 2021).
- [14] V. A. Banks, A. Eriksson, J. O'Donoghue, and N. A. Stanton, "Is partially automated driving a bad idea? Observations from an on-road study," *Appl. Ergon.*, vol. 68, pp. 138–145, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.apergo.2017.11.010.

- [15] D. A. Abbink, M. Mulder, and E. R. Boer, "Haptic shared control: Smoothly shifting control authority?," *Cogn. Technol. Work*, vol. 14, no. 1, pp. 19–28, Mar. 2012, doi: 10.1007/s10111-011-0192-5.
- [16] Vaca-Recalde, Myriam E., Marcano, Mauricio, Sarabia, Joseba, González, Leonardo, Pérez, Joshué, Díaz, Sergio (2020). A Fluid-HMI Approach for Haptic Steering Shared Control for the HADRIAN Project. *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 417-428), ISSN 0302-9743, Springer International Publishing, doi:10.1007/978-3-030-50523-3-30
- [17] Marcano, Mauricio, Diaz, Sergio, Perez, Joshue, Irigoyen, Eloy (2020). A Review of Shared Control for Automated Vehicles: Theory and Applications. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 50(6) (pp. 475-491), ISSN 2168-2291, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), doi:10.1109/thms.2020.3017748
- [18] Z. Lu and J. C. F. de Winter, "A Review and Framework of Control Authority Transitions in Automated Driving," *Procedia Manuf.*, vol. 3, pp. 2510–2517, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.513.
- [19] Human-centred design processes for interactive systems, Working document, ISO 13407:1999
- [20] L. Saleh, P. Chevrel, F. Claveau, J. F. Lafay, and F. Mars, "Shared steering control between a driver and an automation: Stability in the presence of driver behavior uncertainty," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 974–983, 2013, doi: 10.1109/TITS.2013.2248363.
- [21] F. Mars, M. Deroo, and J. M. Hoc, "Analysis of human-machine cooperation when driving with different degrees of haptic shared control," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 7, no. 3, pp. 324–333, Jul. 2014, doi: 10.1109/TOH.2013.2295095.
- [22] R. Nishimura, T. Wada, and S. Sugiyama, "Haptic Shared Control in Steering Operation Based on Cooperative Status Between a Driver and a Driver Assistance System," *J. Human-Robot Interact.*, vol. 4, no. 3, p. 19, Mar. 2015, doi: 10.5898/4.3.nishimura.
- [23] M. Körber, C. Gold, D. Lechner, and K. Bengler, "The influence of age on the take-over of vehicle control in highly automated driving," *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 39, pp. 19–32, May 2016, doi: 10.1016/j.trf.2016.03.002.
- [24] N. Kalra and S. Paddock, *Driving to Safety: How Many Miles of Driving Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability?* RAND Corporation, 2016.
- [25] Y. Xiong, J. Gao, Y. Yang, X. Yu, and W. Huang, "Classifying Driving Fatigue Based on Combined Entropy Measure Using EEG Signals," *Int. J. Control Autom.*, vol. 9, no. 3, pp. 329–338, 2016, doi: 10.14257/ij-ca.2016.9.3.30.
- [26] M. Johns et al., "Exploring shared control in automated driving," in *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, Apr. 2016, vol. 2016-April, pp. 91–98, doi: 10.1109/HRI.2016.7451738.
- [27] Z. Lu, X. Coster, and J. de Winter, "How much time do drivers need to obtain situation awareness? A laboratory-based study of automated driving," *Appl. Ergon.*, vol. 60, pp. 293–304, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.apergo.2016.12.003.
- [28] P. Liu, R. Yang, and Z. Xu, "Public Acceptance of Fully Automated Driving: Effects of Social Trust and Risk/Benefit Perceptions," *Risk Anal.*, vol. 39, no. 2, pp. 326–341, Feb. 2019, doi: 10.1111/risa.13143.
- [29] V. A. Banks, A. Eriksson, J. O'Donoghue, and N. A. Stanton, "Is partially automated driving a bad idea? Observations from an on-road study," *Appl. Ergon.*, vol. 68, pp. 138–145, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.apergo.2017.11.010.
- [30] P. Papantoniou, E. Papadimitriou, and G. Yannis, "Review of driving performance parameters critical for distracted driving research," in *Transportation Research Procedia*, Jan. 2017, vol. 25, pp. 1796–1805, doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.148.
- [31] N. Das, E. Ohn-Bar, and M. M. Trivedi, "On Performance Evaluation of Driver Hand Detection Algorithms: Challenges, Dataset, and Metrics," in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, Oct. 2015, vol. 2015-October, pp. 2953–2958, doi: 10.1109/ITSC.2015.473.
- [32] "The 100-Car Naturalistic Driving Study Phase II-Results of the 100-Car Field Experiment," 2006.
- [33] P. Knoll, "Driving assistance systems," in *Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, pp. 180–185.

- [34] F. Naujoks, C. Purucker, K. Wiedemann, A. Neukum, S. Wolter, and R. Steiger, "Driving performance at lateral system limits during partially automated driving," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 108, pp. 147–162, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.aap.2017.08.027.
- [35] A. T. Nguyen, C. Sentouh, and J. C. Popieul, "Sensor Reduction for Driver-Automation Shared Steering Control via an Adaptive Authority Allocation Strategy," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 23, no. 1, pp. 5–16, Feb. 2018, doi: 10.1109/TMECH.2017.2698216.
- [36] T. Saito, T. Wada, and K. Sonoda, "Control Authority Transfer Method for Automated-To-Manual Driving Via a Shared Authority Mode," *IEEE Trans. Intell. Veh.*, vol. 3, no. 2, pp. 198–207, Jun. 2018, doi: 10.1109/TIV.2018.2804167.
- [37] "Cuadernos Técnicos Conceptos Básicos de Muestreo," 2014. <https://www.icjce.es/adjuntos/AudidoresCuaderno21.pdf>
- [38] Ronald E. Walpole; Raymond H. Myers; Sharon L. Myers; Linda Margarita Medina Herrera, Ed., *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*, 9th ed. Ciudad de Mexico: Pearson, 2012.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CÁMARA CLIMÁTICA CONTROLADA PARA REPRODUCIR EPISODIOS DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS PERECEDERAS

Segado Fernández, María Aránzazu; Ibarrola-Lacalle, Julio José; Giménez-Gallego, Jaime; Torres-Sánchez, Roque

Departamento de Automática, Ing. Eléctrica y Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena, Campus de la Muralla s/n 30202 Cartagena.

[arantxasegado@gmail.com](mailto:arantxasegado@gmail.com); [juliojose.ibarrola@upct.es](mailto:juliojose.ibarrola@upct.es); [jaime.gimenez@upct.es](mailto:jaime.gimenez@upct.es); [roque.torres@upct.es](mailto:roque.torres@upct.es)

### Resumen

*La necesidad de analizar la pérdida de calidad en los alimentos se ha ido incrementando en los últimos tiempos de manera progresiva, debido a las cada vez más restrictivas condiciones de trazabilidad en las diferentes fases de distribución de los productos perecederos. Disponer de herramientas que permitan estimar las pérdidas de calidad en estas fases logísticas, ayudaría a reducir el desperdicio de alimentos desechados muchas veces por inadecuadas condiciones de conservación.*

*El objetivo del proyecto, donde se encuadra este trabajo, consiste en la obtención de indicadores de pérdidas de calidad de productos cuando están sometidos a variaciones térmicas no deseadas. Estos indicadores, proporcionarían valores cualitativos de la calidad de la mercancía estimando variaciones de la vida comercial del producto o “shelf life”. Como parte de este proyecto, en este trabajo se ha diseñado y construido una cámara climática portátil en la que se pueden reproducir ciclos térmicos controlados durante la vida útil del producto y, de ese modo, evaluar distintos parámetros de calidad y relacionarlos con las condiciones de conservación.*

*Debido al alto número de ensayos que es necesario realizar para obtener indicadores fiables, este trabajo propone el diseño de una cámara de bajo coste fácilmente reproducible y escalable donde sea factible someter al producto perecedero a alteraciones térmicas controladas durante la vida comercial del producto, y obtener un shelf-life dinámico en función de las variaciones de las condiciones climáticas. Este trabajo aborda el diseño, dimensionamiento, la instrumentación y los diferentes elementos que componen el sistema de control, además de la identificación y el ajuste del regulador. Los resultados y conclusiones permiten validar el diseño planteado*

*quedando, la cámara desarrollada, como una herramienta útil para obtener indicadores de pérdidas de calidad ante diferentes condiciones climáticas.*

**Palabras clave:** pérdidas de calidad de alimentos, shelf-life, alimentos perecederos, cámara climática, simulación, identificación de procesos.

### 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto surgió de la necesidad de analizar y calcular las pérdidas de calidad en los alimentos perecederos durante su fase de distribución. La principal causa del deterioro de los productos perecederos hortofrutícolas durante su distribución es el inadecuado manejo de la temperatura durante la cadena de suministro. Influyen, en menor medida, una excesiva deshidratación; inadecuados niveles de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> y otros volátiles (etanol, acetaldehído, etc.) [1-3].

Muchas de estas causas ocurren durante las etapas del transporte y almacenamiento, que son en las que más esfuerzos tecnológicos se están realizando para ajustar las condiciones de conservación a la duración del producto. Por un lado, evitando las perturbaciones que sufren las variables durante estos procesos puesto que, si las condiciones ambientales están fuera de especificación durante estas etapas, el producto se deteriora [4]. Y por otro, ajustando el valor de la vida comercial del producto (shelf-life) a estas condiciones, de forma que se pueda destinar el producto a mercados con más rotación o con consumos más frecuentes [5,6].

La estimación dinámica del shelf-life, puede realizarse obteniendo indicadores de pérdidas de calidad a partir de los datos de conservación (principalmente temperatura), registrados durante la serie temporal de

la distribución del producto. De ese modo y, partiendo del shelf-life teórico de un producto a temperaturas ideales, las pérdidas de calidad se expresan como una estimación de reducción de ese shelf-life o, dicho de otro modo, como una reducción de la vida comercial útil.

Para lograr estas estimaciones, se recurre a entrenar modelos supervisados con las valoraciones cuantitativas de la calidad de los productos, en función de una serie de análisis físico-químicos [7,8], extrayendo muestras de producto en distintos días previos al shelf-life teórico y clasificando el producto en función de una valoración de la calidad umbral [9]. Estos ensayos requieren cámaras climáticas dedicadas y múltiples extracciones de muestras para analizar, además de la repetición de los experimentos con diferentes variaciones de conservación.

En trabajos previos [10], se han realizado ensayos de calidad en las cámaras del Instituto de Biotecnología Vegetal (IBV) de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT). Sin embargo, la disponibilidad limitada de cámaras y la dificultad de alterar las condiciones de conservación para realizar los experimentos han motivado el desarrollo de este trabajo, consistente en el desarrollo de cámaras climáticas portátiles de coste reducido, donde es posible alterar las condiciones de temperatura dadas mediante un sistema de control.

La cámara climática está fabricada a partir de un conducto rectangular realizado con láminas de lana de vidrio CLIMAVER NETO de la marca ISOVER [11], que se encarga de aislar los productos y mantener así su temperatura independiente de perturbaciones externas no provocadas. Las condiciones térmicas dentro de la cámara se obtienen mediante la impulsión de aire, cuya temperatura y caudal puede ser modificado mediante acciones de control. Para mantener unas condiciones térmicas homogéneas en el interior, se ubicaron medios porosos para generar un flujo pistón uniforme.

Para simplificar y abaratar el coste de la cámara, el diseño está pensado para que la cámara se ubique en el interior de una de las habitaciones refrigeradas del IBV. De este modo, sin acciones de control de calentamiento, el aire de la cámara portátil estaría a las mismas condiciones refrigeradas de la habitación.

El sistema se ha diseñado para que sea capaz de reproducir un ciclo temperatura-tiempo. De este modo, es posible programar una determinada evolución térmica durante un número de días concreto para poder extraer las muestras de producto y proceder a su análisis cualitativo. Estos ensayos permiten establecer correlaciones entre las variaciones observadas dentro de la cámara climática y el decremento de la vida comercial útil del producto o shelf-life.

El trabajo describe el dimensionamiento y diseño de la cámara, la identificación del modelo representado por la función de transferencia, las acciones de control y los sensores, así como el ajuste de los distintos parámetros del controlador ensayados para obtener unas determinadas especificaciones dinámicas y permanentes que validen la utilidad de la cámara climática.

## 2. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Para alcanzar los objetivos del proyecto, se realizaron las siguientes tareas:

- **Modelado inicial de la cámara climática con SOLIDWORKS**

Con el objetivo de modelar la cámara, se probaron varios diseños. Como primera hipótesis, se pensó en que la cámara climática constara de dos capas: una interna, en la que se practicarían agujeros y otra externa, separada a cierta distancia de la interna, que actuaría como aislante. Finalmente, se rechazó este diseño, debido a que iba a ser difícil de implementar y no nos iba a garantizar que los resultados fuesen los requeridos por el problema.

El diseño final de la cámara consiste en un conducto rectangular de  $1 \times 0.5 \times 0.5 \text{ m}^3$  que está formado por una sola capa de material, encargada de aislar su interior (Figura 1).



Figura 1: Diseño y simulación de cámara climática.

- **Estudio de la mecánica de fluidos del prototipo mediante una simulación con ANSYS**

Una simulación ayuda a conocer el comportamiento de un prototipo y verificar si es el adecuado. Para ello, se empleó el software de simulación de ingeniería ANSYS, desarrollado para trabajar con volúmenes finitos en el caso de la mecánica de fluidos.

Partiendo de los condicionantes de diseño expuestos, la hipótesis consiste en que, utilizando únicamente un ventilador y una resistencia calefactora, se consiga modificar la variable de la temperatura en unas condiciones controladas. Por ello, el flujo en el interior de la cámara debe de ser uniforme en toda la geometría

y no deben existir recirculaciones que produzcan un cambio en el comportamiento del aire. Para este fin, se ha implementado un análisis de las condiciones térmicas y fluidodinámicas de la cámara a estudiar mediante simulación numérica.

En el interior del conducto rectangular se colocaron dos medios porosos: uno situado a 20 cm de distancia al inicio del conducto (color marrón oscuro en Figura 2) y otro a 10 cm de distancia al final del conducto (color claro en la Figura 2). En dicha zona de trabajo se analizó el campo de presiones (Figura 2) y de temperaturas (Figura 3), donde se pudo observar que presentaban un comportamiento suficientemente homogéneo.

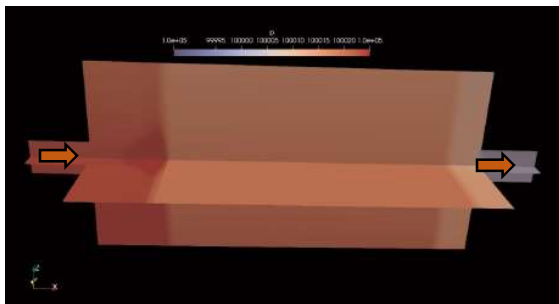


Figura 2: Evolución del campo de presiones en el interior del dominio.

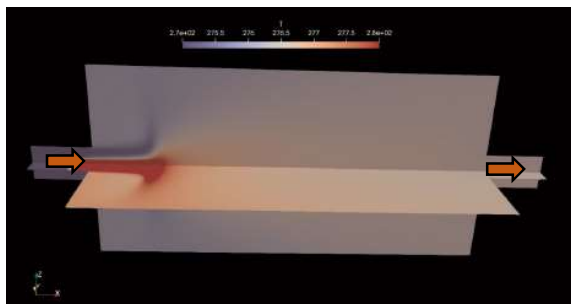


Figura 3: Evolución del campo de temperaturas en el interior del dominio.

Utilizando las simulaciones se establecieron los caudales idóneos ( $100 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ) para mantener una temperatura suficientemente constante, en la zona de trabajo (desde 0,2 m hasta 0,9 m de longitud), que se puede observar resaltada en la Figura 4. Además, se aprecia que la evolución de la temperatura posee un mejor comportamiento con un caudal de  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ , por lo que se decidió trabajar con este valor.

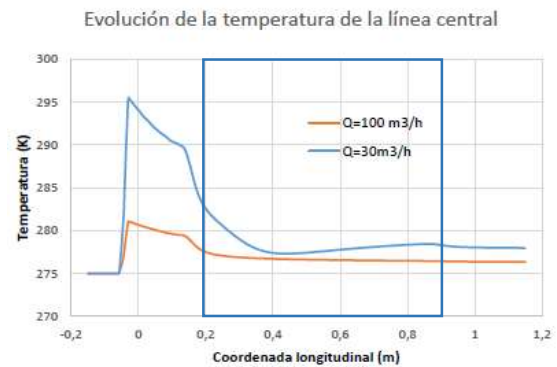


Figura 4: Evolución de la temperatura en el interior de la zona de trabajo.

- **Elaboración del diseño geométrico real de la cámara**

Las paredes de la cámara climática han sido construidas a partir del plegado de un panel rígido de Lana de Vidrio CLIMAVER NETO [11]. En su interior, se encuentran dos medios porosos, que consiguen homogeneizar el flujo (denominado *pistón*). La realimentación térmica se realiza mediante diez sensores de temperatura y humedad relativa distribuidos por todo el interior de la cámara, que se encuentran sujetos mediante unos soportes diseñados a tal efecto (Figura 5). A ello se le añade un ventilador y una resistencia, sujetos por un acople y a su vez por una brida diseñadas mediante fabricación aditiva.



Figura 5: Vista interior de la cámara de simulación.

- **Incorporación de sensores y actuadores**

Para la medición de temperatura, se emplean diez sensores modelo WES con protocolo de comunicación SDI-12, diseñados y fabricados íntegramente en la UPCT. Los diez sensores empleados en este trabajo se distribuyen por todo el interior de la cámara: uno a la entrada, otro a la salida, cuatro en el medio poroso de la entrada y cuatro en el de salida.

Las variables medidas por los sensores se instrumentaron mediante un registrador de datos Campbell Scientific CR1000 [16,18]. Se trata de un equipo con una alta fiabilidad, bajo consumo y gran robustez ante condiciones duras de trabajo.



disponiendo, además de salidas para manejar las acciones de control. Para programar este equipo se utiliza el software de soporte LoggerNet [19], encargado además de la gestión de los datos instrumentados.

Para la entrada de aire, se emplea un ventilador de 24W con caudal volumétrico regulable por tensión. Para calentar el aire, se utiliza una resistencia tipo PTC con una potencia nominal de 150W. El conjunto se puede visualizar en la Figura 6.



Figura 6: Cámara climática con sensores, actuadores y controlador/registrador.

#### • Ensayos de identificación del sistema

La variación de temperatura se obtuvo a partir de dos señales de control: tensión del ventilador y potencia de la resistencia calefactora. Para facilitar el estudio, se decidió mantener constante el valor de la tensión del ventilador y dejar como única variable manipulada la potencia de la resistencia. La identificación consistió en la aplicación de entradas tipo escalón a la variable manipulada, considerando el proceso como una caja negra.

Las pruebas de identificación se llevaron a cabo en el interior de una cámara de las instalaciones del IBV, tomando como base de partida una temperatura 5°C que suele ser la habitual en la distribución hortofrutícola [10].

El comportamiento del sistema, debido a su carácter térmico, se asemejará a un sistema de primer orden con retardo [14,15].

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{1 + \tau s} \cdot e^{-Ls} \quad (1)$$

Se estudió el comportamiento del ventilador para distintas tensiones: 6V, cuyo valor equivale a 100 m³/h, y 10V, equivalente a 167 m³/h. Con un caudal de 100 m³/h se producía un flujo laminar y sin grandes alteraciones térmicas. Por este motivo se escogió como valor óptimo la tensión de 6V. Una vez fijado este valor, se realizó la identificación de la función de transferencia de temperatura en la cámara para

distintas potencias aplicadas a la resistencia (44,5W y 60,4W).

Las diferentes potencias aplicadas al sistema se generaron por medio de salidas binarias proporcionadas por el datalogger, cuyo valor de potencia se adaptaba mediante un relé. El relé se conmutaba mediante una señal Pulse Width Modulation (PWM), en donde cuanto mayor era su ciclo de trabajo, mayor tiempo se mantenía encendido el relé, y, por tanto, mayor era la potencia media entregada a la resistencia calefactora.

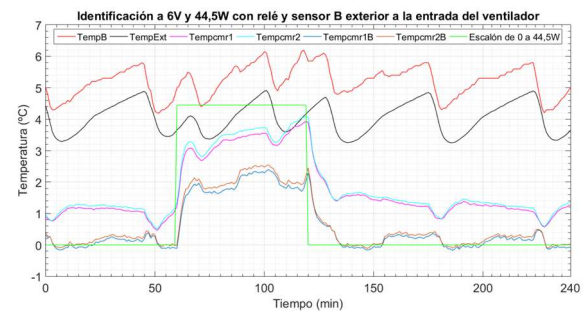


Figura 7: Identificación de la función de transferencia a 6V y con un escalón de 0 a 44,5W.

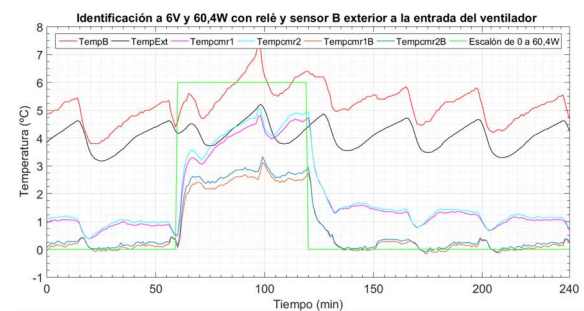


Figura 8: Identificación de la función de transferencia a 6V y con un escalón de 0 a 60,4W.

En la representación de las gráficas, tanto para 44,5W (Figura 7) como para 60,4W (Figura 8), se puede observar la temperatura exterior medida de dos maneras: mediante un sensor de temperatura SDI-12 ("TempB") y con el datalogger ("TempExt"). Por un lado, se aprecia la temperatura corregida media de las superficies porosas (temperatura media restándole la temperatura del exterior) medida con el datalogger ("Tempcmr1" y "Tempcmr2"), y, por otro lado, restándole la temperatura exterior con el sensor B situado a la entrada del ventilador ("Tempcmr1B" y "Tempcmr2B"). El escalón es el valor medio de la PWM, que en unos casos es un escalón de 0 a 44,5W y en otros de 0 a 60,4W.

El comportamiento del sistema formado por "Tempcmr1" y "Tempcmr2" es muy diferente al de "Tempcmr1B" y "Tempcmr2B". Esto se debe a que, el datalogger presenta un claro error de precisión, puesto que, cuando no se aplica ningún escalón, la temperatura corregida del datalogger (Tempcmr-

TempExt) es de aproximadamente 1°C, cuando realmente la diferencia debería de ser nula, ya que la temperatura de las superficies porosas tendría que ser coincidente con la temperatura exterior. Además, aparecen una serie de sobrepicos de temperatura periódicos, posiblemente debidos al desescarche del ventilador de la habitación refrigerada.

Con el fin de realizar posteriormente un control realista, se identificó la función de transferencia en la que la temperatura exterior del sistema se mide mediante el sensor B, puesto que la otra función es correcta pero no representa a la realidad. Además, la función de transferencia será la media de las FDT identificadas para las potencias de 44,5W y 60,5W:

$$G(s) = \frac{0,0419}{1 + 2,6s} \quad (2)$$

El retardo identificado fue despreciable frente a la constante de tiempo del sistema que era igual a 2,6 minutos.

Una vez finalizada la identificación, se realizó el proceso de validación. El proceso se ajusta suficientemente a la función de transferencia identificada, como se puede observar en las Figuras 9 y 10.

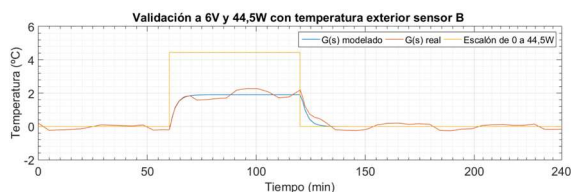


Figura 9: Validación de la función de transferencia del sistema para 6V y con un escalón de 0 a 44,5W.

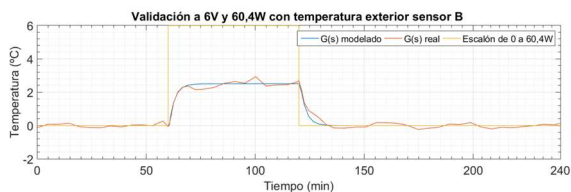


Figura 10: Validación de la función de transferencia del sistema para 6V y con un escalón de 0 a 60,4W.

- **Estudio y ejecución de controladores para cumplir los requisitos establecidos para las variables de salida**

El sistema de control está basado en una estructura básica, gestionando las acciones de control en función de la diferencia entre una temperatura deseada definida por el valor de consigna establecido y el valor de las señales de salida (temperaturas dentro de la cámara). Según el algoritmo de control, se ejecuta una acción regulatoria que aumenta o disminuye el valor de la variable controlada. (Figura 11).

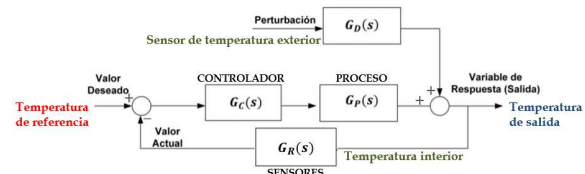


Figura 11: Estructura clásica de sistema de control realimentado.

La estrategia de control ha sido conservadora [13]. En primer lugar, se propuso utilizar un controlador proporcional (P), en donde la acción de control es proporcional a la señal de error. Sin embargo, este tipo de controlador no es capaz de anular el error en régimen estacionario. Por lo que, posteriormente, añadimos un término integral (I) que se encargó de integrar el error para así eliminarlo y mejorar su respuesta.

La acción de control del controlador proporcional integral es la siguiente [12]:

$$u_{pi}(t) = K_p \cdot \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) dt \right] \quad (3)$$

A partir del lazo de control, se ajustaron los valores de P e I, se ejecutó la simulación y posteriormente se utilizó un índice de error cuadrático, para comparar las prestaciones de las diferentes sintonías.

El objetivo de control consiste en el seguimiento de la referencia de temperatura con el requisito de que el error sea menor de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , tal y como se planteó en el apartado de introducción. En primer lugar, para estimar los valores de P e I, mediante simulación, se realizó una sintonía analítica mediante el método de asignación de polos.

Tomando la función de transferencia del sistema  $G(s)$  y la del controlador  $G_{PI}(s)$ :

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s}; \quad G_{PI}(s) = K_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{sT_i} \right) \quad (4)$$

Tenemos la siguiente función en lazo cerrado:

$$G_{lc}(s) = \frac{G(s) \cdot G_{PI}(s)}{1 + G(s) \cdot G_{PI}(s)} \quad (5)$$

Cuya ecuación característica es:

$$1 + G(s) \cdot G_{PI}(s) = 0 \quad (6)$$

$$s^2 + \frac{1 + K_p K}{\tau} s + \frac{K_p K}{T_i \tau} = 0 \quad (7)$$

Tomando el sistema como subamortiguado ( $\xi < 1$ ), se establece la siguiente ecuación característica:

$$s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2 = 0 \quad (8)$$

Con las siguientes relaciones:

$$K_p = \frac{2\xi w_n \tau - 1}{K}; \quad T_i = \frac{2\xi w_n \tau - 1}{w_n^2 \tau} \quad (9)$$

Y soluciones:

$$s = -\xi w_n \pm w_n \sqrt{1 - \xi^2} j \quad (10)$$

$$s = -\sigma \pm w_d j \quad (11)$$

Se fijará el valor de la sobreoscilación  $M_p$  al 5% y el tiempo de pico  $t_p$  a 5 minutos, para calcular finalmente  $w_d$  y  $\sigma$ .

$$M_p = e^{-\frac{\pi}{\tan \theta}} = 0,05 \rightarrow \theta = 46,36^\circ \quad (12)$$

$$t_p = \frac{\pi}{w_d} = 5 \rightarrow w_d = 0,628 \quad (13)$$

$$\theta = \arctg \frac{w_d}{\sigma} \rightarrow \sigma = 0,599 \quad (14)$$

A partir de ahí, se calcula  $w_n$  y  $\xi$ :

$$\sigma = \xi w_n \rightarrow w_n = \frac{\sigma}{\xi} = \frac{0,599}{0,69} = 0,868 \quad (15)$$

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (16)$$

$$\xi = \sqrt{1 - \left(\frac{w_d}{w_n}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{0,628}{0,868}\right)^2} = 0,69 \quad (17)$$

Finalmente, los parámetros del controlador son los siguientes:

$$P = K_p = \frac{2\xi w_n \tau - 1}{K} = \frac{2 \cdot 0,69 \cdot 0,868 \cdot 2,6 - 1}{0,0419} = 50,46 \quad (18)$$

$$I = \frac{K_p}{T_i} = \frac{K_p w_n^2 \tau}{2\xi w_n \tau - 1} = \frac{50,46 \cdot 0,868^2 \cdot 2,6}{2 \cdot 0,69 \cdot 0,868 \cdot 2,6 - 1} = 46,765 \quad (19)$$

Se realizó una simulación previa del controlador utilizando Simulink con la estructura de la Figura 12.

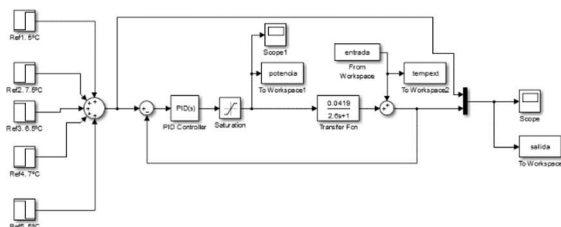


Figura 12: Estructura del control simulado en MATLAB.

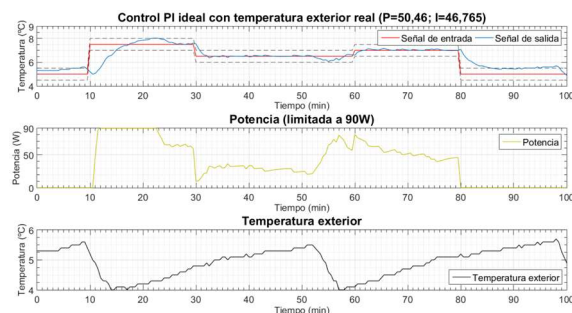


Figura 13: Control PI ideal mediante el método de asignación de polos.

El método de asignación de polos se utilizó con el fin de obtener unos valores iniciales con los que trabajar y próximamente poseer una sintonía más precisa. A la vista de los resultados de la Figura 13, la saturación en la señal de control (potencia de la resistencia calefactora) es muy elevada. Por ello, finalmente, se implementó el método de “prueba y error”, puesto que así se consiguieron reducir las sobreoscilaciones al mínimo posible (Figura 14).

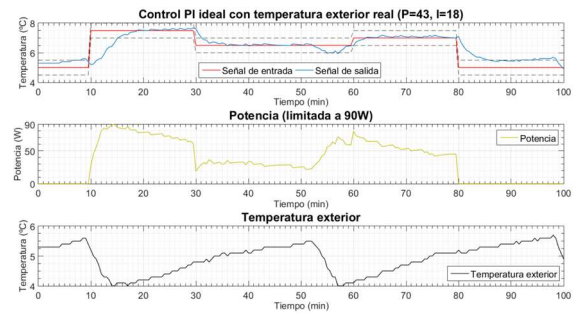


Figura 14: Control PI ideal mediante el método de prueba y error.

Una vez sintonizado el controlador con los parámetros ( $P=43$  e  $I=18$ ), se realizaron diferentes ensayos reales en las instalaciones del IBV, utilizando para ello diferentes ciclos. En la Figura 15 se puede observar los trazos rojos correspondientes al ciclo térmico a seguir y en azul la variable controlada. Las líneas discontinuas representan el límite de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  que no debe de exceder la variable controlada respecto a la señal de referencia. En amarillo se ve la acción de control y en negro la temperatura exterior con sus perturbaciones. A la vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que se ha alcanzado el objetivo de control, es decir, el sistema responde satisfactoriamente a las perturbaciones de temperatura, como se puede apreciar en la Figura 15.

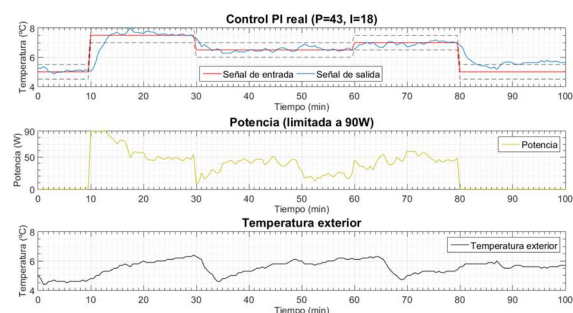


Figura 15: Resultados del control PI real.

### 3. CONCLUSIONES

La conclusión principal que se extrae de este trabajo es que es totalmente factible el diseño de una cámara climática de coste reducido, con un control que permita seguir un determinado ciclo temporal de temperatura. Las limitaciones que se deducen de las especificaciones del control son totalmente compatibles con las características de las condiciones térmicas que sufren los productos durante las fases de distribución; esto es, partiendo de temperaturas ideales de consignas de 5°C no es habitual que las perturbaciones observadas en los transportes y almacenamientos reales de mercancías hortofrutícolas sean superiores a 7°C [10], aunque sí que suelen ser sostenidas en el tiempo. Además, los tiempos de reacción del equipamiento de refrigeración de los contenedores o cámaras de conservación no son inferiores a los 5 minutos, con lo que los valores obtenidos de duración del transitorio permiten un control ajustado a la dinámica del proceso.

La construcción de la cámara climática no ha sido una labor simple, puesto que se han escogido unos sensores y actuadores específicos para este proyecto y además se han diseñado en 3D todas las piezas y accesorios necesarios para el correcto su funcionamiento. Cabe destacar, que la complejidad de diseñar una pieza en 3D aumenta cuando no se tienen unas medidas exactas a las que recurrir, ya que no se tiene una visión precisa de cómo va a ser la pieza hasta que no se imprima. Por lo que, varias piezas se tuvieron que rediseñar porque no cumplían las especificaciones.

Los valores de temperaturas observados en los diferentes puntos de medida concluyen que el diseño termodinámico de la cámara es acertado, las dimensiones permiten ubicar tres cajas apiladas de productos hortofrutícolas (*standard cardboard boxes*) [20] entre las dos superficies permeables, lo que dota al ensayo de un número suficiente de ejemplares para realizar los análisis físico-químicos por parte del personal del IBV.

En cuanto a la identificación del sistema en una habitación refrigerada a 5°C del IBV, al no tener un conocimiento previo de cómo se podía comportar el sistema ante cualquier escalón, se realizaron una gran cantidad de experimentos los cuales han servido para definir los límites de las acciones de control y el dimensionamiento de la cámara y sus componentes.

El control del sistema no requirió de demasiados ensayos, debido a que, con ayuda de los cálculos teóricos y simulaciones previas, teníamos un conocimiento aproximado de cómo controlar el sistema.

Lo que finalmente se puede afirmar es que, se ha logrado el objetivo principal del proyecto, con excepción de la realización de ensayos con productos perecederos. Tras un largo periodo de experimentos de identificación y de control, se ha conseguido que el sistema responda a las señales de referencia de temperatura, hasta un incremento límite de 2,5°C, tal y como se estableció inicialmente, lo que va a servir como herramienta para la supervisión y entrenamiento de modelos de cuantificación cualitativa de los productos perecederos que son sometidos a perturbaciones de condiciones climáticas.

En trabajos futuros se prevé dotar a la cámara de sistema de recirculación del aire interior con una acción de control que permita realizar la mezcla del aire exterior con el aire recirculado, lo que redundará en un control más preciso con mayores prestaciones.

#### English summary

#### DESIGN OF A CONTROLLED CLIMATIC CHAMBER TO REPRODUCE THE TRANSPORTATION OF PERISHABLE COMMODITIES

#### Abstract

*The need to analyze food quality loss has been increasing in recent times due to the increasingly restrictive traceability conditions in the different distribution stages of perishable products. The availability of tools to estimate the quality losses in these logistic phases would help to reduce the waste of food, often discarded due to inadequate preservation conditions.*

*The objective of the project, where this work is framed, is to obtain quality-losses indicators of commodities when they are exposed to undesired thermal variations. These indicators would provide qualitative values of the quality of the perishable merchandise by estimating variations in the shelf life of the commodities. As part of this project, a portable climatic chamber has been designed and built in which controlled thermal cycles can be reproduced during the shelf life of the commodity and, in this way, different quality parameters can be evaluated and related to the preservation conditions.*

*Due to the high number of tests required to obtain reliable indicators, this work proposes the design of*



*an easily reproducible and scalable low-cost chamber where it is feasible to subject the perishable product to controlled thermal alterations during the commercial life of the commodity, and to obtain a dynamic shelf-life as a function of variations in climatic conditions. This work deals with the design, sizing, instrumentation and the different elements that make up the control system, as well as the identification and adjustment of the controller. The results and conclusions show that the controlled climatic chamber developed in this paper, is a useful tool to obtain indicators of quality losses under different climatic conditions.*

**Keywords:** food quality losses, shelf-life, perishable commodities, climatic chamber, simulation, process identification.

## Referencias

- [1] Artés-Hernández, F. Factors affecting postharvest quality. *4th International on-line Course on Postharvest and Fresh-cut Technologies*. 2019
- [2] Edjabou, M., Petersen, C.; Scheutz, C.; Astrup, T.; Food waste from Danish households: Generation and composition. *Waste Management Vol 52*, 2016
- [3] Cantwel, M.; Kasmire, R.E. Postharvest handling systems: Flower, leafy and stem vegetables. In *Postharvest Technology of Horticultural Crops*; Kader, A.A., Ed.; UC Davis: Davis, CA, USA, Vol 3311, pp. 423–434. 2002.
- [4] Tsang, Y. P., Choy, K. L., Wu, C. H., Ho, G. T. S., Lam, H. Y., & Tang, V. An intelligent model for assuring food quality in managing a multi-temperature food distribution centre. *Food Control*. Vol 90, pp. 81-97. 2018.
- [5] Aung, M. M., & Chang, Y. S. Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives. *Food Control*, 39(1), 172-184. 2014
- [6] Díaz-Ruiz, R., Costa-Font, M., López-i-Gelats, F., & Gil, J. M. Food waste prevention along the food supply chain: A multi-actor approach to identify effective solutions. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol 149, pp. 249-260. 2019
- [7] Cantwell, M.; Suslow, T. Lettuce, Chrispead: Recommendations for Maintaining Postharvest Quality. 2002. Available online: <http://postharvest.ucdavis.edu/pfvegetable/LettuceChrispead> Accessed: 2020-1-10
- [8] ASTM. Physical Requirements Guidelines for Sensory Evaluation Laboratories; *ASTM International: Philadelphia*, PA, USA, 1986
- [9] Torres-Sánchez, R.; Martínez-Zafra, M.T.; Castillejo, N.; Guillamón-Frutos, A.; Artés-Hernández, F. Real-Time Monitoring System for Shelf Life Estimation of Fruit and Vegetables. *Sensors* 2020, vol 20, 1860
- [10] Martínez-Zafra, M.T. Monitorización de las variables ambientales durante el transporte de productos perecederos para estimar en tiempo real las pérdidas de Calidad. Tesis Doctoral. 2020. Disponible en: <https://repositorio.upct.es>
- [11] Características técnicas ISOVER Climaver Neto. <https://www.isover.es/productos/climaver-neto>
- [12] Astrom, Karl J. Control PID avanzado. 1ªed. Pearson, 2009. ISBN 9788483225110
- [13] Chuk, Daniel. Los sistemas de primer orden y los Controladores PID. 2012 [en línea]. Disponible en: <http://dea.unsj.edu.ar/control2/ControladoresPID.pdf>
- [14] Dorf, Richard C. Sistemas modernos de control. 1ªed. Addison-Wesley Iberoamericana, 1989. ISBN 0201644177
- [15] Ogata, Katshuiko. Ingeniería de Control Moderna. 5ªed. Pearson, 2010. ISBN 9788483229552
- [16] CRBasic Editor: Stand-Alone Installation for CRBasic Editor [en línea]. Disponible en: <https://www.campbellsci.es/crbasiceditor>
- [17] Control de Procesos [en línea]. Disponible en: [http://lcr.uns.edu.ar/Control\\_Procesos/Teor%C3%A1a/Control%20de%20Procesos\\_cap5.pdf](http://lcr.uns.edu.ar/Control_Procesos/Teor%C3%A1a/Control%20de%20Procesos_cap5.pdf)
- [18] Dataloggers y Sistemas Adquisición de Datos [en línea]. Disponible en: <https://www.campbellsci.es/data-loggers>
- [19] LoggerNet: Software de soporte para datalogger [en línea]. Disponible en: <https://www.campbellsci.es/loggernet>
- [20] Pautas para el transporte de alimentos perecederos [en línea]. Disponible en: <https://www.deccoiberica.es/pautas-para-el-transporte-de-alimentos-perecederos/>



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# Control basado en eventos mediante umbral relativo aplicado al control de altitud de cuadricópteros Crazyfly 2.1

Francisco José Mañas-Álvarez, María Guinaldo, Raquel Dormido,  
Rafael Socas, Sebastián Dormido

Departamento de Informática y Automática

E.T.S.I. Informática, Universidad Nacional de Educación a Distancia, España,  
(fjmanas, mguinaldo, raquel, sdormido)@dia.uned.es, rsocas@telefonica.net

## Resumen

*En este trabajo se presenta el diseño de un controlador basado en eventos para el control de altitud del Crazyfly 2.1. La novedad estriba en la implementación del generador de eventos mediante un umbral relativo. La adaptación de este umbral se realiza en función de la distancia a la referencia y la presencia de ruido en el sistema. Los resultados obtenidos muestran una reducción del 93% de actualizaciones de la señal de control requeridas frente a controladores basados en eventos con umbral fijo o controladores de tipo periódico.*

**Palabras clave:** Controlador PID, muestreo adaptativo, nano-dron.

## 1 Introducción

Los nano-drones se han convertido en elemento fundamental para la investigación de cuadricópteros [21, 15]. Entre las ventajas que aportan respecto a otras plataformas destacan su bajo coste en comparación con otros vehículos aéreos, su bajo consumo de energía o su rápida maniobrabilidad. Los desarrollos conseguidos en su capacidad de maniobra plantean múltiples desafíos que abarcan desde el modelado dinámico, la estimación de estados o el seguimiento de trayectorias y el control.

El Crazyfly 2.1 es una plataforma comercial desarrollada por la compañía Bitcraze [2]. Se trata de un nano-dron de código y hardware abierto muy utilizado en distintas aplicaciones. Por ejemplo, en problemas de grandes enjambres [19, 18], en planificadores de rutas [13], en educación [7], en rechazo a perturbaciones [4], etc. Las características que presenta este nano-dron, como las no linealidades o el ser un sistema subactuado, lo convierten en una plataforma muy interesante para la investigación en diseño de sistemas de control para seguimiento de trayectorias. Además, el hecho de que sean vehículos no tripulados sugieren investigar en conseguir un mayor grado de autonomía, que pasa por alargar la vida de las baterías.

En este sentido, las técnicas de control basado

en eventos [11] como alternativa a los métodos de muestreo periódico son efectivas al disminuir el número de muestras y de actualizaciones de la señal de control. En el control basado en eventos, dichas tareas tienen lugar cuando se viola una cierta condición sobre el estado del sistema. Por tanto, hay una adaptación a las necesidades del proceso, que el caso del Crazyfly 2.1 implicarían un mayor tiempo de vuelo, al reducirse el número de actualizaciones y por tanto el uso de energía de las baterías. Sin embargo, en las estrategias de control basadas en eventos, el ruido en los sensores puede reducir la efectividad de esta técnica, ya que este tipo de perturbaciones aumentan el número de eventos detectados [23]. Configurar adecuadamente el controlador para minimizar el impacto del ruido es importante en estos casos.

El principal objetivo de este trabajo es diseñar algoritmos de control de posición y trayectoria para el Crazyfly. Utilizando Simulink se han implementado distintas soluciones haciendo uso de una estructura de control PID paralelo: tanto controladores de tipo periódico, en tiempo continuo y discreto, como controladores basados eventos. En estos últimos controladores se utiliza una estrategia tradicional del tipo “send-on-delta” y otra de tipo “adaptativo” que tiene en cuenta el error relativo respecto a la referencia y el nivel de ruido permitido. Se pretende probar las distintas soluciones analizando las ventajas que aporta cada una.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se describe brevemente el modelo dinámico del Crazyfly, comentando su arquitectura de control a bajo nivel. A continuación, en la sección 3 se analizan los principios básicos del control basado en eventos y se comenta el diseño propuesto para el controlador basado en eventos. La sección 4 presenta los resultados de simulación obtenidos. Finalmente, en la sección 5, se comentan las conclusiones del trabajo y algunas posibles líneas de actuación futuras.

## 2 Crazyfly 2.1

El presente trabajo se desarrolla sobre la plataforma experimental de código abierto



Crazyflie 2.1, figura 1. Se trata de un nano-cuadricóptero por su reducido tamaño ( $92 \cdot 92 \cdot 29 [mm]$ ) y peso ligero ( $27 [g]$ ). Su diseño, especialmente pensado para vuelo en interiores, junto con la flexibilidad que ofrece en su programación, ha propiciado su auge en el sector educativo y de investigación. En la tabla 1 se muestran los parámetros físicos del dron considerados en el presente trabajo. En la figura 1 se muestran los ejes establecidos para el modelado del dron. Durante el desarrollo se hará referencia al marco global, OXYZ, mediante el índice “o”. Para el caso de las coordenadas locales, O'X'Y'Z', el índice empleado es “b”.

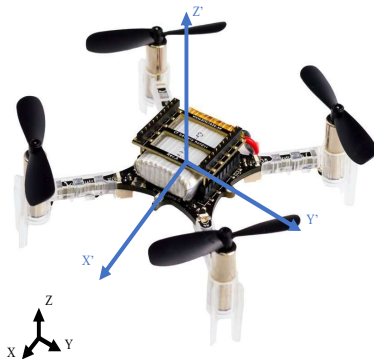


Figura 1: Cuadricóptero Crazyflie 2.1.

Tabla 1: Parámetros físicos del Crazyflie 2.1.

Parámetro	Valor
Masa del dron ( $m$ )	$27[g]$
Longitud del brazo ( $d$ )	$39.73 \cdot 10^{-3}[m]$
Radio del rotor ( $r$ )	$23.135 \cdot 10^{-3}[m]$
Inercia eje x ( $I_{xx}$ )	$1.36 \cdot 10^{-5}[Kg \cdot m^2]$
Inercia eje y ( $I_{yy}$ )	$1.43 \cdot 10^{-5}[Kg \cdot m^2]$
Inercia eje z ( $I_{zz}$ )	$2.17 \cdot 10^{-5}[Kg \cdot m^2]$
Constante de empuje ( $k_T$ )	0.2025
Constante de torque ( $k_D$ )	0.11

## 2.1 Modelo

En esta sección se realiza el modelado en el espacio de estados basado en leyes físicas para un cuadricóptero genérico empleando la formulación matemática de Newton-Euler. El vector de estados está compuesto por cuatro vectores asociados a los 6 grados de libertad del dron y sus respectivas velocidades, tabla 2.

Como hipótesis iniciales, se considera que el dron es un cuerpo rígido, simétrico y cuyos cuatro rotores son idénticos. De igual forma, se considerará su configuración en “X” para los cálculos. Para determinar las ecuaciones relacionadas con

Vector	Estado	Descripción
$p$	$x$	Posición X
	$y$	Posición Y
	$z$	Posición Z
$\Phi$	$\phi$	Ángulo Roll
	$\theta$	Ángulo Pitch
	$\psi$	Ángulo Yaw
$V$	$u$	Velocidad Lineal X
	$v$	Velocidad Lineal Y
	$w$	Velocidad Lineal Z
$\omega$	$p$	Velocidad Angular X
	$q$	Velocidad Angular Y
	$r$	Velocidad Angular Z

Tabla 2: Vector de estados.

los parámetros lineales del dron, se aplica la segunda ley de Newton, calculando la derivada de la velocidad según la ecuación de Coriolis, ecuación (1), donde el subíndice  $CG$  hace referencia al centro de gravedad del dron y  $b/o$  al movimiento relativo del centro de gravedad del dron respecto al origen de coordenadas.

$$\Sigma F = m \cdot \dot{V}_{CG}^o = m \cdot \left( \dot{V}_{CG}^b + \omega_{b/o} \times V_{CG} \right) \quad (1)$$

Considerando que en estacionario, tanto el ángulo Roll como el ángulo Pitch son nulos, el equilibrio de fuerzas permite determinar la derivada de la velocidad lineal del dron, tal y como se muestra en (2). La transformación correspondiente entre el marco global y la referencia local del dron viene dada por una primera rotación del ángulo Yaw, ( $\psi$ ), seguida de la rotación del ángulo Pitch, ( $\theta$ ), y una tercera rotación de Roll, ( $\phi$ ) (ver [8]).

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{F_z}{m} \end{bmatrix} - R_o^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

Las derivadas de las variables referentes a la posición, se calculan proyectando las velocidades lineales del dron sobre el marco global mediante la matriz de transformación  $R_b^o$ .

$$\dot{p}^o = R_b^o \cdot V^b \quad (3)$$

La fuerza de empuje generada por cada hélice, expresada en Newtons, se determina mediante la ecuación (4), donde  $C_T$  es el coeficiente de empuje del motor y  $\omega_i$  la velocidad de rotación de cada motor. La ecuación (5) se corresponde con el empuje total generado por los cuatro motores.

$$F_i = C_T \omega_i^2 \quad (4)$$

$$\Sigma F_i^b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_T (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

El coeficiente de empuje de un motor depende de una constante adimensional  $k_T$ , la densidad del aire,  $\rho$  y del radio del rotor,  $r$ :

$$C_T = k_T \rho \frac{(2r)^4}{3600} \quad (6)$$

Para determinar los componentes angulares del vector de estados, se emplea el equilibrio de momentos. Aplicando el teorema del momento angular e introduciendo la ecuación de Coriolis, se obtiene la ecuación (7) aplicada al marco global, donde  $h$  representa el momento angular alrededor del centro de gravedad.

$$\Sigma M^o = {}^o \dot{h} \rightarrow \Sigma M^o = {}^b \dot{h} + \omega_{b/o} \times h \quad (7)$$

Si se considera el marco local del dron, el equilibrio de momentos se puede expresar mediante la ecuación (8), donde  $J$  representa la matriz de inercia. Bajo la hipótesis de simetría,  $J$  se puede expresar según la ecuación (9).

$$\Sigma M^b = J^b \dot{\omega}_{b/o} + \omega_{b/o} \times J \omega_{b/o} \quad (8)$$

$$J = \text{diag}(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) \quad (9)$$

Despejando el vector  $\dot{\omega}_{b/o}$  en (8) se obtiene:

$$\dot{\omega} = (J)^{-1} (M_{x,y,z} - \omega \times J \omega) \quad (10)$$

La última ecuación de estado se determina de la relación entre el vector  $\omega_{b/o}$  y la derivada de  $\Phi$ :

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (11)$$

El momento total generado por la acción de los rotores:

$$M = \Sigma P_i \times F_i + \Sigma \tau_i \quad (12)$$

donde  $P_i$  representa la distancia de cada motor al centro de gravedad, vectorialmente, y  $\tau_i$  representa el momento inducido por cada motor. El momento total inducido por los rotores es:

$$\Sigma \tau_i^b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_D (-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Conociendo la fuerza que genera cada motor calculada según la ecuación (5), el momento que produce el empuje de cada motor es:

$$\begin{aligned} P_1 \times F_1 &= \frac{d}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -C_T \omega_1^2 \\ -C_T \omega_1^2 \\ 0 \end{bmatrix} & P_2 \times F_2 &= \frac{d}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -C_T \omega_2^2 \\ C_T \omega_2^2 \\ 0 \end{bmatrix} \\ P_3 \times F_3 &= \frac{d}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} C_T \omega_3^2 \\ C_T \omega_3^2 \\ 0 \end{bmatrix} & P_4 \times F_4 &= \frac{d}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -C_T \omega_4^2 \\ -C_T \omega_4^2 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

El cálculo de los momentos, con referencia local, es el siguiente:

$$M^b = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dC_T/\sqrt{2} (-\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ dC_T/\sqrt{2} (-\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \\ C_D (-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (15)$$

El coeficiente de torque,  $C_D$ , se determina según la ecuación (16), [9], donde se muestra la dependencia con el coeficiente adimensional  $k_D$ , la densidad del aire,  $\rho$  y del radio del rotor,  $r$ .

$$C_D = k_D \rho \frac{(2r)^5}{3600} = 7.9379 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{Nm}{rpm^2} \right] \quad (16)$$

En la ecuación (15), los términos que incluyen aceleraciones angulares y momentos giroscópicos se han omitido ya que su contribución se puede considerar despreciable [20, 3].

## 2.2 Arquitectura de control

En la figura 2 se muestra el diagrama general de la arquitectura de control de un cuadricóptero. Esta es la más extendida en la literatura. En color azul y con el subíndice “dron” se representan las señales de realimentación medidas del dron. El caso de las señales con el subíndice “ref” se tratan de las señales de referencia para los controladores. La referencia global del dron está representada mediante el término “Pose3D”. Finalmente, “Control Mixer” recibe la señal de control de referencia de giro de los motores,  $\Omega$ , mientras que  $\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\psi$  representa la variación de velocidad de giro que debe realizar el dron para alcanzar la referencia. El “Control Mixer” es el encargado de aplicar la parte proporcional de cada término a cada motor.

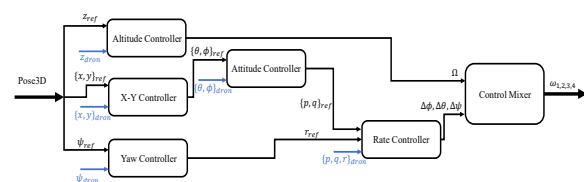


Figura 2: Arquitectura de control implementada.

Todos los controladores que incorpora la arquitectura anterior están basados en controladores del tipo PID, optándose por tomar como referencia las frecuencias recomendadas por el fabricante. En el caso del “Attitude Controller” y “Rate Controller”, la frecuencia de funcionamiento es de 500[Hz], mientras que los controladores de posición y del ángulo *Yaw* se ejecuta a 100[Hz]. La discretización de los controladores se ha realizado mediante la aproximación trapezoidal, considerando sus respectivos periodos de muestreo.

De estos en la tabla 3 solo se muestran los parámetros correspondientes a una configuración PID paralela para el controlador de altitud del dron, en el que se centra este trabajo. La señal de control que recibe el dron es un pulso PWM transmitido en una señal de 16 bits, por lo que el rango de la señal de control está comprendido entre  $[0, 65536]$ . Los parámetros empleados son una combinación extraída de [14, 22]. Para atenuar el ruido de alta frecuencia se ha implementado un filtro paso bajo en el término derivativo del PID.

Tabla 3: Parámetros PID.

Parámetro	Valor
$K_p$	15000 [bits/m]
$K_i$	3500 [bits/m]
$K_d$	9000 [bits/m]

### 3 Control basado en eventos

#### 3.1 Fundamentos

El control basado en eventos supone un método de muestreo alternativo al periódico que se ha demostrado efectivo en disminuir el número de muestras, actualizaciones de la señal de control, etc. a la vez que se garantizan niveles de desempeño similares a un controlador convencional [11]. Su auge en los últimos veinte años ha venido motivado por las ventajas que aporta en sistemas de control en red o, más recientemente, en los llamados sistemas ciberfísicos, en los cuales existe un fuerte acoplamiento entre el control, la computación y la comunicación, y el diseño de estrategias ha de abordarse de manera integral [1]. El uso eficiente de estos recursos tiene un especial impacto en aquellos sistemas que están alimentados por baterías, como son los nano-drones, ya que permite prolongar la autonomía del sistema.

Normalmente, en un muestreo por eventos, se define una función de disparo dependiente de una señal de error y una cota, de tal manera que se produce un evento (muestreo) cuando dicha señal alcanza ese valor máximo definido.

Sea  $x(t)$  el estado del sistema a tiempo  $t$ . Se define el error como  $e(t) = x(t_k) - x(t)$ , donde  $t_k$  representa el último instante de muestreo. Éstos se definen de manera recursiva como

$$t_{k+1} = \inf\{t : t > t_k, f(e(t), x(t)) > 0\}, \quad (17)$$

donde  $f(e(t), x(t))$  es la función de disparo. Ésta puede depender: a) del error y el estado (estrategias de *umbral relativo*), y su definición se deriva a través de análisis de estabilidad mediante funciones de Lyapunov [24, 26, 5] que permite garantizar estabilidad asintótica del sistema; b) sólo del

error -y otros parámetros constantes- como en el caso de las estrategias send-on-delta [12, 16] (o de *umbral fijo*), que solo garantizan que el estado permanecerá confinado en una región en torno al equilibrio; c) una combinación de ambas estrategias y de otros parámetros como el tiempo, que permiten buscar una solución de compromiso entre ambas situaciones [10, 17]. Esta solución también se ha presentado en la literatura cuando el estado completo del sistema no está disponible, ya que el uso de la estrategia de umbral relativo puro lleva a lo que se conoce como efecto Zeno, es decir, la ocurrencia de infinitos eventos en un intervalo de tiempo finito [6].

#### 3.2 Control basado en eventos para Crazyflie 2.1

Con el objetivo de disminuir la frecuencia promedio del controlador, se ha propuesto un diseño de control basado en eventos en el cual se define una función de disparo para las variables de estado  $x, y, z$ . Si denotamos de manera genérica una de estas variables como  $p_i$ , el error asociado al muestreo basado en eventos de la variable  $p_i$  como  $e_i$ , y el tiempo de muestreo de dicha variable como  $t_k^i$ , la función de disparo propuesta es la siguiente:

$$f_i(e_i(t), p_i(t)) = |e_i(t)| - (c_0^i + a_i |p_i(t) - p_{ref}^i| + c_n^i(t)), \quad (18)$$

donde  $c_0^i$  y  $a_i$  son parámetros constantes,  $c_n^i(t)$  es un parámetro que se ajusta al nivel de ruido de la señal y  $p_{ref}^i$  es la señal de referencia para la variable  $p_i$ . Nótese que en este caso la cota consta de tres términos: uno constante dado por  $c_0^i$  que nos determinará el error máximo que tengamos en torno a la referencia, uno relativo a la distancia a la referencia ponderado por  $a_i$ , y un tercer término dado por  $c_n^i(t)$  que permite acomodar el muestreo a la presencia de ruido, que puede generar eventos innecesarios. El cálculo de este término se basa en la estimación del valor de ruido al que está sometida la señal [23]. Para ello se determina  $c_n^i(t)$  como el valor máximo de desviación de la medida respecto al cálculo del valor medio de la señal calculado mediante una ventana móvil de longitud predefinida:

$$c_n^i(t) = \max(|y_l[n] - \sum_{i=1}^l y_l[i]|), \quad (19)$$

donde  $l$  es la longitud de la ventana analizada e  $y_l[n]$  el vector de medidas estudiado.

De esta manera, cuando el sistema está alejado de la referencia, se toleran valores de  $e_i$  superiores a cuando el sistema se acerca al punto deseado, lo cual permite mantener un nivel adecuado de desempeño del controlador pero reduciendo el número de actualizaciones de la señal de control.

## 4 Resultados

El caso de estudio se centra en los resultados obtenidos para el control de altitud del dron. Para la comparativa se toman tres casos de estudio en los cuales los parámetros del PID permanecerán constantes (ver tabla 3). En el primero, el controlador PID será discretizado mediante la aproximación trapezoidal con un periodo constante de 10 [ms]. En el segundo caso, se plantea un disparador por eventos con una cota constante de 1 [cm]. Este parámetro, en la práctica experimental está condicionado por la precisión del sistema de localización empleado. Finalmente, el tercer caso contempla la condición de disparo descrita en (18), con  $c_0^i = 1$  [cm] y  $a = 1.5$  [cm]. El parámetro  $c_n^i(t)$ , fundamental para evitar falsos disparos a causa del ruido, se ha estimado a partir del error máximo respecto a una media de ventana móvil con una longitud de 20 muestras. Al tratarse de una simulación, el ruido se ha añadido de forma artificial mediante una señal de ruido blanco con ancho de banda limitado. La señal se ha simulado con una densidad espectral de potencia de  $1 \cdot 10^{-8}$  y una frecuencia de funcionamiento de 1[kHz]. El controlador PID implementado incluye el filtro paso bajo en la derivada.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \frac{s}{1 + \frac{K_d}{K_p N_d} s} \quad (20)$$

Vasyutynskyy y Kabitzsch [25] presentan, una implementación de este controlador basada en eventos para cada instante de muestreo k:

$$u_k = P_k + I_k + D_k \quad (21)$$

$$P_k = K_p \cdot e_k \quad (22)$$

$$I_k = I_{k-1} + K_i \cdot T_k \cdot e_{k-1} \quad (23)$$

$$D_k = \frac{K_d}{K_d + N_d \cdot T_k \cdot K_d} D_{k-1} + \frac{K_d \cdot N_d}{\frac{K_d}{K_p} + N_d \cdot T_k} \cdot (e_k - e_{k-1}) \quad (24)$$

donde  $P_k$ ,  $I_k$  y  $D_k$  son las acciones proporcional, integral y derivativa, respectivamente,  $T_k$  representa el tiempo transcurrido desde el último evento y  $N_d$  es el parámetro característico del filtro de la derivada cuyo valor adoptado es 20.

La trayectoria empleada en este estudio se muestra en la figura 3. Se propone elevar el dron a una altura de un metro y dibujar una trayectoria de un cuadrado de 1 [m] de lado a dicha altura. En dos de los lados del cuadrado se reduce la consigna del eje Z en un 20% para observar su comportamiento mejor sacándolo de estacionario en dos ocasiones. En la figura 4 se muestran los datos obtenidos para el movimiento en el eje Z (gráfica superior) y la

correspondiente señal de control generada por el controlador transformando la señal PWM a la velocidad angular de cada rotor.

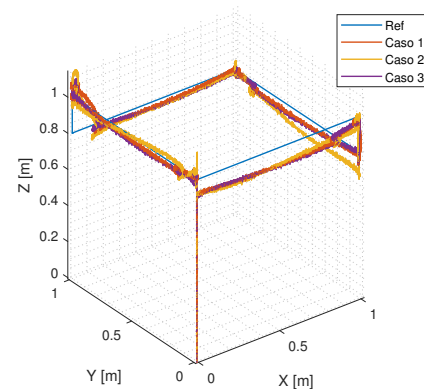


Figura 3: Trayectoria realizada por el Crazyfly.

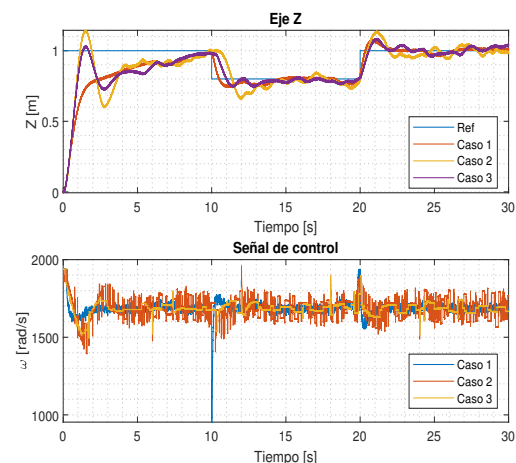


Figura 4: Control altitud Crazyflye 2.1.

A simple vista, se observa la discrepancia entre el control del PID discretizado y las dos implementaciones del control basado en eventos. La mayor discrepancia de comportamiento se encuentra en el despegue, donde en el caso de los basados en eventos, se aprecia una clara sobreoscilación sobre el controlador discreto. Los tres controladores parecen converger a partir del instante  $t = 5$ [s], aunque los controladores basados en eventos mantienen cierto rizado en estacionario. Atendiendo al comportamiento de la señal de control, se observa que para el caso 2, el valor adoptado para el filtro en la derivada no es suficientemente bajo. El valor del parámetro del filtro  $N_d = 20$ , se ha escogido tras un barrido del mismo. Para el caso 2 concretamente, debería tomar el valor 7 para conseguir la reducción del ruido en la señal de control. No obstante, dicho valor provoca que el sistema os-

cile al llegar a estacionario por lo que empeora significativamente su desempeño. Con la finalidad de analizar el desempeño de los controladores diseñados se utilizan distintos índices: el número de muestras ( $N$ ), la Integral del Error Absoluto (*Integral of Absolute Error*, IAE), la Integral del Tiempo por el Error Absoluto (*Integral of Time-weighted Absolute Error*, ITAE) y el consumo energético. Para este último índice, sólo se ha considerado la velocidad de giro de los rotores. Una estimación más precisa y que reforzaría los resultados obtenidos debería considerar el consumo intrínseco asociado al procesamiento de mensajes por parte del dron. En la tabla 4 se muestran los valores de cada índice para cada uno de los casos.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
$N$	3000	1027	207
$IAE [m]$	2.2568	2.6417	2.1825
$ITAE [m \cdot s]$	12.485	21.224	14.989
Consumo $[W]$	13.909	13.931	13.897

Tabla 4: Resultados analíticos.

Se observan claras diferencias entre los distintos controladores. Como era de esperar, el control basado en eventos reduce notablemente la cantidad de mensajes en la arquitectura de control. En este sentido, para el caso 2 se consigue una reducción del 65.77% y para el caso 3 se alcanza una reducción del 93%. Atendiendo al desarrollo propuesto al control basado en eventos mediante el caso 3, las mejoras son más significativas que respecto al controlador discreto (3.29% de mejora en la IAE). En el número de eventos, la mejora es del 79.844%, mejora el desempeño en la IAE e ITAE un 17.383% y 29.374% respectivamente.

En la figura 5 se observa la comparativa de generación de eventos entre el caso con una cota variable (Caso 3) y la cota fija (Caso 2). Dado que el sistema es muy rápido para visualizar con detalle la generación de eventos, en las figuras 6 y 7 se presenta una ampliación. Se observa claramente como el umbral se ajusta al ruido y como resultado se consigue reducir la generación de eventos. En ese caso se muestra durante el periodo transitorio del movimiento del dron en Z. En la figura 7 se muestra durante un periodo estacionario donde se aprecia el valor prácticamente nulo del término  $a$  de la ecuación (18) y la adaptación al ruido.

Finalmente, en la figura 8, se muestra la variación del periodo entre las acciones de control para los tres casos estudiados. Como es lógico, en el caso del controlador discreto, el periodo es constante a 0.01[s]. En el caso del umbral fijo, el periodo máximo que se alcanza es 0.337[s]. Los

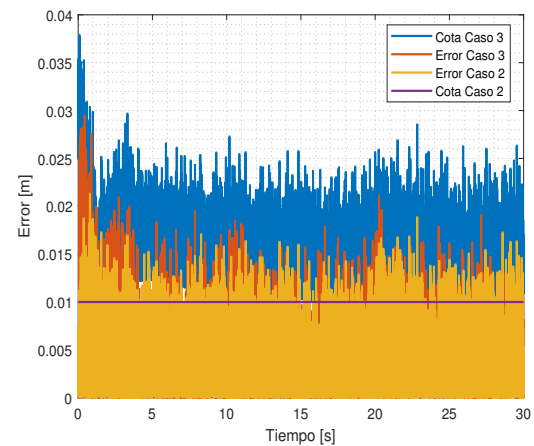


Figura 5: Comparativa de generación de eventos.

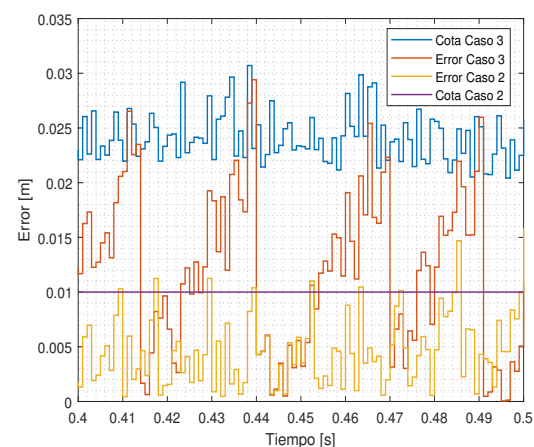


Figura 6: Generación de eventos. Transitorio.

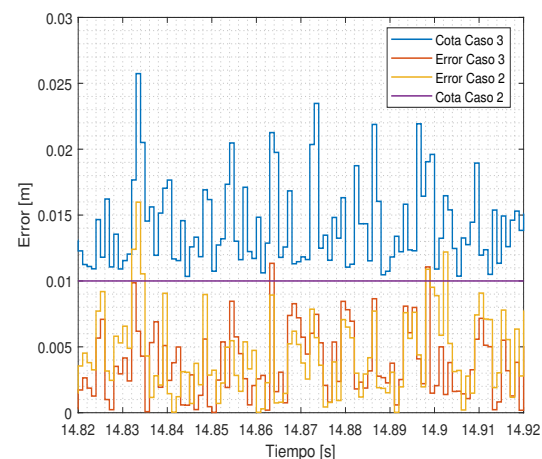


Figura 7: Generación de eventos. Estacionario.

mejores resultados, como era de esperar, se alcanzan para el caso del umbral relativo, logrando hasta un máximo de 1.25[s], manteniéndose por encima siempre de las otras dos implementaciones.



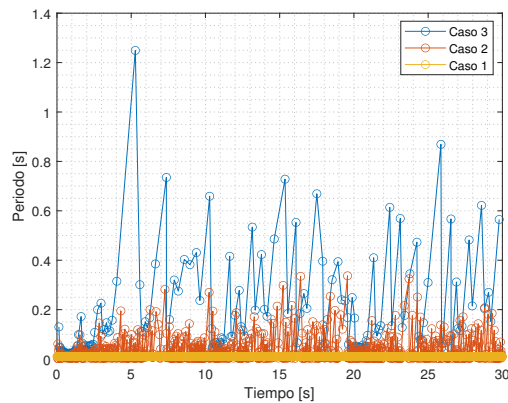


Figura 8: Periodo entre acciones de control.

## 5 Conclusiones

En este trabajo se ha probado un cálculo adaptativo del umbral de disparo de un sistema de control basado en eventos aplicado al control de altitud del nano-dron Crazyflie 2.1. Se han comparado los resultados obtenidos para el umbral relativo (Caso 3) con el desempeño de un umbral constante (Caso 2) y con un controlador PID discretizado con periodo constante (Caso 1). Los resultados muestran una mejora en el número de cambios en la señal de control, siendo máximos para el caso 1 (3000) y mínimos, con una reducción del 93% para el caso 3 (207 señales).

Una vez verificadas las bondades de la arquitectura de control propuesta, el siguiente paso es extenderla al resto de controladores, figura 2. En el caso del índice de consumo, se puede estudiar la inclusión de gasto asociado al procesamiento de los mensajes de control para observar el efecto de la mejora en la duración de la batería, parámetro crítico en los robots de tamaño tan reducido. Además, se abre un abanico de opciones de estudio modificando las condiciones de operación, tales como el equipamiento de los robots, inclusión de perturbaciones o evaluar la robustez del sistema frente a pérdida de mensajes en la comunicación.

### Agradecimientos

Este trabajo fue financiado en parte por los proyectos CICYT RTI2018-094665-B-I00 y DPI2017-84259-C2-2-R del Ministerio de Ciencia e Innovación

### English summary

**Event-based control with relative threshold applied to Crazyflie 2.1 quadrotor altitude control**

## Abstract

*In this work the design of an event-based controller for the altitude controller of the Crazyflie 2.1 is presented. The novelty is based on the implementation of the event generator by means of a relative threshold. The adaptation of this threshold is carried out according to the distance to the reference and the presence of noise in the system. This obtained results show a 93% reduction of the number of control signal updates with respect to event-based controllers with a fixed threshold or periodic controllers.*

**Keywords:** PID Controller, adaptive sampling, nano-dron.

## Referencias

- [1] E. Aranda-Escolástico, M. Guinaldo, R. Heradio, J. Chacon, H. Vargas, J. Sánchez, and S. Dormido. Event-based control: a bibliometric analysis of twenty years of research. *IEEE Access*, 8:47188–47208, 2020.
- [2] Bitcraze. Crazyflie 2.1 — bitcraze. <https://www.bitcraze.io/products/crazyflie-2-1/>. Accessed: 2021-06-12.
- [3] S. Bouabdallah, A. Noth, and R. Siegwart. PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume 3, pages 2451–2456, 2004.
- [4] N. Bucki and M.W. Mueller. Improved quadcopter disturbance rejection using added angular momentum. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 4164–4170, 2018.
- [5] C. De Persis, R. Sailer, and F. Wirth. Parsimonious event-triggered distributed control: A zeno free approach. *Automatica*, 49(7):2116–2124, 2013.
- [6] M.C.F. Donkers and W.P.M.H. Heemels. Output-based event-triggered control with guaranteed  $\mathcal{L}_\infty$ -gain and improved and decentralized event-triggering. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57(6):1362–1376, 2012.



- [7] W. Giernacki, M. M. Skwierczyński, W. Witwicki, P. Wroński, and P. Kozierski. Crazyflie 2.0 quadrotor as a platform for research and education in robotics and control engineering. In *2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, pages 37–42, 2017.
- [8] Marcus Greiff. *Modelling and control of the crazyflie quadrotor for aggressive and autonomous flight by optical flow driven state estimation*. PhD thesis, Department of Automatic Control, Lund University, 2017.
- [9] E.M. Greitzer, Z.S. Spakovszky, and I.A. Waitz. Thermodynamics and propulsion. *Mechanical Engineering, MIT*, 2006.
- [10] M. Guinaldo, D.V. Dimarogonas, K.H. Johansson, J. Sanchez, and S. Dormido. Distributed event-based control strategies for interconnected linear systems. *IET Control Theory and Applications*, 7(6):877–886, 2013.
- [11] W.P.M.H. Heemels, K.H. Johansson, and P. Tabuada. An introduction to event-triggered and self-triggered control. In *2012 IEEE 51st IEEE conference on decision and control (cdc)*, pages 3270–3285, 2012.
- [12] W.P.M.H. Heemels, J.H. Sandee, and P.P.J. Van Den Bosch. Analysis of event-driven controllers for linear systems. *International Journal of Control*, 81(4):571–590, 2008.
- [13] M. Hupfuch and S. Röck. Real-time path planning in dynamic environments for unmanned aerial vehicles using the curve-shortening flow method. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 18(1), 2021.
- [14] C. Luis and J.L. Ny. Design of a trajectory tracking controller for a nanoquadcopter. *arXiv preprint arXiv:1608.05786*, 2016.
- [15] M. Mack, C. Noe, T. Rice, I.S. Ahn, and J. Wang. Distributed localization and control of quadrotor UAVs using ultra-wideband sensors. In *2019 IEEE Aerospace Conference*, pages 1–9, 2019.
- [16] M. Miskowicz. Send-on-delta concept: An event-based data reporting strategy. *Sensors*, 6(1):49–63, 2006.
- [17] N. Mu, X. Liao, and T. Huang. Consensus of second-order multi-agent systems with random sampling via event-triggered control. *Journal of the Franklin Institute*, 353(6):1423–1435, 2016.
- [18] D. Pickem, P. Glotfelter, L. Wang, M. Mote, A. Ames, E. Feron, and M. Egerstedt. The robotarium: A remotely accessible swarm robotics research testbed. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1699–1706, 2017.
- [19] J.A. Preiss, W. Honig, G.S. Sukhatme, and N. Ayanian. Crazyswarm: A large nano-quadcopter swarm. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3299–3304, 2017.
- [20] F. Sabatino. Quadrotor control: modeling, nonlinear control design, and simulation, 2015.
- [21] Z. Shang and Z. Shen. Indoor testing and simulation platform for close-distance visual inspection of complex structures using micro quadrotor uav, 2019.
- [22] G. Silano, E. Aucone, and L. Iannelli. CrazyS: a software-in-the-loop platform for the Crazyflie 2.0 nano-quadcopter. In *2018 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pages 1–6, 2018.
- [23] R. Socas, S. Dormido, and R. Dormido. Event-based controller for noisy environments. In *2014 Second World Conference on Complex Systems (WCCS)*, pages 280–285, 2014.
- [24] P. Tabuada. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(9):1680–1685, 2007.
- [25] V. Vasyutynskyy and K. Kabitzsch. Time constraints in PID controls with send-on-delta. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(3):48–55, 2009.
- [26] X. Wang and M.D. Lemmon. Event-triggering in distributed networked control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(3):586–601, 2011.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# DIMENSIONADO DE SISTEMA DE ALMACENAMIENTO PARA HIBRIDACIÓN CON FV A PARTIR DE PREDICCIONES PROBABILÍSTICAS DE IRRADIANCIA

E. Pérez, J. González-Barreda, J. Segarra-Tamarit y H. Beltran

Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño, Universitat Jaume I,  
Castelló de la Plana, España *pereze@uji.es* // ORCID: 0000-0001-8466-3941

## Resumen

*En este trabajo se propone una metodología para dimensionar el sistema de almacenamiento de un sistema híbrido con fotovoltaica (FV) para uso doméstico, a partir de predicciones probabilísticas de la producción solar. Se introduce para ello un modelo basado en Deep Learning que, a partir de estimaciones de la irradiancia pasada en el área que rodea la localización objetivo, obtiene las predicciones de distintos percentiles de la producción FV. El dimensionamiento se realiza mediante una optimización lineal que utiliza la función cuantil para garantizar, con un cierto nivel de confianza, que se satisface un perfil de demanda tipo. Finalmente, se introducen y discuten resultados en cuanto a la violación de restricciones que se produce con diferentes tamaños del sistema de almacenamiento mostrándose que, cuando este es superior a 3 h a potencia nominal de la instalación FV, las restricciones se satisfacen en más del 99 % de las ocasiones.*

**Palabras clave:** aplicaciones fotovoltaicas, sistemas de almacenamiento de energía, predicción probabilística, programación lineal.

## 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos años, la fotovoltaica (FV) se ha consolidado como la primera tecnología renovable en términos de MW instalados al año a nivel mundial, superando así a la energía eólica [8]. De hecho, según se estima en [18], la capacidad FV global instalada a finales de 2020 superaba los 600 GW.

Este importante crecimiento de las instalaciones FV conlleva, no obstante, la aparición de varios desafíos debidos principalmente a la naturaleza estocástica de su producción [9]. Para afrontarlos, existen diferentes enfoques en la literatura. Destacan entre ellos el desarrollo de modelos de predicción de la irradiancia [17] y el uso de sistemas de almacenamiento. Gracias a la progresiva disminución de los precios de estos últimos [12], su presencia junto a instalaciones FV está siendo ca-

da vez más habitual. Así, existen propuestas que los combinan tanto para aplicaciones residenciales [4] como para instalaciones a nivel de red [15].

La utilización de sistemas de almacenamiento, y en particular de baterías de iones de litio, para mejorar la producción de plantas FV también ha sido un campo de investigación importante en los últimos años. La mejora productiva se puede obtener de varias formas, dependiendo de los objetivos de la propuesta: suavizado de potencia [10], control de rampa [2], maximización del beneficio económico obtenido [13], entre otros. Del mismo modo, también se ha trabajado bastante en el reto de dimensionar los sistemas de almacenamiento integrados con instalaciones FV [20]. Existen multitud de enfoques en la literatura en este sentido abarcando desde el dimensionado y localización óptima en las redes de distribución [21, 19, 14] hasta el dimensionado para la producción en firme utilizando modelos de predicción de irradiancia [1].

La introducción de incertidumbre en la gestión de sistemas de almacenamiento mediante restricciones probabilísticas se ha resuelto con anterioridad en la literatura para su aplicación en microrredes [3, 6] pero, a conocimiento de los autores, no para instalaciones residenciales que pretendan evitar el consumo desde la red. En este sentido, este trabajo plantea la determinación de las potencias a verter a red así como las de carga-descarga del sistema de almacenamiento de forma que se garantice, en todo momento y con un nivel de confianza adecuado, una potencia disponible en la instalación superior a la demanda de un usuario residencial tipo evitando la saturación del almacenamiento.

El documento se organiza del siguiente modo: en la sección 2 se presenta un modelo de predicción probabilística de la irradiancia basado en redes neuronales, a partir del cual se obtendrá la predicción de producción FV del sistema. La sección 3 está dedicada al planteamiento del problema de optimización que, utilizando el modelo anterior, permitirá dimensionar el almacenamiento requerido por el sistema. En la sección 4 se presentan los resultados obtenidos en cuanto al dimensionado, mostrando el funcionamiento del sistema híbrido en dos días tipo, claro y nublado. Finalmente, en

la sección 5 se proponen algunas conclusiones y trabajo futuro.

## 2. MODELO DE PREDICCIÓN PROBABILÍSTICA DE IRRADIANCIA

Para generar la predicción de producción de irradiancia, se ha desarrollado un modelo de Deep Learning basado en el presentado en [11] y cuya arquitectura fundamental puede ser observada en la Figura 1. Como se puede ver, esta utiliza como entrada principal estimaciones de irradiancia pasada en el área que rodea la localización objetivo. Estas matrices de irradiancia pasada se obtienen a partir del algoritmo Surface Insolation under Clear and Cloudy Skies (SICCS) [7], un modelo basado en la física y ajustado empíricamente, que utiliza información de satélite. El tiempo transcurrido entre cada una de las matrices es de 15 minutos, que es el mismo con el que se generan las predicciones finales. Las matrices pasan a continuación por una estructura de Deep Learning compuesta por varias capas convolucionales para detectar el movimiento y las características de las nubes. Además, el modelo utiliza otras entradas secundarias como la irradiancia en el exterior de la atmósfera. Esta variable depende de la fecha, la hora y la localización y es independiente del estado de la atmósfera. Por tanto, es posible obtenerla con precisión para cualquier momento, tanto pasado como futuro. Finalmente, la última entrada utilizada son las mediciones pasadas de irradiancia, que se obtienen en la localización objetivo mediante un piranómetro.

La información obtenida por las capas convolucionales, junto con las entradas secundarias, pasa entonces por varias capas densas para obtener la predicción final. En concreto, el modelo tiene tres capas densas para obtener cada una de sus predicciones y replica esta estructura en paralelo para cubrir todo el horizonte de predicción. Cada uno de estos subgrupos está compuesto por tres capas densas de 300, 100 y 20 unidades. Las dos primeras cuentan con activaciones ReLU, mientras que la última utiliza activaciones softmax para obtener la probabilidad de cada uno de los 20 rangos en los que se han discretizado los valores de irradiancia (desde 0 hasta 1000 con escalones de 50). Por tanto, para cada predicción del modelo se obtiene un vector con estas 20 probabilidades, correspondientes a cada nivel de irradiancia, para cada uno de los instantes de tiempo. La selección de los hiperparámetros del modelo se ha llevado a cabo utilizando un año de datos, de los cuales un 80 % se ha destinado al entrenamiento y el otro 20 % a evaluar el desempeño del modelo. Este proceso de entre-

Tabla 1: Comparación de las probabilidades del modelo con los datos reales.

$Pr\{\hat{x} > x\}$	5 %	10 %	90 %	95 %
Modelo	1.3 %	2.5 %	97.1 %	98.2 %

namiento se lleva a cabo en una NVIDIA 1050Ti y dura aproximadamente tres horas y media. El entrenamiento se lleva a cabo para minimizar la entropía cruzada y finaliza cuando los resultados empiezan a empeorar para un subconjunto de validación, lo que permite evitar el overfitting.

Las figuras 2 y 3 muestran la producción FV real y diferentes predicciones obtenidas mediante el modelo probabilístico para un día claro y uno nublado, respectivamente. Puede comprobarse como, para los días mostrados, la producción real queda siempre entre los rangos definidos aunque hay otros días en los que el modelo falla en algún instante puntual, como es de esperar por los intervalos de confianza establecidos. Además, es interesante observar como el rango entre las cotas superior e inferior es proporcionalmente mucho menor para el día claro, reflejando la incertidumbre más baja de la predicción en este tipo de situaciones.

Para evaluar el funcionamiento del modelo se han comparado las predicciones de los cuatro percentiles que se van a utilizar posteriormente con datos reales diferentes a los del desarrollo del modelo. La Tabla 1 muestra la cantidad de valores reales que quedan por debajo de cada una de las predicciones obtenidas del modelo. Se observa que los percentiles 5 y 10 del modelo en realidad dejan por debajo menos valores reales de los esperados, con un 1.3 % y un 2.5 % respectivamente. En cambio, las predicciones de los percentiles 90 y 95, dejan por debajo un 97.1 % y un 98.2 %, que es un valor superior al esperado.

## 3. DIMENSIONADO DEL ALMACENAMIENTO MEDIANTE OPTIMIZACIÓN PROBABILÍSTICA

Una vez se tiene disponible un modelo de predicción probabilística de la producción del sistema FV, se plantea una estrategia de control del sistema híbrido cuyo principal objetivo es satisfacer la demanda a lo largo de todo el día con el sistema de almacenamiento más pequeño que evita la saturación del mismo. No obstante, puesto que no se conoce con total certeza la producción FV, estas restricciones no pueden asegurarse de manera estricta, sino con un nivel de confianza determinado. Así, puede obtenerse la secuencia de potencias de

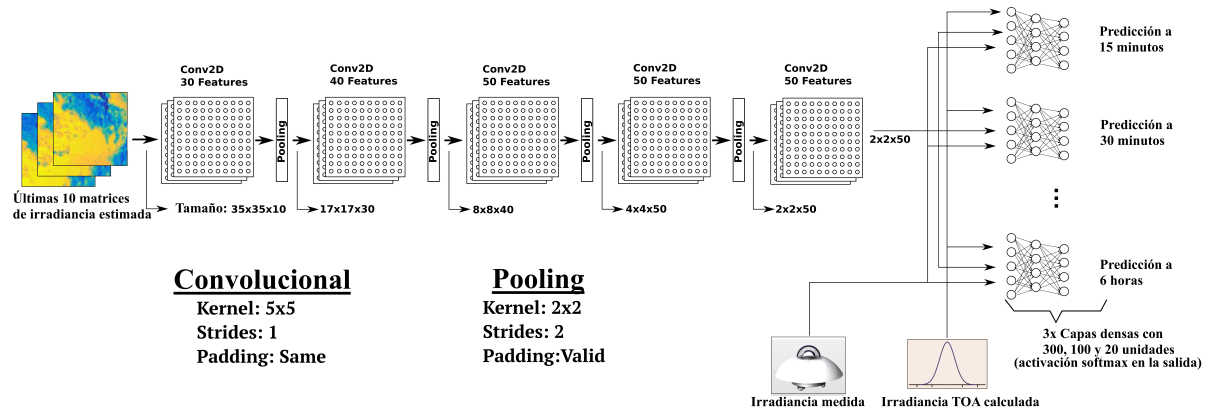


Figura 1: Arquitectura del modelo de Deep Learning con capas convolucionales para detectar el movimiento de las nubes y capas feed forward para hacer predicciones cada 15 minutos.

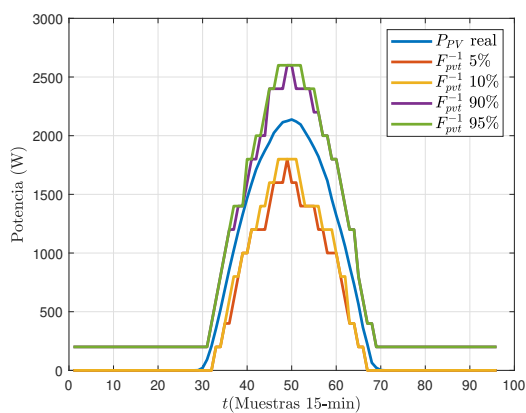


Figura 2: Producción FV real y predicciones probabilísticas para un día claro.

salida del sistema híbrido,  $P_o$ , como:

$$\min_{C, P_o} C \quad (1)$$

$$\text{sujeto } \forall t = 1 \dots N \text{ a:} \quad (2)$$

$$Pr \{E(t) \leq C\} > 1 - \epsilon \quad (3)$$

$$Pr \{E(t) \geq 0\} > 1 - \epsilon \quad (4)$$

$$Pr \{P_o(t) \geq P_{dem}(t)\} > 1 - \epsilon \quad (5)$$

$$E(t) = E(t-1) + T \cdot (P_{FV}(t) - P_o(t)) \quad (6)$$

donde  $N$  es el número de muestras en un día, 96 cuando se tienen medidas cada 15 minutos;  $Pr\{A\}$  representa la probabilidad del suceso  $A$ ;  $\epsilon$  es la tolerancia de la condición;  $C$  es la capacidad del sistema de almacenamiento;  $E(t)$  es la energía almacenada en el mismo en un instante  $t$ ;  $P_{FV}(t)$  es la potencia producida por los paneles;  $P_o$  es la potencia de salida del sistema híbrido y  $P_{dem}$  es la potencia demandada por el usuario de la instalación, que quiere garantizarse en todo momento.

La resolución del problema de optimización anterior, tal como está formulado, requeriría que el

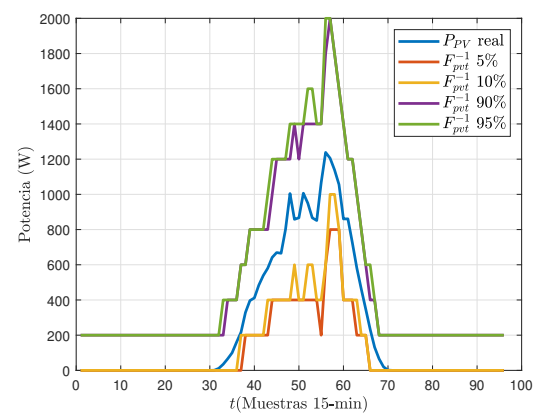


Figura 3: Producción FV real y predicciones probabilísticas para un día nublado.

sistema de almacenamiento fuera capaz de absorber toda la incertidumbre respecto a la producción FV, resultando tamaños de batería muy elevados. No obstante, pueden utilizarse ideas similares a las propuestas en [16] para el control del nivel de embalses. De este modo, puede hacerse uso del hecho de que, en el momento de ajustar la salida de potencia del sistema híbrido,  $P_o(t)$ , se tiene conocimiento de la producción FV en el instante anterior,  $P_{FV}(t-1)$ , lo que nos permite definir la potencia de salida como:

$$P_o(t) = P_{FV}(t-1) - h(t) \quad (7)$$

donde  $h(t)$  es una variable de holgura ajustable que determina la diferencia entre ambas potencias.

Substituyendo, se puede trabajar con la ecuación (6) para obtener la evolución de la energía almacenada en la batería. Tomando  $P_{FV}(-1) = 0$  y siendo  $E(0) = E_0$  la carga inicial de la batería,

supuesta conocida, se tiene:

$$\begin{aligned} E(0) &= E_0 \\ E(1) &= E_0 + T(P_{FV}(1) - P_0(1)) = \\ &= E_0 + T(P_{FV}(1) + h(1)) \\ E(2) &= E(1) + T(P_{FV}(2) - P_0(2)) = \\ &= E_0 + T(P_{FV}(1) + P_{FV}(2) + h(1) \\ &\quad - P_{FV}(1) + h(2)) = \\ &= E_0 + T(P_{FV}(2) + h(1) + h(2)) \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E(t) &= E_0 + TP_{FV}(t) + T \sum_{i=1}^t h(i) \\ &\vdots \\ E(N) &= E_0 + TP_{FV}(N) + T \sum_{i=1}^N h(i) \end{aligned}$$

Debe recordarse que, en el momento de resolver la optimización, la secuencia de producción FV futura  $P_{FV}(t)$  no se conoce de manera determinista, pero se tiene el modelo probabilístico descrito en la sección anterior. Con ello, podemos operar a partir de la ecuación (3):

$$Pr \left\{ P_{FV}(t) \leq \frac{C - E_0}{T} - \sum_{i=1}^t h(i) \right\} > 1 - \epsilon \quad (8)$$

Y, a partir de esta:

$$\frac{C - E_0}{T} - \sum_{i=1}^t h(i) > F_{P_{FVt}}^{-1}(1 - \epsilon) \quad (9)$$

donde  $F_{P_{FVt}}^{-1}$  es proporcionada por el susodicho modelo y representa la función de distribución acumulada inversa, o función cuantil, que es el mínimo valor  $x$  que garantiza que  $Pr\{P_{FV}(t) \leq x\} \geq 1 - \epsilon$ :

$$F_X^{-1}(y) = \inf_{x \in \mathbb{R}} \{F_X(x) \geq y\} \quad (10)$$

De esta forma, la restricción probabilística (3) ha pasado a formularse de manera determinista. Nótese cómo, cuanto menor es el tamaño de la batería  $C$ , más difícil es que la condición se cumpla. Del mismo modo, un valor elevado de  $h(t)$  se traduce en un valor bajo de  $P_o(t)$  y de la potencia con la que se descarga la batería, lo que dificulta garantizar que la batería no se llene.

En cuanto a la ecuación (4), se puede transformar en una ecuación determinista con un procedimiento similar, recordando que  $Pr\{X \leq x\} + Pr\{X \geq x\} = 1$ . De esta forma:

$$1 - Pr \left\{ P_{FV}(t) \leq \frac{-E_0}{T} + P_{red}(t) \right\} > 1 - \epsilon \quad (11)$$

O, lo que es lo mismo:

$$Pr \left\{ P_{FV}(t) \leq \frac{-E_0}{T} + P_{red}(t) \right\} < \epsilon \quad (12)$$

A partir de esta ecuación podemos aplicar de nuevo la función cuantil para obtener una restricción determinista:

$$\frac{-E_0}{T} + P_{red}(t) < F_{P_{FV}}^{-1}(\epsilon) \quad (13)$$

Análogamente, puede operarse a partir de la ecuación (5):

$$1 - Pr \{P_o(t) \leq P_{dem}(t)\} > 1 - \epsilon \quad (14)$$

$$Pr \{P_{FV}(t-1) \leq P_{dem}(t) + h(t)\} < \epsilon \quad (15)$$

$$h(t) < P_{dem}(t) + F_{P_{FV}}^{-1}(\epsilon) \quad (16)$$

Con todo ello, el problema de optimización (1) puede escribirse como:

$$\min_{C, P_o} C \quad (17)$$

$$\text{sueto } \forall t = 1 \dots N \text{ a:} \quad (18)$$

$$\frac{C - E_0}{T} - \sum_{i=1}^t h(i) > F_{P_{FVt}}^{-1}(1 - \epsilon) \quad (19)$$

$$\frac{-E_0}{T} + P_{red}(t) < F_{P_{FV}}^{-1}(\epsilon) \quad (20)$$

$$h(t) < P_{dem}(t) + F_{P_{FV}}^{-1}(\epsilon) \quad (21)$$

El problema (17) es un problema estándar de programación lineal (LP) para cuya resolución existen múltiples librerías gratuitas.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para analizar el funcionamiento del algoritmo propuesto, se plantea el estudio de un sistema híbrido de FV con almacenamiento para autoconsumo, en el que se quiere conseguir, con el nivel de confianza elegido, que la instalación sea capaz de cubrir en todo momento la demanda y verter los excedentes a la red, cuando estos existan. Se utilizarán datos de irradiancia reales, escalados para una instalación FV de 4 kW, obtenidos en una ubicación mediterránea (Castelló de la plana) durante 187 días (desde el 01/06/2019 hasta el 31/12/2019, excluyendo aquellos días con pérdida de datos por algún motivo). Estos datos no coinciden con los utilizados para entrenar el modelo descrito en la sección 2, y puede comprobarse que cubren todo tipo de días desde el punto de vista de la irradiancia (desde antes del solsticio de verano hasta después del solsticio de invierno).

En cuanto a la demanda de la instalación, se supondrá que esta se corresponde con un 80 % de la energía total que se prevé producir, en promedio,

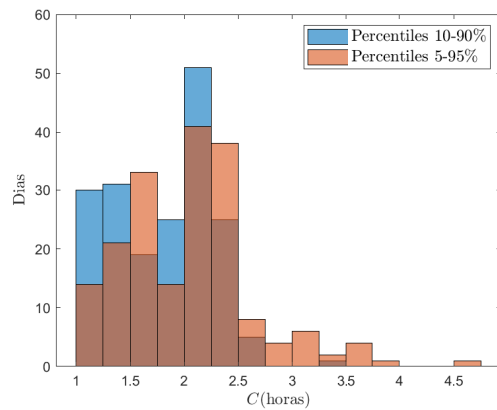


Figura 4: Distribución del tamaño de batería requerido para no saturar en los diferentes días.

mediante la instalación FV durante el día, pero el consumo se distribuirá de acuerdo a un perfil que se extiende a lo largo de las 24 horas. Dicho perfil es el promedio anual de los perfiles de referencia definidos por el Ministerio de Industria para el sector residencial [5], utilizado por las comercializadoras de energía en el Mercado Ibérico de la Electricidad para facturar a los consumidores que no disponen de contador electrónico con telemedida, y por lo tanto se supone que representan un promedio de tendencias. En concreto, se utilizan los perfiles de los clientes con discriminación horaria, que se supone que es el tipo de tarifa más adecuado para sistemas domésticos FV con almacenamiento.

Con todo ello, se lanza la optimización (17) considerando dos intervalos de percentiles diferentes, entre el 5 % y el 95 %, y entre el 10 % y el 90 %. obteniendo una capacidad diferente para cada uno de los 187 días. En la figura 4 se representa un histograma con los resultados de dichas optimizaciones. Puede comprobarse como, con los percentiles 5 %-95 %, para garantizar que todos los días se cumplan las restricciones impuestas, se necesita una batería de más de 4.5 horas de capacidad a potencia nominal de la instalación FV. No obstante, el tamaño queda determinado por un único día en toda la secuencia. Es más, son muy pocos días los que necesita una batería superior a las 3.5 horas de capacidad. Por otra parte, con los percentiles 10 %-90 %, sólo hay un día que requiere una batería de más de 3.25 horas, y todos los demás garantizan el cumplimiento de restricciones con baterías de 2.75 horas, o inferiores.

Las figuras 5 y 6 muestran, respectivamente la evolución de las potencias del sistema y el estado de carga (*state of charge*, SoC) de una batería de 14 kWh de tamaño (equivalente a 3.5h) para los días claro y nublado cuyos percentiles de predicción se muestran en las figuras 2 y 3, respectivamente.

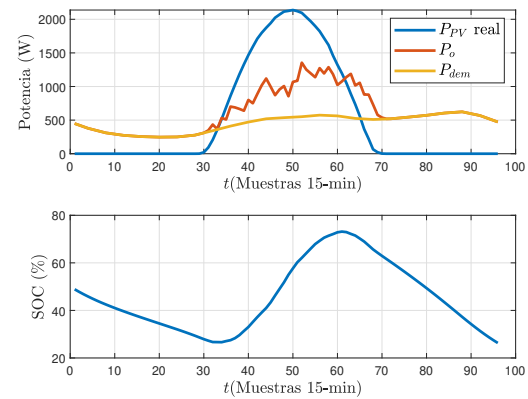


Figura 5: Evolución de potencias del sistema y SoC de la batería, día claro.

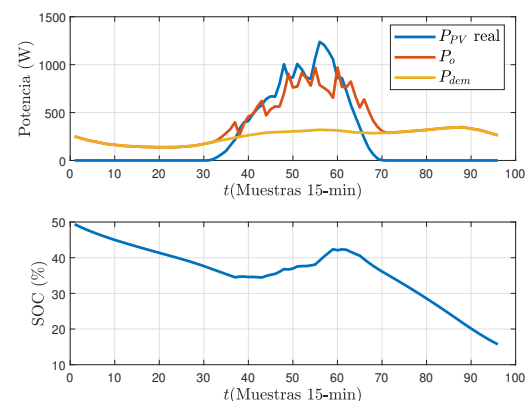


Figura 6: Evolución de potencias del sistema y SoC de la batería, día nublado.

Para ambos días puede comprobarse cómo la optimización decide que el sistema híbrido produzca, durante las horas nocturnas, la mínima potencia suficiente para satisfacer la demanda, a costa de que la batería se descargue. Durante el día, no obstante, el sistema vierte parte de la potencia a la red. Para ambos días puede observarse que, en los tramos en los que la potencia de salida  $P_o$  se aleja de la curva de demanda  $P_{dem}$ , tiene una forma con dientes de sierra. Esto se debe a que, continuamente, el sistema va ajustando la potencia de salida en función de la medida anterior de potencia FV producida, de acuerdo a la ecuación (7). En cuanto a la evolución del SoC, se comprueba que en ninguno de los dos días la batería está cerca de saturarse, por lo que el tamaño de la misma resulta suficiente. Este hecho es también razonable si se revisan las figuras 2 y 3, en las que puede verse como la producción FV real no se acerca a los extremos marcados por los percentiles sino que sigue una trayectoria bastante central. La saturación de la batería sólo se habría podido producir si la potencia FV hubiera excedido en algún punto dichos percentiles.



Tabla 2: Violación de restricciones para diferentes tamaños de batería.

$C$	Percent. 5 %-95 %	Percent. 10 %-90 %
1h	44.97 %	40.91 %
2h	6.73 %	5.31 %
2.5h	1.60 %	1.44 %
3h	0.98 %	1.33 %
3.5h	0.67 %	1.31 %

Los resultados obtenidos para los días anteriores, y algunos otros, hacen sospechar que probablemente el tamaño de batería calculado a partir de la optimización esté algo sobredimensionado durante una gran parte del tiempo de funcionamiento del sistema. Por esta razón, a continuación se calculará, para todos los días de la secuencia, la violación de restricciones que se produce para diferentes tamaños de batería, con los resultados obtenidos por las dos posibles optimizaciones con los percentiles 5 %-95 %, por un lado, y los percentiles 10 %-90 %, por el otro. De este modo, la tabla 2 muestra para qué porcentaje del total de muestras (187 días  $\times$  96 muestras/día) la batería está llena, o vacía, o la potencia de salida  $P_o$  no es superior a la demanda  $P_{dem}$ . Los resultados muestran como, para una batería con una capacidad inferior a las 2.5 horas a potencia nominal de la instalación FV, el nivel de violación de restricciones es probablemente demasiado elevado para ser aceptado. Este resultado es coherente con lo observado en el histograma 4.

Además, cuando la capacidad de la batería es suficiente, se comprueba que la violación de las restricciones es inferior cuando se utiliza la estrategia de control derivada de la optimización con los percentiles 5 %-95 % que con los percentiles 10 %-90 %. Esto es debido a que en el primer caso, la optimización considera condiciones más desfavorables que en el segundo. No obstante, para tamaños de batería inferiores esto no se cumple, porque aplicar el resultado de una optimización pensada con un tamaño de batería considerablemente superior lleva a un mayor grado de suboptimalidad.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha propuesto una metodología para dimensionar el sistema de almacenamiento de un sistema híbrido con FV para uso doméstico a partir de predicciones probabilísticas de la producción solar. Dicho dimensionamiento se realiza de modo tal que permita al usuario, con un cierto nivel de confianza, satisfacer un perfil de demanda tipo sin que se produzca la saturación del acumu-

lador de energía.

Los resultados de la optimización y de la simulación realizada a partir de datos reales de irradiancia para la ubicación objeto de estudio muestran que, a partir de tamaños del sistema superiores a 3 horas a potencia nominal de la instalación FV, el porcentaje de tiempo en el que se produce la violación de alguna de las restricciones es inferior al 1 % y que, para dichos tamaños, es más conveniente utilizar para la optimización predicciones basada en percentiles 5 %-95 % que 10 %-90 %.

En trabajos posteriores en esta línea, se pretende aplicar el modelo probabilístico desarrollado a sistemas fotovoltaicos de mayor tamaño con participación en diferentes mercados eléctricos y que, por lo tanto, deben obtener la secuencia óptima de potencias con una mayor antelación.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Universitat Jaume I de Castelló mediante su programa *Estudia e Investiga en la UJI* y a la Generalitat Valenciana y el Fondo Social Europeo por la ayuda concedida con código ACIF/2019/106 en su programa de *Subvenciones para la contratación de personal investigador de carácter predoctoral*.

## English summary SIZING OF ENERGY STORAGE SYSTEM FOR HIBRIDIZATION WITH PV BASED ON PROBABILISTIC FORECASTS OF IRRADIANCE

### Abstract

*In this work, a methodology is proposed to size the storage system of a hybrid photovoltaic (PV) system for domestic use, based on probabilistic predictions of solar production. To do so, a model based on Deep Learning is introduced which, based on estimates of past irradiance in the area surrounding the target location, obtains the forecasts of different percentiles of PV production. Sizing is carried out through a linear optimization that uses the quantile function to guarantee, with a certain level of confidence, that a typical demand profile is satisfied. Finally, results are introduced and discussed regarding the violation of constraints that occurs with different sizes of the storage system, showing that, when they are greater than 3 h at the nominal power of the PV installation, the constraints*

are satisfied in more than 99 % of the occasions.

**Keywords:** PV applications, energy storage systems, probabilistic forecasts, linear programming.

## Referencias

- [1] H. Beltran, J. Cardo-Miota, J. Segarra-Tamarit, and E. Pérez, "Battery size determination for photovoltaic capacity firming using deep learning irradiance forecasts," *Journal of Energy Storage*, vol. 33, p. 102036, 2021.
- [2] H. Beltran, I. Tomas Garcia, J. C. Alfonso-Gil, and E. Perez, "Levelized Cost of Storage for Li-Ion Batteries Used in PV Power Plants for Ramp-Rate Control," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 1, pp. 554–561, 2019.
- [3] O. Ciftci, M. Mehrtash, F. Safdarian, and A. Kargarian, "Chance-constrained microgrid energy management with flexibility constraints provided by battery storage," in *2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [4] K. Darcovich, E. R. Henquin, B. Kenney, I. J. Davidson, N. Saldanha, and I. Beausoleil-Morrison, "Higher-capacity lithium ion battery chemistries for improved residential energy storage with micro-cogeneration," *Applied Energy*, vol. 111, pp. 853–861, 2013.
- [5] Dirección General de Política Energética y Minas—Ministerio para la Transición Ecológica, "Resolución de 21 de diciembre de 2018, por la que se aprueba el perfil de consumo y el método de cálculo a efectos de liquidación de energía," *Boletín Oficial del Estado Español (BOE)*, p. 536–713, 2018.
- [6] S. Geng, M. Vrakopoulou, and I. A. Hiskens, "Chance-constrained optimal capacity design for a renewable-only islanded microgrid," *Electric Power Systems Research*, vol. 189, p. 106564, 2020.
- [7] W. Greuell, J. F. Meirink, and P. Wang, "Retrieval and validation of global, direct, and diffuse irradiance derived from SEVIRI satellite observations," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, no. 5, pp. 2340–2361, mar 2013.
- [8] Janet L. Sawin, Jay Rutovitz, Freyr Sverrisson, Hannah E. Murdock, and Rana Adib, "Renewables 2018, Global Status Report," Tech. Rep., 2018.
- [9] F. Katiraei and J. R. Agüero, "Solar PV Integration Challenges," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 9, no. 3, pp. 62–71, 2011.
- [10] X. Li, D. Hui, and X. Lai, "Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 464–473, 2013.
- [11] E. Pérez, J. Pérez, J. Segarra-Tamarit, and H. Beltran, "A deep learning model for intra-day forecasting of solar irradiance using satellite-based estimations in the vicinity of a pv power plant," *Solar Energy*, vol. 218, pp. 652–660, 2021.
- [12] O. Schmidt, S. Melchior, A. Hawkes, and I. Staffell, "Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies," *Joule*, vol. 3, no. 1, pp. 81–100, 2019.
- [13] J. Segarra-Tamarit, E. Perez, J. C. Alfonso-Gil, C. Arino, N. Aparicio, and H. Beltran, "Optimized management of a residential microgrid using a solar power estimation database," in *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2017, pp. 993–998.
- [14] F. R. Segundo Sevilla, D. Parra, N. Wyrsh, M. K. Patel, F. Kienzle, and P. Korba, "Techno-economic analysis of battery storage and curtailment in a distribution grid with high PV penetration," *Journal of Energy Storage*, vol. 17, pp. 73–83, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.02.001>
- [15] E. Vartiainen, G. Masson, C. Breyer, D. Moser, and E. Román Medina, "Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelised cost of electricity," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. n/a, no. n/a, p. pip.3189, aug 2019.
- [16] S. Vedula and P. Mujumdar, *Water resources systems: modelling techniques and analysis*. Tata McGraw-Hill, 2005.
- [17] C. Voyant, G. Notton, S. Kalogirou, M.-L. Nivet, C. Paoli, F. Motte, and A. Fouilloy, "Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review," *Renewable Energy*, vol. 105, pp. 569–582, may 2017.

- [18] A. Whiteman, J. Esparrago, S. Rueda, S. Elsayed, and I. Arkhipova, *Renewable Energy Capacity Statistics 2019*. Abu Dhabi: IRENA, 2019.
- [19] L. A. Wong, V. K. Ramachandaramurthy, S. L. Walker, P. Taylor, and M. J. Sanjari, “Optimal placement and sizing of battery energy storage system for losses reduction using whale optimization algorithm,” *Journal of Energy Storage*, vol. 26, no. August, p. 100892, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100892>
- [20] Y. Yang, S. Bremner, C. Menictas, and M. Kay, “Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review,” pp. 109–125, aug 2018.
- [21] Z. Yuan, W. Wang, H. Wang, and A. Yildizbasi, “A new methodology for optimal location and sizing of battery energy storage system in distribution networks for loss reduction,” *Journal of Energy Storage*, vol. 29, no. January, p. 101368, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101368>



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Estimación del estado de carga y coeficientes de difusión en baterías de flujo redox

Alejandro Clemente, Andreu Cecilia i Ramon Costa-Castelló

Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, CSIC-UPC, Llorens i Artigues 4-6, 08028 Barcelona  
alejandro.clemente.leon@upc.edu, andreu.cecilia@upc.edu, ramon.costa@upc.edu

## Resumen

*En este artículo se presenta el diseño de un observador de estado y parámetros para la estimación del estado de carga y algunos de los parámetros de difusión de una batería de flujo redox. El observador es de alta ganancia y se basa en un modelo dinámico no lineal, que utiliza un enfoque realista diferenciando entre las concentraciones totales de electrolito en las dos partes del sistema. Se muestra que el estado de carga se puede estimar mediante la medición del voltaje de celda y un observador de alta ganancia. No obstante, la precisión de la estimación se ve afectada por la incertidumbre en los coeficientes de difusión del sistema. Por esta razón, el observador se robustece mediante una estimación de parámetros adaptativos de inmersión e invariancia. Finalmente, los resultados se validan en una simulación numérica.*

**Palabras clave:** Batería de flujo redox, estado de carga, observador no lineal adaptativo.

## 1 INTRODUCCIÓN

Es conocido que el uso de la energía renovable ha crecido durante los últimos años y seguirá aumentando en el futuro. La Agencia Internacional de Energía (AIE) ha estimado que en los próximos cinco años la capacidad total de energía renovable se expandirá en un 50% [8], creciendo especialmente el número de plantas solares y eólicas. Uno de los principales inconvenientes de la energía renovable es su dependencia con las condiciones meteorológicas, dotándolas de un carácter intermitente, razón por la cual actualmente se trabaja en el desarrollo de almacenamiento de energía a gran escala como herramienta de apoyo. Es en este contexto, donde las baterías de flujo redox (BFR) se han convertido en una solución prometedora.

Una BFR es un sistema de almacenamiento de energía electroquímica que utiliza cuatro especies químicas divididas en dos subsistemas idénticos llamados anolito y catolito. Dispone de una celda electroquímica donde tienen lugar las reacciones redox durante un proceso de carga (corriente de

catolito a anolito) o de descarga (del anolito al catolito). Por otro lado, dispone de dos tanques donde se almacena la energía y que están conectados a la celda a través de tuberías, que permiten la circulación de electrolito mediante dos bombas. En la Figura 1 se representa un esquema general de una BFR.

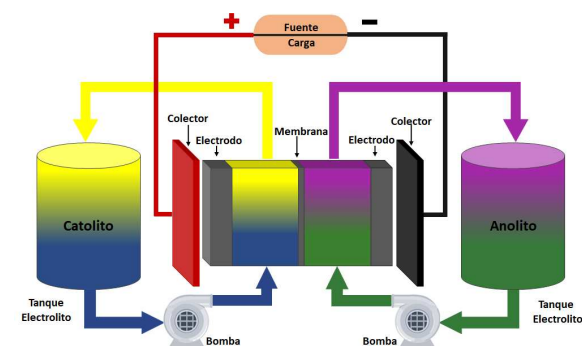


Figura 1: Esquema de una BFR con sus principales componentes.

Dado que la cantidad de energía almacenada es directamente proporcional al volumen de los tanques, las BFR son adecuadas para aplicaciones de energía a gran escala. Una de sus principales características es su modularidad entre la potencia y energía, la potencia se puede obtener mediante el diseño del stack en cuanto a medidas y número de celdas mientras que la energía viene exclusivamente determinada por el tamaño de los tanques. Como principal inconveniente, es que tienen una baja densidad energética, razón por la cual hace necesario disponer de grandes volúmenes de electrolito almacenado en tanques si se desea obtener una alta capacidad energética. No obstante, por su diseño flexible y otras características como son su larga duración o seguridad hacen de las BFR una buena elección como sistema de almacenamiento energético.

Entre los diferentes tipos de BFR, las baterías de flujo redox de vanadio (BFRV) se han convertido en la mejor opción debido al hecho de que todas las especies son óxidos de vanadio. De esta forma, no hay contaminación entre los dos electrolitos

aunque exista una difusión de iones a través de la membrana. Una BFRV está compuesta por especies de vanadio en cuatro estados de oxidación diferentes. El anolito está compuesto por las especies  $V^{2+}$  y  $V^{3+}$ , mientras que el catolito está compuesto por las especies  $V^{4+}$  y  $V^{5+}$ . Dentro del estudio y análisis de este tipo de sistemas, uno de los desafíos más importantes es la determinación del estado de carga (SOC) que permite cuantificar la cantidad de energía almacenada en el sistema, permitiendo analizar el correcto funcionamiento de la batería [7].

El SOC se puede monitorizar directamente conociendo la concentración de especies dentro de los tanques, existiendo en la literatura múltiples técnicas destinadas a la estimación de dichas concentraciones como por ejemplo mediante el análisis del color, densidad o conductividad [12]. Sin embargo, estas técnicas son demasiado lentas, intrusivas e inexactas para ser una opción válida para el control en tiempo real. Teniendo en cuenta la imposibilidad de obtener una medida adecuada del SOC, algunos estudios proponen un observador para estimar su valor.

La medida más comúnmente utilizada para estimar el SOC es el voltaje en circuito abierto (OCV) que es la diferencia de potencial entre el catolito y anolito de la celda. Skyllas-Kazacos, que fue pionera en el uso de las BFRV, desarrolló un Filtro de Kalman Extendido (EKF) para estimar el SOC midiendo el OCV y asumiendo que la concentración de especies de vanadio tanto en la celda como en los tanques es la misma [16]. Sin embargo, el EKF se basa en la linealización del modelo, lo que da como resultado una solución local del problema de estimación y puede presentar poca robustez en otros puntos. Por esta razón, algunos autores implementaron el uso de observadores no lineales, como es el caso del observador de modo deslizante (SMO) [15], siendo especialmente útil para tratar con modelos no lineales.

Otra preocupación en la estimación del SOC es la incertidumbre paramétrica, que deteriora la precisión del observador. En consecuencia, algunos autores han estudiado el uso de técnicas de estimación adaptativa para reducir su efecto [13]. Desafortunadamente, las técnicas adaptativas disponibles se implementan comúnmente a través de métodos recursivos de mínimos cuadrados, por lo que la convergencia de la estimación de estados y parámetros solo se puede demostrar mediante la condición de excitación persistente.

Con todo ello, este artículo presenta un observador no lineal de alta ganancia [5] que puede estimar el SOC de un BFRV, tratando directamente con un modelo electroquímico no lineal más realista, que

distingue entre los caudales de las dos partes del sistema, así como la concentración total de vanadio. Además, considera que no todos los coeficientes de difusión son conocidos, razón por la cual el observador está acoplado con un mecanismo de adaptación que estima los parámetros desconocidos [6]. La dinámica de adaptación se basa en ideas de inmersión e invariancia que permiten probar la convergencia de estados y parámetros aún en el caso de sistemas con relajada excitación persistente [1].

Este trabajo se ha organizado de la siguiente manera: La Sección 2 presenta el modelo no lineal así como las expresiones del OCV y del SOC. En la Sección 3, se presenta la formulación del problema. Un análisis de observabilidad es presentado en la sección 4. La sección 5 presenta el observador de alta ganancia diseñado. La sección 6 presenta la dinámica de adaptación de parámetros. Todo el estudio ha sido validado mediante simulación numérica en la Sección 7. Finalmente, la Sección 8 presenta las conclusiones del trabajo.

## 2 MODELO DINÁMICO DE LA BFRV

Un modelo electroquímico dinámico que ha sido ampliamente utilizado es el propuesto por Skyllas-Kazacos que presenta la evolución de la concentración de especies dentro de la celda y los tanques [14]. Usando este enfoque, se ha formulado un modelo no lineal para una BFRV que tiene en cuenta que los caudales,  $q$ , y la concentración total de vanadio,  $c_v$ , son diferentes para el anolito y el catolito. Esta formulación no lineal se puede expresar en términos de las especies de vanadio  $V^{2+}$  y  $V^{5+}$ :

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{2}{v_c} \left[ (x_3 - x_1)q_1 + \frac{I}{F} - k_2x_1 - 2k_5x_2 - k_4c_{v+} \right] \\ \dot{x}_2 &= \frac{2}{v_c} \left[ (x_4 - x_2)q_2 + \frac{I}{F} - k_3x_1 - k_5x_2 - k_3c_{v-} \right] \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{v_t}(x_1 - x_3)q_1 \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{v_t}(x_2 - x_4)q_2\end{aligned}\quad (1)$$

donde  $x_1$  es la concentración de  $V^{2+}$  en la celda del anolito,  $x_2$  es la concentración de  $V^{5+}$  en la celda de catolito,  $x_3$  es la concentración de  $V^{2+}$  en el tanque de anolito y  $x_4$  la concentración de  $V^{5+}$  en el tanque de catolito.  $q_1$  es el caudal en el anolito y  $q_2$  en el catolito,  $I$  es la corriente de carga o descarga,  $F$  es la constante de Faraday,  $k_i$  son los coeficientes de difusión de las especies de vanadio  $V^{i+}$ ,  $v_c$  es el volumen de la celda y  $v_t$  el volumen de cada tanque.

## 2.1 CÁLCULO DEL OCV

En este trabajo, la ecuación del OCV considera el efecto de la concentración de protones dentro de la celda [11], así como las pérdidas óhmicas, y puede ser computado mediante la siguiente expresión:

$$E = \frac{RT}{F} \ln \left[ \left( \frac{x_2 \cdot (c_{H^+}(0) + x_2)^2}{c_{v-} - x_2} \right) \left( \frac{x_1}{c_{v+} - x_1} \right) \right] + E^\theta + rI \quad (2)$$

donde  $E$  representa el voltaje de la celda OCV,  $E^\theta$  es el potencial estándar del electrodo,  $R$  es la constante del gas,  $T$  es la temperatura de la celda,  $c_{H^+}(0)$  es la concentración inicial de protones,  $c_{v+}$  es la concentración total de vanadio en el catolito,  $c_{v-}$  en el anolito y  $r$  es la resistencia óhmica.

## 2.2 CÁLCULO DEL SOC

Para calcular el SOC, en este trabajo se propone hacer una distinción entre la concentración de vanadio en el catolito y en el anolito, teniendo dos definiciones distintas:

$$SOC_- = \frac{x_3}{c_{v-}}, \quad SOC_+ = \frac{x_4}{c_{v+}}.$$

Ambas definiciones se combinan para presentar una definición única del SOC del sistema completo, correspondiente al mínimo SOC de las dos partes:

$$SOC = \min\{SOC_-, SOC_+\}. \quad (3)$$

## 3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA EN EL ESPACIO DE ESTADOS

El objetivo es diseñar un observador que usando el voltaje de celda medido pueda estimar el valor de los estados  $x_3$  y  $x_4$ , necesarios para la estimación del ECD mediante (3).

Para facilitar el diseño del observador, y sabiendo que la corriente y la temperatura se pueden medir fácilmente, es posible obtener una expresión más simplificada para trabajar. Suponiendo que  $E^\theta$  y  $r$  son constantes, se pueden restar del voltaje de la celda para obtener una expresión  $h(\mathbf{x})$  que solo depende de las concentraciones de la celda  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $c_{H^+}(0)$  y la concentración total de vanadio  $c_{v-}$  y  $c_{v+}$ :

$$h(\mathbf{x}) = \frac{E - E^\theta - rI}{RT/F} = \ln \left[ \left( \frac{x_2 \cdot (c_{H^+}(0) + x_2)^2}{c_{v-} - x_2} \right) \left( \frac{x_1}{c_{v+} - x_1} \right) \right]. \quad (4)$$

Teniendo en cuenta esta nueva expresión, es posible formular el sistema no lineal completo en el espacio de estados:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + q_1\mathbf{H}_1\mathbf{x} + q_2\mathbf{H}_2\mathbf{x} + \mathbf{c}I + \mathbf{d} \quad (5)$$

$$y = h(\mathbf{x})$$

donde  $\mathbf{x}$  son las concentraciones de especies de vanadio, y las matrices y vectores  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{H}_1$ ,  $\mathbf{H}_2$ ,  $\mathbf{c}$  and  $\mathbf{d}$  tienen los siguientes valores:

$$\mathbf{A} = \frac{2}{v_c} \begin{bmatrix} -k_2 & -2k_5 & 0 & 0 \\ -k_3 & -k_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{2}{v_c} & 0 & \frac{2}{v_c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{v_t} & 0 & -\frac{1}{v_t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2}{v_c} & 0 & \frac{2}{v_c} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{v_t} & 0 & -\frac{1}{v_t} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{c} = \frac{2}{v_c} \begin{bmatrix} 1/F \\ 1/F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{d} = \frac{2}{v_c} \begin{bmatrix} -k_4c_{v+} \\ -k_3c_{v-} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

La identificación de los coeficientes de difusión sigue siendo un problema abierto e introducirá una incertidumbre significativa en la estimación del SOC, razón por la cual se robustecerá la estimación al acoplar al observador una dinámica de adaptación de parámetros.

## 4 ANÁLISIS DE OBSERVABILIDAD

El primer análisis que se debe realizar es la observabilidad del sistema presentado. Esto permite saber si los estados del sistema se pueden estimar a partir de la salida  $y$ .

En control, un sistema se considera (localmente) observable si satisface la condición de rango de observabilidad, lo que implica que el rango de un espacio de observabilidad  $O_s$  debe ser igual al número de estados  $n$  [4].

Para un sistema no lineal como el presentado para la BFRV, la condición de observabilidad se puede realizar de forma simple y automática calculando la codistribución de observabilidad  $\Omega$ . Para el caso



de estudio, la codistribución de observabilidad de orden 4 ( $\Omega_4$ ) se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\Omega_4 = & \text{span}\{\nabla h\} \oplus \text{span}\{\nabla L_{A\mathbf{x}+q_1\mathbf{H}_1\mathbf{x}+q_2\mathbf{H}_2\mathbf{x}}h(\mathbf{x})\} \\ & \oplus \text{span}\{\nabla L_{A\mathbf{x}+q_1\mathbf{H}_1\mathbf{x}+q_2\mathbf{H}_2\mathbf{x}}^2h\} \\ & \oplus \text{span}\{\nabla L_{A\mathbf{x}+q_1\mathbf{H}_1\mathbf{x}+q_2\mathbf{H}_2\mathbf{x}}^3h\}\end{aligned}$$

donde  $\text{span}$  es el espacio generado,  $\oplus$  es el operador de suma directa y  $L^i$  es la función derivada de Lie que se puede calcular como:

$$\begin{aligned}L_{f(\mathbf{x})+g(\mathbf{x})}^1h &= \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \cdot (f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})) \\ L_{f(\mathbf{x})+g(\mathbf{x})}^k h &= \frac{\partial L^{k-1}h}{\partial \mathbf{x}} \cdot (f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})).\end{aligned}$$

Llevando a cabo el análisis para el sistema formulado en (5) se puede demostrar que el rango de la codistribución de observabilidad  $\Omega_4$  es máximo, por lo que el sistema es observable y las concentraciones se pueden estimar mediendo el voltaje de celda.

## 5 DISEÑO DEL OBSERVADOR

Una vez analizada la observabilidad del sistema, el siguiente paso corresponde al diseño de un observador apropiado capaz de estimar los estados  $x_3$  y  $x_4$ , que son los estados que determinan el SOC del sistema, y no aparecen implícitos en la expresión del OCV medido.

El procedimiento para diseñar el observador ha sido: primero, transformar el sistema a una forma canónica controlable, que acepta el diseño de un observador no lineal, y luego, invertir la transformación para recuperar la estimación en las coordenadas originales. En particular, se ha considerado el siguiente mapa:

$$\Phi(\mathbf{x}, q_1, q_2) \triangleq \begin{bmatrix} h(\mathbf{x}) \\ L_{A\mathbf{x}+q_1\mathbf{H}_1\mathbf{x}+q_2\mathbf{H}_2\mathbf{x}}h(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ L_{A\mathbf{x}+q_1\mathbf{H}_1\mathbf{x}+q_2\mathbf{H}_2\mathbf{x}}^3h(\mathbf{x}) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Por medio de los resultados de observabilidad en la Sección 4, el mapa en (6) define un difeomorfismo entre las variables originales en el sistema en cuestión y las nuevas en la forma de retroalimentación estricta [3].

En consecuencia, es posible formular un observador de alta ganancia de la siguiente manera [2]:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{x}}} &= \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}} + q_1\mathbf{H}_1\hat{\mathbf{x}} + q_2\mathbf{H}_2\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{c}I + d \\ &+ \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{x}}\right)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1}{\epsilon}, & \frac{\alpha_2}{\epsilon^2}, & \frac{\alpha_3}{\epsilon^3}, & \frac{\alpha_4}{\epsilon^4} \end{bmatrix}^\top (y - h(\hat{\mathbf{x}}))\end{aligned} \quad (7)$$

donde  $\alpha_i$  y  $\epsilon$  son los parámetros del observador a diseñar y  $\hat{\mathbf{A}}$  es la matriz  $\mathbf{A}$  con los valores estimados de los parámetros desconocidos.

**Lema 5.1** [10] *Considere el observador de alta ganancia (7) con los parámetros  $\alpha_i$  sintonizados de manera que el polinomio:*

$$s^4 + \alpha_1 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_3 s + \alpha_4 \quad (8)$$

*sea Hurwitz, con todas las raíces en el semiplano izquierdo. Entonces, hay una constante positiva  $\epsilon^*$ , tal que, para todo  $\epsilon \leq \min\{\epsilon^*, 1\}$ , el error de estimación del observador (7) se limita en última instancia de la siguiente manera*

$$\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\| \leq \kappa_1 \|\mathbf{K} - \hat{\mathbf{K}}\|, \quad (9)$$

donde  $\kappa_1$  está formada por constantes positivas y  $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_2 \\ k_5 \end{bmatrix}$ .

**Observación 5.1** *Para diseñar el  $\epsilon$  es importante tener en cuenta sus propiedades. Por un lado, los valores pequeños de  $\epsilon$  aseguran una convergencia rápida y robusta del observador. Por otro lado, valores demasiado pequeños inducirán el fenómeno de pico y agravarán la sensibilidad al ruido del observador [10]. Teniendo en cuenta estas cuestiones, es importante diseñar correctamente el valor de  $\epsilon$  para evitar estos fenómenos, al tiempo que se obtiene una estimación correcta.*

## 6 DISEÑO DEL ESTIMADOR DE PARÁMETROS

En este trabajo, para facilitar el estudio, se ha considerado que solo se desconocen los coeficientes de difusión  $k_2$  y  $k_5$ . Se puede observar que dichos parámetros aparecen en la primera derivada de la función de salida (4). Por lo tanto, los parámetros desconocidos aparecen en el mapa de observabilidad considerado (6). En consecuencia, el observador siempre presentará un sesgo que no podrá reducirse aumentando su ganancia.

Teniendo en cuenta este problema, se propone acoplar al observador con un algoritmo de estimación de parámetros. Con este enfoque, una técnica común es estimar los parámetros del modelo a través de una dinámica de adaptación similar al descenso de gradientes. Esta estrategia permite un desacople entre los estados y la estimación de parámetros, mediante la cancelación de los parámetros desconocidos de la función de Lyapunov [17]. Sin embargo, la convergencia de los parámetros sólo puede demostrarse bajo la condición de persistente excitación la cual es muy restrictiva [17]. Como las BFRV normalmente

operan alrededor de un punto de equilibrio, la condición de excitación persistente no se cumplirá genéricamente. En consecuencia, las técnicas similares al descenso de gradientes no pueden garantizar la convergencia de los parámetros.

Estos problemas pueden solucionarse mediante un método de estimación de parámetros basado en la técnica de Inmersión e Invariancia (I&I) [1]. Este enfoque se basa en el diseño de una variedad invariante y atractiva que se puede utilizar para estimar los parámetros.

**Lema 6.1** Considere la siguiente dinámica de estimación de parámetros:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\theta}} &= -\frac{\partial \beta(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \mathbf{x}} \left[ f(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) + \varphi(\hat{\mathbf{x}}) \left( \hat{\theta} + \beta(\hat{\mathbf{x}}) \right) \right] \\ \dot{\hat{\mathbf{K}}} &= \hat{\theta} + \beta(\hat{\mathbf{x}}),\end{aligned}\quad (10)$$

donde  $f(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u})$ ,  $\varphi(\hat{\mathbf{x}})$  y  $\beta(\hat{\mathbf{x}})$  son los vectores de funciones

$$\begin{aligned}f(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) &= \begin{bmatrix} \frac{2}{v_c} [(\hat{x}_3 - \hat{x}_1)q_1 + \frac{I}{F} - k_4 \hat{x}_2] \\ \frac{2}{v_c} [(\hat{x}_4 - \hat{x}_2)q_2 + \frac{I}{F} - k_3 \hat{x}_1 - k_3 c_{v-}] \end{bmatrix} \\ \varphi(\hat{\mathbf{x}}) &= \begin{bmatrix} -\hat{x}_1 & -2c_{v+} \\ 0 & -\hat{x}_2 \end{bmatrix} \\ \beta(\hat{\mathbf{x}}) &= \frac{\gamma}{2} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \hat{x}_1^2 \\ -\frac{1}{2} \hat{x}_2^2 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (11)$$

siendo  $\gamma$  una constante positiva de diseño.

Entonces, el error del estimador de parámetros convergirá hacia:

$$\|\mathbf{K} - \hat{\mathbf{K}}\| \leq \kappa_2 \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\| \quad (12)$$

siendo  $\hat{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \hat{k}_2 \\ \hat{k}_5 \end{bmatrix}$  y  $\kappa_2$  una constante positiva.

**Demostración 6.1** Considerando (11) se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \beta(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \mathbf{x}} \varphi(\hat{\mathbf{x}}) = \gamma \begin{bmatrix} \frac{\hat{x}_1^2}{2} & \hat{x}_1 c_{v+} \\ 0 & \frac{\hat{x}_2^2}{2} \end{bmatrix},$$

que tiene valores singulares positivos.

Definiendo el siguiente variante  $\mathbf{z}$ :

$$\mathbf{z} \triangleq \hat{\theta} - \mathbf{K} + \beta(\mathbf{x}). \quad (13)$$

su dinámica  $\mathbf{z}$  viene dada por:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{z}} &= -\frac{\partial \beta(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \varphi(\mathbf{x}) \mathbf{z} + \delta \\ &= -\gamma \begin{bmatrix} \frac{x_1^2}{2} & x_1 c_{v+} \\ 0 & \frac{x_2^2}{2} \end{bmatrix} \mathbf{z} + \delta\end{aligned}\quad (14)$$

donde  $\delta$  se define como:

$$\begin{aligned}\delta &\triangleq \frac{\partial \beta(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \left[ f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \varphi(\mathbf{x}) \left( \hat{\theta} + \beta(\mathbf{x}) \right) \right] \\ &\quad - \frac{\partial \beta(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \mathbf{x}} \left[ f(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) + \varphi(\hat{\mathbf{x}}) \left( \hat{\theta} + \beta(\hat{\mathbf{x}}) \right) \right].\end{aligned}\quad (15)$$

Como las funciones  $\beta$ ,  $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  and  $\varphi(\mathbf{x})$  son (localmente) Lipschitz y el factor  $\frac{\partial \beta(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$  tiene un límite superior, es posible encontrar una constante positiva  $L_\delta$  tal que:

$$\|\delta\| \leq L_\delta \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|. \quad (16)$$

Si se considera la siguiente función de Lyapunov como candidata

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{z}^\top \mathbf{z},$$

su derivada es

$$\dot{V} = -\gamma \mathbf{z}^\top \begin{bmatrix} \frac{x_1^2}{2} & x_1 c_{v+} \\ 0 & \frac{x_2^2}{2} \end{bmatrix} \mathbf{z} + \mathbf{z}^\top \delta,$$

y considerando que  $\delta$  está limitada (16) se cumple la siguiente inecuación:

$$\dot{V} \leq -\gamma \mathbf{z}^\top \begin{bmatrix} \frac{x_1^2}{2} & x_1 c_{v+} \\ 0 & \frac{x_2^2}{2} \end{bmatrix} \mathbf{z} + \mathbf{z}^\top L_\delta \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|. \quad (17)$$

Como la matriz no es  $L_2$  integrable en toda la región operativa, es posible demostrar que hay una constante positiva  $\kappa_3$  tal que la variable fuera de la variedad está delimitada en última instancia como

$$\|\mathbf{z}\| \leq \kappa_3 \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|. \quad (18)$$

Finalmente, considerando la estimación del parámetro (10), la definición de coordenadas fuera de la variedad (13) y el hecho de que  $\beta(\mathbf{x})$  es Lipschitz, el límite (12) se puede deducir.

## 6.1 ESTABILIDAD DEL OBSERVADOR

Es importante seleccionar adecuadamente las condiciones en las que el acoplamiento entre el observador de estados y el estimador de parámetros crea una estructura estable.

Se ha demostrado que el error de estimación de estados converge a un valor que depende del error de estimación de parámetros, ver (9). Además, se cumple una propiedad similar para el error de estimación de parámetros, considerando el error de estimación de estado como una entrada, ver (12).

**Lema 6.2** El acoplamiento entre el observador de alta ganancia (7) y la dinámica de adaptación (10) es estable si se cumple lo siguiente:

$$\kappa_1 \kappa_2 \leq 1. \quad (19)$$

**Demostración 6.2** Esta afirmación se puede demostrar mediante el teorema de la ganancia pequeña [9].

## 7 SIMULACIÓN NUMÉRICA

Para validar el observador del SOC propuesto, se ha realizado una simulación numérica. Los parámetros de la batería se resumen en la Tabla 1. Tomando estos parámetros, los cuales en una aplicación real son fáciles de medir o obtener su valor, solo es necesario introducir la corriente y los caudales que actúan como entradas.

Respecto a la corriente, se ha seleccionado un proceso de carga con un valor constante de 1.8 A. Para el caso de los caudales  $q_1$  y  $q_2$ , se ha considerado diferente, teniendo en cuenta que en la práctica nunca serán exactamente iguales. Se ha considerado un caudal de 100 ml/min en la parte del catolito y de 110 ml/min en el anolito.

Variable	Valor [unidad]
$v_c$	1 [ml]
$v_t$	45 [ml]
$c_{v-}$	0.35 [mol · l <sup>-1</sup> ]
$c_{v+}$	0.4 [mol · l <sup>-1</sup> ]
$c_{H+}(0)$	1.6 [mol · l <sup>-1</sup> ]
$E^\theta$	1.267 [V]
$r$	1.33 [Ω]
$R$	8.311 [J · mol <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]
$T$	297 [K]
$F$	96.485 [s · A · mol <sup>-1</sup> ]

Además, la estimación de concentraciones se ha inicializado en un punto factible considerando que la batería está prácticamente descargada, presentando un error relativo inicial del 50%. Como se supone que los coeficientes de difusión son desconocidos, sus valores estimados iniciales se han establecido en cero. En el sistema real, los valores se han fijado en  $k_2 = 4.5 \cdot 10^{-11}$  y  $k_5 = 1.65 \cdot 10^{-11}$ .

En cuanto al ajuste del parámetro del observador, se han seleccionado los valores de  $\alpha$  haciendo Hurwitz el polinomio presentado en (8). Para el caso de la constante  $\epsilon$ , se ha diseñado para garantizar un equilibrio entre el rechazo de perturbaciones y la sensibilidad al ruido. Por otro lado, para el estimador de coeficientes de difusión, el parámetro  $\gamma$  se ha ajustado para presentar una tasa de convergencia de parámetros adecuada mientras se conserva la condición (19). Todos los valores del diseño del observador se resumen en la Tabla 2.

Para analizar la robustez del diseño en relación con el ruido del sensor, se ha realizado una simu-

Tabla 2: Parámetros del observador

Variable	Value
$\alpha_1$	$4 \cdot 10^{-4}$
$\alpha_2$	$5.81 \cdot 10^{-8}$
$\alpha_3$	$3.59 \cdot 10^{-12}$
$\alpha_4$	$7.8 \cdot 10^{-17}$
$\epsilon$	0.5
$\gamma$	$1 \cdot 10^{-7}$

lación de 800 segundos introduciendo un ruido de alta frecuencia de variación 0,001 con respecto a la medida de voltaje, que es un valor razonable para un sensor de voltaje.

Las simulaciones obtenidas muestran el correcto funcionamiento del acoplamiento entre el observador de estado y el observador de estimación de parámetros, obteniendo una estimación correcta tanto del SOC como de los parámetros de difusión. Para el caso del ECD, en la Figura 2 se muestra cómo se reduce el error de un 43% presentado en la inicialización hasta un 0.0082% visualizado al final de la simulación.

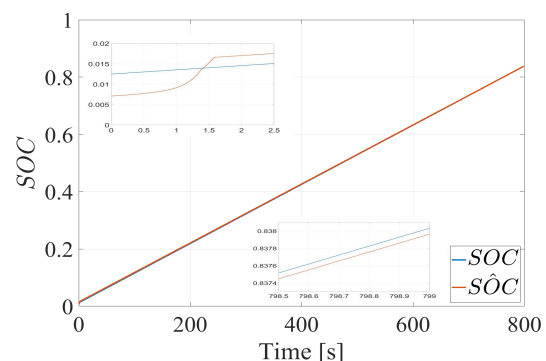


Figura 2: Estimación del SOC (rojo) y su valor real (azul).

Se puede ver cómo el SOC aumenta al tratarse de un proceso de carga. Además, la evolución de las concentraciones de especies  $x_1$  y  $x_2$  presentan un comportamiento similar como se puede observar en la Figura 3.

Para los resultados del coeficiente de difusión, la Figura 4 muestra la estimación de los coeficientes  $k_2$  y  $k_5$ , obteniendo que están correctamente ajustados a los reales. Para el caso de la estimación  $k_2$ , el error presentado es de 0,13%, mientras que para la estimación de  $k_5$  su valor no supera el 0,5%. En detalle, se puede observar cómo la estimación  $k_5$  presenta un sesgo. Este sesgo se debe a la introducción de ruido en la salida de voltaje, lo que impide la convergencia exacta del parámetro.

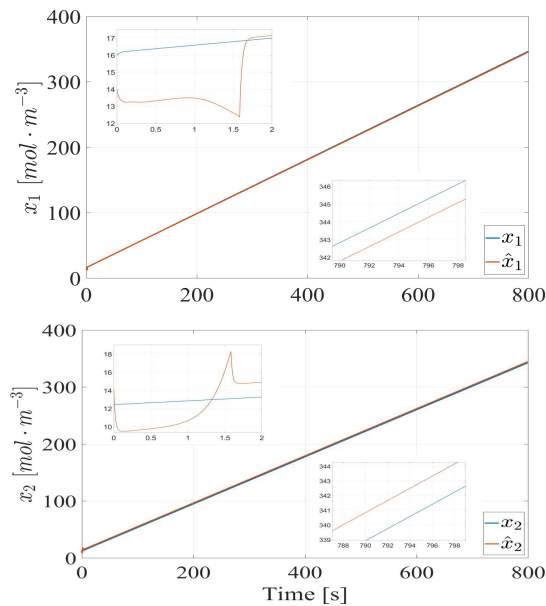


Figura 3: Estimación de estados (rojos) y valores reales (azul).

## 8 CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado un observador no lineal para estimar correctamente los estados de un VRFB suponiendo diferencias, en términos de caudales y especies de vanadio total, entre el catolito y el anolito. Por esa razón, se ha podido estimar por separado los dos SOC presentados en el sistema. Además, se ha realizado una estimación en línea de los parámetros de difusión utilizando un observador de alta ganancia  $I\&I$ . Los resultados se han validado en una simulación numérica en la que se considera un ruido de sensor significativo.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el CSIC bajo el proyecto PTI FLOWBAT 2021 (ref.642 201980E101), el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad bajo el Proyecto DOVE-LAR (ref.RTI2018-096001-B-C32), y bajo la Agencia Estatal de Investigación mediante la unidad de María de Maeztu Seal of Excellence to IRI (MDM-2016-0656).

### English summary

### Estimation of the state of charge and diffusion coefficients in redox flow batteries

### Abstract

This paper presents an observer for the estimation of the state of charge of redox flow batter-

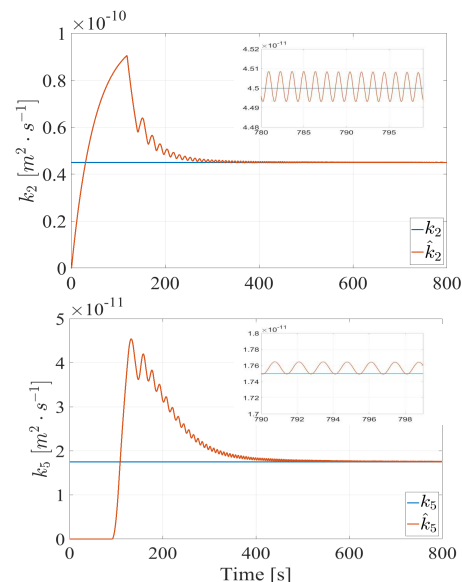


Figura 4: Estimación de los coeficientes de difusión.

ies. The observer is high gain and is based on a non-linear dynamic model, which uses a realistic approach differentiating between the total electrolyte concentrations in the two parts of the system. It is shown that the state of charge can be estimated by measuring cell voltage and a high gain observer. However, the precision of the estimate is affected by the uncertainty in the diffusion coefficients of the system. For this reason, the observer is strengthened by estimating adaptive parameters of immersion and invariance. Finally, the results are validated in a numerical simulation.

**Keywords:** Redox flow battery, state of charge, non-linear adaptive observer.

## Referencias

- [1] Astolfi, A., Ortega, R.: Immersion and invariance: a new tool for stabilization and adaptive control of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* **48**(4), 590–606 (2003), doi:10.1109/TAC.2003.809820
- [2] Astolfi, D., Praly, L.: Output feedback stabilization for siso nonlinear systems with an observer in the original coordinates. In: 52nd IEEE Conference on Decision and Control. pp. 5927–5932 (2013), doi:10.1109/CDC.2013.6760824
- [3] Bernard, P., Praly, L., Andrieu, V., Hammouri, H.: On the triangular canonical

- form for uniformly observable controlled systems. *Automatica* **85**, 293 – 300 (2017), doi:10.1016/j.automatica.2017.07.034
- [4] Besançon, G.: Nonlinear observers and applications, vol. 363. Springer (2007)
- [5] Cecilia, A., Costa-Castelló, R.: Observador de alta ganancia con zona muerta ajustable para estimar la saturación de agua líquida en pilas de combustible tipo pem. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* **17**(2), 169–180 (2020), doi:10.4995/riai.2020.12689
- [6] Cecilia, A., Serra, M., Costa-Castelló, R.: Pemfc state and parameter estimation through a high-gain based adaptive observer. 21st IFAC World Congress (07 2020)
- [7] Clemente, A., Costa-Castelló, R.: Redox flow batteries: A literature review oriented to automatic control. *Energies* **13**, 4514 (09 2020), doi:10.3390/en13174514
- [8] IEA: Renewables 2019-paris. In: IEEE (2019), <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>
- [9] Jiang, Z.P., Teel, A.R., Praly, L.: Small-gain theorem for iss systems and applications. *Mathematics of Control, Signals and Systems* **7**(2), 95–120 (1994)
- [10] Khalil, H.K., Praly, L.: High-gain observers in nonlinear feedback control. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* **24**(6), 993–1015 (2014), doi:10.1002/rnc.3051
- [11] Knehr, K., Kumbur, E.: Open circuit voltage of vanadium redox flow batteries: Discrepancy between models and experiments. *Electrochemistry Communications* **13**(4), 342 – 345 (2011), doi:10.1016/j.elecom.2011.01.020
- [12] Skyllas-Kazacos, M., Kazacos, M.: State of charge monitoring methods for vanadium redox flow battery control. *Journal of Power Sources* **196**(20), 8822 – 8827 (2011), doi:10.1016/j.jpowsour.2011.06.080
- [13] Wei, Z., Tseng, K.J., Wai, N., Lim, T.M., Skyllas-Kazacos, M.: Adaptive estimation of state of charge and capacity with online identified battery model for vanadium redox flow battery. *Journal of Power Sources* **332**, 389 – 398 (2016), doi:10.1016/j.jpowsour.2016.09.123
- [14] Wei, Z., Xiong, R., Lim, T.M., Meng, S., Skyllas-Kazacos, M.: Online monitoring of state of charge and capacity loss for vanadium redox flow battery based on autoregressive exogenous modeling. *Journal of Power Sources* **402**, 252 – 262 (2018), doi:10.1016/j.jpowsour.2018.09.028
- [15] Xiong, B., Zhang, H., Deng, X., Tang, J.: State of charge estimation based on sliding mode observer for vanadium redox flow battery. In: 2017 IEEE Power Energy Society General Meeting. pp. 1–5 (2017), doi:10.1109/PESGM.2017.8274042
- [16] Xiong, B., Zhao, J., Wei, Z., Skyllas-Kazacos, M.: Extended kalman filter method for state of charge estimation of vanadium redox flow battery using thermal-dependent electrical model. *Journal of Power Sources* **262**, 50 – 61 (2014), doi:10.1016/j.jpowsour.2014.03.110
- [17] Young Man Cho, Rajamani, R.: A systematic approach to adaptive observer synthesis for nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* **42**(4), 534–537 (1997), doi:10.1109/9.566664



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Control no lineal adaptativo con identificación dispersa

Roger Domingo-Enrich  
roger.domingo.enrich@estudiantat.upc.edu

Andreu Cecilia\*  
andreu.cecilia@upc.edu

Ramon Costa Castelló\*  
ramon.costa@upc.edu

\*Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, CSIC-UPC, Llorens i Artigas 4-6, 08028 Barcelona, Spain

## Resumen

*En este trabajo se propone un controlador con estimación de parámetros enfocada a sistemas no lineales, desconocidos y cambiantes en el tiempo. Se presenta un algoritmo de aprendizaje en línea para estimar las ecuaciones del sistema y un controlador que usa esta información para estabilizar la planta. Para ello, se han combinado un observador no lineal y un estimador de parámetros con técnicas de optimización dispersa. En el algoritmo hay dos fases diferenciadas: la fase de aprendizaje, donde se aprenden en línea las funciones desconocidas, y la fase de ejecución, donde se controla la planta con unos objetivos preestablecidos. El algoritmo propuesto es capaz de decidir de forma autónoma en qué fase se encuentra, mediante una métrica de aprendizaje. Este algoritmo se ha validado por simulación numérica en una planta roto-magnet.*

**Palabras clave:** Observador de alta ganancia extendido, estimación de parámetros dispersa, métrica de aprendizaje.

## 1. Introducción

Actualmente, más del 90 % de los controladores de la industria son del tipo PID [1]. Su popularidad es resultado de su simplicidad, funcionalidad clara y aplicabilidad. Sin embargo, encuestas recientes [2] muestran que las prestaciones de esta tecnología no son suficientes para atajar los problemas o las tendencias actuales y es necesario desarrollar nuevos algoritmos que sustituyan o mejoren el PID.

Una de las limitaciones del PID es su dificultad de sintonía en presencia de no linealidades. En la práctica, los factores no lineales se consideran como perturbaciones a dominar por el controlador. Esta estrategia conlleva diseñar controladores demasiado conservadores con bajas prestaciones durante el transitorio. Actualmente, este hecho no es un factor limitante, ya que la mayoría de controladores tienen como objetivo mantener una salida cerca de un punto de equilibrio. En este contex-

to, las no linealidades tienen un peso muy bajo en la dinámica del sistema y el PID es una opción más que suficiente. Sin embargo, cada vez se requiere de algoritmos que sean capaces de seguir trayectorias complejas y operar lejos del punto de equilibrio del sistema. Es en esta situación donde la linealidad del PID limita las prestaciones del sistema y es necesario desarrollar algoritmos que trabajen con sistemas no lineales.

El control de sistemas no lineales es un campo que se lleva estudiando desde hace décadas [3]. Pese a los numerosos resultados de aplicaciones prácticas, existen diversos factores que limitan su aplicación directa en la industria. Primero, muchos algoritmos asumen un conocimiento exacto de todos los estados del sistema [4]. Este supuesto no es realista, ya que en la práctica sólo se dispone de la información de unos pocos sensores. Segundo, muchos algoritmos suponen un conocimiento exacto del modelo del sistema [5]. Este supuesto incrementa el coste económico del controlador, ya que requiere una identificación previa del sistema.

Este trabajo presenta un algoritmo de control de sistemas no lineales que pretende relajar las restricciones mencionadas. En primer lugar, el algoritmo incorpora un observador que estima los estados del sistema y la incertidumbre del modelo. En teoría, este elemento soluciona las limitaciones aludidas del control no lineal. Sin embargo, se muestra que el observador ofrece bajas prestaciones en presencia de mucha incertidumbre.

Por eso, en segundo lugar, se complementa el observador con un algoritmo que estima el modelo matemático del sistema en línea. Este paso se realiza comúnmente asumiendo que el modelo tiene forma de regresión lineal y aplicando un algoritmo de mínimos cuadrados recursivos [6]. Sin embargo, este tipo de algoritmo es frágil ante la incertidumbre en el regresor [8]. Es decir, si alguna función del regresor es desconocida, el algoritmo presentará muy baja precisión. En consecuencia, este trabajo propone un método para estimar las funciones del regresor. La idea es considerar un vector de "funciones candidatas" que pueden o no aparecer en el sistema y estimar los parámetros de este vector mediante regresión lineal dispersa.



Finalmente, a diferencia de muchas técnicas de aprendizaje [9], el algoritmo propuesto incorpora una métrica que le permite cuantificar la precisión de los parámetros estimados. Mediante esta métrica se podrá discernir entre una fase de aprendizaje, en la que el controlador está aprendiendo el sistema, y una fase de ejecución, en la que el controlador sigue la referencia deseada. Además, el controlador se complementa con la información de la métrica para robustecer el algoritmo ante la diferencia entre el modelo aprendido y la realidad; así se puede garantizar la estabilidad durante la fase de aprendizaje.

Este trabajo está organizado de la siguiente forma. En la sección 2, se formula el problema matemático a resolver. En la sección 3, se presenta el algoritmo de control. En la sección 4, se valida numéricamente el algoritmo en una planta rotomagnet. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

## 2. Formulación del problema

Este trabajo considera sistemas de orden  $n$  no lineales con una entrada y una salida representadas a través de la siguiente forma canónica:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= x_{i+1}, & i &= 1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n &= \phi(\mathbf{x}) + u \\ y &= x_1,\end{aligned}\quad (1)$$

donde  $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]^\top \in \mathbb{R}^n$  son los estados,  $u \in \mathbb{R}$  es la entrada,  $y \in \mathbb{R}$  es la salida medible y  $\phi(\mathbf{x})$  es una función posiblemente no lineal.

**Nota 2.1.** Si se cumplen ciertas condiciones, cualquier sistema de grado relativo  $n$  se puede transformar a la forma (1) a través del cambio de coordenadas adecuado [5].

El objetivo principal del trabajo es diseñar un controlador que a través de la señal de control,  $u$ , haga el origen del sistema (1) estable, es decir, tal que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{x} = 0.$$

**Nota 2.2.** Todos los resultados que se proponen en este trabajo siguen siendo válidos si, en lugar de estabilizar la planta en el origen, se desea que la salida converja a una trayectoria  $y_{ref}$  predefinida y posiblemente no constante. Sólo es necesario realizar un cambio de coordenadas [10]. Para más detalles, consultar la sección 4.

Este problema se ha estudiado en profundidad en la literatura de control no lineal [3]. Una solución relativamente sencilla consiste en cancelar las no linealidades del sistema mediante la acción de control,  $u$ . De esta manera, el sistema resultante es

completamente lineal y se puede controlar con algoritmos de control lineales. En concreto, si se introduce la siguiente señal de control

$$u = -\phi(\mathbf{x}) + v, \quad (2)$$

el sistema (1) se transforma en

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= x_{i+1}, & i &= 1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n &= v \\ y &= x_1,\end{aligned}\quad (3)$$

el cual es completamente lineal de  $v$  a  $y$  y se puede controlar con un controlador de realimentación lineal de estados.

La diferencia entre este trabajo y los resultados existentes en la literatura aparece al considerar el siguiente escenario. En lugar de suponer que se conoce exactamente la función  $\phi(\mathbf{x})$  [11], que es un supuesto muy restrictivo, se asume que pertenece a una librería de funciones **sobre-completa** conocida,  $\psi(\mathbf{x})\theta$ , la cual cumple las siguientes características:

- $\psi(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{1 \times q}$  es un vector de funciones conocido y  $\theta \in \mathbb{R}^{q \times 1}$  es un vector de parámetros desconocido y a estimar por el algoritmo.
- La base de funciones cumple  $\psi(\mathbf{x})\theta = \phi(\mathbf{x}) \forall \mathbf{x}$ .
- El vector  $\theta$  es **disperso**. Es decir, tiene muchos elementos iguales a cero.

Por ejemplo,  $\psi(\mathbf{x})\theta$  podría ser una librería de funciones candidatas que podrían (o no) aparecer en la planta real.

Al considerar este escenario, aparecen diversas limitaciones que impiden implementar muchas de las soluciones de la literatura. Primero, los estados  $\mathbf{x}$  no son conocidos: por tanto, se tienen que estimar a través de un observador. Segundo, el vector  $\theta$  no es conocido. En consecuencia, se tienen que estimar estos parámetros en línea para poder implementar el controlador (2). Finalmente, el punto más importante es que, como  $\theta$  es disperso, el vector  $\psi(\mathbf{x})$  nunca presentará la excitación suficiente para poder estimar los parámetros  $\theta$  [6]. Por eso, algoritmos de estimación de parámetros, como los mínimos cuadrados recursivos, no se pueden utilizar en este escenario. Este punto se discutirá con más detalle en la subsección 3.2.

El objetivo de este trabajo es presentar un algoritmo de control que sea capaz de operar con un vector de parámetros  $\theta$  disperso y sólo midiendo la salida del sistema.

### 3. Propuesta de solución

La solución propuesta se compone de tres partes. Primero, un observador no lineal que estima los estados del sistema. Segundo, un estimador de parámetros basado en regresión lineal dispersa, que a partir de las estimaciones del observador puede estimar los regresores y los parámetros de la planta real. Finalmente, una métrica que indica al sistema cuándo aprender los parámetros y cuándo ejecutar el control deseado.

#### 3.1. Observador de alta ganancia extendido

El observador no lineal utilizado en el trabajo es el observador de alta ganancia extendido [10]. A diferencia de otros observadores, tiene como ventaja que, además del vector de estados, también estima la incertidumbre del modelo. La incertidumbre,  $\sigma$ , es la diferencia entre la función desconocida y el modelo matemático:

$$\sigma = \phi(x) - \psi(x)\hat{\theta}, \quad (4)$$

donde  $\hat{\theta}$  es una estimación de los parámetros  $\theta$ .

Con la ecuación (4) el sistema (1) se puede reescribir como:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= x_{i+1}, & i &= 1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n &= \psi(x)\hat{\theta} + \sigma + u \\ y &= x_1. \end{aligned} \quad (5)$$

En este tipo de sistemas, un observador de alta ganancia extendido es una copia del sistema más un factor proporcional al error entre la salida del sistema,  $x_1$ , y la salida del sensor,  $y$ :

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i &= \hat{x}_{i+1} + \frac{\alpha_i}{\varepsilon^i}(y - \hat{x}_1), & i &= 1, \dots, n-1 \\ \dot{\hat{x}}_n &= \psi(\hat{x})\hat{\theta} + \hat{\sigma} + u + \frac{\alpha_n}{\varepsilon^n}(y - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{\sigma}} &= \frac{\alpha_{n+1}}{\varepsilon^{n+1}}(y - \hat{x}_1) \end{aligned} \quad (6)$$

donde  $\psi(\hat{x})\hat{\theta}$  es una estimación de la función desconocida  $\phi(x)$  que se desarrollará en la subsección 3.2.

El observador incluye un estado extra,  $\hat{\sigma}$ , el cual es una estimación de la incertidumbre del modelo,  $\sigma$ .

Los parámetros a especificar para el observador son las constantes  $\alpha_i$  y la constante  $\varepsilon$ . Por un lado, las constantes  $\alpha_i$  determinan el comportamiento transitorio del error de estimación, i.e.  $\tilde{x} = x - \hat{x}$ . Para que este error converja a cero hay que diseñar las constantes  $\alpha_i$  de tal forma que todas

las raíces del siguiente polinomio presenten parte real negativa:

$$s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n. \quad (7)$$

Por otro lado, el parámetro  $\varepsilon$  es una constante positiva que determina las prestaciones del observador. Si escogemos un valor de  $\varepsilon$  demasiado pequeño, amplificamos el efecto del ruido y el fenómeno de pico [12][13]. Por el contrario, si escogemos un valor demasiado grande, amplificamos el efecto de la incertidumbre y ralentizamos la dinámica del observador, por lo que el error de estimación va a converger más lentamente. No hay ningún método directo para determinar el valor óptimo del parámetro; en la práctica, se busca un equilibrio de las prestaciones del observador.

#### 3.2. Estimador de parámetros disperso

Una parte esencial del observador y el controlador es la necesidad de estimar los parámetros  $\hat{\theta}$ . Este no es un problema sencillo, ya que sólo se dispone de la información del sensor  $y$ , y los parámetros,  $\theta$ , no están directamente relacionados con esta señal. Sin embargo, la estructura del observador propuesto (6) se presta a simplificar este conflicto. En concreto, a través de la definición de  $\sigma$  (4) se puede deducir la siguiente relación:

$$Y \triangleq \sigma + \psi(x)\hat{\theta} = \psi(x)\theta. \quad (8)$$

Nótese que (8) es una regresión lineal en los parámetros. Sin embargo, el valor de  $\sigma$  no es conocido: sólo se dispone de la estimación  $\hat{\sigma}$  realizada por el observador. En consecuencia, sólo se tiene una aproximación de la regresión anterior:

$$\hat{Y} \triangleq \hat{\sigma} + \psi(\hat{x})\hat{\theta} = \psi(x)\theta - [\sigma - \hat{\sigma}]. \quad (9)$$

Para estudiar la validez de la regresión (9) es importante remarcar dos puntos. Primero, si la estimación de la incertidumbre es precisa, i.e.  $\sigma - \hat{\sigma} \approx 0$ , la regresión (9) converge a la regresión ideal (8). Segundo, cuanto mayor sea la precisión de la estimación de los parámetros,  $\hat{\theta}$ , mayor será la precisión de la estimación de la incertidumbre  $\hat{\sigma}$ . En consecuencia, al resolver iterativamente la regresión lineal (9) e inyectar iterativamente los resultados en el observador (6), se puede conseguir una estimación  $\hat{x}$ ,  $\hat{\theta}$  y  $\hat{\sigma}$  que converja al valor real.

El único punto que queda por clarificar es como estimar los parámetros,  $\hat{\theta}$ , de la regresión (9). En la estructura de (9) es común implementar un algoritmo de mínimos cuadrados recursivos [6][7]. Es decir, implementar un algoritmo que resuelva la siguiente optimización

$$\min_{\theta} \|\hat{Y} - \psi(\hat{x})\theta\|_2, \quad (10)$$

donde  $\|\cdot\|_2$  es la norma 2.

Es bien sabido que el algoritmo de mínimos cuadrados converge al valor real si el vector  $\psi(\hat{x})$  cumple con cierta condición de excitación [6]. Esta condición establece que las trayectorias del sistema son "suficientemente ricas", de forma que sólo exista una única solución de parámetros,  $\theta$ , que explique la trayectoria.

Sin embargo, en este trabajo se consideran vectores  $\theta$  dispersos. Por tanto, la función  $\psi(x)\theta$  contiene muchas más funciones de las necesarias para explicar la trayectoria del sistema. En este contexto, aunque la base de funciones mínimas pueda cumplir la condición de excitación [6], la base sobre-completa  $\psi(x)$ , en general, nunca cumplirá esta condición.

Por eso, es necesario estimar los parámetros de la regresión lineal (9) con un algoritmo distinto a los mínimos cuadrados recursivos. La idea es incorporar la propiedad de dispersión de  $\theta$  en la estimación de parámetros. Por eso, se incorpora un factor de regularización que penaliza la norma-1 de los parámetros. En concreto, se resuelve el siguiente problema:

$$\min_{\theta} \|\hat{Y} - \psi(\hat{x})\theta\|_2 + \lambda \|\theta\|_1, \quad (11)$$

donde  $\lambda$  es un parámetro positivo a sintonizar y  $\|\cdot\|_1$  es la norma 1.

Para más detalles sobre este tipo de optimización, se remite el lector a la referencia [14].

### 3.3. Métrica de aprendizaje

El algoritmo divide el control en línea en dos fases diferentes: una fase de aprendizaje en la que se estima la función desconocida del sistema, y una fase de ejecución en la que se controla el sistema para conseguir unos objetivos preestablecidos. No se pueden estimar parámetros constantemente, sino que es necesario dividir el algoritmo en dos fases, ya que en el aprendizaje es preciso que la trayectoria de las variables de estado  $x$  cumpla la condición de excitación permanente. En algunas ocasiones se tiene que excitar externamente el sistema en esta fase para conseguir una buena estimación de los parámetros.

Se ha diseñado una métrica de aprendizaje,  $M$ , para que el algoritmo distinga de forma autónoma en qué fase del control en línea debe estar el sistema. El cálculo de la métrica se basa en la estimación de la incertidumbre,  $\hat{\sigma}$ , que nos proporciona el observador (6). La métrica nos permite cuantificar la incertidumbre del sistema en un espacio de tiempo

$T$  y se calcula de la siguiente forma:

$$M = \frac{\int_t^{t+T} |\hat{\sigma}_{filtrado}| \cdot dt}{T}. \quad (12)$$

Si el valor la métrica de aprendizaje es alto implica que hay bastante incertidumbre en el sistema y que no se tiene una buena estimación de los parámetros. El algoritmo calcula la métrica cada  $T$  segundos, y evalúa si se encuentra por debajo del umbral de lo que consideramos una buena estimación. Si es así, el sistema pasa a la fase de ejecución; si no, es que ya se encontraba en ella. Por lo contrario, el sistema salta a la fase de aprendizaje; si no, es que ya se encontraba en ella.

En la fase de aprendizaje se realizan iteraciones que duran un tiempo  $T$ , en las que se estiman los parámetros  $\hat{\theta}$ . Al final de cada iteración se calcula la métrica de aprendizaje  $M$  para evaluar si se tiene que seguir aprendiendo el sistema; si es así, se actualizan las estimaciones de parámetros en el observador (6) y en el controlador (13). En la fase de ejecución también se calcula el parámetro de aprendizaje cada cierto período de tiempo  $T$  para detectar si la planta real ha cambiado.

### 3.4. Controlador final

El controlador final realimenta a la entrada del sistema (5) la siguiente señal de control:

$$u = v - \psi(\hat{x})\hat{\theta} - \hat{\sigma}, \quad (13)$$

donde la señal  $v$  corresponde a un controlador de realimentación lineal de estados, y determina la evolución temporal de la salida del sistema linealizado. La estimación de la incertidumbre,  $\hat{\sigma}$ , y la estimación de los estados usada en  $v$  y en el vector de funciones,  $\psi(x)$ , provienen del observador de alta ganancia extendido. Estas estimaciones se van actualizando constantemente para seguir la trayectoria de los estados reales. Por último, la estimación de los parámetros,  $\hat{\theta}$ , proviene del estimador. La estimación de parámetros se actualiza al final de cada iteración de la fase de aprendizaje; si el sistema está en la fase en ejecución, no se actualiza porque la estimación ya se considera buena.

Con esta señal de control (13), por un lado se consigue controlar el comportamiento del sistema linealizado con la señal  $v$  de realimentación de los estados. Por otro lado, se cancelan exactamente las no linealidades y la incertidumbre del sistema, haciéndolo así un controlador más robusto que un PID tradicional.

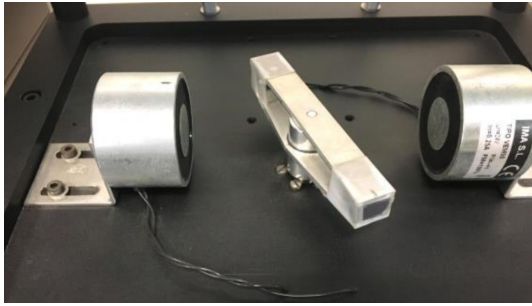


Figura 1: Estructura de la planta roto-magnet

## 4. Validación numérica

El algoritmo propuesto se ha validado con la planta roto-magnet [16]. En esta sección, se va a explicar cómo es y qué características tiene, y posteriormente se va a mostrar un ejemplo de simulación aplicando el algoritmo propuesto.

### 4.1. Explicación de la planta

La planta roto-magnet está diseñada para ser controlada con fines educativos. Esta planta es un sistema mecatrónico que está compuesto por: un motor DC, una barra giratoria, un imán permanente y dos electroimanes fijados. Más concretamente, el imán permanente con dos polos magnéticos opuestos está montado encima de la barra giratoria. Los dos electroimanes, con campos magnéticos diferentes, están fijados cerca de la barra, como se ve en la Fig. 1. El pequeño motor DC, situado debajo de la mesa experimental, está unido a la parte inferior de la barra.

Durante el funcionamiento del motor DC, la interacción entre el imán permanente y los electroimanes fijados crea un campo magnético. Este campo magnético causa un par pulsante  $\Gamma_p$  en el movimiento de la barra, que depende de la posición angular relativa  $\Theta$  entre la barra y los electroimanes.

Para tener la misma nomenclatura que en los sistemas anteriores, se considera que el ángulo  $\Theta$  es el estado  $x_1$ , y que la velocidad angular es el estado  $x_2$ . La salida de la planta es el ángulo relativo entre los imanes, que se mide con un sensor de posición angular.

El modelo de esta planta puede describirse como [15]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\alpha_1 x_2 + \Gamma_p(x_1) + \alpha_2 u \\ y &= x_1,\end{aligned}\quad (14)$$

donde  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son dos constantes relacionadas con la fricción, y  $u$  es la acción de control que repre-

senta el par del motor. En algunos trabajos [15] el par pulsante puede ser definido como la suma de un seno y un coseno dependientes del ángulo  $\Gamma_p(x_1) = \delta \sin(kx_1) + \gamma \cos(kx_1)$ .

Esta planta presenta dos problemas. El primero es que los parámetros  $\alpha_1, \delta, \gamma, k$  y la frecuencia  $k$  de las sinusoidales son difíciles de estimar. El segundo es que, cuando los electroimanes fijos se desactivan y no generan un campo magnético, el par pulsante,  $\Gamma_p$ , es igual a cero. En este trabajo se asume que el controlador no tiene ninguna información sobre la activación o desactivación del campo electromagnético. Entonces, el algoritmo tiene que, por un lado, ser capaz de calcular los parámetros desconocidos, y por otro, detectar si el campo magnético está activo e incluir (o no) las funciones sinusoidales de frecuencia desconocida en el modelo de la planta.

Este problema se puede formular en el contexto de optimización dispersa planteada en este trabajo. Este hecho se presenta en detalle en la siguiente sección.

### 4.2. Aplicación del algoritmo

A continuación, vamos a ver los diferentes pasos a seguir para aplicar el algoritmo en un ejemplo para conseguir que el ángulo  $x_1$  de la barra giratoria del roto-magnet siga una trayectoria angular predefinida y no constante. El algoritmo se divide en dos partes.

La primera parte consiste en diseñar los diferentes elementos del sistema: el observador, el controlador y la librería de funciones.

**Paso 1.** Se define la librería de posibles funciones. Las únicas informaciones de las que se dispone es que hay fricción en el sistema y que el par pulsante es una suma de sinusoidales que dependen del ángulo. Por esto se incluye el ángulo, la velocidad angular y sinusoidales de diferentes frecuencias en la librería de posibles funciones:

$$\psi(x) = [x_1, x_2, \sin(x_1), \sin(\frac{x_1}{2}), \sin(\frac{x_1}{3}), \cos(x_1), \cos(\frac{x_1}{2}), \cos(\frac{x_1}{3})]. \quad (15)$$

Nótese que en esta librería sólo tres factores aparecen realmente en la planta. Estos son:  $x_2, \sin(x_1)$  y  $\cos(x_1)$ .

**Paso 2.** Se diseña el observador de alta ganancia extendido (6), asignando los valores a las constantes:  $\alpha_1 = 15, \alpha_2 = 75, \alpha_3 = 125$  y  $\varepsilon = 0,55$ .

**Paso 3.** Se diseña el controlador (13), donde la acción proporcional es  $v = -[3 \ 3,5]\hat{x}$ , que estabiliza los polos del sistema linealizado en  $-1$  y  $-1,5$ .

**Paso 4.** Como se desea que la salida la planta converja a una trayectoria no constante, se realiza un cambio de coordenadas en las variables de estado de los componentes definidos en los pasos anteriores:

$$\begin{aligned}\bar{x}_1 &= x_1 - y_{ref} \\ \bar{x}_2 &= x_2 - \dot{y}_{ref},\end{aligned}\quad (16)$$

donde la trayectoria a seguir por el ángulo  $x_1$  del roto-magnet es:

$$y_{ref}(t) = \sin(t) + 2 \sin\left(\frac{t}{2}\right) + \frac{3}{2} \cos(t). \quad (17)$$

La segunda parte del algoritmo consiste en determinar cómo funcionan las fases de aprendizaje y de ejecución del control en línea. La fase de aprendizaje consiste en hacer iteraciones en las cuales se estiman los parámetros. En cada iteración, primero se aplica la optimización dispersa (11) para recuperar la base de funciones que realmente aparece en la planta, y luego la optimización de los mínimos cuadrados (10) para mejorar la estimación de los parámetros.

**Paso 5.** Se tiene el modelo de regresión:

$$\hat{Y} = \psi(\hat{x})\hat{\theta}. \quad (18)$$

En cada iteración se toman  $m$  medidas en línea de las variables  $\hat{Y}$  y de las funciones de la librería (15), a partir de las estimaciones del observador. Estas medidas conforman las matrices  $\hat{Y}$  y  $\hat{\Psi}$  de tamaño  $m \times 1$  y  $m \times 8$ , respectivamente, con las que se resuelve el problema de optimización (11). Se sintoniza el parámetro  $\lambda$  que minimiza el error de regresión y el número de funciones regresoras. Como resultado de la optimización se obtiene una estimación de los parámetros  $\theta$  dispersa, ya que se minimiza el número de funciones de la librería (15) que aparecen en el modelo de regresión (18).

**Paso 6.** Se aplica la optimización de mínimos cuadrados (10), sólo considerando las columnas de la matriz  $\hat{\Psi}$  que corresponden a los regresores que han obtenido una estimación de su parámetro diferente de cero en el *paso 5*. Como resultado se obtiene una mejor estimación de los parámetros, ya que en los mínimos cuadrados sólo se minimiza el error de regresión. Así se consigue un modelo,  $\psi(x)\theta$ , de la función desconocida,  $\phi(x)$ , con las funciones regresoras más importantes. Este modelo se actualiza en el observador y en el controlador al final de cada iteración de la fase de aprendizaje.

**Paso 7.** Se tiene que definir el umbral de la métrica de aprendizaje que indique al sistema cuándo aprender la función desconocida y cuándo ejecutar el control preconcebido. Se calcula la métrica  $M$  cada 25 segundos, que en el caso de estar en la

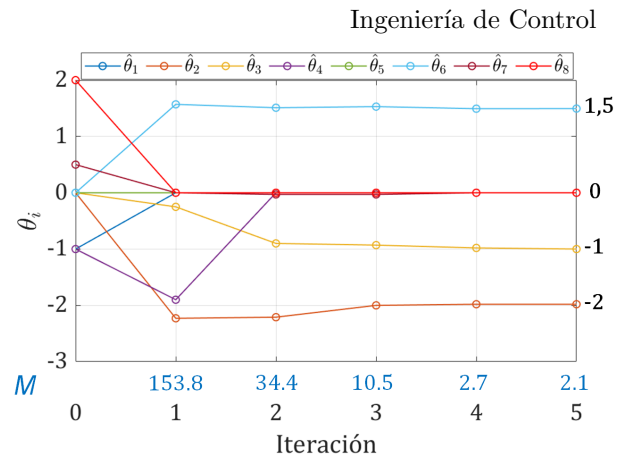


Figura 2: Evolución de las estimaciones  $\hat{\theta}$  y de la métrica  $M$  entre los segundos 125 y 150

fase de aprendizaje coincide con la duración de las iteraciones. Esta ventana de tiempo de 25 segundos se ha escogido teniendo en cuenta la dinámica de la referencia a seguir (17). Si el valor de la métrica está por encima de 2,5, se tiene que estar en la fase de aprendizaje porque hay incertidumbre en el sistema. En cambio, si la métrica está por debajo de 2,5, se ejecuta el control preestablecido sin estimar los parámetros. Se ha elegido el umbral 2,5 porque, por debajo de él, tenemos una buena estimación  $\psi(\hat{x})\hat{\theta}$  de la función desconocida  $\phi(x)$ .

### 4.3. Resultados

Para hacer la simulación se considera que los parámetros desconocidos de la planta (14) son:  $\alpha_1 = -2$ ,  $\alpha_2 = 1$ ,  $\delta = -1$ ,  $\gamma = 1,5$  y  $k = 1$ . Se asignan los parámetros de la planta real para realizar la simulación, pero el algoritmo no los conoce. Se simulará que los electroimanes generan un campo magnético los primeros 275 segundos y que luego se desactivan. El controlador desconoce el tiempo de desactivación.

En el inicio de la simulación, se considera el siguiente modelo inicial de la función desconocida, que se usará en el observador y el controlador:

$$\psi(x)\theta = -x_1 - \sin\left(\frac{x_1}{2}\right) + 0,5 \cos\left(\frac{x_1}{2}\right) + 2 \cos\left(\frac{x_1}{3}\right).$$

Nótese que el modelo inicial no incluye las mismas funciones que el modelo real (14). El controlador deberá ser capaz de notar esta discrepancia y, de forma autónoma, aprender las funciones que realmente aparecen en el sistema.

Del segundo 0 al 125, el algoritmo realiza 5 iteraciones en la fase de aprendizaje. Se puede ver la evolución de la estimación de los parámetros y de la métrica en la Fig. 2. En la quinta iteración el sistema pasa a la fase de ejecución ya que el valor de la métrica de aprendizaje es menor que 2,5. La

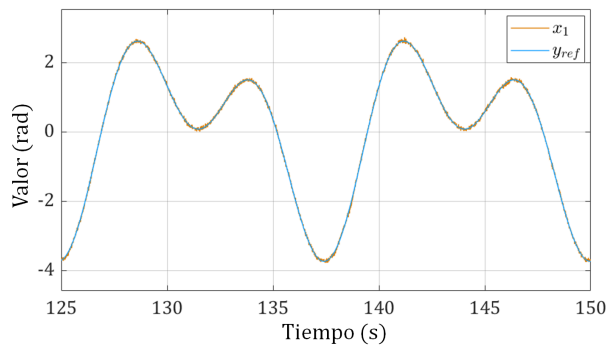


Figura 3: Evolución de  $x_1$  y  $y_{ref}$  entre los segundos 125 y 150

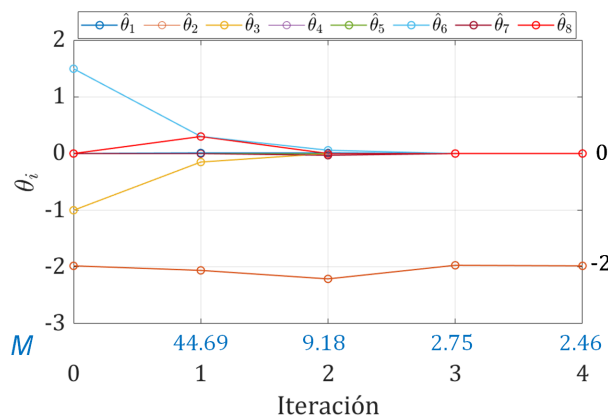


Figura 4: Evolución de las estimaciones  $\hat{\theta}$  y de la métrica  $M$  entre los segundos 275 y 375.

estimación final de la función desconocida que se usa en el observador y el controlador es:

$$\psi(x)\hat{\theta} = -1,99x_2 - 1,01\sin(x_1) + 1,50\cos(x_1).$$

En el segundo 125 empieza la fase de ejecución, donde el control del sistema funciona correctamente, como se puede apreciar en la Fig. 3.

El sistema se encuentra en la fase de ejecución hasta el segundo 300. Entre los segundos 275 y 300, la métrica  $M$  se dispara a un valor de 44,7, lo que significa que se han desactivado los electroimanes y que la planta real ha cambiado. En consecuencia, el algoritmo vuelve a entrar en la fase de aprendizaje, y se hacen 4 iteraciones en esta fase. Se puede ver la evolución de la estimación de los parámetros y de la métrica en la Fig. 4.

En el segundo 375 la métrica pasa a valer 2,46, y se considera que se han aprendido las ecuaciones del roto-magnet sin las sinusoidales correspondientes al par pulsante (14). La estimación de la función desconocida es:

$$\psi(x)\hat{\theta} = -1,99x_2.$$

El sistema vuelve a la fase de ejecución entre los segundos 375 y 500, que acaba la simulación. El

sistema se controla correctamente ya que en este periodo de tiempo el seguimiento de la referencia es similar al de la Fig. 3.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto un controlador para sistemas no lineales, con planta desconocida y cambiantes en el tiempo. Se asume que las funciones de la planta son desconocidas y sólo se dispone de una librería de posibles "funciones candidatas". Se propone un algoritmo que combina un observador de alta ganancia extendido con una optimización dispersa para así recuperar las funciones reales de la planta a la vez que se garantiza la estabilidad de la planta durante el aprendizaje. Además, se diseña una métrica que nos permite cuantificar la precisión del modelo. El algoritmo se ha validado mediante simulación numérica en una planta roto-magnet.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado con el apoyo de la Agencia Estatal de Investigación española a través del sello de excelencia de María de Maeztu, IRI (MDM-2016-0656) y a través del proyecto DOVE-LAR (ref. RTI2018-096001-B-C32).

## English summary

### Nonlinear adaptive control with sparse identification

#### Abstract

*This work presents a controller with parameter estimation focused on non-linear, unknown and time-variant systems. The proposal consists of an on-line learning algorithm to estimate the system equations, and a controller that uses this information to stabilize the plant. Our approach is to combine a non-linear observer and a parameter estimator using sparse optimization techniques. The resulting algorithm operates in two stages: the learning stage, where unknown functions are learned on-line, and the execution stage, where the plant is controlled with pre-established objectives. The proposed algorithm can autonomously decide what is its current stage by using a learning metric. We have validated our algorithm using numerical simulation in a roto-magnet plant.*



**Keywords:** extended high gain observer, sparse parameter estimation, learning metric.

## Referencias

- [1] K. H. Ang, G. Chong y Y. Li. PID control system analysis, design, and technology, en *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 559-576, July 2005, doi: 10.1109/TCST.2005.847331.
- [2] F. Lamnabhi-Lagarrigue, A. Annaswamy, S. Engell, A. Isaksson, P. Khargonekar, R. M. Murray, H. Nijmeijer, T. Samad, D. Tilbury, P. Van den Hof. Systems & control for the future of humanity, research agenda: Current and future roles, impact and grand challenges, *Annual Reviews in Control*, vol. 43, pp. 1-64, 2017, doi: 10.1016/j.arcontrol.2017.04.001.
- [3] A. Isidori, E. D. Sontag y M. Thoma. *Nonlinear control systems*. Vol. 3. London: Springer, 1995.
- [4] A. Isidori, A. Krener, C. Gori-Giorgi y S. Monaco. Nonlinear decoupling via feedback: A differential geometric approach, en *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 26, no. 2, pp. 331-345, April 1981, doi: 10.1109/TAC.1981.1102604.
- [5] C. I. Byrnes y A. Isidori. New results and examples in nonlinear feedback stabilization, *Systems & Control Letters*, vol. 12, no. 5, pp. 437-442, 1989, doi:10.1016/0167-6911(89)90080-7.
- [6] L. Ljung y T. Söderström, *Theory and Practice of Recursive Identification*. Cambridge, 1983.
- [7] A. Cecilia, M. Serra y R. Costa-Castelló. Nonlinear adaptive observation of the liquid water saturation in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 492 (2021): 229641.
- [8] A. Astolfi, D. Karagiannis, y R. Ortega. *Nonlinear and adaptive control with applications*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [9] R. Sun, M. L. Greene, D. M. Le, Z. I. Bell, G. Chowdhary y W. E. Dixon. Lyapunov-Based Real-Time and Iterative Adjustment of Deep Neural Networks, en *IEEE Control Systems Letters*, doi: 10.1109/LCSYS.2021.3055454.
- [10] H. K. Khalil. *High-gain observers in nonlinear feedback control*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2017.
- [11] P. A. Ioannou y J. Sun. *Robust adaptive control*. Courier Corporation, 2012.
- [12] H. J. Sussmann y P. V. Kokotovic. The peaking phenomenon and the global stabilization of nonlinear systems. *IEEE Transactions on automatic control* 36.4 (1991): 424-440.
- [13] A. Cecilia y R. Costa-Castelló. High gain observer with dynamic deadzone to estimate liquid water saturation in pem fuel cells. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 17.2 (2020): 169-180.
- [14] D. L. Donoho, Compressed sensing, en *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, April 2006, doi: 10.1109/TIT.2006.871582.
- [15] J. Na, Y. Xing y R. Costa-Castelló, Adaptive Estimation of Time-Varying Parameters With Application to Roto-Magnet Plant, en *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 51, no. 2, pp. 731-741, Feb. 2021, doi: 10.1109/TSMC.2018.2882844.
- [16] R. Costa-Castelló, J. Nebot y R. Grino, Demonstration of the internal model principle by digital repetitive control of an educational laboratory plant, en *IEEE Transactions on Education*, vol. 48, no. 1, pp. 73-80, Feb. 2005, doi: 10.1109/TE.2004.832873.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# PLANTA EXPERIMENTAL PARA SISTEMAS DE CALEFACCIÓN DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO

María L. Delgado, Manuel Lara, Francisco Vázquez

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Automática, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Córdoba, España, p72degum@uco.es

## Resumen

*En este trabajo se describe una planta experimental para test de sistemas de calefacción de vehículos de transporte público. La planta incorpora un sistema para el control de la temperatura de la cabina y emula la temperatura del motor del vehículo (mediante una caldera de gas natural), así como la temperatura exterior del autobús. De este modo, es posible imponer diferentes condiciones de operación al ciclo de calefacción. Se expone además la estrategia de control utilizada y, como ejemplo, los datos obtenidos en un ensayo realizado con la planta, que junto con otras experiencias servirán para la caracterización de sus componentes. Con este trabajo se dispone de una planta experimental que servirá como banco de pruebas para explorar distintas estrategias de control y optimización orientadas a aumentar el rendimiento de los sistemas de calefacción de vehículos de transporte público.*

**Palabras clave:** Sistema de calefacción, Transporte público, Control.

## 1 INTRODUCCIÓN

Una de las principales preocupaciones de la industria del automóvil es el confort de sus pasajeros, sobre todo en los vehículos destinados al transporte público. Por tanto, el diseño, optimización y control de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, Heating, Ventilating and Air Conditioning) de vehículos para mantener el confort térmico de sus pasajeros es un problema técnico relevante. Existen diferentes trabajos que tratan esta temática, algunos orientados a obtener modelos térmicos de la cabina del vehículo [5], [3], otros enfocados en el confort térmico de los pasajeros teniendo en cuenta condiciones de temperatura, humedad y velocidad del aire [6] o centrados en estudiar el rendimiento de cada componente del sistema de aire acondicionado [10].

La optimización y el control de los sistemas HVAC [7] es más relevante en los vehículos destinados al uso público y en concreto, en los autobuses debido a ciertos factores particulares de estos automóviles

como son su bajo aislamiento debido a la reducción de peso necesaria en la propia carrocería, la ocupación variable [4], las perturbaciones producidas por las frecuentes aperturas de las puertas, o las grandes no linealidades tanto en el comportamiento del intercambiador de calor como en la válvula de control [8]. Todas estas características dificultan el mantenimiento del confort térmico del autobús, y se añaden a ciertas condiciones de operación, como es el caso de la deshumidificación en la que se prima la seguridad (visión del conductor) al confort.

Otra característica importante de estos sistemas es el carácter multivariable del proceso. La mayoría de los autobuses, y muchos otros vehículos, disponen de un doble sistema de climatización, estableciendo dos zonas [9], la cabina del conductor y la zona de pasajeros, cada una con su consigna de temperatura. Dado que la zona de pasajeros tiene unas dimensiones considerablemente mayores que la zona de conductor, esta última se ve condicionada por la primera, produciéndose acoplamientos entre los dos lazos de control.

Por otra parte, y considerando en específico los sistemas de calefacción de los autobuses, la energía procede del sistema de refrigeración del motor de combustión. Pero esta energía no es constante ni en los arranques ni durante el funcionamiento normal, en el que el motor está sometido a los cambios propios del régimen del vehículo (variaciones de velocidad, pendientes, demanda por parte de otros sistemas, etc.), limitando su disponibilidad. Al mismo tiempo, las restricciones impuestas a los motores de combustión con la entrada en vigor de la normativa europea EURO VI y posteriores, limitan el paso de agua caliente al circuito de calefacción mientras no se alcanza la temperatura óptima de funcionamiento del motor, haciendo necesario el uso de precalentadores. Además, actualmente, el mercado tiende hacia los vehículos híbridos o totalmente eléctricos, en los que no existe como fuente de calor el motor de combustión, sino que dependen de una batería, lo que dificulta el mantenimiento del confort térmico dentro del habitáculo del vehículo. El hecho de emplear dicha batería para climatizar implica disminuir considerablemente la autonomía del vehículo [1],[2]. Por estas razones, actualmente se

buscan alternativas al sistema de calefacción o su optimización, considerándose tanto la gestión de componentes (válvulas, bombas, etc.) como la mejora de eficiencia de los intercambiadores.

Con el objetivo de contribuir al conocimiento de los sistemas de calefacción, a la optimización de sus condiciones de operación y de explorar distintas estrategias de control para aumentar el rendimiento de los intercambiadores de calor, así como del resto de componentes que conforman el sistema, se ha diseñado una planta experimental con los principales elementos de este tipo de sistemas, parte de ellos cedidos por la empresa colaboradora, incluyendo una Unidad Central de Climatización (UCC) de un autobús real.

El resto del artículo se organiza de este modo: en la sección 2 se describe la planta experimental diseñada, en la sección 3 se detalla el sistema de control implementado, en la sección 4 se exponen los resultados obtenidos en un ensayo experimental realizado con esta planta que servirán de base para modelar sus componentes principales y, por último, en la sección 5 se resumen las conclusiones obtenidas y se especifican las líneas futuras del proyecto.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La planta experimental diseñada, que se muestra en la Figura 1, consta principalmente de la UCC y una bomba de impulsión de agua, ambas pertenecientes al circuito de climatización del conductor de un autobús real, y de un sistema para emular el agua caliente procedente del motor de combustión. Se ha añadido la instrumentación necesaria para monitorizar el comportamiento de las variables de interés, con sensores de temperatura, caudal y presión.



Figura 1: Planta experimental

Para la supervisión del estado de los sensores y el control de los actuadores, se ha empleado un sistema de control compuesto por un PLC (*Programmable*

*Logic Controller*) S7-1512 de Siemens, en el que se implementan las estrategias de control a bajo nivel, y un PC, en el que se ejecuta un SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), el WinCC de Siemens, así como el software Matlab (licencia Campus), para establecer estrategias de control de alto nivel (optimización, registro de datos, etc.).

En la Figura 2 aparecen los elementos principales que conforman la planta experimental, y que se describen en los siguientes apartados.

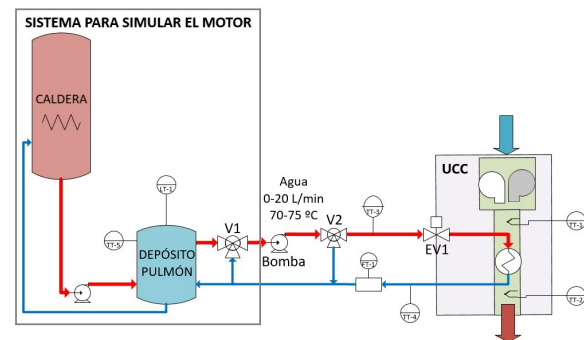


Figura 2: Esquema actual planta

### 2.1 EMULACIÓN DEL MOTOR

Para simular el calor producido por el motor de combustión de un autobús se ha empleado una caldera de gas natural de 24 kW de potencia calorífica y un depósito pulmón de 100 L. Además, se ha incorporado una válvula de tres vías de control proporcional de Siemens, V1, a la salida del depósito para reproducir el comportamiento del motor en los arranques, en los cuales existe un régimen transitorio hasta alcanzar la temperatura normal de funcionamiento. Esta válvula está pilotada por el PLC mediante una señal de 4-20 mA, con la que se modifica la posición del vástago, y a través de una entrada analógica de 0-10V se puede comprobar el *feedback* de la posición.

### 2.2 IMPULSIÓN AGUA

Para impulsar el agua caliente e introducirla en la UCC se emplea una bomba hidráulica que produce un caudal de 5000 L/h (0,2 bar). Para su control se emplea una salida digital que activa y desactiva, a través de un relé, su alimentación (24 V DC). Por otra parte, Además, se ha incluido una válvula manual de tres vías, V2, para poder modificar el caudal máximo que entra en la UCC, haciendo que parte de este caudal de agua caliente no circule por la unidad de climatización, con la finalidad de probar su influencia sobre la temperatura de canalización de aire del autobús.

### 2.3 UCC

El elemento principal de la planta es la UCC (Figura 3). Se compone esencialmente de un intercambiador de calor agua-aire, en el que se produce la transferencia de calor entre el agua caliente impulsada por la bomba procedente del circuito de refrigeración del motor y aire, que puede proceder del interior (recirculado) o del exterior del autobús. Esta transferencia se produce gracias a sus dos ventiladores que impulsan el aire y lo hacen circular de manera perpendicular a la batería del intercambiador por la que pasa el agua caliente. Para variar la velocidad de estos ventiladores se utiliza modulación por ancho de impulso (PWM, Pulse-Width Modulation).



Figura 3: UCC

Otro elemento a destacar de esta unidad es la válvula de control, encargada de limitar el caudal de agua caliente a la entrada de la UCC. Esta válvula motorizada es gestionada por el PLC mediante dos salidas digitales que accionan el motor, una para la orden de marcha directa y otra para la orden de marcha inversa, modificando de esta forma la posición del obturador. Esta válvula posee un potenciómetro con el que se monitoriza la posición del vástago.

La UCC incorpora dos motores de corriente continua para modificar la posición de dos compuertas. Una de estas compuertas se emplea para seleccionar la procedencia del aire, del interior o del exterior del autobús. La otra, que incorpora un potenciómetro para poder establecer posiciones intermedias, se utiliza para la deshumidificación de la luna delantera del vehículo. Modificando la posición de esta compuerta, parte del caudal de aire caliente procedente del intercambiador se emplea en la deshumidificación en lugar de circular por las canalizaciones del sistema de calefacción.

La unidad de climatización incorpora tres sondas de temperatura, modelo KTY81/110, que se han conectado a tres entradas analógicas de 0-10V del PLC mediante un divisor de tensión.

Puesto que para caracterizar el sistema se necesitan las temperaturas de los fluidos, así como sus caudales, se han añadido dos sondas de temperatura (KTY81/110) de agua tanto a la entrada como a la salida de la UCC, y dos caudalímetros, uno para medir el caudal de agua a la salida de la UCC, modelo SA6000 de IFM, y otro el de aire en la tobera de salida, que se corresponde con el caudal empleado para calentar la cabina del conductor, modelo SA5000 de IFM. Ambos caudalímetros se conectan al controlador, mediante dos entradas analógicas de 4-20 mA. Indicar que la tobera de salida no existe en el autobús real, sino que se ha construido y acoplado sobre la UCC para canalizar todo el aire que circula por la unidad en un único punto y, de este modo, poder medir su caudal.

### 2.4 EMULACIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTE

Se ha realizado una adaptación en la planta para poder reproducir condiciones ambientales difíciles de alcanzar en Córdoba. Para ello se conecta a la planta, una cámara de refrigeración capaz de alcanzar 0 °C de temperatura, y mediante una soplante, se extrae aire frío de su interior conduciéndolo hasta la entrada de la UCC como se muestra en la Figura 4. Para el control del extractor de aire de la cámara se ha empleado una salida digital del PLC que a través de un relé establece o corta su alimentación.



Figura 4: Adaptación planta

### 2.5 SEÑALES

En la Tabla 1 se especifican las señales de entrada y salida conectadas al PLC de la planta, indicando el tipo (AI, entrada analógica, AQ, salida analógica, DI, entrada digital o DQ, salida digital) y la unidad de medida, en su caso.



Tabla 1: Señales conectadas al controlador

Señal	Tipo	Unidad
Potenciómetro válvula control de caudal (UCC)	AI	%
Potenciómetro válvula compuerta luna (UCC)	AI	%
Caudalímetro agua	AI	l/min
Caudalímetro aire	AI	m <sup>3</sup> /h
Consigna posición válvula motorizada de 3 vías	AQ	%
Activación ventiladores	DQ	-
PWM ventiladores	DQ	-
Bomba	DQ	-
Orden marcha (O.M.) directa motor válvula control de caudal (UCC)	DQ	-
O.M. inversa motor válvula control de caudal (UCC)	DQ	-
O.M. directa motor válvula compuerta pies (UCC)	DQ	-
O.M. inversa motor válvula compuerta pies (UCC)	DQ	-
Encendido caldera de gas	DQ	-
Activación soplante cámara frigorífica	DQ	-
O.M. directa motor válvula compuerta luna (UCC)	DQ	-
O.M. inversa motor válvula compuerta luna (UCC)	DQ	-
Seta de emergencia	DI	-
Temperatura aire de entrada (UCC)	AI	°C
Temperatura aire exterior (UCC)	AI	°C
Temperatura aire de salida (UCC)	AI	°C
Temperatura agua de entrada (UCC)	AI	°C
Temperatura agua de salida (UCC)	AI	°C
Posición válvula motorizada de 3 vías	AI	%

### 3 SISTEMA DE CONTROL Y SUPERVISIÓN

La planta está instrumentalizada con sensores de presión, temperatura y caudal. Para recoger los datos de estos sensores y controlar los actuadores, válvulas, motores y bomba, se ha empleado un sistema de control con una CPU 1512C-1 PN (Figura 5) que permite la implementación de redes Profinet y OPC UA (*Open Platform Communications - Unified Architecture*), así como modulación por ancho de pulso (PWM).

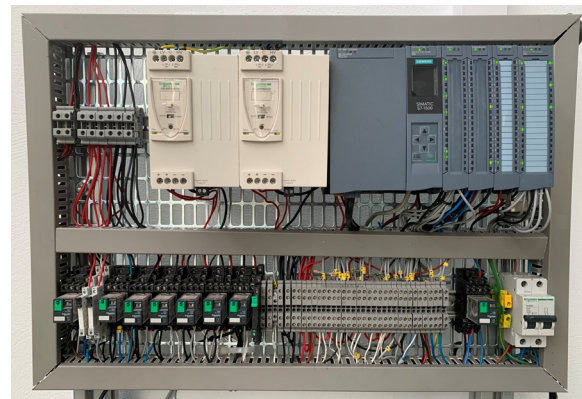


Figura 5: Cuadro eléctrico planta

#### 3.1 COMUNICACIÓN OPC UA

Se ha configurado el PLC para que funcione como servidor OPC UA. Este protocolo, basado en Ethernet, es una evolución del clásico OPC, que permite realizar una comunicación, entre procesos o en red, independiente del fabricante y de la plataforma empleada con mecanismos de seguridad en el nivel de protocolo y de aplicación, entre otras ventajas. Se ha utilizado para comunicar variables entre el PLC y el software Matlab/Simulink que se ejecuta en un PC (Figura 6).

```
% Conecta al servidor OPC
uaClient = opcua('192.168.0.1',4840);
connect(uaClient);

%Condiciones ensayo:
OPC_PosLuna=opcuanode(3, ""M_HMI_ValLuna_Pos"",uaClient);
OPC_VelocVent=opcuanode(3, ""DB_vent"". ""y"",uaClient);
OPC_BotonVent=opcuanode(3, ""DQ_Vent"",uaClient);
OPC_ValMezcl=opcuanode(3, ""FB_ValMezcl"". ""y"",uaClient);
writeValue(uaClient, OPC_PosLuna, 0);
writeValue(uaClient, OPC_VelocVent, 40);
writeValue(uaClient, OPC_BotonVent, 1);
writeValue(uaClient, OPC_ValMezcl, 100);
% Arranca la bomba
OPC_bomba_on = opcuanode(3, ""Bomba_ON"",uaClient);
writeValue(uaClient, OPC_bomba_on_off, 1);
%Para fichero
PLC_VelocVentilador=readValue(uaClient, OPC_VelocVent);
PLC_ValMezcladora=readValue(uaClient, OPC_ValMezcl);
PLC_PosLuna=readValue(uaClient, OPC_PosLuna);
```

Figura 6: Captura código Matlab

#### 3.2 SCADA

Para el control y supervisión de la planta experimental se ha diseñado un SCADA sobre PC, cuya pantalla principal se muestra en la Figura 7.

Desde este SCADA, además de la monitorización del estado sensores y el control de los actuadores de la planta desde la pantalla principal, se han incorporado otras funciones:

- calibración de las señales analógicas de entrada;
- configuración de los parámetros de los controladores PID;

- almacenamiento de los datos generados en un fichero;
- gráficas con la variación temporal de las principales variables (Figura 8);
- visualización de la información del proyecto.

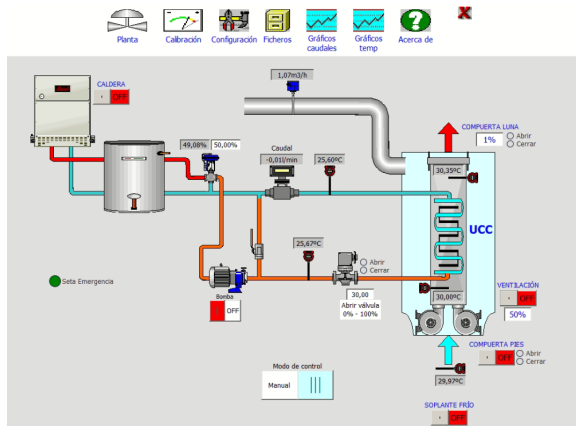


Figura 7: Pantalla principal SCADA

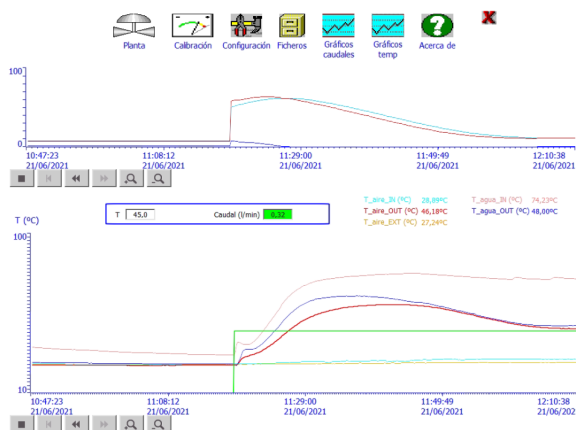


Figura 8: Gráficas temperaturas

### 3.3 LAZOS DE CONTROL

Desde el punto de vista de control, el objetivo principal es mantener controlada la temperatura de aire de salida, denominada de canalización, que se corresponde con la que es introducida en el recinto del conductor del autobús. La variable manipulada es el porcentaje de apertura de la válvula de la UCC. El resto de las señales se consideran perturbaciones. Muchas de estas perturbaciones se pueden reproducir de forma experimental en la planta.

Para el control de la temperatura del aire de canalización del circuito del conductor se ha empleado un controlador de tipo PID, aunque la acción derivativa no se ha utilizado. Para implementar este PID, en lugar de utilizar funciones predefinidas del PLC, se ha desarrollado un bloque

propio para tener mayor flexibilidad. En este PID, se ha implementado el mecanismo *anti-windup* y el de histéresis y como periodo de muestreo se ha seleccionado 15 s, tiempo similar al utilizado en la tarjeta de control de los autobuses. Para sintonizar este controlador se han empleado reglas heurísticas, basadas en la respuesta en lazo abierto en las que se han obtenido las relaciones entre el porcentaje de apertura de la válvula de control y el caudal, y entre el porcentaje de apertura de la válvula y la temperatura de aire de canalización.

## 4 PRUEBAS EXPERIMENTALES

A continuación, se presentan algunos datos obtenidos de un ensayo, a modo de ejemplo, realizado en la planta experimental con el objetivo de evaluar el control implementado.

En este ensayo en lazo cerrado se disminuyó la consigna de temperatura de canalización desde los 60 °C hasta 30 °C, en decrementos de 5 °C cada 90 min. La duración total del ensayo fue de 12 h. La consigna de la caldera se mantuvo a 75 °C, temperatura análoga a la de un motor de combustión de un autobús, y se programó la válvula mezcladora para que su apertura fuera lineal de 0-100% en 15 min reproduciendo el arranque del vehículo. Se limitó el caudal máximo de entrada a la UCC a 2 l/min empleando la válvula de tres vías manual, V2, y se seleccionó 2 °C como valor umbral para la histéresis del controlador.

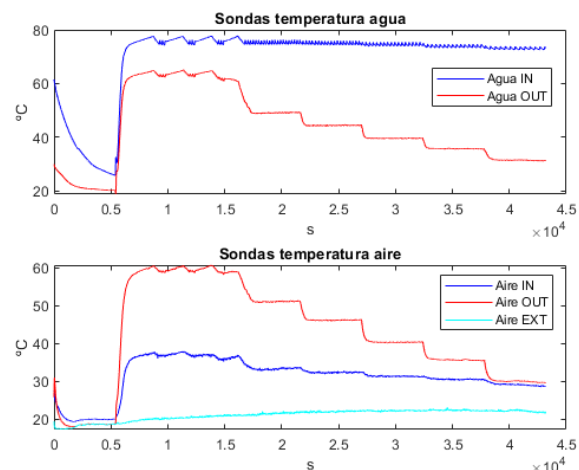


Figura 9: Sondas temperatura

En la Figura 9 se muestra la evolución temporal de las sondas de temperatura que caracterizan el sistema durante el ensayo en lazo cerrado. Se observa que la caldera es capaz de mantener la temperatura de entrada de la UCC prácticamente constante y



alrededor de los 75 °C, temperatura normal de funcionamiento del motor de combustión.

En la Figura 10, se representa, por un lado, la señal de control junto a la medida del potenciómetro de la válvula de control, ambas coincidentes, y, por otro lado, la evolución de la temperatura de canalización del circuito de conductor junto a la referencia.

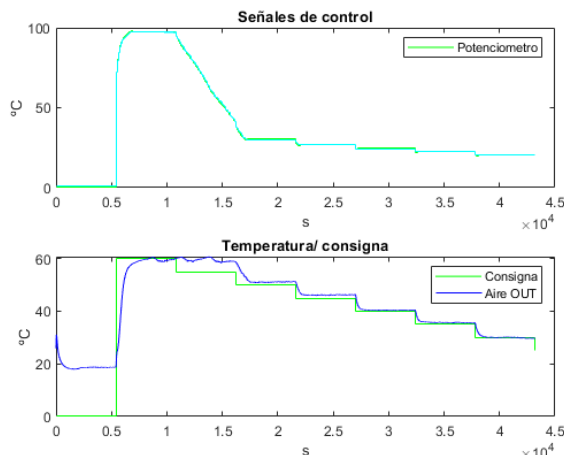


Figura 10: Respuesta y señal de control

En las gráficas anteriores, se puede observar el efecto del mecanismo de histéresis implementado en el PID, dejando constante la señal de control cuando la diferencia entre la temperatura de canalización y la consigna es inferior al valor umbral. Así mismo, se comprueba el seguimiento de referencias de la temperatura de canalización. La consigna de 55 °C no se alcanza debido al tiempo que emplea el controlador en cerrar la válvula, que en el instante anterior al cambio de referencia se encuentra totalmente abierta. Sobre este fenómeno que se produce en el arranque de cualquier vehículo ya se han implementado soluciones, no descritas para preservar la confidencialidad.

## 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha descrito una planta de ensayos para sistemas de calefacción de vehículos públicos. La funcionalidad de la planta para emular la temperatura del agua del circuito de refrigeración del motor de combustión y la temperatura ambiente exterior del autobús, permite establecer diferentes condiciones de trabajo del sistema de calefacción. Además, se ha implementado un sistema de control y adquisición de datos sobre PC que posibilita el registro de todas las variables de interés de cada ensayo.

Como trabajos futuros, se emplearán los datos obtenidos en los ensayos para caracterizar y modelar los componentes de la planta, permitiendo de esta forma obtener un modelo térmico del autobús. Actualmente, se está trabajando en un modelo térmico híbrido del vehículo, en el que, por un lado, como parte simulada se emplea un modelo térmico en Matlab del habitáculo del autobús y del circuito de calefacción de la zona de pasajeros y, por otro lado, como parte real se utiliza la planta experimental descrita en este trabajo que emula el circuito de calefacción del conductor. Se prevé realizar una batería de ensayos empleando este modelo híbrido y comparar sus resultados con los obtenidos con el modelo térmico completo y con los datos recogidos en pruebas en autobuses reales. Por último, se implementarán estrategias de control y optimización avanzadas con el objetivo de aumentar el rendimiento de los sistemas de calefacción de vehículos de transporte público.

## Agradecimientos

Agradecer a la Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades de la Junta de Andalucía la financiación del proyecto P18-TP-2040, y a la empresa Hispacold (grupo Irizar), copartícipe del citado proyecto.

Por otro lado, agradecer también la contribución de los alumnos del grado de Ingeniería Electrónica Industrial participantes en el proyecto, como M<sup>a</sup> de los Reyes Mármol o Alfonso y Antonio Almenara, en diversas fases de su implementación.

## English summary

## EXPERIMENTAL PLANT FOR HEATING SYSTEMS IN PUBLIC TRANSPORT VEHICLES

### Abstract

*In this paper, an experimental plant for heating systems of public transport vehicles is described. The plant incorporates a system to control the cabin temperature and allows the emulation of the vehicle engine temperature as well as the outside temperature of the bus. In this way, different operating conditions on the heating cycle can be imposed. The control strategy employed is described and data obtained from a specific experimental setup are analyzed. This test-bench will be useful for comparing and studying different control optimization strategies aimed at increasing the performance of heating systems in public transport vehicles.*

**Keywords:** Heating systems, Public transport, Control.

## Referencias

- [1] Al Faruque, M. A., Vatanparvar, K., (2016) "Modeling, analysis, and optimization of Electric Vehicle HVAC systems", *Proceedings of the Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC*, vol. 25-28-Janu, pp. 423–428.
- [2] Bellocchi, S., Leo Guizzi, G., Manno, M., Salvatori, M., Zaccagnini, A., (2018) "Reversible heat pump HVAC system with regenerative heat exchanger for electric vehicles: Analysis of its impact on driving range", *Applied Thermal Engineering*, vol. 129, pp. 290–305.
- [3] Farzaneh, Y., Tootoonchi, A. A., (2008) "Controlling automobile thermal comfort using optimized fuzzy controller", *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 1906–1917.
- [4] He, H., Yan, M., Sun, C., Peng, J., Li, M., Jia, H., (2018) "Predictive air-conditioner control for electric buses with passenger amount variation forecast", *Applied Energy*, vol. 227, pp. 249–261.
- [5] Marcos, D., Pino, F. J., Bordons, C., Guerra, J. J., (2014) "The development and validation of a thermal model for the cabin of a vehicle", *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, pp. 646–656.
- [6] Pala, U., Oz, H. R., (2015) "An investigation of thermal comfort inside a bus during heating period within a climatic chamber", *Applied Ergonomics*, vol. 48, pp. 164–176.
- [7] Ruz, M., Garrido, Vázquez, F. Morilla, F. (2017) "A hybrid modeling approach for steady-state optimal operation of vapor compression refrigeration cycles", *Applied Thermal Engineering*, vol. 120, pp. 74–87.
- [8] Shoukat Choudhury, M. A. A., Thornhill, N. F., Shah, S. L., (2005) "Modelling valve stiction", *Control Engineering Practice*, vol. 13, pp. 641–658.
- [9] Torregrosa-Jaime, B., Bjurling, F., Corberán, J. M., Di Sciullo, F., Payá, J., (2015) "Transient thermal model of a vehicle's cabin validated

under variable ambient conditions", *Applied Thermal Engineering*, vol. 75, pp. 45–53.

- [10] Zhi, Z., Peng, D., Pei, Z., (2013) "Performance analysis and simulation of automotive air conditioning systems", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 261–262, pp. 357–361.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# MODELOS DE GRAFCET Y APLICACIONES DISTRIBUIDAS EN LA NORMA IEC 61499. UN CASO DE ESTUDIO.

Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Diseño. Universitat Jaume I

Av. Vicent Sos Baynat s/n. CP 12071 Castelló de la Plana. España

e-mail: {omiguel,romeroj}@uji.es

## Resumen

*En este trabajo se presenta un caso de estudio en el que se diseña una aplicación mediante distintos modelos en Grafcet los cuales van a ser implementados según el estándar para el diseño de aplicaciones distribuidas IEC 61499. Los diseños planteados tienen en cuenta distintos grados de modularidad de los componentes y, en base a estos modelos, se plantean distintas implementaciones, viendo cómo los modelos influyen en la distribución de los algoritmos de control.*

**Palabras clave:** Grafcet, IEC 61499, DCS

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la mayor parte de los sistemas de automatización industrial se programan según el estándar IEC 61131 [5], ampliamente usado en la programación de Autómatas Programables Industriales (APIs). Sin embargo, en los últimos años se ha estado desarrollando el estándar IEC 61499 [3, 10], más orientado a la programación de sistemas de control distribuidos y reconfigurables. Dicho estándar permite el diseño centralizado de una aplicación de control cuya ejecución puede ser distribuida entre distintos dispositivos de control los cuales no necesariamente deben ser del mismo fabricante. Esto mejora de forma considerable la interoperabilidad del software de control. Otra de las diferencias respecto al IEC 61131 es que el nuevo estándar cuenta con mecanismos para la modificación de las aplicaciones sin necesidad de detener su ejecución, facilitando la reconfiguración de los sistemas de control.

Las características antes mencionadas hacen que el IEC 61499 esté siendo actualmente el centro de atención de numerosos trabajos para su uso en diferentes problemas de automatización y control industrial. Muestra del interés que entre los fabricantes de los equipos de control está suscitando el IEC 61499, es el hecho de que ya existen entornos de programación comerciales que lo soportan como Isagrap de Rockwell Automation, nxtSTUDIO de nxtCONTROL y EcoStruxure Automation Ex-

pert de Schneider Electric, que actualmente está en desarrollo.

Existen varios métodos de modelado del comportamiento de sistemas de automatización: redes de Petri interpretadas para control, diagramas de Grafcet, diagramas de estado UML, entre otros. Estos modelos permiten una descripción formal de las especificaciones del comportamiento de los sistemas, evitando de esta forma las ambigüedades a las que puede inducir una descripción textual (descripción informal) del comportamiento. Una de las características fundamentales de estos modelos es su grado de abstracción, lo cual permite modelar el comportamiento de los sistemas independientemente de la forma y la tecnología que se use en la implementación final de los controladores. Varios trabajos de investigación han abordado el desarrollo de metodologías para la traducción de los modelos a aplicaciones para Autómatas Programables, teniendo en cuenta los distintos lenguajes de programación recogidos en la IEC-61131 (SFC, LD, FBD, ST, IL), [1, 6, 7, 9]. El objetivo de dichas metodologías es sistematizar y en última instancia automatizar el proceso de generación de los programas a partir de los modelos, reduciendo así las posibles fuentes de errores a la vez que se agiliza el proceso de programación.

Hasta el momento, muy pocos trabajos han abordado el desarrollo de metodologías que permitan el desarrollo de aplicaciones de control en el estándar IEC 61499. En particular, las ingenieras e ingenieros de control carecen de herramientas que permitan implementar, de forma sistemática, controladores para sistemas de eventos discretos a partir de las técnicas de modelado con las que están familiarizados y que utilizan para describir de una manera formal el comportamiento dinámico de los sistemas automatizados. Uno de los avances más recientes en este sentido ha sido presentados en [8] donde se propone una primera aproximación a la metodología para la implementación distribuida de modelos de Grafcet usando la IEC 61499.

En este trabajo se presenta un caso de estudio basado en una aplicación distribuida sencilla. A partir de un enunciado sobre la funcionalidad a implementar, se proponen varios modelos en Graf-

cet, el cual se define en el estándar IEC 60848 [4], que luego se implementan en la norma IEC 61499. Se analizará cómo el planteamiento de los modelos influye en modularidad y distribución del *software* de control que se obtiene a partir de los mismos.

El artículo se distribuye como sigue. En la Sección 2 se describe la plataforma experimental sobre la que se desarrollan las aplicaciones y se describe la funcionalidad a implementar. En la Sección 3 se presentan los diferentes modelos en Grafcet sobre los que se trabajará la implementación. En la Sección 4 se presentan las distintas implementaciones en la norma IEC 61499. Finalmente en la Sección 5 se discuten las conclusiones del trabajo.

## 2. PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Se trata de máquinas formadas por módulos de desplazamiento lineal (MDL) que pueden ser ensamblados para obtener diferentes configuraciones, como por ejemplo las mostradas en la Figura 1. Cada MDL consta de un motor eléctrico para mover un cabezal a lo largo del módulo y 5 detectores de posición del cabezal. Además, cada MDL tiene su propio dispositivo de control, compuesto de una tarjeta BeagleBone Black, a la que están conectados los detectores y el motor. De esta forma, el control total de una configuración dada se consigue mediante el sistema de control distribuido (DCS, por sus siglas en inglés) formado por los controladores de cada uno de los módulos que están interconectados mediante una red de comunicaciones. Con esta arquitectura, la reconfiguración mecánica conlleva implícitamente una reconfiguración del *hardware* de control y el cambio entre configuraciones solo requiere añadir o quitar de la red de comunicaciones los dispositivos de control de los módulos correspondientes.

La configuración concreta usada en este estudio se muestra en la Figura 2. Con esta disposición se pretende simular el comportamiento de una máquina que debe realizar una operación dada (estampado, agujereado, etc.) en cuatro puntos diferentes de una pieza. Los puntos para las operaciones son fijos y están situados en las posiciones de los detectores 1 y 5 de los MDL en los ejes X e Y, siendo los puntos concretos (1,1), (5,1), (5,5) y (1,5). El actuador que realiza la operación está en el extremo inferior del MDL del eje Z. Una vez que el actuador está sobre una de estas posiciones, dicho módulo debe bajar hasta la posición 3, donde el actuador se activa automáticamente para realizar la operación. Una vez realizada la operación, la máquina puede pasar al siguiente punto hasta completar las cuatro operaciones. Se considera el estado en que se acaba la última operación como

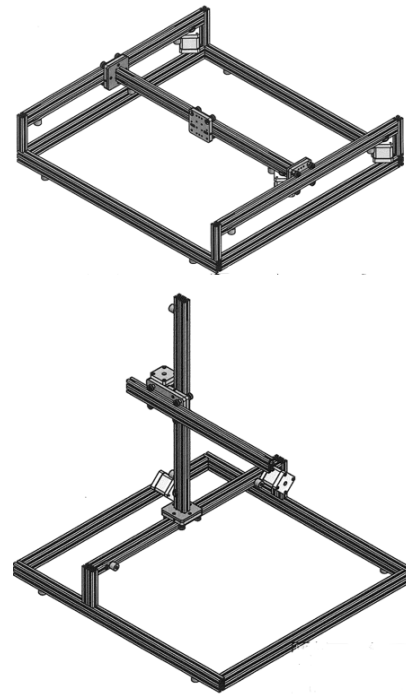


Figura 1: Ejemplos de configuraciones de máquinas mediante el ensamblado de varios MDLs.

estado inicial de la máquina.

El *software* de control resultante que garantiza el comportamiento antes descrito va a depender en gran medida del modelo en base al cual se realiza el mismo. En la siguiente sección se plantean dos modelos en diagramas de Grafcet que modelan el comportamiento de la tarea descrita. A partir de dichos modelos se obtendrán 4 implementaciones del *software* de control que satisface dicho funcionamiento. Las diferencias fundamentales entre las 4 implementaciones estarán en la distribución y en la modularidad de la aplicación de control obtenida en la norma IEC 61499.

Todas las implementaciones se realizarán en el programa open-source 4DIAC [2], que permite desarrollar aplicaciones distribuidas en el estándar IEC 61499. Para todas las soluciones que se describen se va a mantener la configuración de los dispositivos encargados del control, que están conectados entre sí mediante una red Ethernet como se muestra en la Figura 3.

## 3. Modelos de Grafcet

Para el modelado del comportamiento descrito en la sección anterior se han considerado dos alternativas: la primera consiste en un Grafcet único y la otra considera un modelo jerárquico formado por varios Grafcets. Se ha considerado únicamente el control secuencial de la máquina y se ha excluido

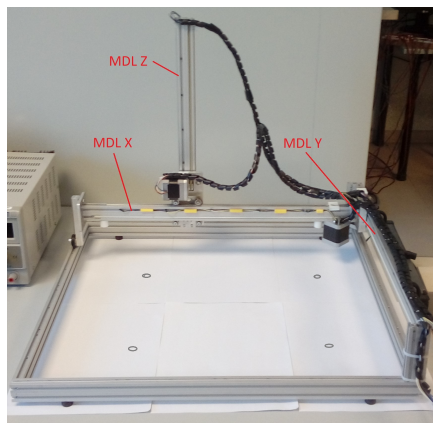


Figura 2: Maqueta real del caso en estudio.

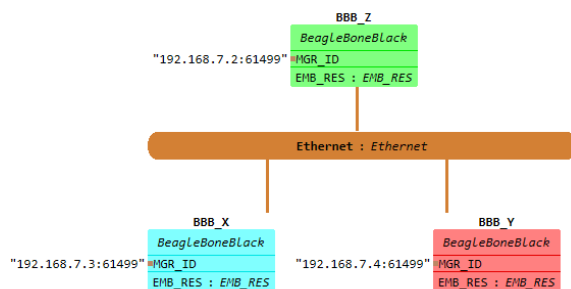


Figura 3: Conexiones entre los dispositivos que forman el DCS donde se implementarán las aplicaciones de control.

el control de los diferentes modos de marcha, paro y emergencia para simplificar el estudio.

El modelado mediante un Grafcet único se muestra en la Figura 4. Este Grafcet integra tanto la secuencia lógica del control como las acciones que cada MDL debe desarrollar. En este caso se considera que el retroceso del MDL Z se realiza automáticamente, por lo que esta fase no se incluirá en la aplicación de automatización. Por otro lado, el modelo jerárquico está formado por un Grafcet principal que define la lógica de funcionamiento, mostrado en la Figura 5 y tres Grafcets que definen el funcionamiento genérico de cada MDL, uno de los cuales se muestra en la Figura 6, donde PX representa la posición actual y TX posición de destino. Para indicar cuándo se ha llegado al destino se ha incluido una variable booleana "XDone" cuya activación dispara las transiciones del Grafcet que define el funcionamiento secuencial. Grafcets similares modelan el comportamiento de los MDLs de los ejes Y y Z.

Una diferencia fundamental entre estos dos modelos es que el modelo jerárquico el Grafcet que define la lógica del funcionamiento se abstrae del funcionamiento concreto de los módulos. Dicho diagrama sólo fija las posiciones a las que se debe

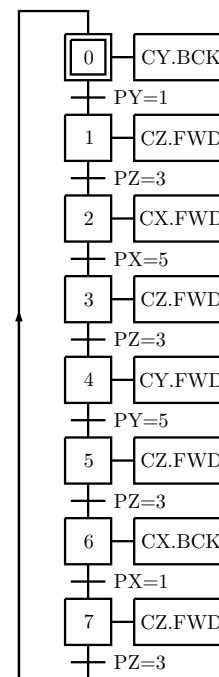


Figura 4: Modelado del sistema mediante Grafcet único.

mover cada módulo en cada momento. Son los diagramas que modelan el comportamiento de cada módulo los que definen la acción concreta (BCK o FWD) en función de la posición actual y de destino. Cabe destacar que para el modelado jerárquico se podría haber usado otras técnicas de interacción entre diagramas, pero se ha elegido la sincronización mediante transiciones por su sencillez para adaptarse a la situación concreta del caso en estudio.

#### 4. Implementaciones del software de control en IEC 61499

A partir de los modelos presentados en la sección anterior se desarrollarán varias implementaciones del *software* de control en la norma IEC 61499. Como cada MDL tiene su propio dispositivo de control, la recogida de datos y las órdenes a los actuadores se dan en el propio dispositivo, propiciando cierto grado de distribución del control, inherente a la estructura del DCS formado por las tres tarjetas BeagleBone Black interconectadas. En lo referente al control lógico secuencial, el algoritmo puede ser implementado de forma centralizada en una de las tarjetas o distribuida entre varias de ellas.

##### 4.1. Implementación 1: algoritmo centralizado y baja modularidad

En primer lugar, podemos considerar un diseño del control secuencial centralizado. Para ello, po-

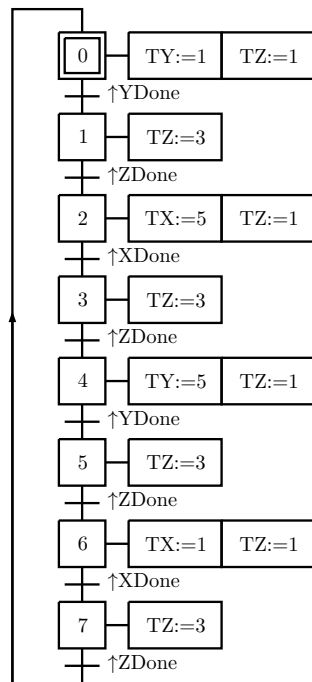


Figura 5: Modelado del sistema mediante jerarquía de Grafquets. Grafket de control secuencial.

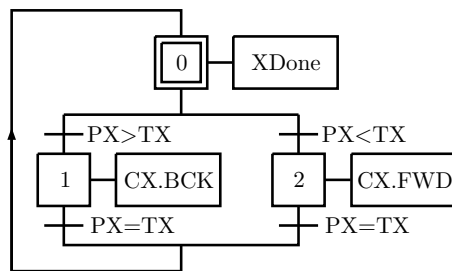


Figura 6: Modelado del sistema mediante jerarquía de Grafquets. Grafket que modela el funcionamiento del MDL del eje X.

demos usar directamente el modelo de Grafket presentado en la Figura 4, el cual se muestra nuevamente en la Figura 7 resaltando las acciones que afectan a cada dispositivo con su respectivo color de acuerdo con la Figura 3.

Este diagrama de Grafket se ha implementado en la norma IEC 61499 mediante el *Execution Control Chart* (ECC) de un bloque de funciones básico según los patrones de traducción de los elementos de Grafket a IEC 61499 propuestos en [8], Figura 8. El bloque de funciones resultante junto con la aplicación que implementa el control se presentan en la Figura 9.

El bloque **CentralizedCtrl** que implementa el control descrito en el Grafket propuesto consta de tres entradas de datos pertenecientes a las posiciones medidas en cada eje y de tres salidas corres-

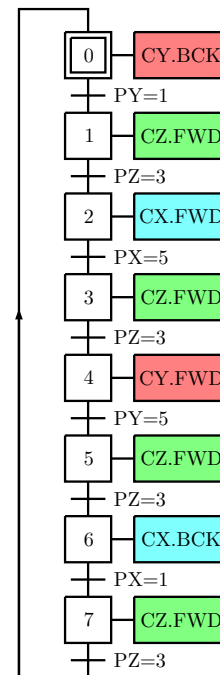


Figura 7: Modelo de Grafket único mostrado en la Figura 4 indicando la distribución de las acciones en los MDLs.

pondientes a la acción de control para cada eje. La aplicación muestra la distribución de los elementos, que viene indicada por el color de los bloques de funciones, que se corresponde con el color del dispositivo que lo ejecuta según se representa en la Figura 3. De esta forma las subaplicaciones **Read** y los bloques que implementan la salida booleana o de PWM de la tarjeta de control serán ejecutados por la tarjeta sobre la que deben medir y actuar. Los bloques mencionados se deben mapear en estos dispositivos ya que las entradas y salidas están justamente en estos dispositivos. Sin embargo, el bloque **CentralizedCtrl** podría ejecutarse en cualquiera de los tres dispositivos, en este caso se ha asignado al dispositivo que controla el eje Z.

Esta implementación centralizada de la aplicación conlleva que todos los datos de posición sean transmitidos a la tarjeta del eje Z y que esta envíe las acciones de control oportunas al resto de tarjetas. A su vez, si se desean realizar modificaciones en la aplicación de control solo se debe modificar el bloque **CentralizedCtrl** que implementa el modelo de Grafket.

#### 4.2. Implementación 2: algoritmo distribuido y baja modularidad

En el apartado anterior, si bien existía cierta distribución en distintos dispositivos en cuanto a la recepción y envío de datos, el algoritmo de control se encontraban únicamente en un dispositivo,



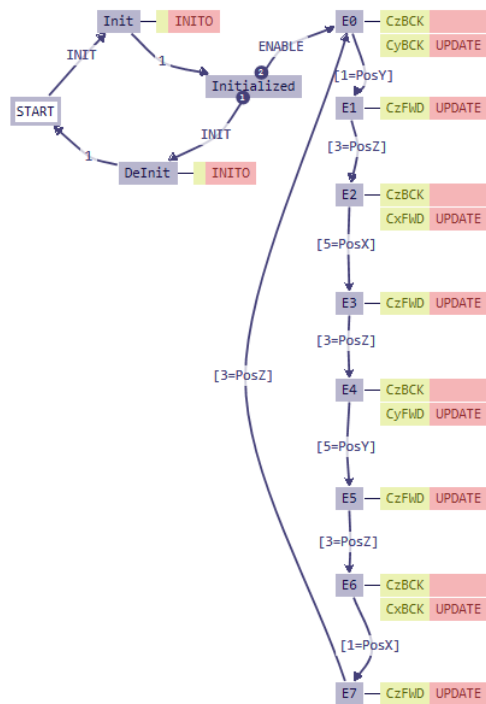


Figura 8: ECC que implementa el Grafcet de control secuencial de la Figura 4.

el que controla el eje Z. Gracias a la flexibilidad en la distribución del código que aporta el estándar IEC 61499, esto puede no ser así, es decir, distintos dispositivos pueden encargarse simultáneamente de ejecutar una aplicación de control.

En este caso mantendremos como base de referencia el modelo de Grafcet mostrado en la Figura 4. Manteniendo la misma estructura, en la Figura 10 se presentan tres diagramas de Grafcet, cada uno coloreado acorde al dispositivo en el que se van a implementar. Todos presentan las mismas etapas y transiciones pero cada uno de ellos sólo incluyen las acciones de control correspondientes al dispositivo donde será implementado. La funcionalidad de la aplicación se mantiene ya que 4DIAC permite que los bloques que implementan estos modelos de Grafcet se puedan ejecutar simultáneamente.

Por lo tanto, una aproximación sistemática para la distribución del control consiste en esta división en varios diagramas de Grafcet para luego implementar cada uno de ellos en bloques de funciones independientes.

Se han desarrollado tres bloques de funciones llamados *Ctrl\_X*, *Ctrl\_Y* y *Ctrl\_Z*, cada uno conteniendo sus respectivas acciones de control. Estos bloques se han introducido en la aplicación que se muestra en la Figura 11 y se han mapeado cada uno en su respectivo dispositivo.

La aplicación resultante implementa los algorit-

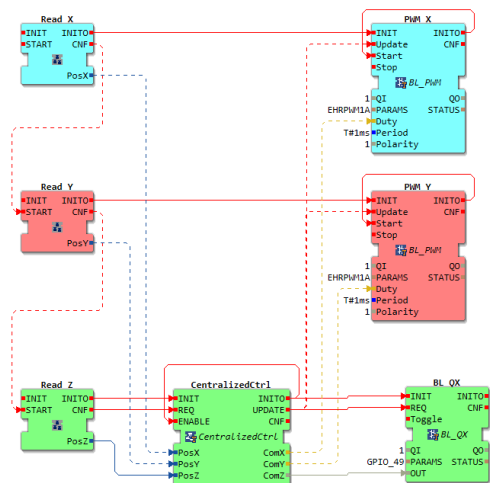


Figura 9: Implementación en 4DIAC de la aplicación de control centralizada.

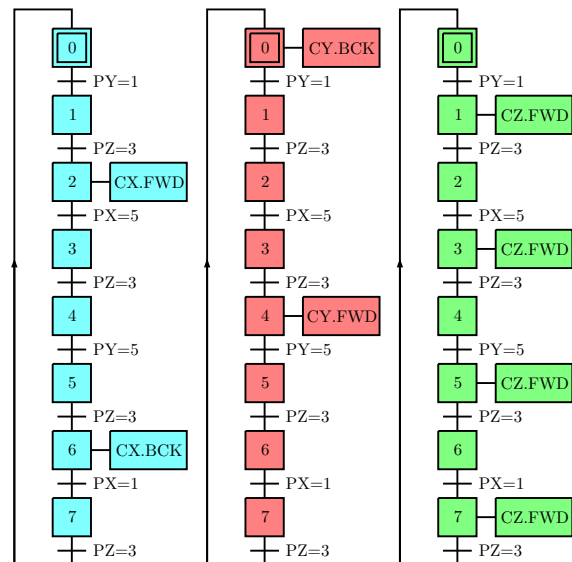


Figura 10: Distribución en tres Grafcets del Grafcet original presentado en la Figura 7.

mos de control de forma distribuida, siendo estos ejecutados en todos los dispositivos simultáneamente. Sobre la transmisión de datos, esta distribución implica que los valores de posición de los ejes ahora tienen que ser transmitidos a todos los dispositivos, a diferencia del caso anterior, en el que se transmitían todos a un solo dispositivo. Sin embargo, las acciones de control resultantes se aplican directamente dentro del mismo dispositivo, no requiriendo así transmisión de las mismas. En el caso anterior, las acciones de control debían ser transmitidas a los dispositivos pertinentes.

Por otra parte, en el caso de modificarse la aplicación de control se deberían modificar los tres bloques de funciones, a diferencia del caso anterior, en el que solo se modificaría un bloque. Esto,

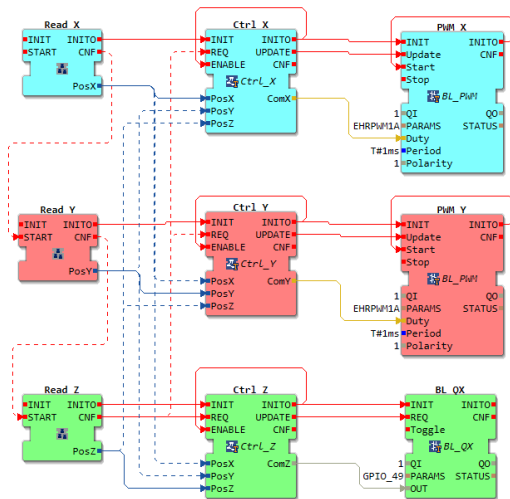


Figura 11: Implementación en 4DIAC de la aplicación de control distribuida.

desde el punto de vista de la flexibilidad y reconfigurabilidad del *software* de control, supone un claro inconveniente.

#### 4.3. Implementación 3: algoritmo centralizado y modular

Las implementaciones 1 y 2 se realizaron a partir de un modelo de Grafcet único que contiene tanto el control lógico secuencial como las acciones concretas a desarrollar por cada eje. Este enfoque es práctico para la aplicación concreta ya que el funcionamiento de cada MDL es sencillo, sin embargo, para otras máquinas o módulos las acciones pueden ser más complejas.

Para la implementación 3 consideraremos el modelo jerárquico presentado en la sección 3 en el que se separa el funcionamiento genérico de un MDL del control secuencial que coordina la operación de la máquina. El Grafcet que describe el funcionamiento de un MDL (Figura 6) se ha implementado mediante un bloque de funciones básico y, junto con los bloques de funciones encargados de obtener la posición del eje y actuar sobre el mismo (READ y PWM) se han encapsulado en una subaplicación. Esta subaplicación, que tiene como entrada la posición de destino a la que debe ir el eje y como salida la variable booleana *Done*, puede ser considerada como un *driver* del MDL.

Por otro lado, el Grafcet que describe el control secuencial (Figura 5) se implementará de forma centralizada en un único dispositivo, aunque evidentemente, las acciones serán desarrolladas por los dispositivos de control de cada módulo. Esto se ha destacado en la Figura 12 coloreando las acciones que afectan a cada uno de los dispositivos con su color respectivo.

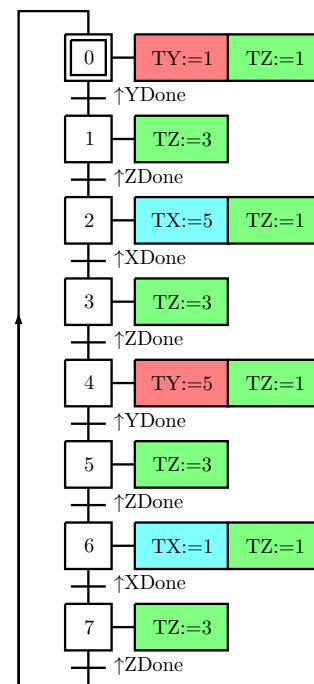


Figura 12: Modelo de Grafcet jerárquico (Figura 5) indicando la distribución de las acciones.

La aplicación en 4DIAC que implementa este control se presenta en la Figura 13, en la que cada subaplicación de los MDL se ha mapeado en su respectivo dispositivo. Sin embargo, como en el primer caso, el bloque *Ctrl\_Log\_Centr* que implementa el modelo de Grafcet de la Figura 12 puede ser mapeado en cualquier dispositivo, y en este caso se ha asignado a la BeagleBone Black que controla el MDL del eje Z.

Esta implementación modular favorece el reemplazo de los módulos ya que la aplicación a desarrollar no cambia, con lo cual, si se aporta el *driver* correspondiente al nuevo módulo los cambios en la aplicación son mínimos.

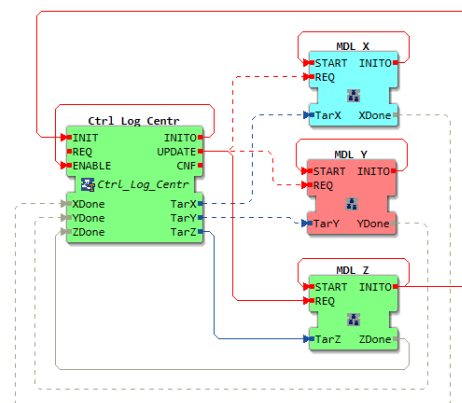


Figura 13: Implementación de la aplicación modular y con algoritmos centralizados.

#### 4.4. Implementación 4: algoritmo distribuido y modular

La aplicación del apartado anterior presenta el algoritmo de control secuencial centralizado en un solo dispositivo. Sin embargo, este puede ser distribuido entre los diferentes dispositivos encargados del control de los módulos. Para ello partimos del diagrama de Grafcet propuesto en la Figura 12. Tal y como se ha visto en la Sección 4.2, este diagrama de Grafcet se puede dividir en tres diagramas con la misma estructura (etapa y transiciones), pero cada uno de ellos solo con las acciones que se deben desarrollar en cada dispositivo. En la Figura 14 se recogen los tres diagramas de Grafcet que permiten obtener una aplicación distribuida.

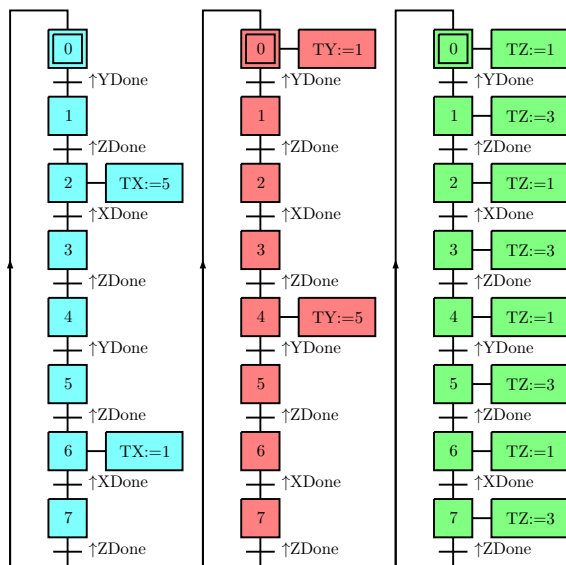


Figura 14: Distribución en tres Grafcets del Grafcet modular centralizado de la Figura 12.

Cada uno de estos diagramas de Grafcet se ha implementado en un bloque de funciones básico, llamados *Ctrl\_Log\_X*, *Ctrl\_Log\_Y* y *Ctrl\_Log\_Z*, y se han mapeado en su correspondiente dispositivo como se muestra en la aplicación de la Figura 15.

Respecto al control de cada uno de los MBL, se mantienen las subaplicaciones que implementan el control como se modela en la Figura 6.

En la aplicación resultante los datos sobre el estado de los ejes, los booleanos “Done”, se transmiten entre todos los dispositivos, sin embargo, la posición de destino a transmitir a cada eje queda dentro del propio dispositivo. Esto mismo sucedía en el segundo caso mostrado. Sin embargo, a diferencia de aquella implementación, si en esta se desea modificar la aplicación, por ejemplo para cambiar las posiciones de un eje en las que la máquina tiene que hacer las operaciones, solo

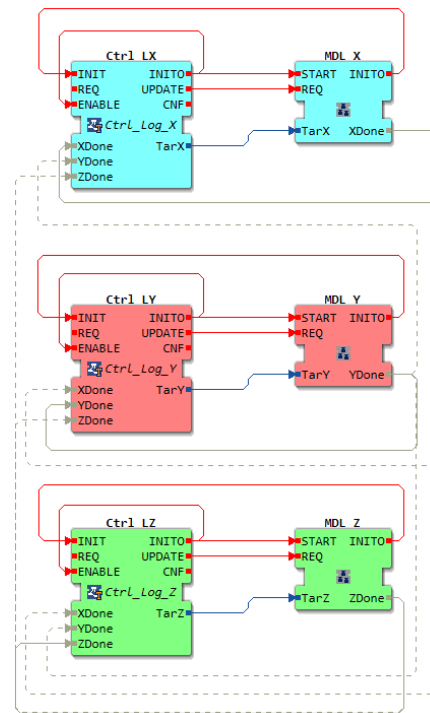


Figura 15: Implementación de la aplicación modular distribuida.

es necesario modificar las posiciones de destino de dicho eje, quedando el resto de bloques intactos.

Además, como en el caso modular centralizado, cada módulo puede ser reemplazado o modificado, modificando sus respectivos *drivers*, sin tener que alterar los algoritmos de control presentados en la Figura 14.

## 5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentan diferentes implementaciones del *software* de control en la norma IEC 61499 a partir de una descripción funcional en modelos de Grafcet. Se considera un caso de estudio que consiste en una máquina compuesta por tres módulos de desplazamiento lineal controlados cada uno de ellos por tarjetas independientes.

Dos modelos de Grafcet han sido propuestos, uno de ellos con una concepción más centralizada del diseño de sistemas secuenciales y otro centrado en una concepción más modular. Estos modelos han servido de base para la implementación de las aplicaciones en la norma IEC 61499, proponiéndose dos implementaciones por cada modelo, y centrandó la atención en la distribución de los algoritmos de control que permite esta norma.

El estudio de las cuatro implementaciones permite hacer las siguientes observaciones. En cuanto a la distribución de las funcionalidades de la máqui-

na, en el caso del modelo mediante Grafcet único, la función de los dispositivos de control de cada módulo se limita a la lectura de sensores y activación de salidas. Por otro lado, el modelo jerárquico permite, además de las operaciones relacionadas con sensores y actuadores, definir en el dispositivo de control de cada módulo su comportamiento genérico, que consiste en moverse hacia las posiciones indicadas. En ambos modelos, el código que define el comportamiento secuencial del la máquina puede ser o no distribuido entre los dispositivos de control de cada módulo. Esta distribución se consigue replicando la estructura del modelo de Grafcet en cada dispositivo, pero incluyendo únicamente las acciones correspondientes a cada uno.

Podemos concluir que el modelo de Grafcet influye en el *software* de control obtenido mediante la norma IEC 61499. En particular, el caso presentado se beneficia de las ventajas del diseño basado en componentes a través de la implementación del modelo de Grafcet jerárquico, ya que los módulos de desplazamiento lineal se pueden identificar claramente como componentes. Sin embargo, al tratarse de una aplicación donde los diferentes módulos deben interactuar en múltiples ocasiones durante un ciclo de operación, la distribución de los algoritmos implica un intercambio de datos constante entre los módulos de control. Estas características de los sistemas y de las aplicaciones deben ser tenidas en cuenta en el diseño e implementación de los sistemas de automatización.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universitat Jaume I con nº de proyecto 18I411-UJI-B2018-39 y por la CEICE con nº de beca ACIF/2018/244.

### English summary

## GRAFCET MODELS AND DISTRIBUTED APPLICATIONS IN IEC 61499 STANDARD. A CASE STUDY.

### Abstract

*In this work a case study is presented in which the behaviour of a modular machine is modeled with different Grafcet models and the control software is implemented according to the standard IEC 61499 that enhances the design of distributed applications. The proposed models take into account different degrees of modularity of the components and, based on these models, different implementations are proposed, seeing how the models influence the distribution of the control algorithms.*

**Keywords:** Grafcet, IEC 61499, DCS

### Referencias

- [1] René David and Hassane Alla. *Discrete, continuous, and hybrid Petri nets*, volume 1. Springer, 2005.
- [2] Eclipse 4diac. Eclipse 4diac - the open source environment for distributed industrial automation and control systems, 2020.
- [3] IEC. IEC 61499: Function blocks for industrial-process measurement and control systems, 2000.
- [4] IEC. IEC 60848: GRAFCET specification language for sequential function charts, 2002.
- [5] IEC. IEC 61131 - programmable controllers, part 3: Programming languages, 2013.
- [6] Italia Jiménez, Ernesto López, and Antonio Ramírez. Synthesis of ladder diagrams from Petri nets controller models. In *Proceeding of the 2001 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC'01)*, pages 225–230. IEEE, 2001.
- [7] Robert Julius, Max Schürenberg, Frank Schumacher, and Alexander Fay. Transformation of GRAFCET to PLC code including hierarchical structures. *Control Engineering Practice*, 64:173–194, 2017.
- [8] Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez, Bianca Wiesmayr, and Alois Zoitl. Distributed implementation of Grafquets through IEC 61499. In *2020 25th IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation*, 2020.
- [9] Frank Schumacher and Alexander Fay. Formal representation of GRAFCET to automatically generate control code. *Control Engineering Practice*, 33:84–93, 2014.
- [10] Alois Zoitl and Robert W. Lewis. *Modelling control systems using IEC 61499*, volume 95 of *IET Control engineering series*. IET, London, 2. ed. edition, 2014.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# MODELADO, CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE FRÍO CON ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Luis F. Acedo, Manuel G. Satué, Manuel R. Arahal,  
Carlos Vivas, Manuel G. Ortega  
{lacedo, mgarrido16, arahal, vivas, mortega}@us.es

## Resumen

*En este artículo se presenta el modelado de un sistema de abastecimiento de energía frigorífica basado en enfriadoras de agua refrigeradas por aire, al que se le ha añadido un sistema de almacenamiento de energía. Con ello se pretende satisfacer la demanda de frío de una gran instalación. El modelado de cada uno de los elementos se ha integrado en Simscape a fin de poder simular la planta completa. En el simulador se ha supuesto el sistema controlado a bajo nivel, de tal manera que es capaz de recibir consignas de caudales desde un optimizador a un nivel jerárquicamente superior. Finalmente, se ha propuesto un problema de optimización mixto no lineal con variables enteras asociadas al funcionamiento de partes de la instalación, de forma que se optimice el coste económico de la generación del frío; y se han presentado resultados de simulación que avalan el buen funcionamiento del optimizador.*

**Palabras clave:** Eficiencia energética, optimización, sistemas de refrigeración.

## 1. INTRODUCCIÓN

Muchas aplicaciones requieren refrigeración, ya sea a escala industrial como mercados, fábricas de procesamiento de alimentos, etc. o para edificios de diferentes tipos como hospitales, oficinas, etc. En la actualidad, el consumo de energía eléctrica debido a la demanda de refrigeración en los edificios representa el 10 % del consumo mundial y el 20 % del consumo total de los edificios (40 % en los países desarrollados) según la Agencia Internacional de la Energía [1]. La demanda y la capacidad de refrigeración instalada continuará creciendo a medida que los países de economía emergente progresen. Sin embargo, esta creciente demanda de energía tendrá un gran impacto en el efecto invernadero y el calentamiento global. Por tanto, es de gran importancia mejorar el rendimiento de las grandes instalaciones de producción.

Las máquinas refrigeradoras de agua, o simplemente enfriadoras, son grandes máquinas que pro-

ducen agua enfriada para distribuirla a lo largo de un edificio o red de refrigeración a través de tuberías con el objetivo de enfriar el aire dentro de los edificios. Las enfriadoras pueden utilizar electricidad, gas o energía solar. La eficiencia de las enfriadoras depende del punto de funcionamiento y se expresa generalmente como una cifra asociada al mérito, como por ejemplo el coeficiente de rendimiento (COP, *coefficient of performance*) o el ratio de eficiencia energética (EER, *energy efficiency ratio*). En los sistemas en los que el agua fría alimenta las unidades de refrigeración de la instalación es habitual que más de una máquina de refrigeración se utilice en paralelo. El funcionamiento óptimo requiere una gestión en función de la demanda instantánea de refrigeración, pero en muchos casos esta gestión es semiautomática, utilizando referencias y regímenes de funcionamiento fijos. Además, la planificación es fija o inexistente, lo que va en detrimento de la eficiencia tanto de la potencia instalada como de los costes de funcionamiento. En esta situación, la automatización puede aportar políticas óptimas que produzcan ahorros económicos y beneficios para el medio ambiente.

En la literatura existen trabajos relacionados con el control y la optimización de enfriadoras e instalaciones. Bálint et al. [2] presentan un algoritmo de planificación para una única máquina enfriadora basado en un modelo predictivo de minimización del coste eléctrico que opera con un día de antelación en el mercado. Medoza-Serrano et al. [3] analizan el impacto de varios métodos de predicción y evalúan un controlador predictivo económico basado en modelo (MPC) para el sistema de climatización de un único edificio. Este trabajo también incluye almacenamiento de energía (TES, *thermal energy storage*) en el planteamiento del problema. Arahal et al. [4] han estudiado el problema de la predicción de la demanda de las máquinas enfriadoras utilizando redes hiper-gaussianas.

Este artículo se centra en el modelado, el control y la optimización de la gestión de una planta de producción de frío para una instalación que requiere una alta potencia térmica. El modelo se ha implementado utilizando el entorno de simulación



Simscape de MATLAB y contempla tres máquinas enfriadoras funcionando en paralelo, una carga térmica que simula la demanda de un edificio (hospital), un sistema de almacenamiento de energía y un *bypass* entre la entrada y la salida de la corriente de agua que enfrían las máquinas. Se han tenido en cuenta los siguientes factores: la carga térmica puede cambiar en función del uso del edificio y de la climatología, la eficiencia de las enfriadoras, COP, difiere de un punto de funcionamiento a otro en función de la carga y de las condiciones ambientales, y por último el precio de la electricidad puede fluctuar a lo largo del día. La función del TES en principio es reducir el coste eléctrico del funcionamiento del sistema de enfriamiento, pero en ciertas situaciones ambientales podría llegar a reducir la energía consumida por las máquinas enfriadoras a lo largo de un ciclo. Para obtener una planificación óptima que minimice el coste eléctrico se ha utilizado un algoritmo genético de codificación real junto con un modelo estático del sistema. La función de coste evalúa el coste de la electricidad consumida durante un horizonte temporal deslizante de predicción, teniendo en cuenta además ciertas restricciones de funcionamiento de las enfriadoras.

La organización del resto del artículo es la siguiente: en la Sección 2 se presentan las características de la planta, incluyendo el sistema de generación de agua fría, el sistema de almacenamiento térmico, y la carga de frío. En la Sección 3 se presenta el modelado de cada una de los componentes del sistema. Seguidamente, en la Sección 4 se hace referencia al control de bajo nivel, mientras que en la Sección 5 se utiliza el sistema controlado para realizar una optimización a un nivel jerárquicamente superior. En la Sección 6 se presentan algunos resultados de simulación, y finalmente, las principales conclusiones y trabajos futuros se exponen en la Sección 7.

## 2. SISTEMA

El sistema a tratar en este trabajo (véase la Figura 1) consta de tres elementos principales: un sistema de producción de frío, una carga térmica a satisfacer (edificio) y un sistema de almacenamiento de energía o TES.

El *sistema de producción de frío* está compuesto por tres enfriadoras correspondientes a los modelos RTAC 400, 300 y 250 del fabricante TRANE. Se trata de enfriadoras de agua refrigeradas por aire (véase la Figura 2). Estos modelos tienen una potencia nominal aproximada de 1400, 1060 y 834 kW térmicos de enfriamiento a plena carga respectivamente. En estas condiciones tienen un COP de 2.8 (incluyendo la potencia eléctrica de los com-

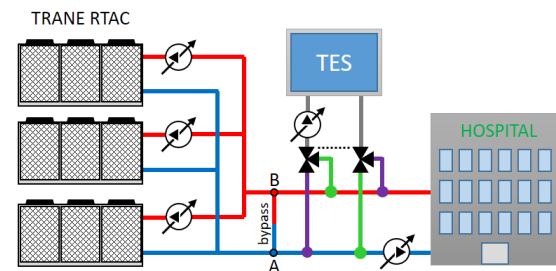


Figura 1: Diagrama de la planta. En color verde se representa la configuración de tuberías para la descarga del TES y en color morado para la carga.

presores, ventiladores y sistemas de control). Funcionando a una carga parcial del 25 % el COP de las máquinas aumenta respectivamente a 5.8, 5.33 y 6.06. El controlador de estas máquinas permite mantener la temperatura de salida del agua enfriada en la referencia especificada, siendo  $[5, 9]$  °C el rango de temperatura en funcionamiento nominal. El caudal de agua que atraviesa cada máquina se regula mediante sendas bombas externas de caudal variable.



Figura 2: Enfriadora TRANE de la serie RTAC.

La *carga de la planta de enfriamiento* la impone un hospital. Dicha carga varía en función del nivel de ocupación del edificio, de las condiciones climáticas en el exterior, etc. La función del *bypass* (véase Figura 1) es permitir adaptar el rango de caudales que puede demandar el hospital y el rango de caudales en el que pueden funcionar las enfriadoras en los casos en los que no sean compatibles.

El *sistema de almacenamiento de energía* consiste en un tanque que contiene agua con un volumen constante e igual a  $1000 \text{ m}^3$ . Para conmutar el modo de funcionamiento del TES entre carga y descarga se utilizan dos válvulas de tres vías que permiten cambiar el punto de aspiración de la bomba de este sistema de almacenamiento, junto con el punto de vertido, según se ejemplifica en el diagrama de la Figura 1. En el caso de descarga, el agua fría del TES se vierte en la línea de agua enfriada procedente de las enfriadoras, mientras que el agua caliente procedente de la salida de la demanda se impulsa hacia el tanque. En el caso



### 3. MODELADO

### 3.1. MODELO DE LAS ENFRIADORAS

Las variables de salida del bloque que modela las enfriadoras son la temperatura de mezcla del agua refrigerada  $T_m$  y caudal másico total  $\dot{m}_T$ . Estas variables se calculan según se indica en las ecuaciones (1) y (2):

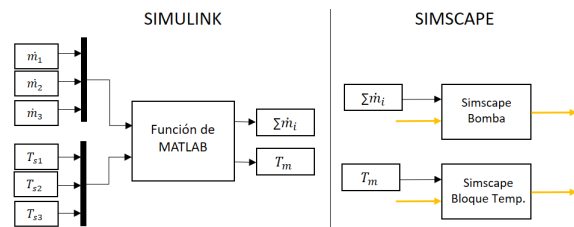
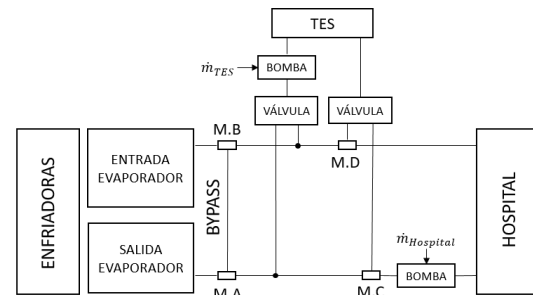


Figura 3: Conexión de las variables en Simscape.


$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^3 \dot{m}_i \cdot T_{s_i}}{\dot{m}_T} \quad (1)$$

$$\dot{m}_T = \sum_{i=1}^3 m_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

Para que estas variables puedan ser conectadas al resto del modelo en Simscape, tal como se describe en la Figura 3, se han modelado dos bloques: un bloque de temperatura y una bomba.

### 3.2. MODELO DEL BLOQUE DE TEMPERATURA

### 3.3. MODELO DE LA BOMBA

El modelo de la bomba consiste en una fuente de energía mecánica ideal, donde el caudal másico se controla por una señal física de entrada. Mantiene el caudal especificado independientemente del di-

ferencial de presión, no hay resistencia al flujo ni intercambio de calor con el entorno.

No sólo permite conectar la variable de salida de las enfriadoras  $\dot{m}_T$  en el sistema, además se utiliza para introducir el perfil de caudal másico en el TES,  $\dot{m}_{TES}$ , y en el hospital (o carga),  $\dot{m}_C$ .

### 3.4. MODELO DEL BYPASS

El *bypass* representa una conexión entre la corriente de agua enfriada por las enfriadoras y la corriente de agua caliente procedente del hospital. Se permite un flujo de caudal entre ellas en ambas direcciones, según lo requiera el sistema para cumplir con el balance de conservación de masa.

El modelo del *bypass* consiste en dos bloques de mezcla, M.A y M.B en la Figura 4, donde cada uno de estos bloques establece un balance de masa [kg/s] y energía,  $\phi$  [kW], entre sus puertos de entrada/salida A, B y C según las ecuaciones (3) y (4).

$$\dot{m}_A + \dot{m}_B + \dot{m}_C = 0 \quad (3)$$

$$\phi_A + \phi_B + \phi_C = 0 \quad (4)$$

### 3.5. MODELO DEL SUBSISTEMA TES

Para la inclusión en el simulador del subsistema de almacenamiento de energía (TES) es necesario modelar, no solo el propio TES, sino también los elementos necesarios para la carga y descarga del mismo, esto es, una bomba y una válvula de tres vías.

#### 3.5.1. Bomba

Como se indicó en la sección 3.3, la bomba permite aspirar el perfil de caudal de carga del TES,  $\dot{m}_{TES}$ , procedente de la corriente de agua enfriada por las enfriadoras o de la corriente de agua caliente procedente del hospital, según la dirección que indique la válvula de tres vías.

#### 3.5.2. Válvula de tres vías

Para realizar de manera simultánea el funcionamiento del TES entre carga y descarga, es necesario una válvula de dirección de tres vías que, a través de una señal física, desvía el flujo de agua en una dirección u otra.

#### 3.5.3. Tanque de almacenamiento

El modelo se basa en la acumulación de masa y energía en un depósito que contiene un volumen constante de agua. El depósito presenta un puerto de entrada y otro de salida, a través de los cuales

fluye el agua. La masa de agua varía con la densidad, propiedad que es función de la presión y la temperatura.

Se supone una resistencia al flujo despreciable entre la entrada y el interior. Por lo tanto, la presión en el interior es igual a la presión en la entrada.

#### Balance de masa

El volumen de la cámara es fijo, pero la compresibilidad del fluido nos dice que su masa puede cambiar con la presión y la temperatura. La acumulación de masa en el depósito debe ser igual al caudal que atraviesa los puertos de entrada y salida:

$$\left( \frac{1}{\beta} \frac{dp}{dt} - \alpha \frac{dT}{dt} \right) \rho V = \dot{m}_A + \dot{m}_B \quad (5)$$

donde el término de la izquierda es la tasa de acumulación de masa, y:

- $p$  es la presión [MPa],
- $T$  es la temperatura [K],
- $\beta$  es la constante isotérmica [MPa],
- $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica [K<sup>-1</sup>],
- $\dot{m}_A$  es el caudal másico [kg/s].

#### Balance de energía

La tasa de acumulación de energía en el volumen de fluido deberá ser igual a la suma de los caudales de energía en los puertos de entrada y salida:

$$\left[ \left( \frac{h}{\beta} - \frac{T\alpha}{\rho} \right) \frac{dp}{dt} + (C_p - h\alpha) \frac{dT}{dt} \right] \rho V = \phi_A + \phi_B \quad (6)$$

Donde el término de la izquierda es la tasa de acumulación de energía, y:

- $h$  es la entalpía [kJ/kg],
- $\rho$  es la densidad [kg/m<sup>3</sup>],
- $C_p$  es el calor específico [kJ/kg · K],
- $V$  es el volumen del depósito [m<sup>3</sup>],
- $\phi$  es el caudal de energía [kW].

### 3.6. MODELO DEL HOSPITAL

El modelado del bloque de carga se realiza mediante un modelo tipo *caja negra*. Para ello, se utiliza una conducción (tubería) por la que circula el agua y, además, por donde intercambia calor con el entorno.

Por tanto, al hospital llega un caudal de carga,  $\dot{m}_C$ , determinado por una bomba. En el momento en que el agua circula por la tubería, esta permite el intercambio de calor con el entorno, a través de un puerto térmico. Los perfiles de carga del

hospital se programan para que sean variables con el tiempo, y se conectan con el bloque a través de una señal física.

#### 4. CONTROL DE BAJO NIVEL

Para la gestión del sistema es necesario manipular adecuadamente las diferentes bombas y válvulas a fin de controlar los caudales que circulan por las distintas tuberías del sistema; para lo cual se supone que se dispone de los elementos de medida (caudalímetros) necesarios.

Este control suele ser relativamente rápido (dinámica en bucle cerrado del orden de pocas decenas de segundos) comparado con el tiempo de muestreo en el que se va a ejecutar la optimización del sistema (del orden de una hora), el cual proporcionará consignas de caudales a este control de bajo nivel.

Por tanto, teniendo en cuenta la jerarquización y las distintas escalas de tiempo del optimizador y de este nivel de control, en el simulador se ha considerado que el sistema ya está controlado a este nivel. Esto evitará simular dinámicas rápidas que no afectan significativamente al resultado de la optimización, y que sin embargo ralentizarían significativamente la ejecución de las simulaciones.

#### 5. OPTIMIZACIÓN

Esta capa de control se encarga de enviar referencias a los controladores de bajo nivel que accionan las bombas de las enfriadoras, la bomba y válvulas que gobiernan el TES, y la bomba que impulsa el agua enfriada por el circuito del edificio. Para ello utiliza un modelo matemático estático de la planta, el cual se simula en una ventana de tiempo deslizante asociada al horizonte de predicción,  $N_p$ , para obtener un coste económico asociado al consumo eléctrico de las máquinas en la ventana de tiempo actual.

El problema consiste en decidir para cada periodo de tiempo en el que se divide el horizonte de predicción, por ejemplo 24 horas con intervalos de una hora, el punto de trabajo de cada una de las enfriadoras de la planta, así como del TES y la carga. El punto de trabajo está definido por las referencias de temperatura a la salida del evaporador de cada máquina,  $T_{s_i}$ , los respectivos caudales másicos,  $\dot{m}_i$ , tres *variables binarias* que indican si las máquinas están encendidas o apagadas, el caudal másico que circula por la carga,  $\dot{m}_C$ , y por el TES y *otras dos variables binarias* que indican si el TES está funcionando y el modo en el que está funcionando (carga o descarga). El objetivo es *proporcionar la potencia de enfriamiento*

*suficiente para cubrir la demanda con el mínimo coste de electricidad posible*, puesto que se considera una tarifa eléctrica variable con la hora del día. Es necesario además contar con predicciones de la demanda de potencia de refrigeración y de la temperatura ambiente en el horizonte de predicción.

El optimizador, en principio, solo considera el consumo eléctrico de las máquinas enfriadoras. El coste económico será el producto de la potencia total consumida por las máquinas,  $P$ , multiplicado por la tarifa correspondiente,  $Tar$ , según la siguiente ecuación:

$$J(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^{N_p} \left( \sum_{j=1}^3 P_k \cdot Tar_k \right) \quad (7)$$

Con las definiciones dadas, el problema de optimización se puede definir de forma matemática como:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & J(\mathbf{x}) \\ \text{s.a.} \quad & x_i \leq \mathbf{x} \leq x_s \\ & \dot{Q}(\mathbf{x}) = \dot{Q}_L \end{aligned} \quad (8)$$

donde la variable independiente  $\mathbf{x}$  es un vector que contiene las trayectorias desde  $k = 1$  hasta  $k = N_p$  que definen el punto de trabajo del sistema dado por (9).

$$\begin{aligned} \mathbf{x} = [ & \dot{m}_C|_1^{N_p}, \dot{m}_{TES}|_1^{N_p}, \dot{m}_1|_1^{N_p}, \dot{m}_2|_1^{N_p}, \dot{m}_3|_1^{N_p}, \\ & T_{s1}|_1^{N_p}, T_{s2}|_1^{N_p}, T_{s3}|_1^{N_p}, Eon_1|_1^{N_p}, Eon_2|_1^{N_p}, \\ & Eon_3|_1^{N_p}, TESon|_1^{N_p}, TES_{desc}|_1^{N_p} ] \end{aligned} \quad (9)$$

En la definición del problema de optimización se han utilizado las siguientes restricciones:

- $x_i \leq \mathbf{x} \leq x_s$ , para limitar las variables independientes a los límites físicos impuestos por la planta, como los caudales mínimos y máximos que pueden circular por las enfriadoras, la temperatura mínima y máxima del agua a la salida del evaporador, etc.
- $\dot{Q}(\mathbf{x}) = \dot{Q}_L$ , para obligar a que la demanda sea satisfecha en cada periodo en que se divide el horizonte de predicción.

Además se han considerado otras restricciones *suaves* en la función de coste:

- se penaliza que la temperatura del agua de entrada al evaporador de una enfriadora sea menor que la temperatura de salida.

- se penaliza que no circule caudal por ninguna de las máquinas.
- se penaliza que la temperatura del TES supere un cierto valor.
- se penaliza que el salto de temperatura entre la entrada y la salida del evaporador de cada máquina salga de un cierto rango preestablecido.

Estas penalizaciones consisten en la adición de un coste extra que aumenta exponencialmente cuanto más se infrinja la restricción asociada.

Por la naturaleza de este problema de optimización (un número elevado variables de decisión, existencia probable de mínimos locales, no disponer del Jacobiano del sistema e incluir variables de decisión binarias) se ha seleccionado un algoritmo genético de codificación real [5] para resolver el problema. El algoritmo utiliza el operador de cruce *BLX-alpha* [6] y selección por torneo.

## 6. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A fin de mostrar la eficacia del proceso de optimización propuesto, en esta sección se presentan algunos resultados de simulación.

Para el diseño del experimento se han considerado tres días consecutivos con un perfil de carga similar. En la Figura 5 se muestra la carga frigorífica demandada por el edificio, junto a las cargas proporcionadas por el conjunto de enfriadoras así como por el TES. Las potencias negativas del TES significan que éste se está cargando, y las positivas que se está descargando.

Para el proceso de optimización se han establecido tres tramos de tarifas eléctricas: un tramo *valle* (en azul), otro *punta* (en rojo); y un tercero *llano* (en verde). Se ha utilizado una ponderación económica simulada en las tarifas con un ratio de 2 a 1 del tramo llano respecto al valle, y de 5 a 1 del tramo punta respecto al valle.

De los resultados cabe destacar como el optimizador claramente hace uso de la descarga del TES en los tramos punta, mientras que aprovecha los tramos llanos y valles para volverlo a cargar.

Finalmente, como puede observarse del balance de potencias, la carga proporcionada por las enfriadoras y el TES es idéntica a la carga demandada por el edificio, por lo que se consigue satisfacer dicha demanda.

En la Figura 6 se muestran los perfiles de temperatura de los distintos puntos del sistema, además de

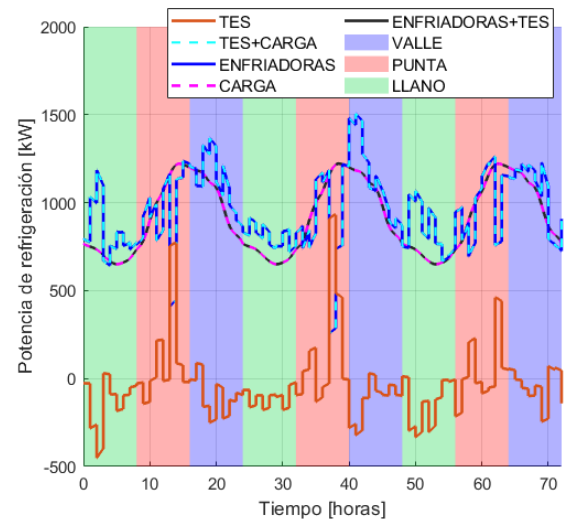


Figura 5: Potencia de refrigeración de las enfriadoras.

mostrar la temperatura ambiente simulada (días calurosos de verano con temperatura máximas del orden de 40 °C).

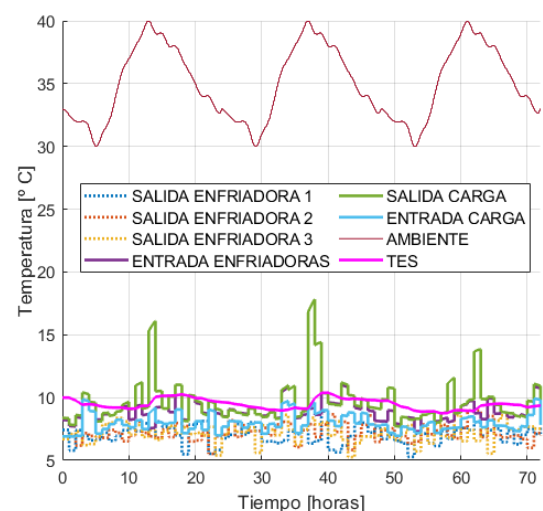


Figura 6: Temperaturas.

## 7. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el modelado, control y optimización de un sistema de abastecimiento de energía frigorífica para atender a la demanda de frío de una gran instalación (como puede ser un hospital), a la cual se le ha añadido un sistema de almacenamiento de energía térmica (TES).

Para la simulación del sistema se ha utilizado la herramienta Simscape bajo MATLAB, que permite la fácil interconexión de distintos elementos del

sistema. Si bien, la mayor parte de estos elementos se han tenido que implementar utilizando *Matlab functions* al tener que incorporar características no incluidas en las bibliotecas habituales de Simscape.

El simulador se ha implementado suponiendo cerrado el control de bajo nivel, de tal manera que el simulador recibe principalmente consignas de caudales. Se supone que la dinámica en bucle cerrado de este control es suficientemente rápida como para no verse afectada por el tiempo de muestreo del optimizador, que está a un nivel jerárquicamente superior.

Se ha propuesto un problema de optimización mixto no lineal con variables enteras (asociadas al funcionamiento o no de partes del sistema), donde se pretende optimizar el coste económico de la generación de la carga frigorífica atendiendo a distintas tarifas eléctricas a lo largo del día. La optimización se ha resuelto utilizando algoritmos genéticos basados en el operador de cruce *BLX-alpha* y selección por torneo.

Finalmente, se han presentado resultados de simulación que muestran la eficacia del algoritmo propuesto, no solo satisfaciendo la carga frigorífica demandada, sino también descargando el TES en tramos de alto precio de la energía eléctrica y volviéndolo cargar en tramos donde ésta es más barata.

### Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada como Proyecto RTI2018-101897-B-I00 por FEDER / Ministerio de Ciencia e Innovación – Agencia Estatal de Investigación.

### English summary

## MODELLING, CONTROL AND OPTIMIZATION OF A COOLING PLANT WITH A THERMAL STORAGE SYSTEM

### Abstract

*This article presents the modeling of a refrigeration energy supply system based on air-cooled water chillers, to which an energy storage system (TES) has been added. This is to satisfy the cold demand of a large installation. The modeling of each of the elements has been integrated into Simscape in order to be able to simulate the complete plant. In the simulator, the low-level controlled system has been assumed,*

*in such a way that it is capable of receiving flow references from an optimizer at a hierarchically higher level. Finally, a non-linear mixed optimization problem has been proposed with integer variables associated with the operation of parts of the installation, in such a way that the economic cost of cold generation is optimized; and simulation results have been presented that support the good performance of the optimizer.*

**Keywords:** Energy efficiency, optimization, cooling plants.

### Referencias

- [1] IEA (2018), The Future of Cooling, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
- [2] Bálint, R., Fodor, A., Hnagos, K.M., Magyar, A., (2018) Cost-optimal model predictive scheduling of freezers, Control Engineering Practice (80), pp. 61-69.
- [3] Mendoza-Serrano, D.I., Chmielewski, D.J., (2014) Smart grid coordination in building HVAC systems: EMPC and the impact of forecasting, Journal of Process Control (24), pp. 1301-1310.
- [4] Arahál, M.R., Ortega, M.G., Satué, M.G., (2021) Chiller Load Forecasting Using Hyper-Gaussian Nets, Energies, 14, 3479.
- [5] Herrera, F., Lozano, M., Sánchez, A. M. (2007). Algoritmos Genéticos con Codificación Real: Operadores de Cruce Híbridos Basados en Entornos con Múltiples Descendientes, Actas del Congreso MAEB, Vol. 7, pp. 827-834.
- [6] Herrera, F., Lozano, M., Pérez, E., Sánchez, A. M., Villar, P. (2002). Multiple crossover per couple with selection of the two best offspring: an experimental study with the BLX- $\alpha$  crossover operator..., Advances in Artificial Intelligence—IBERAMIA, pp. 392-401.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# RENTABILIDAD DE BATERÍAS EN APLICACIONES FV PARA EL SECTOR COMERCIAL BAJO OPERACIÓN BASADA EN MPC

P. Ayuso, E. Pérez, J. Cardo-Miota y H. Beltran

Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño, Universitat Jaume I,  
Castelló de la Plana, España *pereze@uji.es* // ORCID: 0000-0001-8466-3941

## Resumen

*Este trabajo define una estrategia de operación basada en Control Predictivo basado en Modelo (Model Predictive Control, MPC) para instalaciones fotovoltaicas con baterías instaladas en el sector terciario/comercial. La propuesta incluye modelos de predicción de la irradiancia a futuro y modelos de consumo de las cargas basados en técnicas de agrupamiento. La operación del sistema se simula durante un año entero con datos de irradiancia y consumo reales para un centro comercial situado al sur de España. Finalmente, se analiza la rentabilidad del sistema, en términos de vida útil de las baterías requeridas para lograr el retorno de la inversión realizada, para diferentes combinaciones de sistema FV, tamaño de las baterías, y precios de la energía.*

**Palabras clave:** aplicaciones fotovoltaicas, control predictivo basado en modelo, mercados eléctricos, sistemas de almacenamiento de energía.

## 1. INTRODUCCIÓN

Con el continuo aumento de su cuota de mercado durante los últimos años, la fotovoltaica (FV) es hoy en día la tecnología renovable líder en MW instalados al año a nivel mundial después de superar a la energía eólica en 2016 [6]. En total, la capacidad FV global instalada a finales de 2020 es superior a 600 GW, según las estimaciones [19].

Sin embargo, las aplicaciones FV presentan varios desafíos principalmente asociados al carácter estocástico de su producción [9], aunque se han hecho varios esfuerzos en esta dirección [17]. Debido a esto y gracias a una disminución progresiva de los precios [14] de los sistemas de almacenamiento de energía, especialmente en el caso de las baterías de iones de litio (BIL), estas están comenzando a convertirse en un elemento importante en las instalaciones FV. De hecho, la combinación de FV y BIL es una solución disponible comercialmente para aplicaciones residenciales [5] y hay muchas propuestas en la literatura que se centran en varios aspectos de su funcionamiento abarcando desde el

tamaño óptimo del sistema de baterías [18] hasta la maximización del beneficio económico obtenido con su introducción [15].

Por otro lado, el uso de BIL como reserva energética para mejorar la producción de plantas FV también ha sido una línea de investigación importante. Esta mejora se puede obtener de varias formas, dependiendo de los objetivos de la propuesta: suavizado de potencia [11], control de rampa [2], control de tensión [8], entre otros.

Sin embargo, las BIL junto con plantas fotovoltaicas de tamaño intermedio, como las que podrían implementarse para un centro comercial, han recibido mucha menos atención. La falta de interés de este tipo de instalación en el sector comercial puede estar relacionada con el hecho de que las baterías siguen siendo un elemento costoso que aumenta la inversión requerida. Además, como el beneficio económico de utilizar una BIL, así como su esperanza de vida útil, es difícil de evaluar, la rentabilidad de dicha inversión puede quedar en duda.

Existen varios modelos para predecir la expectativa de vida útil de las BIL [1], [3], con diferentes enfoques entre ellas y dedicadas a diferentes químicas. Sin embargo, la mayoría de ellos están de acuerdo en que existen mecanismos de envejecimiento relacionados con el paso del tiempo (envejecimiento por calendario) y otros mecanismos relacionados con la operación (envejecimiento por ciclado). En particular, el número y la naturaleza de los ciclos (profundidad de descarga y estado de carga promedio) que experimenta la BIL, junto con la temperatura, son los factores principales para el envejecimiento por ciclado.

Este trabajo tiene como objetivo proporcionar una estimación detallada de la potencial rentabilidad económica de las instalaciones FV con BIL aplicadas en el sector comercial. Para ello, se focaliza el esfuerzo en analizar cuál debería ser la vida útil mínima de las baterías para que su instalación sea rentable, partiendo de una curva de demanda y de irradiancia conocidas. Esta información, junto con la expectativa de vida útil de la batería, debería ser suficiente para tomar las decisiones de



inversión adecuadas.

Con todo, el documento se organiza como sigue: en la sección 2 se define una estrategia de operación del sistema para determinar los ahorros brutos anuales con diferentes tamaños de instalación, tanto de la FV como de las BIL. En la sección 3 se define los modelos para la predicción de irradiancia y de perfil de carga. En la sección 4 se presentan los resultados tanto de operación del sistema como de rentabilidad de instalaciones con diferentes tamaños. Finalmente, en la sección 5 se obtienen algunas conclusiones.

## 2. OPERACIÓN DEL SISTEMA BAJO MPC

El estudio propuesto en este trabajo requiere definir de partida cómo va a operar el sistema FV con BIL.

En este sentido, hay que tener en cuenta que, para cada instante, hay dos variables incontrolables en la operación: la producción de los paneles fotovoltaicos ( $P_{FV}$ ) y el consumo de las cargas ( $P_C$ ). En general, estas potencias no serán iguales y, cuando  $P_C > P_{FV}$ , la producción de paneles deberá complementarse ya sea desde la descarga de las BIL ( $P_{BIL}$ ) o de la red eléctrica ( $P_{red}$ ). Por el contrario, cuando  $P_C < P_{FV}$ , la energía excedente puede enviarse a la BIL o venderse a red.  $P_{BIL}$  y  $P_{red}$  son, por lo tanto, variables controlables y hay que decidir si es mejor que el sistema use una u otra en cada situación.

En una estructura de precios constantes durante todo el día, en la que los precios de compra de la red son siempre más altos que los de venta pero sin cambiar ninguno de ellos a lo largo de la jornada, la estrategia óptima siempre sería cargar o descargar la BIL antes que intercambiar energía con la red.

Sin embargo, los precios cambian en diferentes períodos del día en la mayoría de los mercados de electricidad, siendo más altos en períodos de alta demanda (horas pico) y más bajos en los de baja demanda (horas valle). En este contexto, la estrategia óptima podría ser diferente de la descrita anteriormente ya que se puede plantear el caso de que sea conveniente ahorrar energía en la BIL durante las horas valle si esta se va a demandar durante los períodos pico.

Este tipo de problema, que requiere tener en cuenta el efecto que tienen las acciones actuales en la optimización y en la capacidad de cumplir con las restricciones en el futuro es muy adecuado para la aplicación del MPC.

MPC [4] es una técnica de diseño de controlado-

res basada en una estrategia de optimización en la que los resultados futuros para un horizonte  $N$  dado, llamado horizonte de predicción, se predicen en cada instante utilizando modelos de proceso. Estas salidas predichas dependen de las señales de control futuras, que se calculan optimizando un criterio determinado y cumpliendo un conjunto de restricciones. Aunque se calcula una secuencia completa de señales de control futuras, solo la primera se envía efectivamente al proceso, porque en el siguiente periodo de muestreo estará disponible nueva información. Esto se conoce como horizonte móvil.

Para el sistema FV con baterías, el criterio de optimización está determinado principalmente por el equilibrio económico de la energía intercambiada con la red. Sin embargo, como se discutirá más adelante, también es conveniente incluir la potencia inyectada o extraída de la BIL. En cuanto a las restricciones, debe cumplirse el equilibrio de potencia, incluidas las potencias del sistema FV, la BIL, la red y las cargas; también el estado de carga (SOC, por sus siglas en inglés) de la BIL debe mantenerse dentro de sus límites, así como la potencia intercambiada con la red y por la BIL que también están limitadas.

Debe tenerse en cuenta que la producción de los paneles FV y el consumo de las cargas a futuro deben conocerse de alguna manera para garantizar el cumplimiento del equilibrio de potencia. Sin embargo, estas variables son imposibles de conocer con antelación, ya que dependen principalmente de la irradiación futura del sol y del comportamiento de los consumidores, respectivamente. Por lo tanto, se emplearán los modelos de predicción correspondientes ( $\hat{P}_{FV}$  y  $\hat{P}_C$ ) descritos en la siguiente sección.

Con todas estas consideraciones, y siguiendo un enfoque similar a [12], el problema de optimización a resolver bajo un MPC se puede formular de la siguiente manera:

$$\min J_N = \sum_{k=0}^N T(c_{red}(t+k)P_{red}(t+k) + c_{BIL}(t+k)|P_{BIL}(t+k)|) \quad (1)$$

Sujeto para  $k = 0 \dots N$  a:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{FV}(t+k) + P_{red}(t+k) + P_{BIL}(t+k) &= \hat{P}_C(t+k) \\ E_{BIL}(t+k+1) &= E_{BIL}(t+k) - T \cdot \eta \cdot P_{BIL}(t+k) \\ E_{BIL,min} &\leq E_{BIL}(t+k) \leq E_{BIL,max} \\ P_{BIL,min} &\leq P_{BIL}(t+k) \leq P_{BIL,max} \\ P_{red,min} &\leq P_{red}(t+k) \leq P_{red,max} \end{aligned}$$

donde:

- $T$  es el periodo de muestreo.
- $\hat{P}_{FV}(t+k)$  y  $\hat{P}_C(t+k)$  son las predicciones para  $P_{FV}(t+k)$  y  $P_C(t+k)$ , respectivamente.
- $P_{red}(t+k)$  es la potencia intercambiada con la red en el instante  $t+k$ , con  $P_{red}(t+k) > 0$  cuando se compra energía.
- $P_{BIL}(t+k)$  es la potencia intercambiada con las BIL en el instante  $t+k$ , con  $P_{BIL}(t+k) > 0$  cuando se descarga.
- $E_{BIL}(t+k)$  es la energía disponible en las BIL en el instante  $t+k$ .
- $P_{BIL,min}$ ,  $P_{BIL,max}$ ,  $P_{red,min}$  y  $P_{red,max}$  son los límites inferior y superior para la potencia intercambiada con la BIL y la red. Estas restricciones se deben a las limitaciones de los convertidores de potencia y, por lo tanto:  $P_{BIL,min} = -P_{BIL,max}$  y  $P_{red,min} = -P_{red,max}$ .
- $E_{BIL,min}$  y  $E_{BIL,max}$  son los límites entre los cuales se debe mantener el SOC de las BIL.
- $c_{BIL}(t+k)$  es el coste de intercambiar energía con las BIL, usado para ajustar el comportamiento del sistema.
- $c_{red} = \begin{cases} C_{compra}(h) & \text{para } P_{red} > 0 \\ C_{venta}(h) & \text{para } P_{red} < 0 \end{cases}$  son los precios de electricidad, los cuales cambian de valor en función de la hora del día  $h$  y de la tarifa, con  $c_{compra}(h) > c_{venta}(h)$  para cualquier  $h$ .
- $\eta = \begin{cases} \frac{1}{\eta_{crg}} & \text{para } P_{BIL} > 0 \\ \eta_{dcrg} & \text{para } P_{BIL} < 0 \end{cases}$ , siendo  $\eta_{dcrg}$  y  $\eta_{crg}$  las eficiencias de descarga y carga, respectivamente.

Aunque la mayoría de las ecuaciones del problema anterior son lineales, sigue siendo un problema complejo de resolver, ya que presenta dos funciones por partes,  $c_{red}$  y  $\eta$ , y una función no lineal,  $|P_{BIL}(t+k)|$ . Este tipo de funciones pueden tratarse mediante la introducción de variables binarias, que conducen a una optimización lineal entera mixta (MILP, por sus siglas en inglés), computacionalmente compleja para el tamaño del problema. Por lo tanto, se propone una formulación diferente.

La idea es reemplazar  $P_{red}$  por dos nuevas variables,  $P_{compra}$  y  $P_{venta}$ , para los casos en que es positivo o negativo. Del mismo modo,  $P_{BIL}$  es reemplazada por  $P_{crg}$  y  $P_{dcrg}$ , y el coste de la energía intercambiada por las BIL,  $c_{BIL}$ , también es sustituido por  $c_{crg}$  y  $c_{dcrg}$ .

Además, con la formulación anterior, la optimización podría presentar múltiples soluciones con el mismo mínimo, debido a la naturaleza constante de los costes por periodos horarios. Para evitar esto, se introducen dos secuencias de ponderación,  $\lambda_c(k) = \alpha^k$  y  $\lambda_d(k) = \beta^k$ .  $\lambda_c(k)$ , con  $\alpha = 0,999$ , pondera a  $P_{crg}$  de manera que, en situaciones iguales, favorezca la carga lo más tarde posible. Por el contrario,  $\lambda_d(k)$ , con  $\beta = 1,001$ , pondera a  $P_{dcrg}$  para favorecer la descarga lo antes posible.

Con los cambios introducidos, el problema de optimización pasa a ser:

$$\begin{aligned} \min J_N = & \sum_{k=0}^N T(c_{compra}(t+k)P_{compra}(t+k) \\ & - c_{venta}(t+k) \cdot P_{venta}(t+k) \\ & + \lambda_c(k) \cdot c_{crg}(t+k) \cdot P_{crg}(t+k) \\ & + \lambda_d(k) \cdot c_{dcrg}(t+k) \cdot P_{dcrg}(t+k)) \quad (2) \end{aligned}$$

Sujeto para  $k = 0 \dots N$  a:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{FV}(t+k) + P_{compra}(t+k) + P_{dcrg}(t+k) \\ = \hat{P}_C(t+k) + P_{venta}(t+k) + P_{crg}(t+k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{BIL}(t+k+1) = E_{BIL}(t+k) \\ + T(\eta_{crg} \cdot P_{crg}(t+k) - \frac{1}{\eta_{dcrg}} \cdot P_{dcrg}(t+k)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{BIL,min} \leq E_{BIL}(t+k) \leq E_{BIL,max} \\ 0 \leq P_{compra}(t+k) \leq P_{red,max} \\ 0 \leq P_{venta}(t+k) \leq -P_{red,max} \\ 0 \leq P_{crg}(t+k) \leq P_{BIL,max} \\ 0 \leq P_{dcrg}(t+k) \leq -P_{BIL,min} \\ P_{compra}(t+k) \cdot P_{venta}(t+k) = 0 \\ P_{crg}(t+k) \cdot P_{dcrg}(t+k) = 0 \end{aligned}$$

Debe tenerse en cuenta que, con esta nueva formulación, la función objetivo y todas las restricciones, excepto las dos últimas, son lineales. Estas dos restricciones finales de igualdad cuadrática se introducen para evitar soluciones ilógicas del problema de optimización, como evitar que se produzca al mismo tiempo la compra y venta de energía con la red, o la carga y descarga de las BIL.

Sin embargo, a partir de la definición de la función objetivo en sí, se puede deducir que nunca habría una solución óptima del problema con  $P_{compra} \neq 0$  y  $P_{venta} \neq 0$ , incluso sin incluir la restricción cuadrática. De hecho, como  $c_{compra} > c_{venta}$ , cualquier solución con  $P_{compra} > P_{venta} > 0$  es subóptimo con respecto a  $P'_{compra} = P_{compra} - P_{venta}$  y  $P'_{venta} = 0$ . Por lo tanto, la restricción cuadrática es redundante y puede descartarse. Para obtener

este mismo comportamiento con  $P_{crg}$  and  $P_{dcr}$ , se introducen costes distintos para la carga y la descargar, ambos cercanos a 0.

Atendiendo a todas estas consideraciones, el problema de optimización se puede definir como una optimización lineal (LP, por sus siglas en inglés), que se puede resolver fácilmente con herramientas de optimización estándar.

Las secuencias de potencia obtenidas mediante LP son óptimas solo si la generación FV y el consumo real son iguales a los modelos de predicción  $\hat{P}_{FV}$  y  $\hat{P}_C$ , respectivamente. Sin embargo, en general este no será el caso y, por lo tanto, las secuencias pueden ser incluso no factibles. En un MPC, este hecho es especialmente crítico para los primeros valores de dicha secuencia, que son los que realmente se aplican. Para los casos en que esto ocurre, (normalmente porque no se alcanza el equilibrio de potencia), se decide mantener el valor de  $P_{BIL}(t)$  obtenido en la optimización y variar  $P_{red}(t)$  para que dicho balance se cumpla.

### 3. CLUSTERING DE IRRADIANCIA Y PERFIL DE CARGA

Los modelos de predicción propuestos en este trabajo están basados en un análisis de agrupamiento o “clustering”, que es una forma de agrupar los datos (en nuestro caso los perfiles horarios de  $P_{FV}$  o  $P_C$ ) de forma que los perfiles clasificados en un mismo clúster sean más similares entre sí (según un criterio específico) que a los de otros clústers. Por consiguiente, a los días clasificados dentro de cada clúster se les asigna como modelo de predicción el perfil del centroide correspondiente a su clúster.

Además, existen diferentes métodos diseñados para ayudar a encontrar el número apropiado de clústers. En este artículo se aplican los métodos más utilizados en la literatura, el método del codo [10] y el estadístico *Gap* [16]. El método del codo está basado en el algoritmo *k-means*, que divide los datos en  $k$  clústers distintos en función de la distancia euclidiana al cuadrado de los datos clasificados al centroide del clúster. Así, este método se basa en calcular, para diferentes valores de  $k$ , la suma de todas las distancias de cada grupo de datos al centroide de su clúster. Finalmente, determina gráficamente cuándo el decremento de esta suma, que desciende continuamente con  $k$ , no es lo suficientemente significativo para seguir aumentando el número de clústers. Por otro lado, el estadístico *Gap* usa la salida del algoritmo de clustering para comparar el cambio en la dispersión dentro del clúster con el esperado bajo una

distribución apropiada de referencia nula. Para la aplicación considerada en esta propuesta, se utilizan datos reales de consumo durante todo un año de un centro comercial en España. La Figura 1 representa el número óptimo de clústers para el consumo anual utilizando ambos métodos de clustering que coinciden en un número óptimo de 3 clústers.

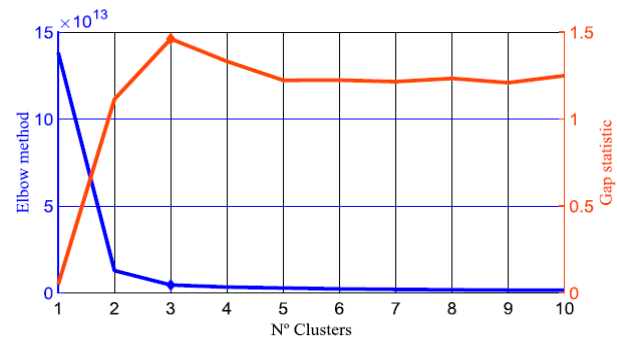


Figura 1: Número óptimo de clústers para las curvas de consumo diario de un centro comercial

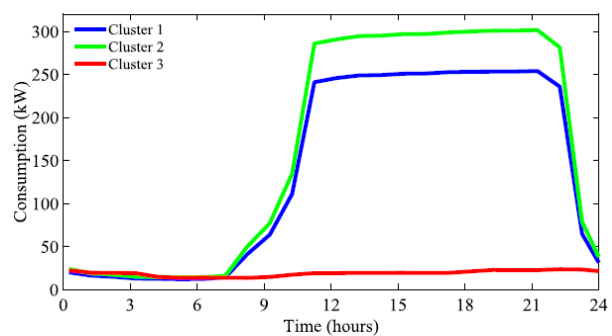


Figura 2: Clustering anual de las curvas de consumo diario de un centro comercial

La Figura 2 muestra los tres perfiles de carga del consumo anual que se utilizarán como  $\hat{P}_C$ . Esto parece un resultado lógico ya que los clústers 1 y 2 podrían representar el consumo correspondiente a días laborales de invierno y verano [13], respectivamente, mientras el clúster 3 agrupa los días festivos, cuando el centro comercial está cerrado al público.

En cuanto a la producción FV, se utilizan los datos reales de irradiancia de todo un año en una ciudad del sur de España. Al igual que se ha presentado para agrupar las curvas del consumo anual de un centro comercial, el número óptimo de clústers para la irradiancia anual también puede ser obtenido utilizando el método del codo y el estadístico *Gap*, que muestran que el número óptimo de clústers es 5.

Los centroides de estos clústers, mostrados en la Figura 3, se utilizarán como  $\hat{P}_{FV}$  y ofrecen re-

sultados explicables. Se puede observar cómo los clústers 3 y 4 representan la irradiancia correspondiente a los días soleados de invierno y verano, respectivamente. De hecho, el clúster 3 muestra un pico más bajo y un perfil en el que la irradiancia aparece más tarde y termina antes que el clúster 4, que es un comportamiento esperado de los días de invierno con respecto a los de verano. Además, el clúster 5 muestra el perfil de irradiancia de los días soleados por la mañana, pero nublados por la tarde. Por el contrario, el clúster 2 muestra el perfil de irradiancia de los días nublados por la mañana, pero soleados por la tarde. Por último, el clúster 1 muestra la irradiancia en los días nublados.

La Figura 4 muestra, a modo de ilustración, el centroide y todas las curvas de irradiancia del clúster 5. De esta forma, para la simulación en próximas secciones,  $P_{PV}$  será una curva como las que aparecen en color en la Figura 4, mientras que  $\hat{P}_{FV}$  será el centroide del clúster (en negro).

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez presentado el algoritmo propuesto para la operación de la planta, y los modelos de predicción que este necesita, se analiza la rentabilidad de la BIL, en términos del tiempo necesario para recuperar la inversión. Como se ha introducido anteriormente, este tiempo debe ser inferior a la vida útil prevista para las BIL.

Para realizar este análisis, es necesario realizar algunas definiciones del sistema. En este sentido, se consideran tres alternativas diferentes de potencia nominal de la planta FV: 350 kW, 250 kW y 150 kW que están, respectivamente, un poco por encima, un poco por debajo y muy por debajo del nivel de carga máxima del centro comercial. En cuanto a la potencia máxima de la BIL, se fija en el 80 % de la nominal de la planta FV. Finalmente, se consideran dos valores de capacidad de almacenamiento de la BIL para cada uno de los casos

anteriores: 1 o 2 horas de acumulación a plena potencia. A modo de comparación, cabe destacar que también se incluye en el análisis el caso sin BIL.

Por último, también es necesario definir los precios de la electricidad de la red. Se analizarán 2 estructuras diferentes de precios, mostradas en la Tabla 1.

La Figura 5 muestra cómo gestiona la planta el algoritmo MPC propuesto durante dos días consecutivos para uno de los casos considerados: el sistema FV de 350 kW con una BIL de 560 kWh bajo los precios de la tarifa 2. Las entradas del algoritmo MPC, es decir, las predicciones de la potencia consumida por el centro comercial y la potencia generada por la instalación FV son mostrados en negro y azul, respectivamente. Las salidas del algoritmo, es decir, la energía intercambiada con la red y con la BIL, se muestran en rojo y verde, respectivamente. Cabe destacar que un valor de  $P_{red}$  positivo representa compra, mientras que un  $P_{BIL}$  positivo representa una descarga de las BIL. En la Figura 6 se muestra la evolución del SOC de las BIL y los precios de compra de la electricidad.

A partir del análisis de ambas figuras, se puede observar como el optimizador decide si cargar la BIL en el periodo valle en función de la irradiancia esperada para el siguiente día. Así, en el primer día mostrado en las Figuras 5 y 6, la BIL se carga durante las horas valle hasta el 75 % del SOC, dado que durante el resto del día la generación FV superará el consumo permitiendo cargar la batería hasta el valor máximo del SOC. Sin embargo, en el caso del segundo día, la generación FV no supera el consumo, por lo que se decide cargar completamente la batería en el periodo de menor coste. Además, la introducción de  $\lambda_c(k)$  y  $\lambda_d(k)$  obliga a la BIL a descargarse lo antes posible mientras está en periodo punta y a cargar en el periodo valle lo más tarde posible. Por lo tanto, la batería se mantiene al mínimo SOC el mayor tiempo posible para reducir su envejecimiento por calendario.

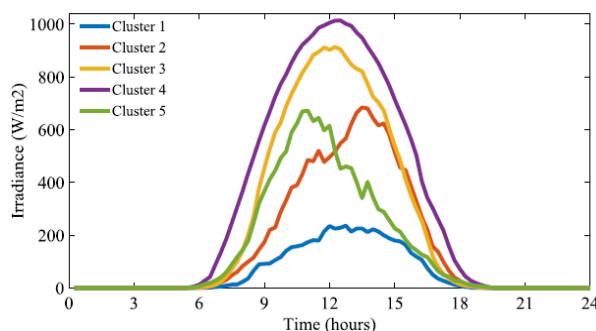


Figura 3: Centroides del *clustering* de la irradiancia anual

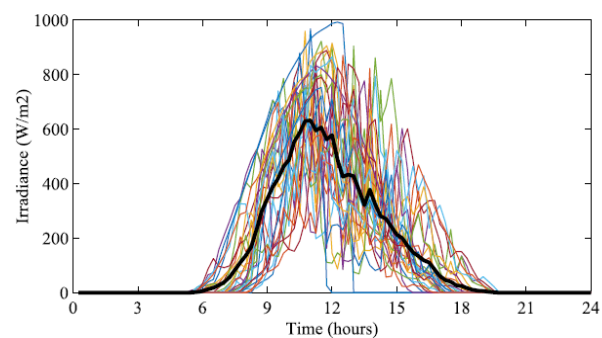


Figura 4: Ejemplo de *clustering* de un grupo de perfiles de irradiancia

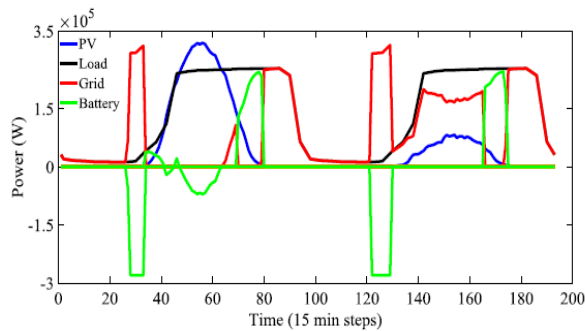
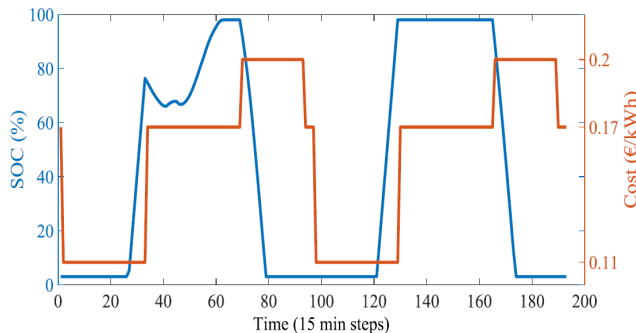


Figura 5: Resultados iniciales del optimizador

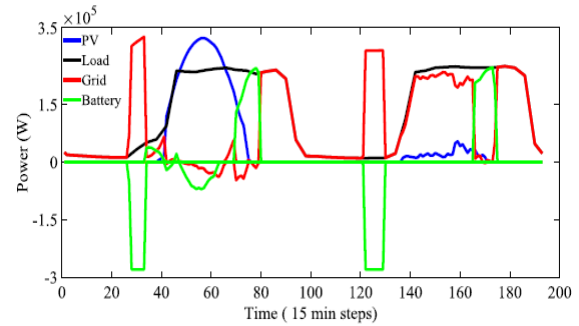
Figura 6: Evolución de SOC y  $c_{compra}$ 

Como se ha introducido en la sección 2, en general las predicciones para  $\hat{P}_{FV}$  y  $\hat{P}_C$  no coinciden con los valores reales de  $P_{FV}$  y  $P_C$  que experimenta el sistema, por lo que se decide mantener siempre el  $P_{BIL}$  dado por la optimización y ajustar  $P_{red}$  para garantizar el cumplimiento del equilibrio de potencias. La Figura 7 muestra la evolución de potencias en el caso real, con  $P_{red}$  ajustado. Obsérvese que, como  $P_{BIL}$  no cambia, la evolución del SOC en este caso es la misma que en la Figura 6. La diferencia principal entre la Figura 5 y la Figura 7 se observa en el segundo día, cuando, debido a los errores en  $\hat{P}_{FV}$ , es necesario comprar más energía a la red. También se observa una pequeña diferencia que lleva a un comportamiento ligeramente subóptimo durante el primer día, en el que los errores de predicción hacen que el sistema venda algo de energía a la red, ya que hay cierto exceso de energía porque el consumo de la carga es un poco inferior al previsto.

Para el análisis de rentabilidad, se realizan simulaciones del sistema para todo un año en las condiciones descritas anteriormente. Para cada caso, se calcula el coste de la compra de energía, con y sin

Tabla 1: Costes de la energía

	Compra (€/kWh)			Venta (€/kWh)		
	Valle	Estándar	Pico	Valle	Estándar	Pico
Tarifa 1	0,122	0,150	0,160	0,038	0,047	0,050
Tarifa 2	0,110	0,170	0,200	0,038	0,047	0,050

Figura 7: Evolución de potencias ajustadas con  $P_{red}$ 

el sistema híbrido FV con BIL. Además, cuando se considera el sistema híbrido, también se calculan los ingresos obtenidos por la venta de la energía excedente y los costes operativos, definidos como el coste de las compras menos los ingresos. La diferencia entre el coste de las compras sin el sistema híbrido y estos costes operativos representa el ahorro bruto anual conseguido con la introducción de dicho sistema. En las tablas 2 y 3 se muestran los resultados para los distintos casos considerados.

Además, estas tablas introducen los costes de las baterías, considerando un ratio de 187 €/kWh [7] y la vida útil mínima para la rentabilidad. Obsérvese que, incluso sin baterías, la aplicación FV por sí misma produce ahorros. Por tanto, la vida útil mínima se calcula como:

$$\text{Mín. vida útil} = \frac{\text{Coste de batería}}{\text{Ahorros} - \text{Ahorros}_{0\text{kWh}}} \quad (3)$$

A partir de los resultados obtenidos y considerando las vidas útiles típicas de las BIL, se puede concluir que en con los precios de la tarifa 1 es difícil asegurar la rentabilidad de la BIL en ninguno de los casos considerados. Sin embargo, con los de la segunda tarifa, algunas combinaciones permiten recuperar la inversión en un adecuado número de años (hasta 7). Además, también se concluye que cuanto más alto sea el valor de la potencia nominal del sistema FV, más fácil será conseguir un retorno de la inversión positivo.

También es interesante comprobar que, para una potencia fija de la BIL, el aumento de la capacidad reduce tanto el coste de las compras como los ingresos por las ventas. Esto se debe a que, cuando se dispone de más almacenamiento, es más eficaz ahorrar energía y evitar futuras compras para venderlas a un precio mucho menor. Sin embargo, en la mayoría de los casos, este incremento de capacidad también implica un aumento del coste de la batería, y, en consecuencia, alarga la vida útil mínima para la rentabilidad.

Tabla 2: Resultados de la optimización de la tarifa 1

Potencia FV	Potencia de BIL	Capacidad de BIL	Coste compras		Ingresos venta de energía con FV+BIL	Costes operativos con FV+BIL	Ahorro bruto anual	Coste de BIL	Vida útil mínima para la rentabilidad
			sin FV+BIL	con FV+BIL					
150 kW	120 kW	0 kWh	168 k€	132 k€	1 k€	131 k€	37 k€	-	-
		120 kWh	168 k€	131 k€	1 k€	130 k€	38 k€	22 k€	22
		240 kWh	168 k€	130 k€	1 k€	129 k€	39 k€	45 k€	22
250 kW	200 kW	0 kWh	168 k€	110 k€	3 k€	107 k€	61 k€	-	-
		200 kWh	168 k€	108 k€	2 k€	106 k€	62 k€	37 k€	24
		400 kWh	168 k€	106 k€	2 k€	104 k€	64 k€	75 k€	24
350 kW	280 kW	0 kWh	168 k€	95 k€	6 k€	89 k€	79 k€	-	-
		280 kWh	168 k€	89 k€	4 k€	84 k€	84 k€	52 k€	11
		560 kWh	168 k€	86 k€	4 k€	82 k€	86 k€	105 k€	15

Tabla 3: Resultados de la optimización de la tarifa 2

Potencia FV	Potencia de BIL	Capacidad de BIL	Coste compras		Ingresos venta de energía con FV+BIL	Costes operativos con FV+BIL	Ahorro bruto anual	Coste de BIL	Vida útil mínima para la rentabilidad
			sin FV+BIL	con FV+BIL					
150 kW	120 kW	0 kWh	180 k€	145 k€	1 k€	143 k€	37 k€	-	-
		120 kWh	180 k€	142 k€	1 k€	140.717 €	40 k€	22 k€	9
		240 kWh	180 k€	140 k€	1 k€	138 k€	42 k€	45 €	9
250 kW	200 kW	0 kWh	180 k€	122 k€	3 k€	120 k€	61 k€	-	-
		200 kWh	180 k€	118 k€	2 k€	116 k€	65 k€	37 k€	10
		400 kWh	180 k€	114 k€	2 k€	112 k€	69 k€	75 k€	10
350 kW	280 kW	0 kWh	180 k€	107 k€	6 k€	101 k€	80 k€	-	-
		280 kWh	180 k€	98 k€	5 k€	94 k€	87 k€	52 k€	7
		560 kWh	180 k€	92 k€	4 k€	88 k€	92 k€	105 k€	8

Finalmente, se puede concluir en términos de rentabilidad que, para los casos considerados, sigue siendo más eficaz aumentar la potencia máxima FV, cuando es posible, que introducir una BIL.

## 5. CONCLUSIONES

Este artículo ha introducido una estrategia de operación, basada en MPC, para conducir el funcionamiento óptimo desde el punto de vista económico, de un sistema FV con baterías instalado en un centro comercial. Además, se han propuesto modelos de predicción de la producción de los paneles FV y de los consumos de las cargas, basados en técnicas de clustering. Por último, se ha analizado la rentabilidad económica derivada de la introducción de una instalación FV con baterías simulando el sistema, durante todo un año, bajo diferentes condiciones en cuanto a tamaño de la FV, capacidad de la batería y tarifas eléctricas. Los resultados muestran que, para una tarifa en la que existen diferencias suficientemente significativas entre los costes en horas punta y valle, y si el tamaño del sistema FV es adecuado, se consigue un retorno de la inversión positivo en menos años que la vida útil esperable para las baterías de iones de litio.

### Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universitat Jaume I de Castelló (España) por sus programas de investigación para fomentar la investigación científica y el desarrollo tecnológico. Este Trabajo se desarrolló bajo dicho programa dentro del proyecto con código UJI-B2017-26 y dentro de la beca con código PREDOC/2020/35.

## English summary

### PROFITABILITY OF BATTERIES IN PV APPLICATIONS FOR THE COMMERCIAL SECTOR UNDER MPC OPERATION

### Abstract

*This work defines a strategy of operation based on Model Predictive Control (MPC) for a PV application with an energy storage system (ESS) in the commercial sector. Prediction models of future irradiance and loads consumption based on clustering techniques are also introduced. The operation is simulated for a whole year with real irradiance data in a southern spanish location and with real consumption values from a shopping center. Finally, profitability of the system, in terms of required lifetime of the ESS for the return of the investment, is analyzed for different scenarios of PV system, battery capacities and energy prices.*

**Keywords:** PV applications, model predictive control, electricity markets, energy storage systems.



## Referencias

- [1] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu, "A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications," *Journal of Power Sources*, vol. 241, pp. 680–689, nov 2013.
- [2] H. Beltran, I. Tomas Garcia, J. C. Alfonso-Gil, and E. Perez, "Levelized Cost of Storage for Li-Ion Batteries Used in PV Power Plants for Ramp-Rate Control," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 1, pp. 554–561, 2019.
- [3] M. Berecibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van den Bossche, "Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 572–587, apr 2016.
- [4] E. Camacho and C. Bordons, *Model Predictive Control*, jan 2004, vol. 13.
- [5] K. Darcovich, E. R. Henquin, B. Kenney, I. J. Davidson, N. Saldanha, and I. Beausoleil-Morrison, "Higher-capacity lithium ion battery chemistries for improved residential energy storage with micro-cogeneration," *Applied Energy*, vol. 111, pp. 853–861, 2013.
- [6] Janet L. Sawin, Jay Rutovitz, Freyr Sverrisson, Hannah E. Murdock, and Rana Adib, "Renewables 2018, Global Status Report," Tech. Rep., 2018.
- [7] Jeff St. John, "Report: Levelized Cost of Energy for Lithium-Ion Batteries Is Plummeting," *Greentech Media*, 2019.
- [8] M. N. Kabir, Y. Mishra, G. Ledwich, Z. Y. Dong, and K. P. Wong, "Coordinated Control of Grid-Connected Photovoltaic Reactive Power and Battery Energy Storage Systems to Improve the Voltage Profile of a Residential Distribution Feeder," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 967–977, 2014.
- [9] F. Katiraei and J. R. Agüero, "Solar PV Integration Challenges," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 9, no. 3, pp. 62–71, 2011.
- [10] T. Kodinariya and P. Makwana, "Review on Determining of Cluster in K-means Clustering," *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, vol. 1, pp. 90–95, jan 2013.
- [11] X. Li, D. Hui, and X. Lai, "Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 464–473, 2013.
- [12] E. Perez, H. Beltran, N. Aparicio, and P. Rodriguez, "Predictive Power Control for PV Plants With Energy Storage," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 482–490, 2013.
- [13] REE, "Atlas de la demanda Eléctrica Española," Tech. Rep., 1998.
- [14] O. Schmidt, S. Melchior, A. Hawkes, and I. Staffell, "Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies," *Joule*, vol. 3, no. 1, pp. 81–100, 2019.
- [15] J. Segarra-Tamarit, E. Perez, J. C. Alfonso-Gil, C. Arino, N. Aparicio, and H. Beltran, "Optimized management of a residential microgrid using a solar power estimation database," in *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2017, pp. 993–998.
- [16] R. Tibshirani, G. Walther, and T. Hastie, "Estimating the Number of Clusters in a Data Set Via the Gap Statistic," *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, vol. 63, pp. 411–423, feb 2001.
- [17] C. Voyant, G. Notton, S. Kalogirou, M.-L. Nivet, C. Paoli, F. Motte, and A. Fouilloy, "Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review," *Renewable Energy*, vol. 105, pp. 569–582, may 2017.
- [18] J. Weniger, T. Tjaden, and V. Quaschnig, "Sizing of Residential PV Battery Systems," *Energy Procedia*, vol. 46, pp. 78–87, 2014.
- [19] A. Whiteman, J. Esparrago, S. Rueda, S. Elsayed, and I. Arkhipova, *Renewable Energy Capacity Statistics 2019*. Abu Dhabi: IRENA, 2019.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# IMPLEMENTACIÓN DE CAPAS SUPERIORES DE LA PIRÁMIDE DE AUTOMATIZACIÓN EN UNA PLANTA PILOTO HÍBRIDA

Daniel Montes<sup>a</sup>, Jesús M. Zamarreño <sup>a,c</sup>, José Luis Pitarch<sup>b</sup>, Erika Oliveira-Silva<sup>a,c</sup>, Cesar de Prada<sup>a,c</sup>

danielalberto.montes.lopez@uva.es, jesusm@autom.uva.es,

jlpitarch@isa.upv.es, erika.oliveira@autom.uva.es, prada@autom.uva.es

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid

<sup>b</sup> Instituto de Automática e Informática Industrial (ai2), Universitat Politècnica de Valencia

<sup>c</sup> Instituto de Procesos Sostenibles, Universidad de Valladolid

## Resumen

*En este trabajo se presenta la implementación de un controlador predictivo basado en un modelo no lineal (NMPC) y un optimizador de consignas en tiempo real (RTO) a una planta piloto híbrida. La planta consta de un reactor CSTR, dos caudalímetros, una bomba, una válvula y cuatro sensores de temperatura. La reacción química se emula a partir de las medidas del proceso y el calor que esta generaría se aplica mediante resistencias eléctricas. Así, la única sustancia involucrada es agua, se conserva la hidrodinámica del proceso y se evitan los inconvenientes típicos del manejo de sustancias químicas. Se desarrolla y ajusta un modelo basado en medidas reales que luego es usado como base para el MPC y el RTO. Se hacen pruebas de seguimiento de consigna del controlador y optimización económica del RTO. El conjunto planta híbrida + MPC + RTO conforma una plataforma flexible, a la vez que realista, para evaluar técnicas de optimización avanzada donde existen discrepancias entre planta-modelo y entre modelos.*

**Palabras clave:** Industria 4.0, Pirámide automatización, MPC, RTO, digitalización.

## 1. INTRODUCCIÓN

En ediciones anteriores de las Jornadas de Automática se ha presentado una versión inicial del reactor híbrido del Grupo de Control y Supervisión de Procesos de la Universidad de Valladolid [1]. Desde entonces, ha habido grandes cambios tanto de hardware como de software en la planta. Se adquirió un nuevo depósito para el reactor que incorpora directamente las resistencias eléctricas. Simplificando así la planta y logrando que la dinámica se asemeja más a la de un reactor real. Por otra parte, se conectó la planta a una base de datos en tiempo real y se rediseñó la interfaz gráfica del SCADA para que tuviera cierta correspondencia con la pirámide de automatización. Se sustituyó el sistema de control en cascada por un controlador predictivo no lineal y un optimizador en tiempo real.

Las ventajas de técnicas avanzadas de optimización, detección de fallos, estimación y/o cuantificación de la

incertidumbre, etc. deberían ser probadas previamente a su implementación final. Sin embargo, las plantas reales tienen una complejidad inherente que hace que la experimentación sea costosa o directamente imposible. Siempre existe el riesgo de perder producto y, además, los cambios admisibles en las variables manipuladas suelen ser muy pequeños como para obtener información dinámica valiosa. Este aspecto es todavía más crítico en el marco de la digitalización, ya que el modelado mediante aprendizaje profundo o de combinación de MPC con técnicas de aprendizaje por refuerzo requieren de una ingente cantidad de datos informativos sobre el proceso. Si dichos datos no pueden ser obtenidos mediante experimentación directa, la mayoría de propuestas en la literatura asumen que se dispone de un modelo de simulación detallado del proceso como alternativa para realizar el aprendizaje. No obstante, es difícil que un modelo llegue a reflejar toda la realidad y problemas de operación de una planta real.

Las plantas piloto buscan asemejarse a los procesos reales pero suelen tener poca instrumentación y son de muy pequeña escala. En éstas normalmente están involucradas las mismas sustancias que en los procesos reales. Así, se deben tener consideraciones de adquisición de sustancias químicas, disposición de las mismas, medidas de seguridad, etc. A medio camino entre las plantas reales y las piloto se encuentran las plantas piloto híbridas. De esta forma, parte del proceso es simulada mientras que las características hidrodinámicas se mantienen fieles a la realidad [2].

La tradicional pirámide de automatización, mostrada en la figura 1, recoge las tecnologías asociadas a la automatización industrial y a la gestión de procesos productivos. Está organizada jerárquicamente en diferentes niveles: proceso, dispositivos, PLC/SCADA, MES (Manufacturing Execution System) y ERP (Enterprise Resource Planning). Es importante destacar que no se debe avanzar a niveles superiores si los inferiores no funcionan adecuadamente. Esta separación entre capas es mucho más que un concepto y tiene implicaciones tanto en la organización de las empresas como en los flujos de información de los procesos. Las tecnologías relacionadas con el control predictivo se pueden situar entre el nivel de PLC/SCADA y el de MES. Por su parte, las tecnologías asociadas con la

optimización en tiempo real se emplazan en la capa de MES. Así, este trabajo servirá como demostración de la implementación de estrategias de las capas superiores de la pirámide.

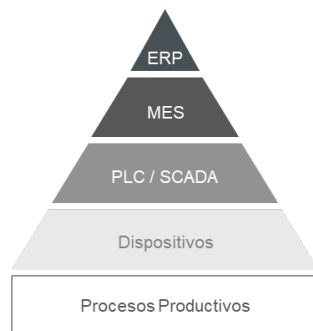


Figura 1: Pirámide de automatización [3].

En la sección 2 se explica en detalle la configuración física de la planta. La sección 3 describe su arquitectura de software. En la sección 4 se desarrolla y ajusta un modelo. Luego, en la sección 5 se formulan un controlador predictivo no lineal y un optimizador en tiempo real. Finalmente, la sección 6 muestra las pruebas llevadas a cabo con estas herramientas de control avanzado. El artículo se cierra con las conclusiones y propuestas de trabajo futuro en la sección 7.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La principal característica de la planta es que, aunque tiene todos los elementos de un reactor químico, la reacción está simulada y la única sustancia involucrada es agua. Una simulación de la reacción recibe medidas en tiempo real del proceso para calcular el calor que generaría la reacción, este luego se aplica mediante resistencias eléctricas.

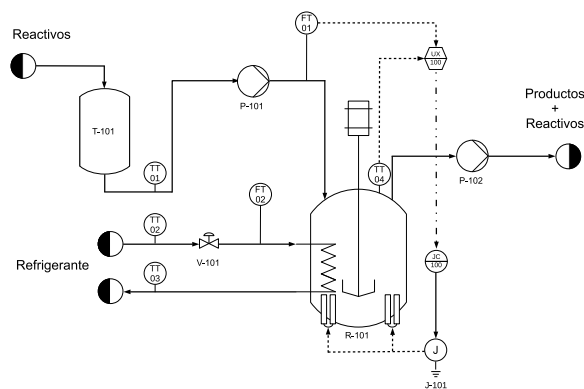
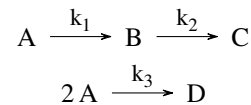


Figura 2: P&ID de la planta.

En la figura 2 se muestra un esquema de la planta. Esta cuenta con cuatro sensores de temperatura (TT-01 a 04) y dos caudalímetros (FT-01 y 02). Los elementos finales de control son la bomba peristáltica de reactivos (P-101) y la válvula de refrigerante (V-101). La bomba P-102 tiene una velocidad fija y su única función es simular que los reactivos salen del reactor por desbordamiento.

La simulación de la reacción química está embebida

en un servidor OPC-DA generado con EcosimPro [4]. En el trabajo original de Marcos et al. solo había una reacción, A que produce B [1]. Ahora se ha cambiado para incluir las reacciones de van de Vusse, conocidas por su alta no linealidad [5].



Las ecuaciones que están programadas dentro del bloque de simulación son iguales a las que se mostrarán en la sección 4.1. Una vez se ha calculado el calor que generarían las reacciones, este se envía como una señal a la unidad de amplificación de las resistencias eléctricas. De esta forma, se consigue emular la dinámica de un reactor CSTR.

## 3. ARQUITECTURA SOFTWARE

La planta piloto se ha dotado de una arquitectura que se asemeja a una instalación industrial. Por una parte, se extendió el desarrollo de Marcos et al. [1] del SCADA en el software Wonderware InTouch [6]. También se conectó la planta a una base de datos en tiempo real, PI System de OSIsoft [7], para tener acceso al histórico de todos los datos del proceso. Los controladores PID de la planta y la tarjeta de adquisición de datos se comunican mediante OPC-DA [8]. Sigue siendo ampliamente utilizado en la industria aunque su sucesor, OPC-UA, fue publicado hace más de una década. El nuevo estándar de OPC-UA pretende mejorar las carencias de su predecesor: no depende de COM y, por tanto, es multiplataforma; tiene en cuenta aspectos de ciberseguridad; se puede paralelizar en múltiples CPUs; tiene soporte de redundancia, etc. [9]. En nuestro trabajo se usa este último estándar para los módulos de control avanzado y optimización en tiempo real.

### 3.1. SCADA

El SCADA original fue desarrollado por Marcos et al. [1] usando Wonderware InTouch [6]. Este recogía toda la información del proceso y permitía actuar sobre él. Además, tenía implementados dos lazos de control en cascada: uno para la temperatura del reactor y otro para la conversión. En este trabajo se ha reorganizado el SCADA para que reflejara de forma visual la pirámide de automatización. En la figura 3 se puede ver la ventana principal de la interfaz hombre-maquina (HMI) del SCADA de la planta. De especial interés es la pirámide en la esquina superior derecha. Esta permite navegar entre las diferentes ventanas por niveles de la pirámide. En cada una de las ventanas se pueden configurar los módulos a los que corresponden y visualizar algunas variables de interés.

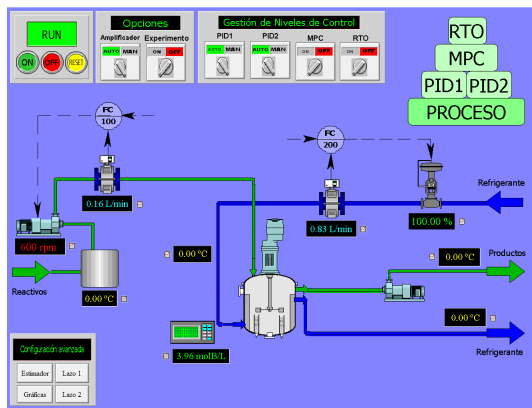


Figura 3: Ventana principal del HMI.

### 3.2. BASE DE DATOS EN TIEMPO REAL

Las bases de datos en tiempo real permiten gestionar la gran cantidad de datos que se generan en los procesos en cada periodo de muestreo. Con ellas se busca facilitar el acceso a la información y así basar las decisiones corporativas en los datos. Aunque el concepto es relativamente sencillo, una buena base de datos debe tener capacidades de comunicación con prácticamente cualquier protocolo que se use en la industria (hay cientos). Además, también deben disponer de herramientas que permitan analizar y visualizar la información en tiempo real para descubrir patrones de interés. Todas estas características están incluidas en el PI System de OSIsoft [7], software que se usa de forma generalizada en la industria de procesos y energía.

Con el fin de que la planta se asemeje aún más a una instalación industrial, se conectó la misma a una instancia ya creada del PI System [10]. Así también se emula la estructura de la información típica de una empresa. Específicamente, se conectaron la tarjeta de adquisición de datos, los controladores PID, el SCADA (OPC-DA) y los bloques de control avanzado y optimización en tiempo real (OPC-UA). La figura 4 muestra la configuración de las variables en el servidor PI Asset Framework (PI AF) del PI System.

Figura 4: Estructura en el servidor PI AF.

## 4. MODELADO Y AJUSTE

### 4.1. Modelo

Se debe desarrollar un modelo que sirva como base para las estrategias de control avanzado y optimización

que se implementen en la planta. Se supone que las propiedades físicas del agua permanecen constantes y que el reactor está perfectamente agitado. Así, se usa el modelo típico de un reactor CSTR. También se supone que las reacciones químicas son conocidas, pero no así sus parámetros.

Se formulan los balances de materia teniendo en cuenta que solo entra al reactor el reactivo A.

$$V \frac{dC_A}{dt} = q(C_{A0} - C_A) + V(-r_1 - 2r_3) \quad (1)$$

$$V \frac{dC_B}{dt} = -qC_B + V(r_1 - r_2) \quad (2)$$

$$V \frac{dC_C}{dt} = -qC_C + r_2V \quad (3)$$

$$V \frac{dC_D}{dt} = -qC_D + r_3V \quad (4)$$

Donde  $C_i$  son las concentraciones de cada una de las especies ( $\frac{\text{mol}}{\text{L}}$ ),  $V$  el volumen del reactor (L),  $q$  es el caudal de reactivos ( $\frac{\text{L}}{\text{min}}$ ) y  $r_j$  las velocidades de reacción ( $\frac{\text{mol}}{\text{Lmin}}$ ).

Los balances de energía representan la parte del proceso que no es simulada, es decir, el proceso real. Se incluyen términos de generación de energía y de intercambio de calor. El serpentín también se modela como si su temperatura fuera homogénea.

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = q\rho C_p(T_0 - T) - UA(T - T_c) + Q_{rxn} \quad (5)$$

$$\rho C_p V_c \frac{dT_c}{dt} = Fr\rho C_p(T_{c0} - T_c) + UA(T - T_c) \quad (6)$$

Donde  $UA$  es el coeficiente global de transferencia de calor ( $\frac{\text{kJ}}{\text{min}^\circ\text{C}}$ ),  $Q_{rxn}$  es el calor generado por las reacciones químicas ( $\frac{\text{kJ}}{\text{min}}$ ) y  $Fr$  es el caudal de refrigerante ( $\frac{\text{L}}{\text{min}}$ ). Además,  $T_0$  y  $T_{c0}$  son las temperaturas del reactor y el serpentín a la entrada, mientras que  $T$  y  $T_c$  son las temperaturas a la salida.

Como se mencionó anteriormente, los parámetros de las reacciones se suponen desconocidos. Así, se deben encontrar valores para los mismos de forma tal que el modelo se ajuste adecuadamente al proceso. Las ecuaciones cinéticas son como sigue:

$$r_1 = k_{10}e^{-\frac{E_1}{RT}} C_A \quad (7)$$

$$r_2 = k_{20}e^{-\frac{E_2}{RT}} C_B \quad (8)$$

$$r_3 = k_{30}e^{-\frac{E_3}{RT}} C_A^2 \quad (9)$$

$$Q_{rxn} = -V \sum_{j=1}^3 r_j \Delta H_{rxn,j} \quad (10)$$

$$UA = \alpha Fr^{0.8} \quad (11)$$

Donde  $k_{j0}$  son las constantes pre-exponenciales de las velocidades cinéticas ( $\frac{1}{\text{min}}$ ),  $E_j$  las energías de activación de las reacciones ( $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ ) y  $\Delta H_{rxn,j}$  las entalpías de

las reacciones ( $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ ).  $\alpha$  es un parámetro que engloba a otros como las propiedades del agua, el diámetro del serpentín, etc.

En la tabla 1 se muestran los valores de los parámetros conocidos del modelo.

Tabla 1: Parámetros conocidos del modelo.

Parám.	Descripción	Valor
$V$	Volumen del reactor	11.5 L
$V_c$	Volumen del serpentín	1 L
$\rho$	Densidad del agua	1 $\frac{\text{kg}}{\text{L}}$
$C_p$	Capacidad calorífica	4.18 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$
$C_{A0}$	Conc. entrada de A	5 $\frac{\text{mol}}{\text{L}}$

Las ecuaciones (1)–(11) serán lo que se denomine de ahora en adelante como el modelo de la planta. Por otra parte, conviene diferenciar el modelo de la planta de lo que está programado dentro del bloque que emula la reacción química, ecuaciones (1)–(4) y (7)–(10). A pesar de ser exactamente las mismas ecuaciones, la emulación de las reacciones no está afectada únicamente por estos balances de materia sino también por las dinámicas de la unidad de amplificación de potencia y de las resistencias eléctricas. Esto último no se tiene en cuenta para el modelo de la planta y, por tanto, hay errores estructurales que impedirán que el modelo represente perfectamente la dinámica de la planta.

## 4.2. AJUSTE

Se llevó a cabo un experimento para recolectar datos dinámicos de la planta y ajustar el modelo a los mismos. Se dieron valores diferentes a la velocidad de la bomba de reactivos y a la apertura de la válvula refrigerante. Se intentó explorar todas las zonas posibles de operación de la planta y que los cambios no estuvieran correlacionados. En la figura 5 se muestra la evolución de los caudales de reactivos y refrigerante durante el experimento.

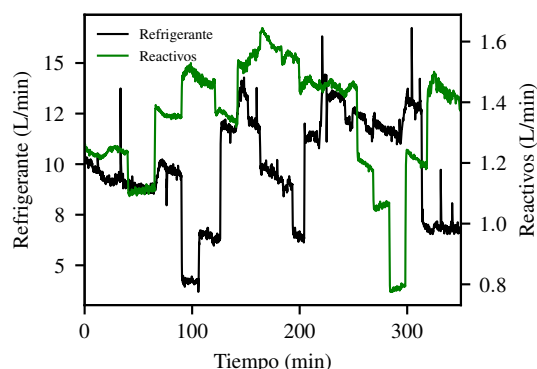


Figura 5: Planificación del experimento.

Una vez recolectados los datos, se formula un problema de optimización dinámica como se muestra en la ecuación (12). Las restricciones corresponderían a las ecuaciones del modelo (1)–(11). Para la función de

costo se usó una *fair function* en lugar de mínimos cuadrados. Esto limita la penalización ante errores gruesos, i.e. grandes diferencias entre modelo y medida de algún sensor (descalibraciones, etc.), evitando así distorsionar el ajuste a otras variables cuyas medidas son más fiables. [11].

$$\begin{aligned} \min_{k_i, E_i, \Delta H_{rxn,i}, \alpha} \quad & c^2 \sum_{i=1}^4 \gamma_i \left[ \frac{|\varepsilon_i|}{c} - \ln \left( 1 + \frac{|\varepsilon_i|}{c} \right) \right] \\ \text{s.t.} \quad & \text{Ecuaciones (1)–(11),} \\ & \varepsilon_i = \frac{y_{m,i} - y_{p,i}}{\hat{y}_{p,i}} \quad i = 1, \dots, 4 \end{aligned} \quad (12)$$

Donde  $c$  es un hiperparámetro con valor de seis y  $\gamma_i$  y  $\varepsilon_i$  son los pesos asociados y los errores normalizados respecto a cada uno de los estados medidos.  $y_{m,i}$  son las predicciones del modelo,  $y_{p,i}$  las medidas reales del proceso y  $\hat{y}_{p,i}$  la media de cada una de las medidas.

Para resolver el problema de optimización dinámica (12) se siguió un enfoque secuencial, usando Ecosim-Pro [4] para evaluar la función de costo y SNOPT [12] para calcular nuevos valores de los parámetros. La optimización secuencial consiste en usar un simulador para resolver las ecuaciones diferenciales y así evaluar la función de costo y las restricciones [13]. Estas son enviadas a un optimizador que se encarga de calcular nuevos valores para las variables de decisión y se repite el proceso. La iteración se detiene cuando se ha cumplido el número máximo de iteraciones o la tolerancia especificada en el optimizador. La figura 6 muestra un esquema simplificado de la optimización secuencial.

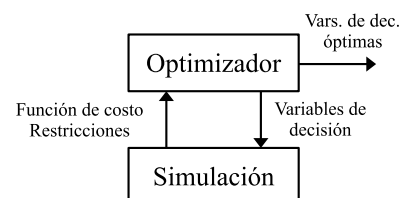


Figura 6: Optimización secuencial.

Del experimento de 350 minutos de duración, se usaron 250 para ajustar el modelo y 100 para validarlo. Las figuras 7, 8 y 9 muestran el resultado gráfico del ajuste. La tabla 2 muestra los valores de los parámetros.

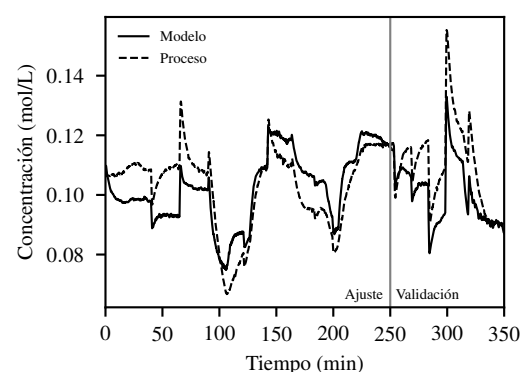


Figura 7: Ajuste de la concentración de A.

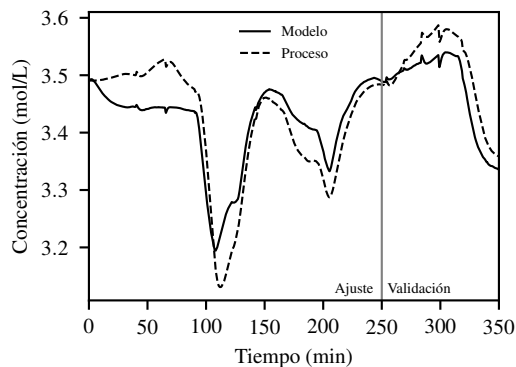


Figura 8: Ajuste de la concentración de B.

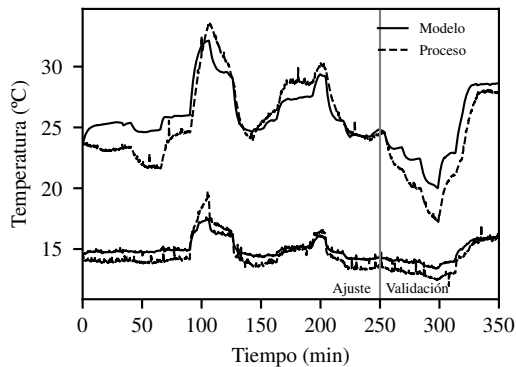


Figura 9: Ajuste de las temperaturas.

Se puede apreciar que el ajuste del modelo, aunque no perfecto, es bueno. Se capturan adecuadamente los transitorios del proceso, pero hay cierto error de estado estacionario. Este error debería ser capaz de remediarlo un estimador de estados de horizonte móvil como se mostrará en la sección 5.1.2.

Tabla 2: Parámetros ajustados del modelo

Parám.	Descripción	Valor
$k_{10}$	Cte. pre-exp. 1 ( $\times 10^9$ )	$6.14 \frac{1}{\text{min}}$
$k_{20}$	Cte. pre-exp. 2 ( $\times 10^{10}$ )	$1.71 \frac{1}{\text{min}}$
$k_{30}$	Cte. pre-exp. 3 ( $\times 10^{11}$ )	$8.28 \frac{1}{\text{min mol}}$
$E_1$	Energía de activación 1	$52.1 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
$E_2$	Energía de activación 2	$73.2 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
$E_3$	Energía de activación 3	$64.9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
$\Delta H_{rxn,1}$	Entalpía de 1	$-19.87 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
$\Delta H_{rxn,2}$	Entalpía de 2	$-3.16 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
$\Delta H_{rxn,3}$	Entalpía de 3	$-77.42 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
$\alpha$	Transferencia de calor	$1.62 \frac{\text{kJ}}{\text{min } ^\circ\text{C}}$

## 5. CONTROL AVANZADO Y RTO

### 5.1. CONTROLADOR PREDICTIVO

#### 5.1.1. Controlador

La función de coste tiene términos de seguimiento de consigna para la temperatura y la concentración de B. Además, se consideran términos de penalización de cambios en las variables manipuladas. Las acciones de

control se discretizan de forma constante entre cada periodo de muestreo. El resultado del MPC se envía a la planta como consignas a los controladores PID de caudal. Por último, se añaden restricciones de cotas inferiores y superiores para las variables controladas y las manipuladas. Los parámetros del controlador se muestran en la tabla 3.

$$\min_{u_1(t), u_2(t)} \sum_{k=1}^2 \sum_{i=0}^N \gamma_k \left[ \frac{y_k(t+i) - w_k(t+i)}{y_{k,upp} - y_{k,low}} \right]^2 + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=0}^{Nu} \beta_j \left[ \frac{\Delta u_j(t+i)}{u_{j,upp} - u_{j,low}} \right]^2 \quad (13)$$

s.t. Ecuaciones (1)–(11),

$$y_{k,low} \leq y_k \leq y_{k,upp}, \quad k = 1, \dots, 4,$$

$$u_{j,low} \leq u_j \leq u_{j,upp}, \quad j = 1, 2$$

Donde  $u_1(t)$  y  $u_2(t)$  son los vectores de variables manipuladas a lo largo del horizonte de control,  $y_k(t)$  y  $w_k(t)$  son las variables controladas y su consigna a lo largo del horizonte de predicción,  $y_{k,upp}$  y  $y_{k,low}$  son los límites superiores e inferiores de las variables controladas y  $u_{k,upp}$  y  $u_{k,low}$  son los límites superiores e inferiores de las variables manipuladas.

Tabla 3: Parámetros del controlador.

Parám.	Descripción	Valor
$Nu$	Horizonte de control	3
$N$	Horizonte de predicción	120
$\gamma_k$	Peso	1.0
$\beta_j$	Penalizaciones	2.0
$\Delta t$	Periodo de muestreo	0.5 min
$u_{1,low}$	Caudal min. reactivos	$0.3 \frac{\text{L}}{\text{min}}$
$u_{1,upp}$	Caudal max. reactivos	$1.2 \frac{\text{L}}{\text{min}}$
$u_{2,low}$	Caudal min. refrigerante	$6 \frac{\text{L}}{\text{min}}$
$u_{2,upp}$	Caudal max. refrigerante	$15 \frac{\text{L}}{\text{min}}$

#### 5.1.2. Estimador de estados

Aunque para el ajuste del modelo se consideró que se medía la especie A, para la operación normal de la planta se considera que esta medida no está disponible. Se formuló un estimador de estados de horizonte móvil (MHE) que estime esta concentración no medida. El MHE considera un horizonte móvil de  $N_E$  medidas anteriores y es ejecutado antes de cada llamada al controlador, estimando los estados al inicio del horizonte y las perturbaciones. Estimar las perturbaciones dota al controlador de acción integral, eliminando posibles errores de estado estacionario [14]. Luego se integra el modelo desde el inicio del horizonte hasta el periodo de muestreo actual para enviar los valores actualizados al controlador.

La función de costo que se presenta en la ecuación (14) está compuesta por tres términos: penalización de la diferencia entre los estados y las variables medidas; penalización de desviación con las estimaciones iniciales



anteriores y penalización de las perturbaciones estimadas. A diferencia de los problemas de optimización de ajuste de parámetros y MPC, el modelo del estimador de estados tiene una ligera modificación. Se incorporan perturbaciones aditivas ( $d_1, \dots, d_4$ ) a las ecuaciones (1), (2), (5) y (6) respectivamente. Estos términos también se incluyen en el modelo del MPC. En la ecuación (15) se muestra un ejemplo de como se incorporan en el modelo. Una vez estimadas por el MHE, el controlador considera las perturbaciones ( $d_1, \dots, d_4$ ) como constantes durante todo el horizonte de predicción.

$$\min_{y_k(t-N_E), d_k} \beta_m \sum_{k=1}^4 \sum_{i=0}^{N_E} \left[ \gamma_k \left( \frac{y_k(t-i)}{y_{k,real}(t-i)} - 1 \right)^2 \right] + \beta_{ant} \sum_{k=1}^4 \gamma_k (y_k(t-N_E) - y_{k,ant}(t-N_E))^2 + \beta_d \sum_{k=1}^4 d_k^2 \quad (14)$$

s.t. Ecuaciones (1)–(11),

$$y_{k,low} \leq y_k \leq y_{k,upp}, \quad k = 1, \dots, 4, \\ d_{k,low} \leq d_k \leq d_{k,upp}, \quad k = 1, \dots, 4$$

Donde  $\beta_m$ ,  $\beta_{ant}$ ,  $\beta_d$  son los pesos relativos asociados con las medidas de los estados, las estimaciones anteriores y las perturbaciones respectivamente. Así mismo,  $\gamma_k$  son los pesos relativos al ajuste a las medidas de cada uno de los estados. Finalmente,  $N_E$  es el número de periodos de muestreo considerados (longitud del horizonte).

$$V \frac{dC_A}{dt} = q(C_{A0} - C_A) + V(-r_1 - 2r_3) + d_1 \quad (15)$$

Tanto el controlador como el MHE (13) fueron programados en EcosimPro [4], usando IDAS para la integración y SNOPT [12] para la optimización (siguiendo un enfoque secuencial). El coste computacional es bajo, aproximadamente medio segundo para resolver ambos problemas. Estos se involucraron dentro de un mismo servidor OPC-UA que les permita interactuar con el SCADA de la planta fácilmente. El servidor del controlador es llamado en cada periodo de muestreo y envía nuevos valores para las consignas de caudal de los controladores PID.

## 5.2. OPTIMIZACIÓN EN TIEMPO REAL

Para formular el optimizador en tiempo real se usa el modelo ya desarrollado pero en estado estacionario. El objetivo es maximizar el beneficio económico de la planta. No se tienen en cuenta las perturbaciones estimadas en el MHE. Se asume que los transitorios tienen poca relevancia en la economía del proceso por ser previsiblemente cortos. En la función de costo del problema de optimización (16) se tiene en cuenta: lo que se produce de la sustancia de interés B, lo que se

consume de reactivos y lo que se usa de refrigerante. Así, las variables de decisión son la temperatura del reactor y la concentración de B. Estas se envían al controlador como puntos de consignas en cada llamada al RTO.

$$\max_{T, C_B} q(p_B C_B - p_A C_{A0}) - p_{ref} Fr \\ \text{s.t. Ecuaciones (1)–(11),} \quad (16) \\ y_{k,low} \leq y_k \leq y_{k,upp}, \quad k = 1, \dots, 4, \\ u_{j,low} \leq u_j \leq u_{j,upp}, \quad j = 1, 2$$

Al igual que el MPC y el MHE, el RTO se programó en EcosimPro [4]. En este caso no fue necesario usar un integrador, pero sí un optimizador (SNOPT [12]). El RTO se envolvió con una capa de OPC-UA para facilitar su integración con la planta y el resto de módulos. Los precios de las especies involucradas en la función de costo se establecieron en 0.2, 18 y 3 €/mol para A, B y Fr respectivamente.

## 6. PRUEBAS DE MPC Y RTO

### 6.1. Prueba del controlador predictivo

Se partió desde un estado estacionario y luego se activó el MPC. Las consignas probadas fueron elegidas arbitrariamente. Tras unos minutos de recolección de datos para el estimador de estados, el controlador empieza a calcular nuevas acciones de control. Luego, alrededor de  $t = 45$  min, se cambian simultáneamente las dos consignas. En las figuras 10 y 11 se muestra la evolución de las variables controladas y manipuladas. La escala de los ejes de la figura 11 refleja los límites de las variables manipuladas.

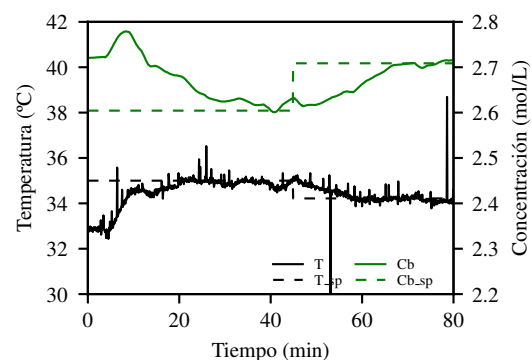


Figura 10: Variables controladas.

El controlador es capaz de llevar al proceso a las dos condiciones de operación especificadas pero hay oscilaciones en las variables manipuladas. Aumentar la penalización a los cambios ( $\beta_j$ ) ayudaría a disminuir estas oscilaciones. No obstante, creemos que estas se deben principalmente al ruido, ya que la implementación actual no considera el filtrado de las señales. En cualquier caso, el rendimiento del controlador es satisfactorio.

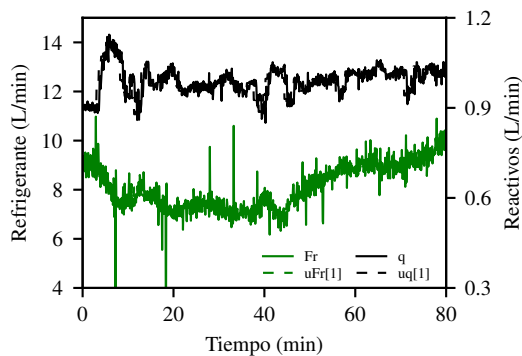


Figura 11: Variables manipuladas.

## 6.2. Prueba del optimizador en tiempo real

Para probar el RTO, se partió de un estado estacionario al igual que para la prueba del MPC. En las figuras 12, 13 y 14 se muestra la evolución de las variables controladas, de las variables manipuladas y de la economía del proceso. Tras recolectar datos para el estimador de estados, el MPC empieza a calcular acciones de control para llegar a las consignas que le llegan desde el RTO.

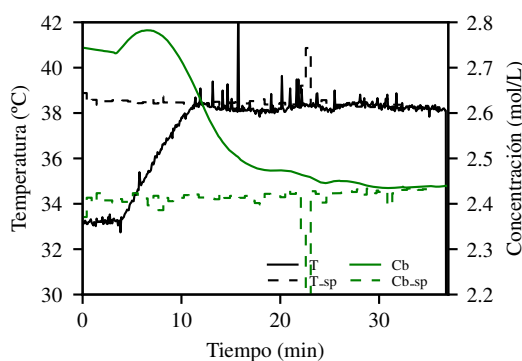


Figura 12: Variables controladas.

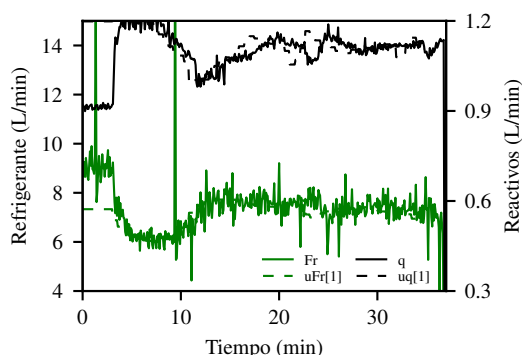


Figura 13: Variables manipuladas.

Se puede apreciar que los puntos de operación óptimos calculados por el RTO tienden a llevar a las variables manipuladas cerca de sus límites. El caudal de reactivos está cerca del límite superior ( $1.2 \frac{L}{min}$ ) y el de refrigerante cerca del límite inferior ( $6 \frac{L}{min}$ ). El comportamiento del MPC es adecuado ya que es capaz de llevar al proceso a la zona indicada por el RTO sin error de estado estacionario. Por otra parte, en la figura 14

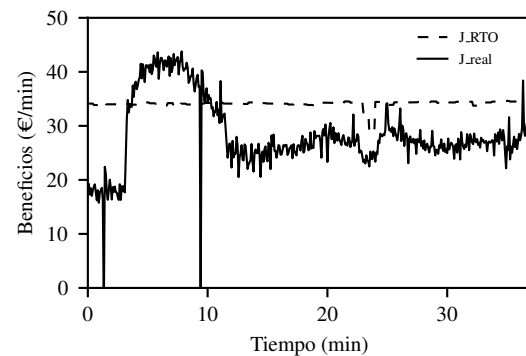


Figura 14: Economía del proceso.

se muestra el valor de la función de costo que calcula el RTO y el valor que hay realmente en la planta. Si el modelo fuera perfecto, estos valores tendrían que coincidir. Así, aunque el RTO logra llevar a la planta a una mejor zona de operación, en términos económicos, comparada con el estacionario inicial, esta zona probablemente no es el punto de operación óptimo de la planta.

## 7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha usado una planta piloto híbrida como eje central del trabajo. Se desarrolló y ajustó un modelo para la misma, que luego sirvió como base para formular un MPC y un RTO. El controlador predictivo tiene incorporado un MHE para eliminar el error de estado estacionario. Por su parte, el optimizador en tiempo real usa el modelo de la planta en estado estacionario para calcular el punto de operación que maximiza el beneficio económico. Ambos módulos se conectan directamente al SCADA de la planta mediante el protocolo de comunicación OPC-UA. Las pruebas llevadas a cabo demostraron el correcto funcionamiento tanto del MPC como el RTO. Así, se comprueba la utilidad que tienen este tipo de plantas para probar estrategias de control u optimización avanzadas antes de su implementación final en un proceso industrial.

Las características de la plataforma realizada alrededor de la planta (no linealidad, flexibilidad, software industrial) la hacen ideal para probar nuevos algoritmos de control y optimización. Como trabajo futuro, se desea probar un controlador predictivo económico con la técnica de adaptación de modificadores (MA). Esta técnica consiste en modificar la función de costo para que el óptimo del modelo sea igual al óptimo del proceso [15]. De esta forma, se lograría llegar al óptimo real de la planta y no al del modelo como ocurrió en la prueba del RTO. Por otra parte, sería interesante implementar la capa superior de la pirámide que corresponde a la planificación de la producción (ERP). Para esto, será necesario expandir el proceso interconectando varias plantas piloto que interactúen entre sí y desarrollar un modelo que las coordine.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia Innovación y Universidades y a la Agencia Estatal de Investigación por su financiación mediante el proyecto PGC2018-099312-B-C31. Daniel Montes ha sido financiado con cargo a la convocatoria 2020 de contratos predoctorales de la Universidad de Valladolid, cofinanciada por el Banco Santander. El segundo, cuarto y quinto autor agradecen el apoyo de la Junta de Castilla y León y EU/FEDER (CLU 2017-09).

## English summary

### IMPLEMENTATION OF UPPER LAYERS OF THE AUTOMATION PYRAMID IN A HYBRID PILOT PLANT

#### Abstract

*This work presents the implementation of a real-time optimization (RTO) and a nonlinear model predictive controller (NMPC) to a hybrid pilot plant. The plant consists of a Van de Vusse CSTR, two flowmeters, a pump, a valve, and four temperature sensors. In order to maintain the hydrodynamics and avoid typical problems with chemical substances, all the reactions are simulated. So, the only substance involved in the process is water. A calculation block simulates the chemical reaction using a model and real-time process measurements, calculating the heat generated by the reaction. This heat is applied to the reactor using two heating coils. Another model for the RTO and NMPC layers is formulated, and the parameters are adjusted using experimental measurements. Then, two experiments are carried out: trajectory tracking for the MPC, and economic optimization for the RTO. The present paper shows the advantages of using hybrid pilot plants for the study and research of advanced control strategies.*

**Keywords:** Industry 4.0, Automation Pyramid, MPC, RTO, digitalization.

## Referencias

- [1] M. P. Marcos, C. de Prada y J. L. Pitarch, «Desarrollo e implementación de un sistema de control en una planta piloto híbrida», en XXXVIII Jornadas de Automática, Universidad de Oviedo, 2017, págs. 479-485.
- [2] L. Bergh, «A Hybrid Approach to Empirically Test Process Monitoring, Diagnosis and Control Strategies», *Advances in Intelligent and Soft Computing*, vol. 126, págs. 215-222, 2012.

- [3] ISA España. «MES: Pasado, presente y mucho futuro». (2021), dirección: <https://isa-spain.org/mes-pasado-presente-y-mucho-futuro/> (visitado 08-06-2021).
- [4] Empresarios Agrupados. «EcosimPro». (2021), dirección: <https://www.ecosimpro.com/> (visitado 05-06-2021).
- [5] J. G. van de Vusse, «Plug-flow type reactor versus tank reactor», *Chemical Engineering Science*, vol. 19, n.º 12, págs. 994-996, 1964.
- [6] Wonderware Spain. «Wonderware InTouch». (2021), dirección: <https://www.wonderware.es/hmi-scada/intouch/> (visitado 05-06-2021).
- [7] OSIsoft. «PI System». (2021), dirección: <https://www.osisoft.es/> (visitado 07-06-2021).
- [8] J. M. Zamarreño, *Acceso a datos mediante OPC*. Santiago de Compostela: Editorial Andavira SL, 2010, ISBN: 978-84-8408-565-2.
- [9] OPC Foundation. «OPC Unified Architecture». (2021), dirección: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/> (visitado 08-06-2021).
- [10] J. M. Zamarreño, C. Pablos, A. Merino, L. F. Acebes y C. de Prada, «Infraestructura para explotación de datos de un simulador azucarero», en XXXVIII Jornadas de Automática, Universidad de Oviedo, 2017, págs. 197-202.
- [11] N. Arora y L. T. Biegler, «Redescending estimators for data reconciliation and parameter estimation», *Computers and Chemical Engineering*, vol. 25, n.º 11-12, págs. 1585-1599, 2001.
- [12] P. E. Gill, W. Murray y M. A. Saunders, «SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization», *SIAM Rev.*, vol. 47, págs. 99-131, 2005.
- [13] L. T. Biegler, *Nonlinear Programming: Concepts, Algorithms and Applications to Chemical Processes*. 2010.
- [14] M. Vaccari y G. Pannocchia, «Implementation of an economic MPC with robustly optimal steady-state behavior», *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, n.º 20, págs. 92-97, 2018.
- [15] E. Oliveira-Silva, C. de Prada y D. Navia, «Dynamic optimization integrating modifier adaptation using transient measurements», *Computers and Chemical Engineering*, vol. 149, 2021.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# MODELO DE PREDICCIÓN DE RESPUESTAS CARDIOVASCULARES DURANTE LA INMERSIÓN EN UN ENTORNO ACUÁTICO

D. Martínez-Pascual, M. Arnau-Papí, J.M. Catalán, L.D. Lledó, S. Ezquerro, F.J. Verdú-García, Nicolás García-Aracil  
Universidad Miguel Hernández de Elche, Instituto de Bioingeniería, david.martinezp@umh.es

## Resumen

*El sistema cardiovascular se ve afectado cuando el cuerpo humano se sumerge en un entorno acuático. Para estudiar y predecir las respuestas del sistema cardiovascular durante la inmersión se ha desarrollado un modelo de alto nivel. El modelo presentado se compone de un conjunto de ecuaciones en diferencias que describe el comportamiento del sistema cardiovascular de acuerdo con el nivel de inmersión. El modelo se evalúa en simulación y se compara con los efectos descritos en la literatura científica en sesiones experimentales.*

**Palabras clave:** Modelado sistema cardiovascular, robótica de rehabilitación, rehabilitación acuática

## 1 INTRODUCCIÓN

Diferentes trastornos motores provocados por ictus, lesiones medulares o esclerosis múltiple pueden traer discapacidades crónicas que limiten la autonomía y calidad de vida. En pacientes de ictus la espasticidad es un síntoma muy común, afectando hasta el 30% de los pacientes [15]. Además, se ha demostrado que la prevalencia de la espasticidad no difiere entre miembros superiores e inferiores. En el caso de pacientes con lesiones medulares la espasticidad llega a afectar hasta el 70% de los sujetos, causando un grado de discapacidad considerable [12]. Asimismo, el desarrollo de contracturas y rigidez en las articulaciones es una de las secuelas más importantes en pacientes de lesiones medulares. En concreto, se han reportado contracturas en al menos una articulación para el 66% de los pacientes [10].

La robótica de rehabilitación es una disciplina que puede realizarse como un complemento de las terapias convencionales, y cuyo propósito es asistir el movimiento de los miembros afectados empleando sistemas robóticos para tratar de disminuir las discapacidades motoras [8]. No obstante, diversos autores señalan que, tanto para los miembros superiores como inferiores, algunos

pacientes fueron excluidos de las pruebas de control debido a una espasticidad severa, dolor o rango de movimiento limitado, entre otros factores [17]. Para tratar de superar estos problemas, y poder ofrecer esta terapia a los pacientes excluidos en las pruebas, una posibilidad sería realizar la terapia de rehabilitación en un tanque de agua con unas condiciones controladas. Realizar la terapia de forma sumergida en este tipo de entorno puede aportar ciertas ventajas como una descarga de las articulaciones del paciente o una menor resistencia al movimiento, y ha demostrado ser una terapia efectiva para tratar la artritis [14] o las lesiones medulares [6].

El proyecto SPLASH nace como un intento para superar estos problemas y ofrecer terapia de rehabilitación con dispositivos robóticos a los pacientes excluidos. El principal objetivo del proyecto SPLASH es investigar un paradigma de rehabilitación radicalmente nuevo. El paradigma propuesto va más allá del desarrollo de dispositivos robóticos sumergibles, ya que se propone estudiar los efectos del cuerpo humano en un entorno acuático cambiante. Por ello, para tener una mejor comprensión de las reacciones del cuerpo humano, se propone desarrollar modelos de alto nivel para estimar el estado del usuario en el entorno de apoyo. Sin embargo, existe una falta de modelos matemáticos que describan las respuestas fisiológicas del cuerpo humano en un entorno acuático cambiante.

Cabe destacar que diversos autores han demostrado que el sistema cardiovascular se ve afectado cuando el cuerpo se encuentra sumergido. Además, las respuestas fisiológicas varían de acuerdo con el nivel de inmersión, tal y como recogen I. M. Wilcock et al. [18]. En concreto, se ha demostrado que estos cambios se deben principalmente a una redistribución de la sangre desde los miembros al tórax, especialmente desde los miembros inferiores [13].

En este trabajo se presenta un modelo de alto nivel que describe las respuestas del sistema cardiovascular en un entorno acuático a temperatura termoneutral, con un nivel de inmersión cambiante.

## 2 MÉTODOS

### 2.1 ANTECEDENTES

La literatura científica recoge diferentes modelos para estudiar las respuestas del sistema cardiovascular bajo ciertas condiciones. Prueba de ello es el modelo desarrollado por S. Timischl [16], un modelo en tiempo continuo que describe el comportamiento del sistema cardiovascular durante el ejercicio físico. No obstante, otros autores prefieren no despreciar la naturaleza pulsátil del corazón. Ejemplos de ello son el modelo del sistema cardiovascular desarrollado por S. Gisler para escenarios de rehabilitación [2], o el modelo desarrollado por R. DeBoer et al., el cual describe el comportamiento del sistema cardiovascular durante el reposo [1]. Ambos autores proponen modelos latido a latido compuestos por un conjunto de ecuaciones en diferencias.

A pesar de que se han desarrollado modelos que explican el comportamiento del sistema cardiovascular en diferentes situaciones, existe una falta de modelos capaces de describir las respuestas del sistema cardiovascular durante la inmersión en un entorno acuático. Por tanto, el modelo matemático propuesto está basado en los efectos que produce la inmersión, recogidos en la bibliografía. En concreto, el modelo se basa en los datos experimentales recabados por K. S. Park et al. [11] y la revisión sistemática realizada por I. M. Wilcock et al.

La mayoría de modelos del sistema cardiovascular están compuestos por reservas o compartimentos que representan las partes que lo forman. El modelo propuesto por S. Gisler es una muestra de ello, y en cuyo modelo nos basamos. Asimismo, los modelos que explican el funcionamiento completo del sistema cardiovascular suelen incluir elementos del sistema nervioso. Suele ser común incluir el reflejo barorreceptor debido a que regula la presión sanguínea y el ritmo cardíaco a corto plazo. Por tanto, el modelo matemático propuesto incorpora el reflejo barorreceptor para así cerrar el bucle de control del sistema, y está basado en el modelo propuesto por R. DeBoer et al. En la Figura 1 se muestra un esquema del modelo propuesto.

Siguiendo la filosofía de los modelos latido a latido, se propone un modelo en tiempo discreto, donde  $k$  representa un latido. Esto provoca que las variables introducidas se actualicen en cada latido. No obstante, cabe destacar que cada una de las características del sistema cardiovascular se actualiza en determinados instantes de tiempo durante el ciclo cardíaco, como se muestra en la Figura 2.

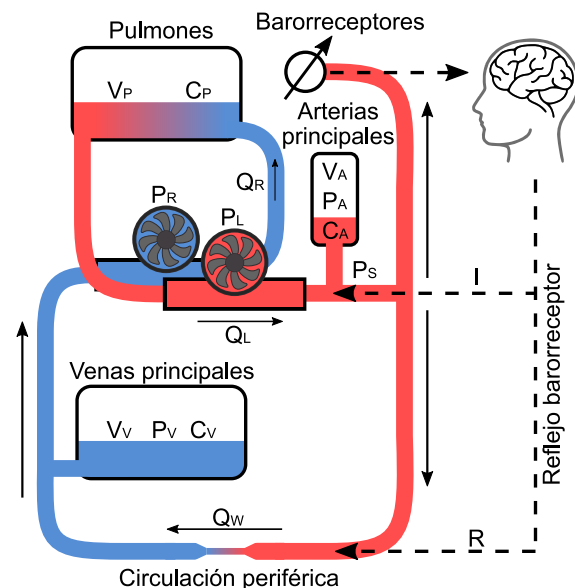


Figura 1: Representación simplificada del sistema cardiovascular del ser humano.

### 2.2 MODELADO DEL SISTEMA CARDIOVASCULAR

#### 2.2.1 Hemodinámica

En el modelo propuesto se tiene en cuenta la circulación en las arterias y venas principales, pero también la circulación pulmonar y la microcirculación en partes periféricas del cuerpo. Esta microcirculación se modela como un estrechamiento de los vasos sanguíneos y se conoce como resistencia periférica. Además, cabe destacar que los vasos sanguíneos no se modelan como tubos rígidos, ya que se modelan como vasos con una cierta elasticidad.

El modelo propuesto por S. Gisler está formado por 3 reservas principales, y representan el sistema pulmonar, las arterias y las venas. Cada reserva tiene asociado un volumen ( $V_P$ ,  $V_A$ ,  $V_V$ ), una determinada elasticidad ( $C_P$ ,  $C_A$ ,  $C_V$ ) y una constante que representa el volumen sanguíneo no estresado ( $V_{P0}$ ,  $V_{A0}$ ,  $V_{V0}$ ). Los volúmenes estresados causan que la sangre circule a unas determinadas presiones, que pueden definirse como

$$P_R(k) = \frac{V_V(k-1) - V_{V0}}{C_V(k)} \quad (1)$$

$$P_L(k) = \frac{V_P(k-1) - V_{P0}}{C_P} \quad (2)$$



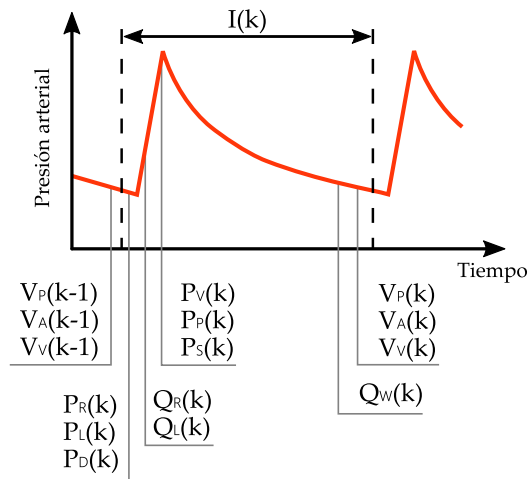


Figura 2: Instante de actualización de variables hemodinámicas durante el ciclo cardiaco

$$P_D(k) = \frac{V_A(k-1) - V_{A0}}{C_A} \quad (3)$$

donde  $P_R$  y  $P_L$  representan las presiones en las aurículas derecha e izquierda, y  $P_D$  la presión diastólica, que depende directamente del volumen sanguíneo en las arterias.

Nótese que  $C_P$  y  $C_A$  se modelan como constantes, pero  $C_V$  se expresa como una variable. De acuerdo con K. S. Park et al., la compresión hidrostática reduce la elasticidad de las venas, especialmente en los miembros inferiores. Por tanto,  $C_V$  se expresa como función del nivel de inmersión. Una posible aproximación es considerar el término dependiente de la inmersión como aditivo

$$C_V(k) = C_{V0} - \delta_V \cdot \frac{H_b(k)}{H_H} \quad (4)$$

donde  $C_{V0}$  indica la elasticidad de las venas sin inmersión,  $H_b$  el nivel de inmersión,  $H_H$  la altura del sujeto y  $\delta_V$  un factor de proporcionalidad.

Además, el flujo entre reservas puede expresarse de forma general como

$$V_j(k) - V_j(k-1) = Q_{in}(k) - Q_{out}(k) \quad (5)$$

siendo  $Q_{in}$  y  $Q_{out}$  las entradas y salidas de volúmenes de la reservas.

De acuerdo con S. Gisler, los volúmenes sistólicos izquierdo y derecho ( $Q_L$ ,  $Q_R$ ), basados en la ley de Frank-Starling, pueden explicarse como una función de la precarga y la longitud del intervalo R-R ( $I$ ) previo. Asimismo, de acuerdo con I. M. Wilcock et al., el volumen sistólico tiende a aumentar conforme aumenta el nivel de inmersión.

Este comportamiento se expresa en la ecuación (6) para los volúmenes sistólicos izquierdo y derecho ( $R, L$ ), donde  $\gamma_{R,L}$  se trata de un factor constante, y  $\delta_{R,L}$  un factor de proporcionalidad conforme al nivel de inmersión.

$$Q_{R,L}(k) = \gamma_{R,L} \cdot P_{R,L}(k) \cdot I(k-1) + \delta_{R,L} \cdot \frac{H_b(k)}{H_H} \quad (6)$$

Según S. Gisler, debido al efecto Windkessel producido en las arterias, la circulación periférica ( $Q_W$ ) depende de la diferencia de presión sistólica ( $P_S$ ) y la presión en las venas ( $P_V$ ), además de la longitud de  $I$  y la resistencia periférica ( $R$ ).

$$Q_W(k) = C_A \cdot (P_S(k) - P_V(k)) \cdot (1 - e^{-\frac{I(k)}{R(k) \cdot C_A}}) \quad (7)$$

En (7),  $P_V$  hace referencia a la presión venosa justo después de la sístole, cuando  $Q_R$  entra en la circulación pulmonar, lo que puede formularse como

$$P_V(k) = \frac{V_V(k-1) - V_{V0} - Q_R(k)}{C_V(k)} \quad (8)$$

Las ecuaciones (9) y (10) definen la presión de pulso ( $P_P$ ), así como su relación con el volumen sistólico y la elasticidad arterial.

$$P_P(k) = P_S(k) - P_D(k) \quad (9)$$

$$P_P(k) = \frac{Q_L(k)}{C_A} \quad (10)$$

## 2.2.2 Regulación de la presión sanguínea

La regulación de la presión sanguínea se lleva a cabo por regulaciones a corto plazo (segundos, minutos y horas), pero también por regulaciones a largo plazo (días o semanas). Para evaluar las respuestas del sistema cardiovascular durante la inmersión, solo se consideran las regulaciones a corto plazo.

En el modelo propuesto, el reflejo barorreceptor es responsable de regular la presión sanguínea, cerrando el bucle de control del sistema. Se sabe que el reflejo barorreceptor responde de forma proporcional en un rango limitado de presiones, cuya sensibilidad puede describirse como una función sigmoide [7]. Basándonos en el modelo



desarrollado por R. DeBoer et al., esta función sigmoide puede expresarse como

$$P_{BS}(k) = P_{B0} + 18 \cdot \arctan\left(\frac{P_B(k) - P_{B0}}{18}\right) \quad (11)$$

siendo  $P_B$  una aproximación de la presión arterial media (MAP), calculada en (12).  $P_{BS}$  es la MAP percibida por los barorreceptores y  $P_{B0}$  es el punto de equilibrio, que se considera la MAP del sujeto sin inmersión.

$$P_B(k) = \frac{1}{3}P_S(k) + \frac{2}{3}P_D(k) \quad (12)$$

A partir de una hipotética señal del reflejo barorreceptor, el sistema nervioso regula el ritmo cardiaco de acuerdo con la presión sanguínea. El modelo propuesto tiene en cuenta las acciones del sistema nervioso simpático y parasimpático en la regulación del ritmo cardiaco. Este comportamiento se expresa en (13), donde  $I$  se determina a partir de  $P_{BS}$  y  $P_P$  durante el latido actual (debido a la influencia rápida del sistema parasimpático), junto con una suma ponderada de  $P_{BS}$  de latidos previos (influencia simpática, más lenta), más una constante  $K_B$ .

$$I(k) = \alpha \cdot P_{BS}(k) + \sum_{n=2}^6 (\beta_I(n) \cdot P_{BS}(k-n)) + K_P \cdot P_P(k) + K_B \quad (13)$$

El reflejo barorreceptor también regula la presión sanguínea ajustando  $R$ . De acuerdo con R. DeBoer et al., las acciones de regulación de  $R$  las lleva a cabo el sistema nervioso simpático. Esto también se expresa como una suma ponderada de  $P_{BS}$  en ciclos previos, como se muestra en (14). Además, de acuerdo con I. M. Wilcock et al., diversos autores han demostrado que existe un decremento de  $R$  con la inmersión. Este comportamiento se modela como un término negativo con una ganancia  $\delta_{BR}$ .

$$R(k) = R_P - \sum_{n=2}^6 (\beta_R(n) \cdot P_{BS}(k-n)) - \delta_{BR} \cdot \frac{H_b(k)}{H_H} \quad (14)$$

## 2.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

En el modelo del sistema cardiovascular descrito existe una serie de constantes que será necesario determinar. Para determinar algunas de esas

constantes nos basaremos en datos de la literatura científica, pero existen otros parámetros que será necesario determinar matemáticamente, empleando el modelo presentado.

Los volúmenes de sangre no estresados  $V_{P0}$ ,  $V_{A0}$  y  $V_{V0}$  se determinan a partir de una aproximación de la distribución de los volúmenes de sangre en el cuerpo humano. De acuerdo con [4], del volumen sanguíneo total del cuerpo humano, un 9% se encuentra en el circuito pulmonar, un 64% en las venas, un 13% en las arterias, un 7% en el corazón y el 7% restante en capilares y vénulas. Además, se estima que aproximadamente el 57% del volumen sanguíneo corresponde a volumen no estresado [3]. Por tanto, una posible aproximación de volúmenes no estresados pasaría por aplicar la distribución sanguínea al cálculo del volumen no estresado. Asimismo, para calcular estos volúmenes se estimará el volumen total sanguíneo de un sujeto en base a su masa corporal, altura y sexo [9].

Para las ponderaciones de las acciones simpática y parasimpática en la regulación de  $I$  y  $R$ , se emplea la ponderación triangular propuesta por R. DeBoer et al. Se empleará una ponderación triangular  $\beta_I(n) = \beta_R(n) = [1, 2, 3, 2, 1]$  ms/mmHg para los instantes  $n = [k-2, k-3, k-4, k-5, k-6]$ .

En cuanto a la elasticidad de los vasos,  $C_P$ ,  $C_A$  y  $C_{V0}$  se ajustan para tener valores fisiológicos normales. Los valores empleados se asemejan en gran medida a los empleados por S. Gisler.

El resto de parámetros del modelo se calculan en el régimen permanente para dos condiciones: inmersión a una determinada altura y no inmersión. Para determinar estas constantes del modelo, establecemos valores de pulso y presiones sistólica y diastólica para ambas condiciones de inmersión. Estos datos están basados en la sesión experimental realizada por K. S. Park et al., y se recogen en la Tabla 1.

Para determinar todas las constantes del modelo, a cada condición se le impondrá dos restricciones adicionales. La primera restricción se expresa en (15), donde se fuerza a que la suma de volúmenes sea igual al volumen sanguíneo total (el 14% del volumen total representa la sangre en capilares y corazón). En la segunda restricción se impone el valor de  $R$  calculado en (16), siendo una aproximación de la resistencia total periférica [5]. Además, de acuerdo con [13], al sumergir el cuerpo humano se redistribuyen unos 500 mL de los miembros inferiores al circuito pulmonar, y esto se expresa en (17).

$$V_T = V_P + V_A + V_V + 0.14 \cdot V_T \quad (15)$$

$$R = \frac{P_B}{Q_L \cdot HR} \quad (16)$$

$$V_P = V_{Pout} + 500[ml] \quad (17)$$

Imponiendo estas restricciones en régimen permanente, quedará un sistema de ecuaciones compatible determinado, por lo que se podrán establecer todos los parámetros empleados en el modelo.

Tabla 1: Valores en régimen permanente para pulso (HR), presión sistólica (PS) y presión diastólica (PD) para dos condiciones de inmersión.

	Variable	Valor en régimen permanente
No inmersión	HR [lpm]	74
	PS [mmHg]	110
	PD [mmHg]	76
Inmersión hasta el cuello	HR [lpm]	70
	PS [mmHg]	122
	PD [mmHg]	80

### 3 RESULTADOS

El modelo propuesto se ha implementado en MATLAB-Simulink, y se ha simulado el sistema para un varón de 1.70 m de altura y 70 kg de masa corporal. La Tabla 2 resume las salidas del sistema para diferentes niveles de inmersión. Además, la Figura 3 muestra la entrada del sistema y

la evolución según el nivel de inmersión de la elasticidad venosa, la distribución sanguínea, las acciones de regulación del ritmo cardíaco, el pulso y la MAP junto con la presión arterial media percibida por los barorreceptores.

Cabe destacar que los niveles de inmersión se han ajustado para representar inmersiones hasta el cuello (144.50 cm) y hasta la apófisis xifoides (118.50 cm), de acuerdo con la altura del usuario y medidas estándar del cuerpo humano.

### 4 DISCUSIÓN

Con este modelo lo que se pretende es estimar el estado del usuario, buscando estudiar y comprender los cambios en el sistema cardiovascular producidos por la inmersión en agua termoneutral (34,5°C). Por ello, cabe destacar que, aunque algunas variables presenten sobreoscilaciones por la naturaleza del sistema, para nuestro caso estamos especialmente interesados en estudiar el régimen permanente.

Uno de los principales efectos producidos cuando el cuerpo humano se sumerge es el decremento de la elasticidad de las venas, causada por la compresión hidrostática (Figura 3.b). Esto causa que una cierta cantidad de sangre se redistribuya desde los miembros inferiores hasta la cavidad torácica, especialmente al circuito pulmonar (Figura 3.c).

Esta redistribución provoca ciertos cambios en el volumen sistólico, lo que conlleva un aumento del gasto cardíaco, estimado multiplicando el  $HR$  por  $Q_L$  (Tabla 2). Además, esto vendrá acompañado

Tabla 2: Valores en régimen permanente para diferentes niveles de inmersión, calculados para un varón de 170 cm de altura y 70 kg.

Variable	Condición 0	Condición 1	Condición 2
Nivel de inmersión (cm)	0.00	144.50	118.50
Pulso (lpm)	74.00	70.00	71.74
Gasto cardíaco (mL/min)	5032.00	5880.00	5436.50
Presión sistólica (mmHg)	110.00	122.00	116.85
Presión diastólica (mmHg)	76.00	80.00	78.56
MAP (mmHg)	87.30	93.72	90.29
MAP percibida por barorreceptores (mmHg)	87.30	94.00	91.33
Presión auricular derecha (mmHg)	5.13	9.12	8.08
Presión auricular izquierda (mmHg)	6.45	10.61	9.43
Volumen arterias (mL)	504.16	512.16	509.29
Volumen venas (mL)	2486.70	1978.70	2214.82
Elasticidad venas (mL/mmHg)	150.00	29.58	51.26
Resistencia periférica (mmHg cdot ms/mL)	1041.34	959.18	997.54
Volumen sistólico izquierdo (mL)	68.00	84.00	76.57
Volumen sistólico derecho (mL)	68.00	84.00	76.57
Circulación periférica (mL)	68.00	84.00	76.57

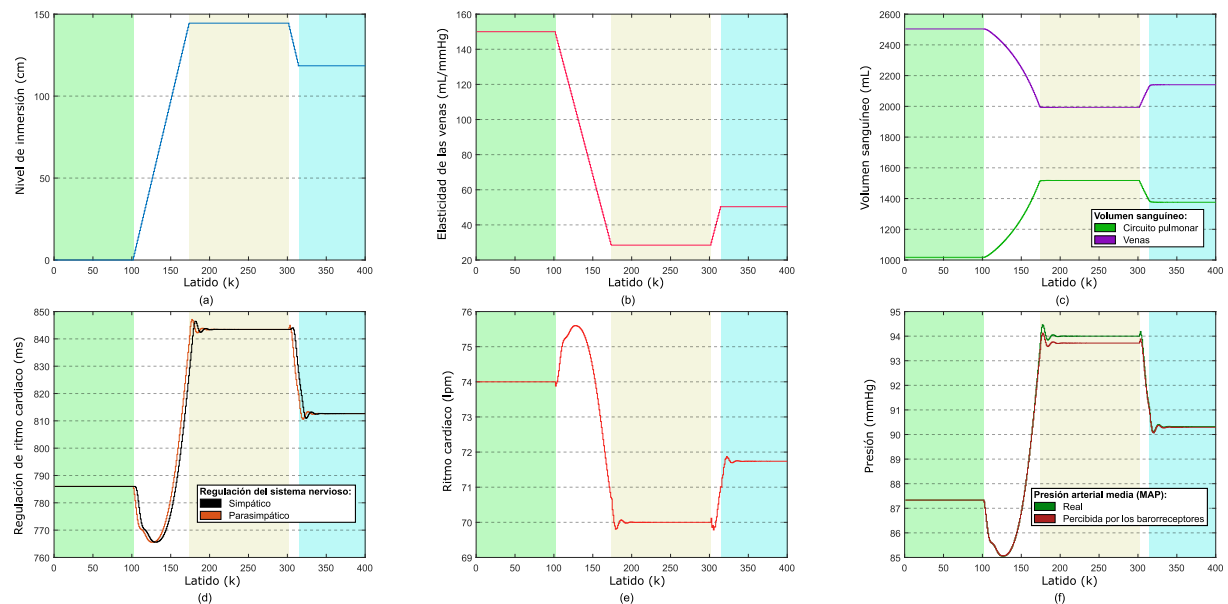


Figura 3: Resultados obtenidos en simulación para un varón de 170 cm de altura y 70 kg. Cada sección coloreada representa un nivel de inmersión: en verde no inmersión, en naranja inmersión hasta el cuello, en azul inmersión hasta la apófisis xifoides (a) Nivel de inmersión, introducido como entrada del sistema (b) Evolución de elasticidad de las venas según el nivel de inmersión (c) Evolución de la distribución sanguínea en venas y circuito pulmonar (d) Regulación del pulso por el sistema nervioso simpático y parasimpático, empleadas como acción de control del sistema (e) Evolución del pulso según el nivel de inmersión (f) Presión arterial media y presión arterial media percibida por los barorreceptores

por un decremento en la resistencia periférica.

Si observamos las presiones en la Tabla 2 se observa un incremento de las presiones sanguíneas durante la inmersión, cuyo efecto se reportó en el estudio elaborado por K. S. Park et al. Además, cabe destacar el efecto del modelado sigmoidal de la sensibilidad de los barorreceptores (Figura 3.d). Se observa que, a mayor MAP, la sensibilidad de los barorreceptores decae, por lo que perciben una menor presión sanguínea.

Por otra parte, existe un decremento del ritmo cardíaco durante la inmersión (Figura 3.e). A pesar de que K. S. Park et al. no obtienen resultados significativos, otros estudios recogidos en el trabajo de I. M. Wilcock et al. observan una cierta tendencia del pulso a disminuir.

Como se ha mencionado previamente, el reflejo barorreceptor será el encargado de variar tanto el pulso como la resistencia periférica para así regular la presión sanguínea. Tanto el sistema nervioso simpático como el parasimpático tendrán influencia sobre el pulso. Estas acciones de regulación se muestran en la Figura 3.d, donde se observa un cierto retardo de la señal simpática con respecto a la parasimpática, debido a que las acciones del sistema nervioso simpático son más lentas. Además, cabe mencionar que, para mayor presión sanguínea, se observa una acción

de control que tiende a aumentar el intervalo R-R, disminuyendo de esta forma el ritmo cardíaco.

## 5 CONCLUSIÓN

Se ha presentado un modelo matemático para tratar de comprender y predecir las respuestas del sistema cardiovascular durante la inmersión en un entorno acuático. Se demuestra mediante simulación que el modelo es capaz de predecir correctamente un considerable número de efectos producidos para diferentes niveles de inmersión, de acuerdo con los resultados aportados por otros autores.

A pesar de que el modelo ha sido evaluado en simulación, se pretende validar el modelo propuesto en una sesión experimental, examinando si es capaz de predecir correctamente las respuestas del sistema cardiovascular para diferentes niveles de inmersión. Asimismo, como planteamos emplear el modelo como una herramienta para predecir el estado del usuario durante escenarios de rehabilitación, se investigará la posibilidad de incorporar al modelo las respuestas producidas por un cambio de temperatura del agua, así como los efectos producidos al realizar un ejercicio de rehabilitación, tanto de forma asistida como no asistida.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, perteneciente a la Agencia Estatal de Investigación (AEI), a través del proyecto PID2019-108310RB-I00/AEI/10.13039/501100011033.

## English summary

# CARDIOVASCULAR PREDICTIVE MODEL DURING WATER IMMERSION

## Abstract

*The cardiovascular system is affected when the human body is immersed in water. To understand and predict the effects on the cardiovascular system during immersion, a high-order model is presented. The model describes the cardiovascular responses according to immersion level with a set of difference equations. The model is evaluated in simulation, and the simulated responses are compared to effects reported in the scientific literature in experimental scenarios*

**Keywords:** Cardiovascular modelling, rehabilitation robotics, aquatic rehabilitation.

## Referencias

- [1] DeBoer, R. W., Karemaker, J. M., & Strackee, J. (1987). Hemodynamic fluctuations and baroreflex sensitivity in humans: a beat-to-beat model. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 253(3), H680-H689.
- [2] Gisler, S. (2011). Modelling and control of the human cardiovascular system (Master's thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Sensory-Motor Systems Lab (SMS)).
- [3] Greenway, C. V., & Lutt, W. W. (1986). Blood volume, the venous system, preload, and cardiac output. *Canadian journal of physiology and pharmacology*, 64(4), 383-387.

- [4] Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2006). *Medical physiology*. Gökhan N, Çavuşoğlu H (Çeviren), 3.
- [5] Hill, L. K., Sollers III, J. J., & Thayer, J. F. (2013). Resistance reconstructed: Estimation of total peripheral resistance from computationally-derived cardiac output. *Biomedical sciences instrumentation*, 49, 216.
- [6] Kesiktaş, N., Paker, N., Erdogan, N., Gülsen, G., Biçki, D., & Yılmaz, H. (2004). The use of hydrotherapy for the management of spasticity. *Neurorehabilitation and neural repair*, 18(4), 268-273.
- [7] McDowall, L. M., & Dampney, R. A. (2006). Calculation of threshold and saturation points of sigmoidal baroreflex function curves. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 291(4), H2003-H2007.
- [8] Miller, E. L., Murray, L., Richards, L., Zorowitz, R. D., Bakas, T., Clark, P., & Billinger, S. A. (2010). Comprehensive overview of nursing and interdisciplinary rehabilitation care of the stroke patient: a scientific statement from the American Heart Association. *Stroke*, 41(10), 2402-2448.
- [9] Nadler, S. B., Hidalgo, J. U., & Bloch, T. (1962). Prediction of blood volume in normal human adults. *Surgery*, 51(2), 224-232.
- [10] Nas, K., Yazmalar, L., Şah, V., Aydın, A., & Öneş, K. (2015). Rehabilitation of spinal cord injuries. *World journal of orthopedics*, 6(1), 8.
- [11] Park, K. S., Choi, J. K., & Park, Y. S. (1999). Cardiovascular regulation during water immersion. *Applied Human Science*, 18(6), 233-241.
- [12] Rekand, T., Hagen, E. M., & Grønning, M. (2012). Spasticity following spinal cord injury. *Tidsskrift for Den norske legeforening*.
- [13] Risch, W. D., Koubenec, H. J., Beckmann, U., Lange, S., & Gauer, O. H. (1978). The effect of graded immersion on heart volume, central venous pressure, pulmonary blood distribution, and heart rate in man. *Pflügers Archiv*, 374(2), 115-118.
- [14] Roper, J. A., Bressel, E., & Tillman, M. D. (2013). Acute aquatic treadmill exercise improves gait and pain in people with knee osteoarthritis. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 94(3), 419-425.

- [15] Thibaut, A., Chatelle, C., Ziegler, E., Bruno, M. A., Laureys, S., & Gosseries, O. (2013). Spasticity after stroke: physiology, assessment and treatment. *Brain injury*, 27(10), 1093-1105.
- [16] Timischl, S. (1998). A global model for the cardiovascular and respiratory system. Karl-Franzens-Universität Graz, Austria.
- [17] Veerbeek, J. M., Langbroek-Amersfoort, A. C., Van Wegen, E. E., Meskers, C. G., & Kwakkel, G. (2017). Effects of robot-assisted therapy for the upper limb after stroke: a systematic review and meta-analysis. *Neurorehabilitation and neural repair*, 31(2), 107-121.
- [18] Wilcock, I. M., Cronin, J. B., & Hing, W. A. (2006). Physiological response to water immersion. *Sports medicine*, 36(9), 747-765.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# ANÁLISIS DE PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS LIBRES DE COLISIONES CON EL OPERADOR HUMANO EN SISTEMAS ROBÓTICOS DE TIPO SUPERNUMERARIO

D. Martínez-Pascual<sup>1</sup>, J. Álvarez-Pastor<sup>1</sup>, F.J. Verdú-García<sup>1</sup>, M. Arnau-Papí<sup>1</sup>, L.D. Lledó<sup>1</sup>, F. Lopez-Labrador<sup>2</sup>  
M.Á. Bernal<sup>2</sup> y N. García-Aracil<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Miguel Hernández, Av. de la Universidad, s/n, 03202, Elche. david.martinezp@umh.es

<sup>2</sup> Eiffage Energia, Ctra. Mahora Km 3,2 02006 Albacete

## Resumen

*Con objeto de disminuir los trastornos musculoesqueléticos en el ámbito laboral, se plantea la posibilidad de emplear dispositivos robóticos de tipo supernumerario que permitan apoyar diversos tipos de tareas durante la realización de trabajos de mantenimiento. Además, se pretende que este tipo de dispositivos sea capaz de actuar de forma cooperativa con el usuario de forma autónoma o semi-autónoma. Para ello, se precisa desarrollar un sistema capaz de evitar la colisión con el usuario. En este trabajo se analiza el uso de planificadores de trayectorias para la evasión de los brazos humanos durante tareas de mantenimiento mediante un modelo simulado.*

**Palabras clave:** Robot supernumerario, planificadores de trayectorias, Robotics Operating System (ROS)

## 1 INTRODUCCIÓN

Los trastornos musculoesqueléticos (TME) son alteraciones que abarcan desde incomodidad, molestias o dolores hasta cuadros médicos más graves que obligan a solicitar la baja laboral e incluso a recibir tratamiento médico. Pueden afectar a los músculos, articulaciones, tendones, ligamentos, huesos y nervios del cuerpo [1].

Las demandas físicas de las tareas realizadas son de los factores de riesgo más asociados a los TME, particularmente las posturas forzadas, la manipulación de cargas, la aplicación de fuerzas y la repetitividad de las acciones. Analizando los resultados de la VII Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo relacionados con los trastornos musculoesqueléticos, los movimientos repetitivos de manos o brazos eran los que afectaban en mayor medida a los encuestados (59%), seguidos por la adopción de posturas dolorosas o fatigantes (35,8%) y la manipulación de cargas (23,3%) [4].

Hacer frente a los TME y los riesgos psicosociales que conllevan exige la adopción de medidas en

el puesto de trabajo. Estas medidas se pueden dividir en dos grandes líneas de actuación: 1) adecuación del puesto de trabajo y 2) desarrollo de ayudas técnicas avanzadas. Dentro de las ayudas técnicas avanzadas, surge el proyecto SecondArmS. Este proyecto tiene como objetivo el desarrollo de dispositivos robóticos bimanuales que ayuden al usuario en tareas de manipulación de cargas y en la realización de movimientos repetitivos. Además, el dispositivo desarrollado permitirá asistir al usuario en la adopción de posturas fatigantes o dolorosas durante la realización de trabajos de mantenimiento, como por ejemplo cuando se realizan tareas de mantenimiento por encima del nivel de la cabeza.

En cuanto al control del sistema, los brazos podrán ser teleoperados, pero también se propone desarrollar un sistema que permita mover los manipuladores robóticos de forma autónoma o semi-autónoma, capaz de evitar la colisión con el usuario. Por tanto, el problema pasa por generar trayectorias entre una configuración inicial y final para los manipuladores en el espacio libre, i.e., en el espacio no ocupado por el usuario o por el propio dispositivo robótico.

MoveIt! es un software ampliamente utilizado para manipulación en ROS [3], el cual permite escoger entre diferentes librerías de planificación de trayectorias. Entre ellas se encuentra la librería Open Motion Planning Library (OMPL) [7], y es la librería de planificación de trayectorias configurada por defecto en MoveIt!.

La librería OMPL incluye planificadores basados en muestreos aleatorios. Este concepto de planificadores se basa en un muestreo del espacio de estados del robot para así proporcionar una respuesta rápida al problema de planificación. Dentro de este tipo de planificadores, podríamos distinguir dos subtipos:

- **Planificadores single-query.** Buscan respuesta a una única planificación entre configuración inicial y final. Estos planificadores se basan en la construcción de árboles de estados conectados por movimientos válidos. Dentro de este



conjunto se encuentran los planificadores **RRT**, **EST**, **KPIECE**, **STRIDE**, **PDST** o **FMT**, y sus variantes (**TRRT**, **BiTRRT**, **RRTConnect**, **RRT\***, **SBL**, **BiEST**, **ProjEST**, **BKPIECE**, **LBKPIECE**).

- **Planificadores multi-query.** Este tipo de planificadores construye un mapa de caminos válidos que cubre todo el espacio de estados. Una vez construido el mapa, éste servirá para realizar múltiples peticiones de planificación entre configuración inicial y final. En esta categoría se encuentran los planificadores **PRM** y **SPARS**, así como sus variantes (**PRM\***, **LazyPRM**, **LazyPRM\***, **SPARS2**).

Para desarrollar un sistema que evite colisionar con el usuario, se considerará la posibilidad de emplear los planificadores de trayectorias de la librería OMPL. Cabe destacar que, debido a la naturaleza de la aplicación presentada, se propone investigar el rendimiento de los planificadores como single-query, incluidos los planificadores multi-query **PRM**, **SPARS** y sus variantes.

A lo largo de las siguientes secciones se presenta un modelo simulado del sistema SecondArmS y la evaluación del rendimiento de los planificadores en base a diferentes métricas.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Para analizar el comportamiento en simulación, se ha desarrollado un modelo del sistema SecondArmS para la plataforma Robotics Operating System (ROS) [6]. El modelo se implementa mediante archivos URDF (Unified Robotic Description Format). Los archivos URDF son archivos en formato XML que permiten describir los elementos de un robot y las relaciones entre ellos en ROS.

El sistema propuesto estará formado por tres componentes principales: los brazos manipuladores robóticos, una plataforma elevadora y el operador humano. Todos estos elementos se modelan en un único archivo URDF, de modo que se tendrá en todo instante información de todos los elementos del sistema y la interacción entre ellos. La Figura 1 muestra una representación del sistema implementado.

Debido a que el sistema se encuentra en desarrollo, el modelo implementado no se trata de un modelo definitivo. No obstante, el modelo se desarrolla con las dimensiones esperadas del sistema final. En las siguientes secciones se

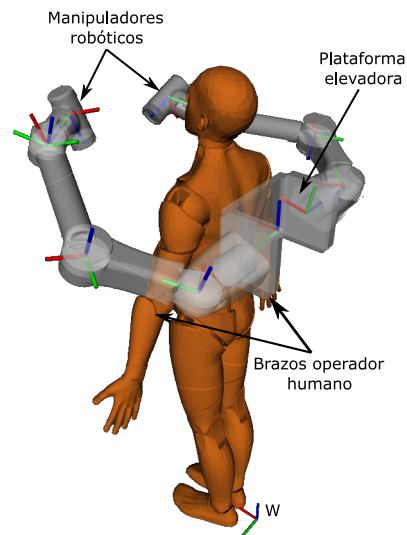


Figura 1: Modelo del sistema SecondArmS implementado en ROS (W = Sistema de referencia del mundo)

presenta de forma más detallada cada uno de los elementos principales que componen el conjunto del modelo.

#### 2.1.1 Brazos manipuladores

El sistema posee dos manipuladores robóticos colaborativos con muñeca no esférica de 6 grados de libertad (GDL), lo que permite alcanzar los puntos del espacio de trabajo con diferentes orientaciones (3 grados de libertad para posición y 3 grados de libertad para orientación). Cada grado de libertad se modela como una articulación rotacional en el modelo URDF.

Cabe destacar que los manipuladores robóticos se diseñan como una extensión de los brazos humanos, por lo que el alcance de los brazos robóticos será similar al alcance de un brazo humano. Esto puede observarse en la Figura 2, donde se hace una representación del espacio de trabajo de la muñeca y alcanzable de los manipuladores robóticos con respecto al operador humano. Dichos espacios de trabajo han sido representados mediante métodos Montecarlo, resolviendo la cinemática directa de los manipuladores para un número  $N$  de valores articulares aleatorios dentro del rango articular.

#### 2.1.2 Plataforma elevadora

El sistema SecondArmS está planteado de tal forma que el usuario porte una mochila con una plataforma que eleve o baje la base de los brazos robóticos. Esto conllevará un aumento del espacio de trabajo, y además permitirá al usuario

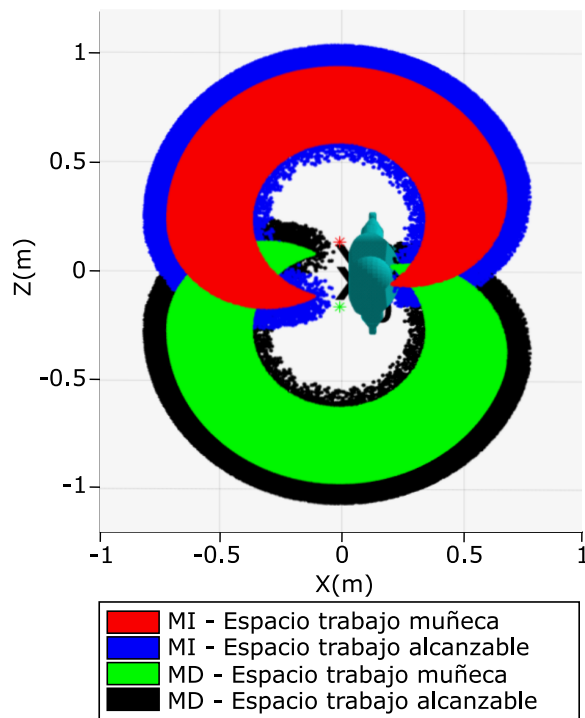


Figura 2: Representación del espacio de trabajo de la muñeca y espacio de trabajo alcanzable en el plano XZ de los manipuladores robóticos izquierdo (MI) y derecho (MD).

acomodarse el sistema según la tarea a realizar.

Dicha plataforma se desplazará sobre la mochila mediante un husillo con una carrera de 450 mm, desde la cadera hasta los hombros del operario. Dicho desplazamiento se modelará como una articulación prismática, sobre la cual se fijan las bases de los brazos manipuladores.

### 2.1.3 Operador humano

El propósito del proyecto SecondArmS es desarrollar un sistema de brazos robóticos colaborativos con el usuario. Por ello, se implementará el operador humano como parte del sistema. Esto permitirá tener en cuenta al usuario, de forma que se podrá evitar colisiones con el mismo.

El operador humano se modelará con la cabeza, torso y miembros inferiores estáticos. No obstante, se modelará como partes móviles las articulaciones de los miembros superiores. Se modelan los movimientos de abducción/aducción de hombro, flexión/extension de hombro, rotación interna/externa de codo y flexión/extension de codo, siendo para cada articulación el rango de movimiento definido en [5].

El propósito de modelar el movimiento de los brazos del usuario se debe a que se desea estudiar

el comportamiento del sistema simulado de forma que sea lo más fiel posible a la realidad, probando diferentes configuraciones del usuario y estudiando el desempeño del sistema completo. En un futuro se pretende desarrollar una aplicación que permita conocer la posición del brazo mediante unidades magnético inerciales (IMU), basado en trabajos previos del grupo de investigación [2], para así lograr que los brazos robóticos eviten colisionar con el usuario.

## 2.2 EVALUACIÓN DE LOS PLANIFICADORES

Para valorar el rendimiento de los planificadores incluidos en OMPL se establece una pose inicial y final del brazo robótico, para las que se debe planificar un camino libre de obstáculos. Como se desea evaluar el comportamiento del sistema de forma fiel a la realidad, se articula el brazo del usuario, generando así un obstáculo entre las configuraciones inicial y final del manipulador. Además, para una correcta evaluación del rendimiento de los planificadores, se planificará  $n$  veces un camino entre la configuración inicial y final.

El rendimiento de los planificadores se evaluará en base a 3 medidas para una misma configuración inicial y final: número de intentos de planificación con éxito, tiempo de planificación y longitud del camino generado.

Los intentos de planificación se analizan como el número de trayectorias planificadas con éxito con respecto al número total de intentos de planificación. Para cada planificador, a mayor número de trayectorias planificadas con éxito se valora mejor desempeño. Por otra parte, el tiempo de planificación se mide como el tiempo necesario para encontrar una trayectoria válida. Para cada planificador, a menor tiempo de planificación se califica como mejor rendimiento. Por último, se evalúa la longitud de las trayectorias planificadas. A menor longitud de trayectoria, mejor rendimiento. Asimismo, se considera como mejor rendimiento del planificador un menor rango intercuartílico para las longitudes de las trayectorias.

Cabe destacar que a partir de los planificadores OMPL se obtendrán las trayectorias para los brazos robóticos como referencias en el espacio articular. No obstante, puede aproximarse el cálculo de la longitud total del camino planificado haciendo uso de la resolución de la cinemática directa del manipulador. Si resolvemos la cinemática directa para cada referencia articular, obtendremos una matriz de transformación homogénea a partir de la

cual podemos obtener la posición en el espacio cartesiano. Esto se expresa en la Ecuación 1, donde  $r_i^E$  representa las referencias generadas en el espacio cartesiano y  $FK$  la resolución de la cinemática directa del manipulador, siendo  $r_i^Q$  un vector con los valores articulares de los 6 GDL del brazo robótico.

$$r_i^E = FK(r_i^Q) = \begin{pmatrix} R_i & T_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Para calcular la longitud total del camino planificado, se hará uso de la posición del efector final  $T_i$  para cada referencia. El cálculo de la longitud total de la trayectoria  $D_s^g$  se expresa en la Ecuación 2, donde  $n$  es el número total de referencias generadas.

$$D_s^g = \sum_{i=1}^n ||\overrightarrow{T_{i-1}T_i}|| \quad (2)$$

### 3 RESULTADOS

Para evaluar el comportamiento de los planificadores en diferentes situaciones, se ha simulado dos tipos de tareas con uno de los brazos robóticos: una tarea por encima del nivel de la cabeza, y una tarea de manipulación frontal (Figura 3). Las posiciones y orientaciones de las configuraciones inicial y final del manipulador, la altura de la plataforma y los ángulos del brazo del operador humano se recogen en la Tabla 1.

Para tener una fuente de datos fiable acerca del porcentaje de éxito, el tiempo de cálculo y la longitud de las trayectorias, cada algoritmo de planificación se ha ejecutado 100 veces para la mismas configuraciones inicial y final. Asimismo, se ha establecido como tiempo máximo asumible de planificación 5 segundos. Cabe destacar que se ha escogido un tiempo asumible de planificación alto debido a la naturaleza

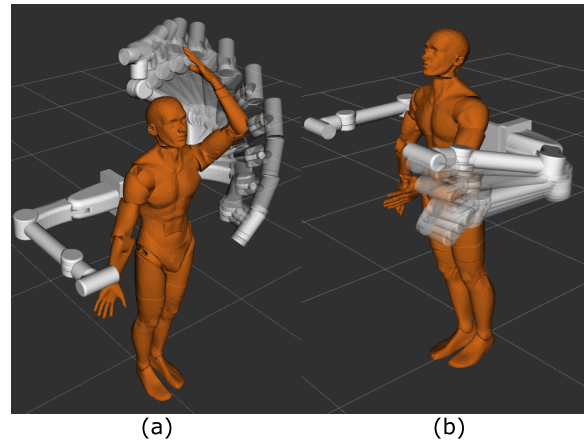


Figura 3: Simulaciones realizadas para evaluar el comportamiento de los planificadores de trayectorias durante tareas de mantenimiento (a) Simulación de tarea sobre la cabeza (b) Simulación de tarea frontal

de las tareas simuladas. En estos trabajos de mantenimiento el operador humano se supone estático, mientras que el manipulador robótico es el que realiza diferentes movimientos y tareas. Por ello, podemos suponer que los movimientos humanos son nulos y comprobar si tiempos de planificación altos logran un buen porcentaje de éxito y buenas trayectorias, especialmente los planificadores multi-query.

Los resultados obtenidos para la simulación de la tarea sobre la cabeza y para la tarea frontal se recogen en la Tabla 2. La Figura 4 y la Figura 5 muestran un gráfico boxplot de las longitudes de las trayectorias planificadas para ambas tareas.

Para la tarea por encima de la cabeza, todos los planificadores han sido capaces de encontrar un camino válido en el tiempo máximo establecido, a excepción de **RRT** (99%), **RRT\*** (94%) y **LazyPRM**, incapaz de planificar un camino en el tiempo establecido. El planificador más rápido ha sido **KPIECE**, con un tiempo de planificación

Tabla 1: Parámetros de simulación para tarea sobre la cabeza (Tarea 1) y tarea frontal (Tarea 2). Las poses del efector final del manipulador robótico y la altura de la plataforma se referencia respecto al sistema de coordenadas del mundo (W)

		Tarea 1	Tarea 2
Brazo operador humano	Abducción hombro [rad]	0.00	0.15
	Flexión hombro [rad]	2.40	0.85
	Rotación interna codo [rad]	0.55	0.60
	Extensión codo [rad]	0.00	0.82
Pose de partida	Posición (x, y, z) [m]	(-0.12, 0.08, 1.91)	(0.70, 0.33, 1.05)
	Orientación (roll, pitch, yaw) [rad]	(-1.47, 0.00, -3.04)	(-2.48, 1.56, -2.48)
Pose objetivo	Posición (x, y, z) [m]	(0.65, 0.16, 1.27)	(0.70, 0.33, 1.40)
	Orientación (roll, pitch, yaw) [rad]	(2.75, -0.59, -1.06)	(-2.6, 1.35, -2.59)
Altura plataforma elevadora [m]		1.40	1.25

Tabla 2: Porcentaje de éxito, tiempo de planificación (media y desviación estándar), mediana de longitud de trayectorias planificadas y rango intercuartílico de longitud de trayectorias (IQR)

Planificador	Tarea sobre la cabeza				Tarea frontal			
	Porcentaje de éxito (%)	Tiempo (s)	Longitud (m)	IQR	Porcentaje de éxito (%)	Tiempo (s)	Longitud (m)	IQR
SBL	100	0.0898 ± 0.0166	3.6546	0.9611	100	0.1102 ± 0.0216	2.3248	0.3852
EST	100	0.0876 ± 0.0281	3.7863	1.6804	100	0.1173 ± 0.0548	2.4215	0.5884
LBKPIECE	100	0.1061 ± 0.0189	3.2360	1.9616	100	0.1245 ± 0.0266	2.0960	0.1248
BKPIECE	100	0.1455 ± 0.0472	3.3607	1.9193	100	0.1562 ± 0.0545	2.1493	0.2466
KPIECE	100	0.0689 ± 0.0165	3.4994	1.8474	100	0.0990 ± 0.0280	2.2558	0.3063
RRT	89	0.1350 ± 0.3128	3.4579	1.8704	89	0.1603 ± 0.2114	2.1479	0.2766
RRTConnect	100	0.0877 ± 0.0129	3.2057	1.9582	100	0.1528 ± 0.0320	1.9342	0.0697
RRT*	96	5.0442 ± 0.0130	3.2167	0.3823	96	5.0723 ± 0.0203	1.9760	0.0919
TRRT	95	0.24335 ± 0.5736	3.3707	0.6079	95	0.2410 ± 0.4876	2.1072	0.2351
PRM	100	5.0210 ± 0.0115	3.5343	1.3336	100	5.0385 ± 0.0121	2.3320	0.4922
PRM*	100	5.0296 ± 0.0124	3.6245	1.7851	100	5.0487 ± 0.0165	2.3346	0.4768
FMT	100	1.2154 ± 0.1174	3.3362	0.4232	100	1.3544 ± 0.0465	2.1423	0.2770
PDST	100	0.1160 ± 0.0495	3.7919	1.1903	100	0.1353 ± 0.0613	2.5961	0.7101
STRIDE	100	0.0716 ± 0.0237	3.6188	1.8169	100	0.0989 ± 0.0344	2.1649	0.2674
BiTRRT	100	0.0976 ± 0.0239	3.4454	1.8918	100	0.1228 ± 0.0159	2.1664	0.2251
BiEST	100	0.0995 ± 0.0210	4.2499	1.5692	100	0.1146 ± 0.0252	2.6982	1.0340
ProjEST	100	0.0822 ± 0.0290	3.6092	1.7365	100	0.1088 ± 0.0396	2.4773	0.4453
LazyPRM	0	N/A	N/A	N/A	0	N/A	N/A	N/A
LazyPRM*	100	5.0193 ± 0.0155	3.3457	1.9271	100	5.0469 ± 0.01516	2.0902	0.1910
SPARS	100	5.0416 ± 0.0163	3.7740	1.7463	100	5.0606 ± 0.0210	2.4496	0.9427
SPARS2	100	5.0205 ± 0.0141	4.1170	1.5801	100	5.0349 ± 0.0160	2.8066	1.1204

N/A = No Aplicable

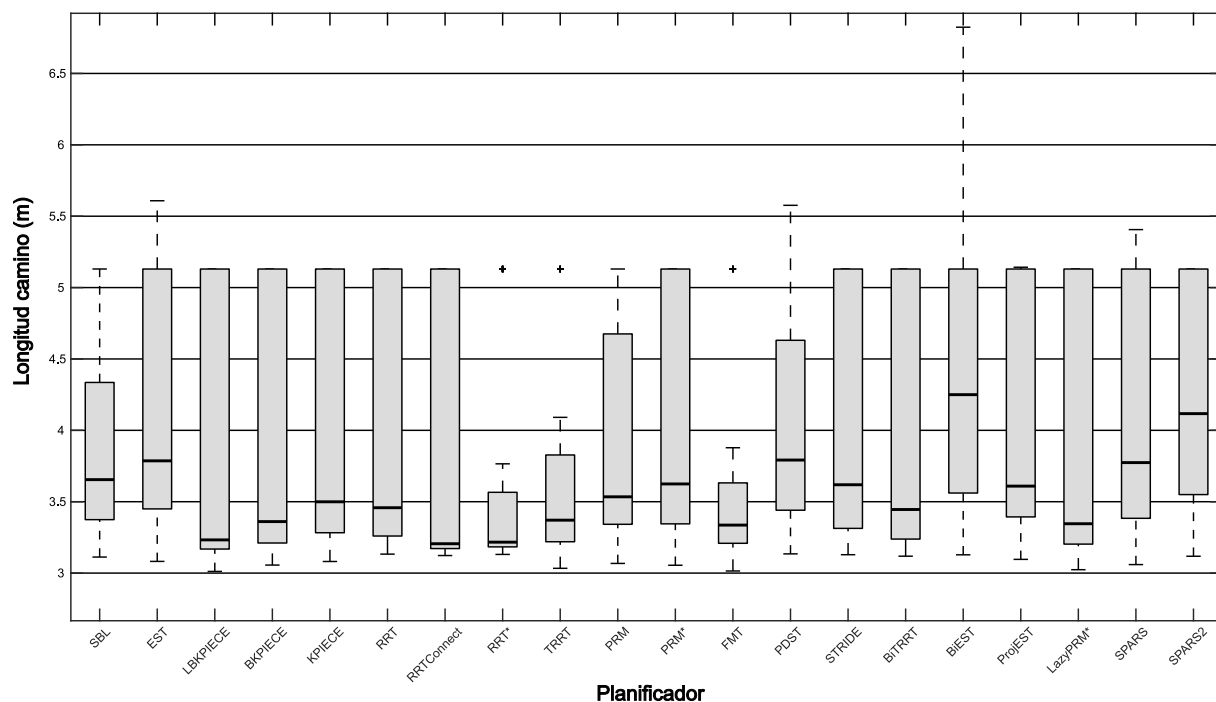


Figura 4: Longitud de trayectorias planificadas para tarea por encima de la cabeza

medio de 0.0689 segundos. Los planificadores **SBL**, **EST**, **RRTConnect**, **STRIDE**, **BiTRRT**, **BiEST** y **ProjEST** han sido capaces de encontrar un camino válido en un tiempo medio inferior a 0.1 segundos. Los planificadores más lentos han sido el **RRT\***, **PRM**, **PRM\***, **LazyPRM\***, **SPARS** y **SPARS2**, con un tiempo medio entorno a los 5 segundos. En cuanto a longitud de las trayectorias planificadas, la

menor mediana se obtiene con el planificador **RRTConnect** (3.2057 m). No obstante, el menor rango intercuartílico se obtiene mediante el planificador **RRT\*** (0.3823).

Para la tarea frontal, todos los planificadores han sido capaces de encontrar un camino válido en el tiempo máximo establecido excepto **RRT** (89%), **RRT\*** (96%), **TRRT** (95%) y **LazyPRM**

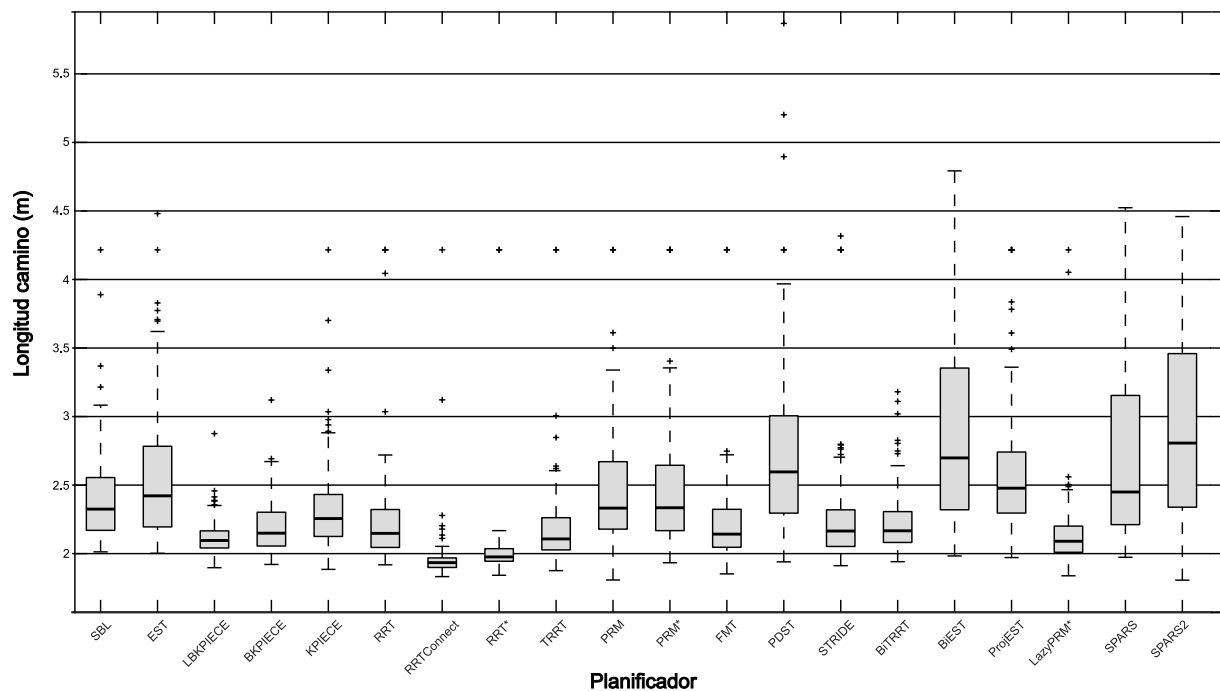


Figura 5: Longitud de trayectorias planificadas para tarea frontal

(0%). El planificador más rápido ha sido **STRIDE**, con un tiempo de planificación medio de 0.0989 segundos, y el planificador **KPIECE** también ha sido capaz de obtener un tiempo de planificación medio inferior a los 0.1 segundos. Para esta tarea, el planificador **RRTConnect** ha generado trayectorias con la menor longitud mediana (1.9342 m), obteniendo también el menor rango intercuartílico (0.0697).

## 4 DISCUSIÓN

A la vista de los resultados, observamos que de forma general todos los planificadores obtienen un elevado porcentaje de éxito de planificación para ambas tareas. No obstante, empleando el planificador **LazyPRM** no se logró planificar ningún camino entre los puntos inicial y final para ninguna de las tareas presentadas.

Por otro lado, atendiendo a la longitud del camino planificado, el planificador **RRTConnect** ha obtenido la mediana más baja, tanto para la tarea sobre la cabeza como para la tarea frontal. Sin embargo, no ocurre lo mismo con el rango intercuartílico (IQR) obtenido para la longitud de las trayectorias. Si bien es cierto que para la tarea frontal el planificador **RRTConnect** obtiene el menor IQR, para la tarea sobre la cabeza se obtiene un IQR elevado, solo superado por el IQR del planificador **LBKPIECE**. Asimismo, cabe destacar que, para la tarea sobre la cabeza, ninguno de los planificadores empleados

ha sido capaz de mantener longitudes inferiores a 5 m para todos los intentos de planificación, como se observa en la Figura 4. Para la tarea frontal, generalmente los planificadores no logran mantener todas las longitudes por debajo de 4 m (Figura 5). No obstante, el planificador **LBKPIECE** logra planificar todas las trayectorias con una longitud inferior a 3 m, y los planificadores **BKPIECE** y **BiTRRT** mantienen longitudes por debajo de 3.5 m.

En cuanto a los tiempos de planificación, de forma general los planificadores single-query logran un tiempo de planificación medio entorno a los 0.1-0.2 segundos para ambas tareas. El planificador **FMT** se trata de una excepción, requiriendo un tiempo medio de 1.2154 y 1.3544 segundos. No obstante, los planificadores multi-query consumen el total del tiempo máximo establecido (5 segundos). A pesar de que para las tareas simuladas se asume un movimiento nulo por parte del operario, en otro tipo de tareas el continuo movimiento de los brazos del usuario provoca que el espacio libre varíe de forma continuada. Por ello, se ha decidido evaluar el problema de planificación como single-query, sin emplear el mapa de caminos generado y comprobando el efecto que tiene en el tiempo de planificación.

Por tanto, en base a las tareas simuladas, los planificadores **LBKPIECE**, **BKPIECE**, **RRTConnect** y **BiTRRT** muestran un buen rendimiento de acuerdo con el porcentaje de éxito, el tiempo de planificación requerido y las

longitudes de las trayectorias planificadas.

## 5 CONCLUSIÓN

Se ha presentado un modelo simulado del sistema SecondArmS, implementado en ROS. Dicho modelo incluye dos manipuladores robóticos de 6 GDL, una plataforma elevadora y el propio usuario, modelando, además, el movimiento de los brazos humanos.

Mediante el modelo implementado se ha simulado 2 tareas de mantenimiento, y se ha evaluado el rendimiento de planificadores de trayectorias de la librería OMPL. A partir de los datos obtenidos, se puede concluir que los planificadores **LBKPIECE**, **BKPIECE**, **RRTConnect** y **BiTRRT** obtienen un mejor rendimiento en base al porcentaje de éxito, el tiempo de planificación y las longitudes de las trayectorias planificadas.

Sin embargo, cabe destacar que los resultados se han obtenido para posiciones fijas del brazo del operador humano. En un futuro se espera probar el sistema en un escenario real, obteniendo la posición en tiempo real de los brazos del usuario y empleando un prototipo del sistema SecondArmS. Asimismo, se analizará y evaluará en mayor profundidad los planificadores que muestran un mejor rendimiento.

### Agradecimientos

Este estudio ha sido subvencionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) perteneciente al Ministerio de Ciencia e Innovación, a través del proyecto IDI-20190764 (Cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional. FEDER, una manera de hacer Europa).

## 6 Acrónimos

**BiEST** Bidirectional Expansive Space Trees

**BiTRRT** Bidirectional Transition-based Rapidly-exploring Random Trees

**BKPIECE** Bidirectional Kinematic Planning by Interior-Exterior Cell Exploration

**EST** Expansive Space Trees

**FMT** Fast Matching Tree

**KPIECE** Kinematic Planning by Interior-Exterior Cell Exploration

**LBKPIECE** Lazy Bidirectional Kinematic Planning by Interior-Exterior Cell Exploration

**PDST** Path-Directed Subdivision Trees

**PRM** Probabilistic Road Map

**ProjEST** Projection-based Expansive Space Trees

**RRT** Rapidly-exploring Random Trees

**SBL** Single-query Bidirectional Lazy collision checking planner

**SPARS** SPArse Roadmap Spanner

**STRIDE** Search Tree with Resolution Independent Density Estimation

**TRRT** Transition-based RRT

## English summary

**Path planners analysis to avoid human user in supernumerary systems**

### Abstract

*To decrease musculoskeletal disorder in the workplace, a supernumerary robot can be used to assist the human operator during maintenance tasks. Moreover, the supernumerary device is intended to move cooperatively with the human user in an autonomous or semi-autonomous way. For this reason, a system able to avoid collision with the user is needed. In this work, path planners are analyzed to avoid human arms during maintenance tasks with a simulated model.*

**Keywords:** Supernumerary robot, path planners, ROS.

## Referencias

- [1] AGENCIA EUROPEA PARA AL SEGURIDAD Y LA SALUD EN EL TRABAJO. Trastornos musculoesqueléticos. [Consulta de abril 2013].
- [2] Bertomeu-Motos, A., Blanco, A., Badesa, F. J., Barios, J. A., Zollo, L., & Garcia-Aracil, N. (2018). Human arm joints reconstruction algorithm in rehabilitation therapies assisted by end-effector robotic devices. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 15(1), 1-11.



- [3] Chitta, S., Sucan, I., & Cousins, S. (2012). Moveit![ros topics]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 19(1), 18-19.
- [4] INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Riesgos de trastornos musculoesqueléticos en la población laboral española (2014).
- [5] Norkin, C. C., & White, D. J. (2016). Measurement of joint motion: a guide to goniometry. FA Davis.
- [6] Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., ... & Ng, A. Y. (2009, May). ROS: an open-source Robot Operating

System. In ICRA workshop on open source software (Vol. 3, No. 3.2, p. 5).

- [7] Sucan, I. A., Moll, M., & Kavraki, L. E. (2012). The open motion planning library. IEEE Robotics & Automation Magazine, 19(4), 72-82.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE BIOMASA EN UNA INSTALACIÓN REACTOR ANÓXICO-FOTOBIORREACTOR AEROBIO DE ALGAS Y BACTERIAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Irina Bausa<sup>a,b</sup>, Raúl Muñoz<sup>a,c</sup>, Smaranda Podar<sup>a,b</sup>, César de Prada<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Procesos Sostenibles, C/ Dr. Mergelina, s/n, 47011, Valladolid

<sup>b</sup> Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, C/ Real de Burgos, s/n, 47011, Valladolid

<sup>c</sup> Dpto. de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, C/ Dr. Mergelina, s/n, 47011, Valladolid

[irina.bausa@uva.es](mailto:irina.bausa@uva.es), [mutora@iq.uva.es](mailto:mutora@iq.uva.es), [smaranda@autom.uva.es](mailto:smaranda@autom.uva.es), [prada@autom.uva.es](mailto:prada@autom.uva.es)

## Resumen

*En este trabajo se presenta el modelado mecanístico de una configuración reactor anóxico-fotobiorreactor aerobio de algas y bacterias con recirculación de biomasa para el tratamiento de aguas residuales domésticas. El modelo desarrollado permite estimar la concentración total de sólidos en suspensión en cada uno de los elementos que conforman la instalación. Con el fin de ajustar el modelo a los datos experimentales, se realiza la estimación de los principales parámetros que influyen sobre la concentración total de biomasa en ambos reactores y el sedimentador. El modelo obtenido se valida mediante simulación, comparando los resultados del mismo con los datos experimentales.*

**Palabras clave:** Estimación de parámetros, Modelado, Sedimentación, Simbiosis microalgas-bacterias, Tratamiento de aguas residuales.

## 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las tecnologías de depuración de aguas residuales basadas en consorcios microalgas-bacterias han generado un interés creciente dentro de la comunidad científica. Aunque esta tecnología fue propuesta en los años 60, aún permanecen algunas limitaciones relacionadas con su aplicación a gran escala. Las directivas medioambientales de la Unión Europea en cuanto a los procesos de tratamiento de aguas residuales; la gestión eficiente de los nutrientes; y el tránsito hacia una economía hipocarbónica, eficiente en el uso de los recursos, ecológica y competitiva, han reactivado el interés por estas tecnologías y el desarrollo de un gran número de mejoras y aplicaciones [10].

En los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales basados en lodos activos, se estima

que los costos asociados a la aireación mecánica representan entre el 45-75% de los costos operacionales totales [7]. Estos costos pueden reducirse empleando sistemas de depuración basados en consorcios microalgas-bacterias, ya que las microalgas constituyen una fuente de oxígeno (O<sub>2</sub>) fotosintético, a la vez que reducen las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) derivadas de la oxidación de la materia orgánica [11]. La capacidad de las microalgas para eliminar simultáneamente carbón (C), nitrógeno (N) y fósforo (P) mediante asimilación mixotrófica representa una ventaja importante en términos de recuperación de nutrientes respecto a la tecnología aerobia de lodos activos o a la de digestión anaerobia [3]. En este sentido, los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en microalgas representan una oportunidad para reemplazar los sistemas convencionales de saneamiento por “industrias productivas” [14]. La biomasa microalgal obtenida en los sistemas de tratamiento de aguas residuales no puede utilizarse directamente en aplicaciones humanas; en cambio, puede ser cosechada para su aplicación en diferentes aspectos: como suplemento o complemento de la alimentación animal, producción de biofertilizantes, bioestimulantes, bioplástico y biodiesel [1], [4].

El número creciente de aplicaciones de tecnologías basadas en microalgas ha fomentado el desarrollo de nuevos modelos para el estudio de los principales procesos, factores y variables que influyen en el crecimiento de las microalgas en diferentes medios de cultivo, incluyendo las aguas residuales [5], [12], [14]. Los modelos matemáticos ofrecen una gran oportunidad para estudiar simultáneamente el efecto de los múltiples factores que afectan a las microalgas y bacterias, permitiendo así la predicción de la producción final de biomasa y contribuyendo a la optimización del diseño del sistema en términos de operación y control [13].

Recientemente, otra de las líneas de investigación que ha generado gran interés es el diseño y mejora de instalaciones que optimicen el rendimiento de la biomasa de algas y garanticen la adecuada

depuración de las aguas residuales. En este sentido, en [8] se propone una configuración de reactor anóxico-fotobiorreactor aerobio para eliminar el nitrógeno y fósforo del agua residual y mejorar la sedimentación de biomasa microalgal. Esta instalación fue optimizada en [2] con el objetivo de promover la eliminación de nitrógeno vía desnitrificación y el desarrollo de una rápida sedimentación de la población de microalgas-bacterias.

El objetivo de este trabajo es modelar, por primera vez, la configuración reactor anóxico-fotobiorreactor aerobio descrita en [2] y determinar los valores óptimos de los parámetros del modelo. El modelado y simulación del proceso se realizan en el entorno de simulación dinámica PROOSIS®.

En este trabajo se consideran como variables de salida del modelo el Total de Sólidos en Suspensión (*Total Suspended Solids*, TSS) en ambos reactores y el sedimentador, debido a que el valor del mismo a la salida de la planta no debe exceder el límite máximo indicado en la legislación de la Unión Europea para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas [6]. Por lo tanto, el valor de concentración de TSS en el efluente y el porcentaje de reducción en relación con el caudal de entrada, constituyen indicadores relevantes en el diseño y evaluación de una instalación depuradora. Además, en el fotobiorreactor valores de biomasa alejados del óptimo conllevarían problemas de fotoinhibición o apantallamiento de la luz, con la consiguiente disminución en la oxigenación fotosintética del proceso, que a su vez impacta en los rendimientos de eliminación de materia orgánica y nitrificación.

El trabajo está estructurado en cuatro secciones: a continuación, se realiza la descripción de la planta y de cada uno de los componentes de la instalación. En la Sección 3 se hace referencia al modelado de la instalación. La Sección 4 está dedicada al procedimiento de estimación de parámetros; y por último, en la Sección 5, se presentan los resultados de aplicación del modelo.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La planta consiste en un proceso de microalgas y bacterias reactor anóxico-fotobiorreactor aerobio con recirculación de biomasa [8]. En [2] se recogen los resultados de los experimentos realizados con el objetivo de estimular la eliminación de nitrógeno del agua residual. Se analizan la influencia del Tiempo de Retención Hidráulico (*Hydraulic Retention Time*, HRT), intensidad y régimen de luz y concentración de oxígeno disuelto en el fotobiorreactor. La influencia de estas condiciones de operación sobre la eliminación de carbono y nitrógeno, se recoge en cinco etapas de experimentación.

La instalación experimental consta de un tanque anóxico interconectado con un fotobiorreactor, tal como se representa en el diagrama en bloques de la Figura 1. El fotobiorreactor es un tanque encamisado de vidrio de 3.5 L (AFORA, España) con un volumen de trabajo total de 2.7 L. El fotobiorreactor fue iluminado de manera continua por tiras de luces LED de 4×5 metros (F30W-12V, España) colocadas de forma circular, las cuales proveen una iluminación de  $400 \pm 51 \mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$  en la pared externa del fotobiorreactor. La temperatura y la agitación magnética del fotobiorreactor se mantuvieron constantes a  $24 \pm 1^\circ\text{C}$  y 300 rpm, respectivamente, mientras que el pH se mantuvo a  $7.8 \pm 0.1$  mediante la adición diaria de 0.8 mL de ácido clorhídrico (37 %) durante las etapas I y II.

El reactor anóxico consiste en un tanque hermético de cloruro de polivinilo de 1 L con un volumen de trabajo total de 0.9 L, este tanque se mantuvo en la oscuridad y agitado continuamente a 300 rpm. El agua residual sintética utilizada en los experimentos fue previamente esterilizada a  $121^\circ\text{C}$  durante 20 min y se mantuvo a  $7^\circ\text{C}$ . Con la esterilización del agua residual sintética se evita el crecimiento de microorganismos dentro del tanque de alimentación que degraden la materia orgánica y los nutrientes antes de entrar al sistema de biorreactores. De esta forma, se garantiza que la composición del agua residual se mantenga constante durante todo el tiempo del experimento.

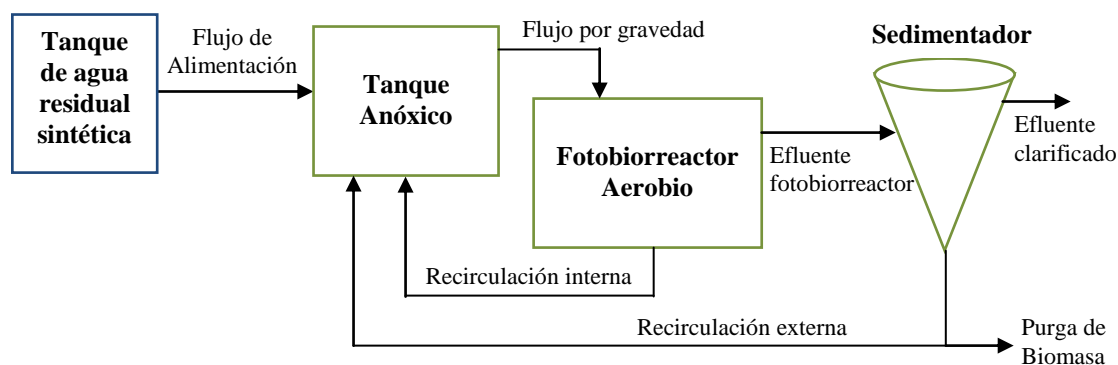


Figura 1: Diagrama en bloques de la configuración reactor anóxico-fotobiorreactor

El reactor anóxico se alimenta con el agua residual sintética y el fotobiorreactor se alimenta continuamente por gravedad con el flujo de rebose del reactor anóxico (Figura 1). El cultivo de microalgas-bacterias se recirculó de manera continua con un flujo de 3 L/d desde el fotobiorreactor al reactor anóxico con el objetivo de suministrar los nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) (generados en el fotobiorreactor mediante nitrificación biológica) requeridos para la desnitrificación. La temperatura del tanque anóxico se mantuvo constante a  $24 \pm 1$  °C. Un cono de Imhoff de 1 L de volumen interconectado con la salida del fotobiorreactor se utilizó como sedimentador. La biomasa de microalgas-bacterias sedimentada se recirculó desde el fondo del sedimentador hacia el tanque anóxico a 0.5 L/d y se purgó tres veces a la semana con el objetivo de controlar el tiempo de retención de lodos (*Sludge Retention Time*, *SRT*) del consorcio microalgas-bacterias.

Los estudios a escala de planta piloto aportan una idea acerca de las características del efluente que se obtendrá, aunque existen problemas de escala y en general únicamente son útiles como estudios iniciales. A mayor escala podría existir estratificación de la biomasa dentro del fotobiorreactor y el régimen de mezcla no se correspondería con mezcla perfecta. Aun así, estos estudios resultan de gran utilidad para evaluar diferentes condiciones de operación y estrategias de control, pues permiten trabajar en un ambiente controlado.

## 2.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

La experimentación se diseñó basada en la hipótesis de que los fotobiorreactores de algas y bacterias para el tratamiento de aguas residuales pueden oxidar el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en  $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ , los cuales se pueden eliminar fácilmente mediante el proceso de desnitrificación heterótrofa (utilizando la materia orgánica presente en el agua residual sintética) bajo condiciones anóxicas, mediante la recirculación del cultivo del fotobiorreactor [8]. Se tomaron 100 mL de muestras líquidas tres veces a la semana del agua residual sintética, reactor anóxico, fotobiorreactor aerobio, purga y efluente clarificado, con el fin de monitorear las concentraciones del Total de Carbono Orgánico (*Total Organic Carbon*, *TOC*) disuelto, Carbono Inorgánico (*Inorganic Carbon*, *IC*) disuelto, especies de nitrógeno disueltas (nitrógeno total,  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_2^-$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ ) y concentración de biomasa, expresada como Total de Sólidos en Suspensión. La Concentración de Oxígeno Disuelto (*Dissolved Oxygen Concentration*, *DOC*), la temperatura y el pH del medio de cultivo en ambos tanques se midieron *in situ* diariamente.

Los datos obtenidos durante las dos primeras etapas de operación se han utilizado en este trabajo como variables de entradas y salidas, para ajustar el modelo

matemático de esta instalación. En la etapa I, el sistema opera a un flujo de agua residual de  $0.9 \pm 0.1$  L/d y en la etapa II a  $1.7 \pm 0.2$  L/d, manteniéndose en ambas etapas los flujos de recirculación interna y externa en 3 L/d y 0.5 L/d, respectivamente. El desarrollo del modelo matemático permitirá variar las condiciones de operación para predecir cambios en las salidas del proceso, reduciendo significativamente el tiempo dedicado a la experimentación.

## 3 MODELO DE LA PLANTA

Existen diferentes modelos matemáticos que describen las reacciones y procesos para las bacterias en sistemas de tratamiento de agua residual convencionales como el sistema de lodos activos, estos se han desarrollado y validado exitosamente y en la actualidad son ampliamente aceptados y aplicados. Por el contrario, los modelos que describen las complejidades internas en sistemas de tratamiento de aguas basados en microalgas-bacterias, se considera que aún están en proceso de desarrollo [13]. Esto se debe a que, en comparación con las tecnologías de tratamiento convencionales, resultan menos conocidas las reacciones y procesos físicos, químicos y bioquímicos que se producen en los sistemas de tratamiento basados en microalgas y bacterias. Los modelos matemáticos ofrecen la oportunidad de estudiar las interacciones microalgas-bacterias y aportan valiosas herramientas para el diseño y control, lo cual deriva en un incremento en la eficiencia de los fotobiorreactores. La revisión de varios de estos modelos, permitió tomar como punto de partida para el presente trabajo el modelo BIO\_ALGAE [15], debido a que este incluye las interacciones entre microalgas y bacterias, sin presentar una complejidad excesiva.

La viabilidad de la tecnología de tratamiento de aguas residuales utilizando una configuración reactor anóxico-fotobiorreactor aerobio ha sido probada experimentalmente a escala de laboratorio en el Instituto de Procesos Sostenibles de la Universidad de Valladolid [2]. Con esta configuración, además de obtenerse altos valores de eficiencias de eliminación de nitrógeno total (68-79 %), se consiguieron altos valores de eficiencias de eliminación de carbono orgánico total (86-89 %) y carbono inorgánico (57-98 %). Para la evaluación de esta configuración en [2] se diseñaron cinco etapas, correspondientes a diferentes condiciones de operación, cada etapa con una duración entre 32 y 47 días, necesitándose un total de 186 días para completar el proceso de experimentación.

El modelo BIO\_ALGAE, aplicado al sistema descrito en [2], se ha utilizado para describir las relaciones fundamentales que tienen lugar en el reactor anóxico y el fotobiorreactor, mientras que el sedimentador se ha modelado utilizando expresiones de balance de

masas. El modelado y simulación del proceso se ha realizado en el entorno de simulación dinámica PROOSIS® [9].

El modelo BIO\_ALGAE utiliza la nomenclatura de los modelos de la Asociación Internacional del Agua (*International Water Association, IWA*) y considera 19 componentes (6 particulados y 13 disueltos) implicados como variables en los procesos físicos, químicos y biocinéticos. En [15] se describen estos componentes, el papel que desempeñan en los procesos que tienen lugar en los fotobiorreactores y las interacciones con otros componentes.

### 3.1 MODELO DEL REACTOR ANÓXICO

En el reactor anóxico se han utilizado las expresiones descritas en el modelo BIO\_ALGAE [15] para modelar los procesos que tienen lugar en el mismo.

En el caso de las microalgas, sólo se tiene en cuenta el proceso correspondiente a la muerte de las microalgas. En cuanto a la actividad de las bacterias heterótrofas, se consideran los procesos relativos al crecimiento anóxico (en  $S_{NO_2}$  y  $S_{NO_3}$ ), la respiración endógena anóxica y la muerte de bacterias heterótrofas. En el caso de las bacterias nitrificantes, en el reactor anóxico sólo se consideran los procesos de muerte de las bacterias oxidantes de amonio y muerte de las bacterias oxidantes de nitritos.

En este reactor, en las ecuaciones diferenciales que describen las variables de estado del sistema, se consideran los términos relativos al transporte de masa de cada componente, teniendo en cuenta los flujos de entrada y salida al reactor. El reactor anóxico, tal como se representa en la Figura 1, recibe flujos de entrada del tanque de agua residual sintética, el fotobiorreactor (recirculación interna) y el sedimentador (recirculación externa).

### 3.2 MODELO DEL FOTOBIORREACTOR AEROBIO

El fotobiorreactor se modela teniendo en cuenta los procesos descritos en el modelo BIO\_ALGAE [15]. En las velocidades de crecimiento de estos procesos se tiene en cuenta el efecto de la concentración de nutrientes (limitación o inhibición) y de las condiciones ambientales (luz, temperatura y oxígeno disuelto).

Particularmente, en cuanto a la actividad de las bacterias heterótrofas, se tiene en cuenta el crecimiento aerobio de las mismas (en  $S_{NH_4}$  y  $S_{NO_3}$ ), el proceso de respiración endógena aerobia y la muerte de las bacterias heterótrofas.

En los procesos que ocurren en el fotobiorreactor, se han considerado, además, los términos relativos al transporte de masa de cada componente, teniendo en cuenta el flujo de entrada del reactor anóxico y los flujos de salida hacia el reactor anóxico y hacia el sedimentador.

### 3.3 MODELO DEL SEDIMENTADOR

El sedimentador se modela tomando como base el modelo de Takács *et al.* [16]. En este modelo, se supone que en el sedimentador no tienen lugar reacciones biológicas. El sedimentador se considera formado por un conjunto de capas, de manera que el flujo de sólidos debido a la gravedad depende de la concentración de fangos en la misma. Las partículas que entran se distribuyen de manera uniforme e instantánea a través de la capa de entrada y las ecuaciones del modelo sólo consideran el flujo en sentido vertical. El flujo de sólidos en cada capa se denomina  $J$  y depende de la concentración de sólidos en la capa ( $X$ ) y de la velocidad ( $v$ ), tal como se refiere en la expresión (1).

$$J = v(X)X \quad (1)$$

En la descripción de las ecuaciones de estado del modelo de Takács [16], se establecen cinco tipos de capas, dependiendo de su posición respecto a la capa de alimentación: la capa superior, las capas superiores a la de alimentación, la capa de alimentación, las capas inferiores a la de alimentación y la capa inferior.

En el modelado de sedimentadores, es fundamental el estudio de la velocidad de sedimentación (2), esta se describe por el modelo de doble exponencial propuesto en [16], este modelo es válido tanto para la zona de sedimentación zonal, como para la zona de clarificación.

$$V_s = V_0 \left( e^{-r_h(X-X_{\min})} - e^{-r_p(X-X_{\min})} \right) \quad 0 \leq V_s \leq V_0' \quad (2)$$

donde:

$X_{\min}$ : Concentración de sólidos no sedimentables [mg/L]

$V_0$ : Velocidad máxima teórica de sedimentación [dm/d]

$V_0'$ : Velocidad máxima práctica de sedimentación [dm/d]

$r_h$ : Parámetro característico de la sedimentación zonal [L/mg]

$r_p$ : Parámetro asociado al comportamiento de la velocidad de sedimentación a bajas concentraciones de sólidos [L/mg]

Para el modelado del sedimentador en este trabajo, se considera que el sedimentador está dividido en cinco capas de 0.2 L cada una y que la alimentación se produce en la capa intermedia. Las capas se consideran de igual volumen y diferente altura, debido a que en este caso el sedimentador es un cono de Imhoff. Debido a la que el sedimentador no posee una sección transversal constante, en las expresiones

que describen la concentración de sólidos en cada capa se incluyen factores de corrección de forma, los cuales deben ser estimados en el proceso de optimización. En la estimación de parámetros en el sedimentador, además, deben estimarse los valores de los parámetros incluidos en la expresión (2).

## 4 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Para obtener un buen ajuste del modelo a los datos experimentales, es necesario realizar una estimación de los valores de varios parámetros del modelo. Primeramente, se realiza un análisis de sensibilidad, para determinar los parámetros que tienen una mayor influencia sobre la concentración de biomasa total. El análisis de sensibilidad se realiza en PROOSIS® utilizando el método de integración IDAS y los conceptos de clases y métodos. El análisis de sensibilidad en los reactores permitió establecer que el modelo tiene una elevada sensibilidad a las velocidades máximas específicas de crecimiento y a las constantes de inactivación de las microalgas y bacterias heterótrofas.

El planteamiento y la forma de resolver un problema de estimación de parámetros en términos de optimización considera que para cada valor del vector de parámetros  $\theta$  (variables de decisión) el modelo proporciona una predicción de la respuesta del sistema  $\hat{y}(\theta)$  en un experimento determinado. Para esto es necesario tomar muestras de los datos de entradas  $u(t)$  y salidas  $y(t)$  del sistema real en un período de tiempo  $t$ . Al modelo se le aplica la misma secuencia de variables manipuladas que al sistema. Para cada instante de tiempo  $t$ , el error de predicción es un indicador de la bondad del modelo. En la figura 2 se representa el diagrama en bloques del estimador en el procedimiento de optimización secuencial.

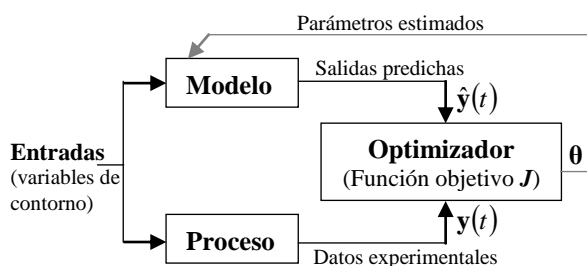


Figura 2. Estimador en la optimización secuencial

En el enfoque secuencial, se utiliza un simulador dinámico para resolver las ecuaciones diferenciales y calcular tanto la función de costo como las restricciones. Luego, un optimizador NLP (*Nonlinear programming*) se encarga de suministrar nuevos valores para las variables de decisión. El simulador recalcula y el ciclo se repite hasta que se alcanza

cierto criterio de parada, normalmente que no se consiga mejorar significativamente la función de costo. En este trabajo se ha utilizado el algoritmo de programación no lineal SNOPT en el entorno de simulación dinámica PROOSIS® para resolver el problema de optimización. El método de integración seleccionado ha sido IDAS.

El estimador *fair function* se utiliza como función objetivo  $J$  para la estimación de parámetros, debido a que esta, a diferencia de los estimadores basados en mínimos cuadrados, es robusta ante errores de medición que no presentan una distribución Gaussiana. El problema de optimización dinámica se plantea según (3):

$$\min_{\theta} J(\hat{\theta}, \theta) = \sum_{j \in M} c^2 \left[ \frac{|\varepsilon_j|}{c} - \log \left( 1 + \frac{|\varepsilon_j|}{c} \right) \right] \quad (3)$$

Sujeto a las restricciones (4) y (5)

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= f(x(t), u(t), \theta, t) \\ \hat{y}(t) &= g(x(t), u(t), \theta, t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\underline{\theta} \leq \hat{\theta} \leq \bar{\theta} \quad (5)$$

donde  $\varepsilon_j = (\hat{\theta}_j - \theta_j) / \theta_m$  representa el error entre los datos experimentales ( $\theta$ ) y los estimados por el modelo ( $\hat{\theta}$ ), limitados entre los límites mínimos y máximos definidos,  $c \in \mathbb{R}^+$  es un parámetro de ajuste definido por el usuario y  $\theta_m$  es el valor medio de los datos medidos. En la estimación de parámetros en ambos reactores y el sedimentador se elige  $c=3$ .

La estimación de parámetros en los reactores se realiza utilizando las variables de decisión seleccionadas en el análisis de sensibilidad y considerando como variables de salida del modelo el Total de Sólidos en Suspensión, el cual está dado por la suma de todos los componentes particulados del modelo (6).

$$TSS = X_{ALG} + X_H + X_{AOB} + X_{NOB} + X_I + X_S \quad (6)$$

En (6),  $X_{ALG}$  representa la concentración de biomasa de algas,  $X_H$  la concentración de bacterias heterótrofas,  $X_{AOB}$  la concentración de bacterias oxidantes de amonio,  $X_{NOB}$  la concentración de bacterias oxidantes de nitritos,  $X_I$  la materia orgánica particulada inerte y  $X_S$  la materia orgánica particulada lentamente biodegradable. En el modelo BIO\_ALGAE las composiciones de los componentes particulados están expresadas en términos de Demanda Química de Oxígeno (*Chemical Oxygen Demand, COD*), por lo cual es necesario realizar la transformación de mgCOD/L a mgTSS/L para realizar la comparación con los datos experimentales.



Para realizar este ajuste, se utilizaron las relaciones COD/TSS obtenidas en [5].

$$TSS = \frac{X_{ALG}}{1.57} + \frac{(X_H + X_{AOB} + X_{NOB} + X_I + X_S)}{1.45} \quad (7)$$

En la Tabla 1 se muestran los valores iniciales de los componentes utilizados para la estimación de parámetros del modelo en ambos reactores. Los valores iniciales de los componentes particulados se estimaron a partir del TSS, teniendo en cuenta las relaciones descritas en [15]. Los valores de  $S_I$  y  $S_S$  se determinaron a partir de los valores medidos de TOC disuelto.

Para la estimación de parámetros en el sedimentador, se consideran los valores medidos de TSS en el

efluente clarificado y la corriente de purga. La expresión (3) se utiliza como función objetivo para la estimación de parámetros en el sedimentador. Se utilizan 11 variables de decisión.

En las tablas 2 y 3 se muestran los valores de las variables de decisión resultantes de estimación de parámetros en los reactores y el sedimentador, respectivamente. En ambos casos, los límites de las variables de decisión y los valores iniciales para la optimización se establecieron según los valores reportados en la literatura. Para la estimación de parámetros se utilizaron los datos experimentales correspondientes a los primeros 30 días de la etapa I, mientras que para la validación del modelo se utilizaron datos de la etapa I (días 31-47) y la etapa II (días 48-60).

Tabla 1: Concentraciones iniciales de los componentes en el reactor anóxico y el fotobiorreactor.

Componentes	Descripción	Anóxico	Aerobio	Unidades
$S_{NH4}$	Nitrógeno amónico	54	60	mgN-NH <sub>4</sub> L <sup>-1</sup>
$S_{NH3}$	Nitrógeno amoniacal	3	5	mgN-NH <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>
$S_{NO3}$	Nitrato	0.4	0	mgN-NO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>
$S_{NO2}$	Nitrito	0	0	mgN-NO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>
$S_{CO2}$	Dióxido de carbono	5	2	mgC-CO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>
$S_{HCO3}$	Bicarbonato	100	58	mgC-HCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>
$S_{CO3}$	Carbonato	2	1	mgC-CO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>
$S_{PO4}$	Fosfato	903.8	797.9	mgP-PO <sub>4</sub> L <sup>-1</sup>
$S_{O2}$	Oxígeno disuelto	1	19.4	mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>
$S_H$	Iones hidrógeno	3.6e-08	7.1e-09	mgH L <sup>-1</sup>
$S_{OH}$	Iones hidróxido	2.8e-07	1.4e-06	mgH-OH L <sup>-1</sup>
$S_S$	Materia orgánica soluble rápidamente biodegradable	191	169	mgCOD L <sup>-1</sup>
$S_I$	Materia orgánica soluble inerte	25.14	25.14	mgCOD L <sup>-1</sup>
$X_{ALG}$	Microalgas	1589	1845	mgTSS L <sup>-1</sup>
$X_H$	Bacterias heterótrofas	813	944	mgTSS L <sup>-1</sup>
$X_{AOB}$	Bacterias oxidantes de amonio	0	0	mgTSS L <sup>-1</sup>
$X_{NOB}$	Bacterias oxidantes de nitrito	1.57	1.35	mgTSS L <sup>-1</sup>
$X_S$	Materia orgánica particulada lentamente biodegradable	94.41	81.3	mgTSS L <sup>-1</sup>
$X_I$	Materia orgánica particulada inerte	258.05	222.22	mgTSS L <sup>-1</sup>

Tabla 2: Valores optimizados de los parámetros en ambos reactores (Modelo BIO\_ALGAE)

Parámetro	Descripción	Valor
$\mu_{ALG}$	Velocidad máxima específica de crecimiento de microalgas	0.4 d <sup>-1</sup>
$\mu_H$	Velocidad máxima específica de crecimiento de bacterias heterótrofas	1 d <sup>-1</sup>
$k_{death,ALG}$	Constante de inactivación para microalgas	0.21 d <sup>-1</sup>
$k_{death,H}$	Constante de inactivación para bacterias heterótrofas	0.9 d <sup>-1</sup>

Tabla 3: Valores optimizados de los parámetros en el sedimentador

Parámetro	Descripción	Valor
$X_{min}$	Concentración de sólidos no sedimentables	1 mg/L
$V_0$	Velocidad máxima teórica de sedimentación	6151.43 dm/d
$r_h$	Parámetro característico de la sedimentación zonal	0.0041 L/mg
$r_p$	Parámetro de velocidad de sedimentación a bajas concentraciones de TSS	0.006 L/mg
$a_1, a_3, b_2, b_3$	Factores de corrección en el modelo	1
$a_2$	Factor de corrección en el modelo	0.1
$b_1, c$	Factores de corrección en el modelo	1.6

## 5 RESULTADOS

Utilizando los valores estimados de los parámetros, se comparan las salidas del modelo con los datos experimentales. En las figuras 3 y 4 se muestran los resultados del modelo para la predicción de la concentración total de biomasa en el reactor anóxico y el fotobiorreactor, respectivamente. Aunque se observan ciertas diferencias entre el modelo y los datos experimentales, estas se encuentran dentro de los límites permisibles. En el reactor anóxico, durante la etapa I, el valor medio de biomasa medida fue de  $2575 \pm 160$  mgTSS/L y el valor medio estimado fue de  $2627 \pm 148$  mgTSS/L. Durante la etapa I en el fotobiorreactor se reportó un valor medio de TSS de  $2531 \pm 191$  mgTSS/L; el valor medio estimado por el modelo fue de  $2392 \pm 111$  mgTSS/L.

Las figuras 5 y 6 representan las salidas del modelo y los datos experimentales en el efluente clarificado y la purga del sedimentador, respectivamente. A pesar de apreciarse diferencias entre las salidas del modelo y los datos experimentales, los valores promedio del TSS resultan muy similares. Durante la etapa I, el valor medio del TSS de los datos experimentales en el efluente fue de  $56 \pm 6$  mgTSS/L (correspondiente con una eficiencia de eliminación de TSS del 98 %). El valor medio de TSS estimado por el modelo durante la etapa I fue de  $55 \pm 5$  mgTSS/L (eficiencia de eliminación de 97,7 %). Los valores experimentales y los calculados por el modelo se encuentran dentro de los límites permitidos por la legislación en cuanto a la concentración del TSS en el efluente y a la eficiencia de eliminación. Se observa la capacidad de predicción del modelo ante los cambios en el régimen de operación durante la etapa I (días 30- 47) y la etapa II (días 47- 60).

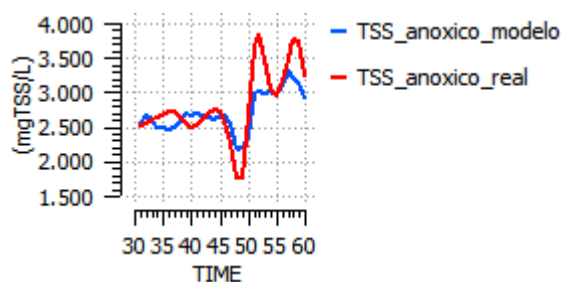


Figura 3. TSS en el reactor anóxico

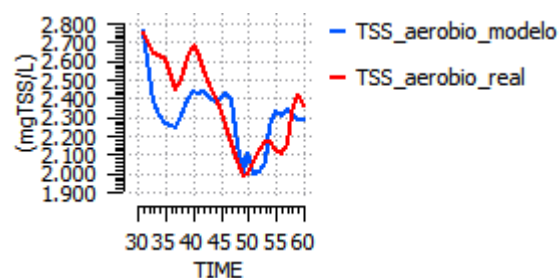


Figura 4. TSS en el fotobiorreactor aerobio

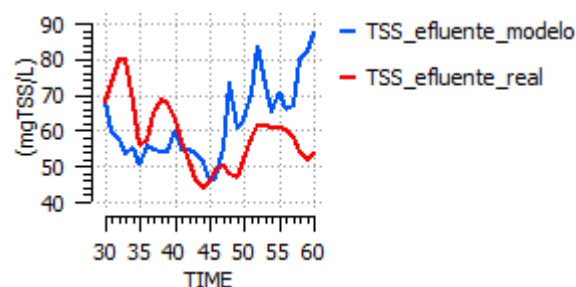


Figura 5. TSS en el efluente del sedimentador

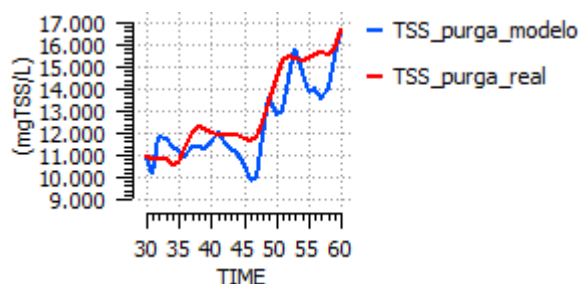


Figura 6. TSS en la purga del sedimentador

## CONCLUSIONES

El modelo desarrollado permite estimar la concentración de biomasa en los reactores que conforman la instalación y en las corrientes de purga y efluente tratado. La estimación de parámetros ha permitido conseguir un buen ajuste del modelo a los datos experimentales.

Como trabajo futuro, se pretende ajustar el modelo a las otras salidas de las cuales se poseen datos experimentales. Esto permitirá mediante simulación, predecir la eficiencia de eliminación de nutrientes de la instalación y reducir significativamente el tiempo dedicado a la experimentación.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Junta de Castilla y León y EU-FEDER (CLU 2017-09 y UIC 233) y por la Junta de Castilla y León y el Fondo Social Europeo (Orden EDU/601/2020).

## BIOMASS ESTIMATION MODEL IN ANOXIC-AEROBIC ALGAL-BACTERIAL PHOTOBIOREACTOR CONFIGURATION FOR WASTEWATER TREATMENT

## Abstract

*This work deals with modelling of anoxic-aerobic algal-bacterial photobioreactor with biomass*

*recycling for wastewater treatment. Total suspended solids concentration in elements composing installation is estimated through mathematical model. Parameter estimation in both reactors and settler is realized in order to fit model outputs to experimental data. Model validation is performed via simulation, comparing model outputs and experimental data.*

**Keywords:** Algal-bacterial symbiosis, Modelling, Parameter estimation, Sedimentation, Wastewater treatment.

## Referencias

- [1] Acien, F., Fernández Sevilla, J., & Molina Grima, E. (2013). Photobioreactors for the production of microalgae. *Environ. Sci. Biotechnol.*, 12(2), 131-151.
- [2] Alcántara, C., Domínguez, J., García, D., Blanco, S., Pérez, R., García-Encina, P., y otros. (2015). Evaluation of wastewater treatment in a novel anoxic-aerobic algal-bacterial photobioreactor with biomass recycling through carbon and nitrogen mass balances. *Bioresource Technology*, 191, 173–186.
- [3] Arbib, Z., Ruiz, J., Álvarez-Díaz, P., Garrido-Pérez, C., Barragan, J., & Perales, J. (2013). Effect of pH control by means of flue gas addition on three different photobioreactors treating urban wastewater in long-term Operation. *Ecol. Eng.*, 57, 226-235.
- [4] Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 557-577.
- [5] Casagli, F., Zuccaro, G., Bernard, O., Steyer, J.-P., & Ficara, E. (2021). ALBA: A comprehensive growth model to optimize algae-bacteria wastewater treatment in raceway ponds. *Water Research*, 190(116734).
- [6] CEE. Directiva 91/271/CEE SOBRE EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS. 1991.
- [7] Chae, K., & Kang, J. (2013). Estimating the energy independence of a municipal wastewater treatment plant incorporating green energy resources. *Energy Convers. Manage.*, 72, 664-672.
- [8] De Godos, I., Vargas, V., Guzmán, H., Soto, R., García, B., García, P., y otros. (2014). Assessing carbon and nitrogen removal in a novel anoxic-aerobic cyanobacterial-bacterial photobioreactor configuration with enhanced biomass sedimentation. *Water Res.*, 61, 77–85.
- [9] "EcosimPro | PROOSIS. Modelling and Simulation Toolkits and Services" [Online]. Disponible en: [www.ecosimpro.com](http://www.ecosimpro.com)
- [10] EEE. (2013). *VII Programa General de Acción de la Unión en Materia de Medio Ambiente hasta 2020 «Vivir bien, respetando los límites de nuestro planeta».*
- [11] Muñoz, R., & Guieysse, B. (2006). Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water Res.*, 40, 2799–2815.
- [12] Sánchez-Zurano, A., Rodríguez-Miranda, E., Guzmán, J., Acien-Fernández, F., Fernández-Sevilla, J., & Molina Grima, E. (2021). ABACO: A New Model of Microalgae-Bacteria Consortia for Biological Treatment of Wastewaters. *Appl. Sci.*, 11(998).
- [13] Solimeno, A., & García, J. (2017). Microalgae-bacteria models evolution: From microalgae steady-state to integrated microalgae-bacteria wastewater treatment models- A comparative review. *Science of the Total Environment*, 607-608, 1136-1150.
- [14] Solimeno, A., Gómez-Serrano, C., & Acien, F. G. (2019). BIO\_ALGAE 2: improved model of microalgae and bacteria consortia for wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 25855-25868.
- [15] Solimeno, A., Parker, L., Lundquist, T., & García, J. (2017). Integral microalgae-bacteria model (BIO\_ALGAE): Application to wastewater high rate algal ponds. *Science of the Total Environment*, 601-602, 646-657.
- [16] Takács, I., Nolasco, G., & Patryioand, D. (1991). Clarification-Thickening Process. *Water Research*, 10(25), 1263-1271.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and  
conditions of the Creative Commons Attribution CC  
BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# Entorno de simulación para vehículos automatizados con CARLA

Asier Arizala, Daniel Campelo, Asier Zubizarreta

Depto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

asier.arizala@ehu.eus, dcampelo001@ikasle.ehu.eus, asier.zubizarreta@ehu.eus

Joshué Pérez

TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA)

joshue.perez@tecnalia.com

## Resumen

El interés alrededor de los vehículos automatizados (VA) ha crecido considerablemente en los últimos años debido a la necesidad de conseguir un método de transporte más eficiente y seguro. Sin embargo, el desarrollo de esta tecnología es una tarea muy compleja, ya que es necesario validar e integrar una gran variedad de funcionalidades. Así mismo, el número de escenarios particulares que se requieren estudiar para asegurar una exitosa automatización hace que el testeo en carreteras reales no sea viable. Debido a esto, ha aumentado el interés por invertir en el desarrollo de entornos de validación virtuales, pudiendo encontrar tanto soluciones comerciales como de código abierto. En este trabajo se propone un entorno de simulación para aplicaciones de vehículos automatizados basado en CARLA, en el que se integran, por un lado, un mapa de una manzana de Bilbao y, por otro, el modelo de un Renault Twizy. De esta forma, se introducen las bases para validar futuros desarrollos en esta misma ubicación real.

In recent years the interest in automated vehicles (AV) have increased due to the need of a safer and more efficient way of travelling. However, the validation of this technology is rather a complex task. Additionally, the amount of particular scenarios for which the technologies have to be tested makes the practical validation not a viable option. That is why recently the virtual testing environments are gaining a lot of popularity. In this work a testing environment is proposed using the open source simulator CARLA, in which a map of a part of Bilbao and a model of a Renault Twizy are integrated. Thanks to this work, future AV related work will be validated with real world data.

**Palabras clave:** Vehículos automatizados, Entornos de simulación, Control.

## 1 Introducción

En los últimos años tanto la comunidad de investigadores como las grandes compañías han realizado grandes inversiones de tiempo y dinero en el desar-

rollo de vehículos automatizados (VA) como una solución eficiente y segura para el transporte de personas y mercancías. Con el tiempo, la posibilidad de ser la primera marca o grupo de investigación en ofrecer esta tecnología ha generado una gran competitividad en el sector. El objetivo es lograr un vehículo con un nivel de automatización de nivel 5 según la SAE (Society of Automotive Engineers) [9]. Sin embargo, se trata de un problema muy complejo. Si bien el estudio sobre algoritmos independientes de la arquitectura general de los VA como los de reconocimiento de objetos [12], toma de decisiones [10], generación de trayectorias y control [1] es extenso hoy en día, el mayor problema reside en su interacción y validación en situaciones complejas.

A la hora de comprobar la validez de los diferentes módulos de un VA, tradicionalmente se realizan pruebas en pista. Sin embargo, todas estas funcionalidades necesitan superar una gran cantidad de situaciones para poder justificar que son seguras para el usuario final, por lo que la cantidad de horas requerida para tal fin hace inviable el uso de la anterior aproximación. Una de las soluciones a tal dilema es la utilización de entornos virtuales [11], donde el usuario posee un completo control sobre todos los agentes involucrados en cada simulación, reduciendo así tiempo y costes.

Dichos entornos o simuladores requieren por tanto de tres características principales. Primero, el realismo necesario para que los algoritmos de percepción testeados sean extrapolables a entornos reales. Segundo, modelos matemáticos capaces de replicar la dinámica vehicular de forma precisa. Dado que los algoritmos de control son dependientes de los modelos a controlar, la validez de estos dependerá de la semejanza entre el modelo virtual y el real. Tercero, una interfaz que ayude al usuario a generar los escenarios requeridos.

Con el tiempo, estas soluciones han ido adaptándose a la aparición de las nuevas tecnologías para adoptar las características mencionadas. De esta forma, se pueden separar 2 tipos de simuladores. Por un lado, los más antiguos y más centrados en la reproducción de la dinámica vehicular tales como CarSim [2] o DSpace [6] ofre-

cen la alta fidelidad de un software validado durante años. Por otro lado, aprovechando el gran avance en el modelado tridimensional de entornos que ha evolucionado con las generaciones de videojuegos, se ha desarrollado un segundo conjunto de simuladores que priorizan el realismo visual sobre la fidelidad de los modelos dinámicos. Uno de los primeros que impulsó el paso hacia esta nueva filosofía fue rFactor pro [8], una evolución del videojuego con el mismo nombre. Recientemente, grandes empresas en el ámbito del diseño gráfico como es Nvidia, han propuesto sus propios entornos de simulación [5] con integraciones de inteligencia artificial. Otros ejemplos son Cognata [3], Metamoto [7], o la plataforma open source CARLA [4], a la cual apoyan Intel y Toyota.

Una vez se dispone de un entorno de simulación es necesario realizar una interpretación de un escenario basado en lugares reales que más tarde pueda servir como método de validación. El realismo de dicho escenario es necesario para que los algoritmos de percepción sean completamente extrapolables, mientras que la fidelidad de los modelos dinámicos utilizados ayudan a los controladores. Se trata de un trabajo complejo que puede resultar en cuellos de botella durante proyectos a largo plazo.

En este trabajo se presenta un entorno de simulación para vehículos automatizados basado en CARLA que usa una representación de una manzana de Bilbao para la posterior validación de algoritmos relacionados en vehículos automatizados en prototipos reales. También introduce el modelo de un Renault Twizy para poder ratificar los resultados obtenidos en un futuro con el propio vehículo en el entorno real.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente manera. En la sección 2 se define el entorno de simulación propuesto, detallando la geometría del mapa y el modelo de vehículo introducidos. En la sección 3 se presenta un caso de uso mediante el cual se demuestra la funcionalidad de la solución propuesta. Para finalizar, en la sección 4 se concretan las conclusiones y los trabajos futuros.

## 2 Entorno propuesto

A fin de conseguir un entorno donde probar algoritmos relacionados con VA, es necesario contar con entornos adaptados a los recursos disponibles, ya que el fin de cada desarrollo pasa por su integración en vehículos reales.

El entorno de simulación desarrollado (Figura 1) se ha implementado en CARLA, abarcando la introducción de un mapa y un vehículo propios, así como la inclusión de un controlador de

seguimiento de trayectorias para realizar pruebas de rendimiento. En este caso, se ha optado por modelar una manzana de Bilbao, y un Renault Twizy, vehículo que posee el grupo de Automated Driving de Tecnalia para testear aplicaciones de VA.

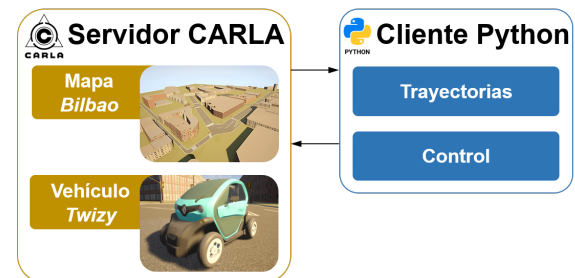


Figura 1: Entorno de simulación propuesto

### 2.1 CARLA

Presentado por primera vez en 2017 CARLA ha ganado popularidad rápidamente entre los desarrolladores de aplicaciones para VA. La posibilidad de realizar simulaciones en entornos realistas, gracias al desarrollo en Unreal Engine, su fácil accesibilidad, a través de tutoriales, manuales y foros, y el hecho de ser de código libre lo convierten en una propuesta muy atractiva.

Actualmente cuenta con una extensa biblioteca de modelos con un total de 8 mapas, 13 sensores, 31 vehículos, 26 peatones, y 90 objetos estáticos, que va creciendo con cada nueva actualización. Además, como es el caso de este trabajo, es posible añadir contenido personalizado gracias a la compatibilidad con programas externos como RoadRunner de Mathworks. Adicionalmente, cabe mencionar que utiliza una arquitectura cliente/servidor utilizando Python como lenguaje de programación.

Dicho esto, otra de sus ventajas es la compatibilidad con ROS que proporciona el CARLA-ROS-bridge, lo cual permite integrar soluciones que se vayan a aplicar en hardware directamente.

### 2.2 Mapa introducido

Se ha modelado un área aproximada de 0,35 km<sup>2</sup> de Bilbao comprendiendo el paso por la Escuela de Ingeniería hasta la Plaza Sagrado Corazón y sus intersecciones. El trazado contiene el conjunto de semáforos, señales y pasos de peatones, así como una zona de parking adicional para pruebas específicas.

El modelado del mapa se ha realizado siguiendo la secuencia de la Figura 2. Para la generación de carreteras se ha utilizado el software RoadRun-



ner. Se trata una aplicación de MathWorks que permite de forma sencilla crear escenarios y que admite la importación de imágenes, archivos OSM o nubes de puntos como plantillas. En este caso, se ha utilizado un archivo OSM de la zona escogida, puesto que se tratan de archivos precisos con puntos de referencia que facilitan el trabajo.

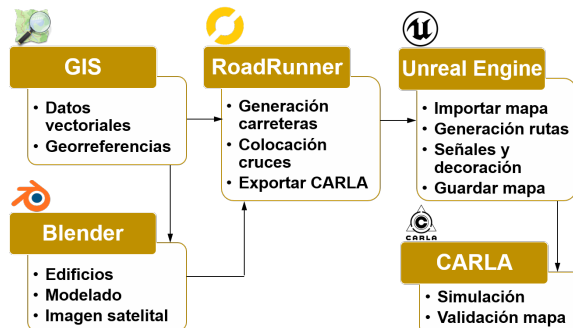


Figura 2: Generación de mapa para CARLA

En cuanto a los edificios, se ha utilizado Blender para modelarlos. Este programa de código abierto, comúnmente utilizado en la industria del videojuego, permite al usuario recrear objetos o personajes mediante mallas estructuradas en poliedros que más tarde se introducirán en un espacio virtual gracias a los motores gráficos como Unreal Engine. Dado que se requiere cierta precisión y coherencia con las carreteras generadas se ha utilizado el mismo archivo OSM para esta tarea también. Se han añadido texturas a los laterales de los edificios con el fin de servir de referencia a aplicaciones de visión artificial.

Finalmente, se han introducido los semáforos, señales y pasos de peatones correspondientes a lo largo de la carretera utilizando los assets de la biblioteca de CARLA como plantilla.

### 2.3 Modelo de vehículo

La introducción de un nuevo vehículo en CARLA tiene una vertiente doble: por un lado es necesario realizar un modelado que resulte adecuado y por otro llevar a cabo las configuraciones de planos (*blueprints*) en Unreal Engine. En el entorno propuesto se ha incorporado un Renault Twizy.

Con tal de llevar a cabo el modelado físico, se ha hecho uso de la herramienta de modelado 3D Blender una vez más. Este programa también permite la generación de esqueletos que posibilitan el movimiento relativo entre segmentos malados. En el caso de un vehículo es necesario definir uniones entre el chasis y las ruedas que permitan simulaciones más realistas de la suspensión del vehículo. Esta tarea se ha llevado

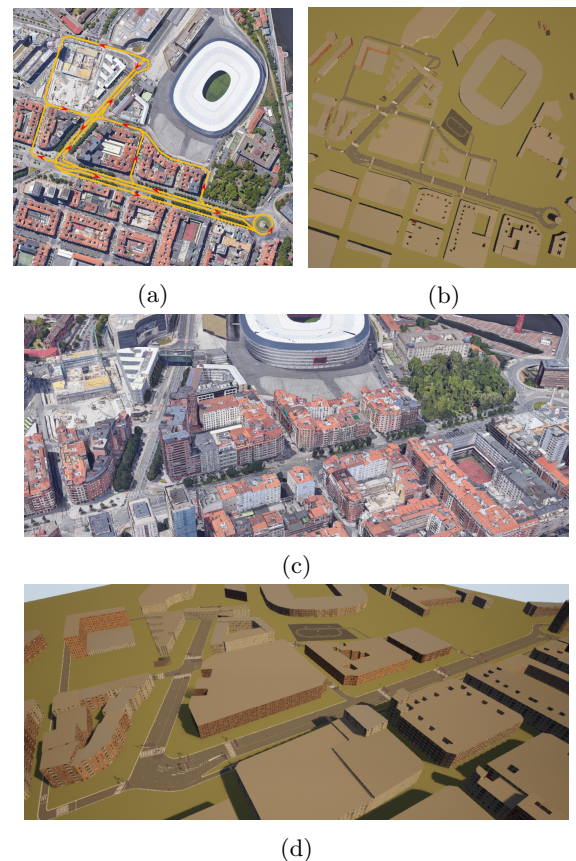


Figura 3: Comparativa del tramo de mapa entre la imagen hecha por satélite y la hecha en el simulador: (a) y (b) en vista aérea; (c) y (d) en perspectiva

a cabo utilizando uno de los modelos 3D que se pueden encontrar en la biblioteca de CARLA como plantilla, ya que facilita la integración con el modelo matemático que se utiliza para simular la dinámica vehicular. Una vez en Unreal Engine, se han añadido animaciones a las ruedas relacionando la velocidad en cada instante del vehículo con su giro. El resultado se muestra en la Figura 4, la cual compara una imagen del vehículo real con el modelado dentro del simulador.

En cuanto al modelado dinámico del vehículo, se hace uso de PhysX, un modelo multicuerpo altamente parametrizado desarrollado por Nvidia. Dado que se busca una representación del vehículo real se han establecido los parámetros en base a las especificaciones del Twizy (Tabla 1).

donde  $I_z$  es el momento de inercia,  $m_{chasis}$  y  $m_{ruedas}$  la masa del vehículo y de cada rueda respectivamente,  $K_{susp}$  y  $C_{susp}$  la rigidez y amortiguación de suspensión frontal/trasera,  $\delta_{max}$  el giro máximo de las ruedas,  $C_{freno\_max}$  el par máximo de frenada,  $rpm_{max}$  las revoluciones máximas del motor,  $\mu_{transmi}$  la relación de transmisión y  $C_{drag}$  el coeficiente de arrastre.





(a)



(b)

Figura 4: Comparativa entre un Renault Twizy real (a) y el modelo virtual en Unreal Engine (b)

## 2.4 Controlador

Se han implementado dos controladores desacoplados en el entorno de simulación para resolver independientemente el problema de seguimiento de una velocidad de referencia (controlador longitudinal) y el problema de seguimiento de trayectoria (controlador lateral). Ambos controladores son parte de las funcionalidades básicas de un entorno de simulación y pueden ser fácilmente reemplazables por módulos externos utilizando ROS. Es por eso que se han elegido diseños basados en el estado del arte. A continuación, se expone una descripción más detallada de los mismos.

Parámetro	Unidad	Valor
$I_z$	kg m <sup>2</sup>	243,18
$m_{chasis}$	kg	611
$m_{ruedas}$	kg	8
$K_{susp\_front}$	N/m	5840
$K_{susp\_rear}$	N/m	8100
$C_{susp\_front}$	Ns/m	660
$C_{susp\_rear}$	Ns/m	1400
$\delta_{max}$	rad	0,7
$C_{freno\_max}$	Nm	360
$rpm_{max}$	rpm	2100
$\mu_{transmi}$		0,108
$C_{drag}$		0,64

Tabla 1: Parámetros dinámicos principales del Renault Twizy

### 2.4.1 Controlador longitudinal

Para conseguir las señales de control del acelerador y el freno del vehículo se ha implementado un controlador PID de rango partido, utilizando los valores negativos en el freno y los positivos en el acelerador:

$$u = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

donde  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  son las ponderaciones proporcional, integral y derivativa respectivamente, es decir, los valores a ajustar del controlador, y  $e(t)$  es la diferencia entre la velocidad longitudinal del vehículo y la de referencia establecida.  $u(t)$  es la señal de control que se aplicará al vehículo más tarde.

Es posible conseguir un vector de velocidad de cada actor dentro del simulador gracias a la API de CARLA. Dicho vector corresponde a los valores de la velocidad desglosado en los componentes cartesianos y relativos al sistema de referencia global del mapa con el que se esté trabajando. De esta forma, la velocidad total del vehículo será el módulo del vector y la velocidad longitudinal será su proyección sobre el eje longitudinal del vehículo.

$$v_{long} = v_{tot} \cos(\phi_v - \phi_{veh}) \quad (2)$$

donde  $\phi_v$  es la orientación del vector de velocidad y  $\phi_{veh}$  es la orientación del vehículo en el mapa.

Dada la superior capacidad de frenado a la de aceleración de los vehículos se ha establecido una ponderación a la acción de control del freno de 0,4.

### 2.4.2 Controlador lateral

El objetivo del controlador lateral es el de generar un valor de giro de ruedas para que el vehículo pueda seguir con el menor error posible la referencia marcada por el centro de la carretera. Para ello, se ha implementado un controlador MPC. El modelo utilizado para la predicción es el modelo cinemático o modelo Ackerman representado por el sistema de ecuaciones 3:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + v_k \cos(\phi_k) T_s \\ y_{k+1} &= y_k + v_k \sin(\phi_k) T_s \\ \phi_{k+1} &= \phi_k + \frac{v_k}{L} \tan(\delta_k) T_s \end{aligned} \quad (3)$$

donde  $\dot{x}$  y  $\dot{y}$  son la velocidad longitudinal y lateral del eje trasero del vehículo respectivamente,  $v$  es la velocidad total del eje trasero,  $\phi$  es la orientación del vehículo respecto al sistema de referencia global,  $L$  es la batalla del vehículo y  $\delta$

es el ángulo de giro de las ruedas representadas en el centro del eje delantero.  $dt$  es el tiempo de muestreo utilizado en las simulaciones.

Por lo tanto, se trata de un MPC no lineal cuya ley de control consiste en resolver en cada instante de control discreto  $k$  el siguiente problema de optimización,

$$\begin{aligned} V &= \min_{\Delta u^+} J(\Delta u^+, \hat{x}(k)) \\ &\text{s.a.} \\ &A_c u^+ \leq b_c \end{aligned} \quad (4)$$

donde  $\Delta u^+ = [\Delta\delta(k) \dots \Delta\delta(k+N)]^T$  es la secuencia de variaciones en la acción de control a calcular a lo largo del horizonte de predicción  $H = NT_s$ , siendo  $T_s$  el tiempo de muestreo del controlador;  $\hat{x}(k)$  es el estado medido en el instante  $k$ ; y  $J$  es la ecuación de coste a minimizar,

$$J = (\hat{y} - w)^T Q (\hat{y} - w) + \Delta u^{+T} R \Delta u^+ \quad (5)$$

donde  $\hat{y} = [y(k+1) \dots y(k+N+1)]^T$  es la posición lateral relativa al sistema de referencia del vehículo en cada iteración, y  $w$  la referencia a lo largo del horizonte de predicción  $H$  transformada al mismo sistema de referencia. Las matrices  $Q$  y  $R$  ponderan el error de seguimiento y la acción de control respectivamente.

Puesto que el modelo está representado en el sistema de coordenadas locales del vehículo, en cada instante las condiciones iniciales del problema de optimización son nulas.

Por último, se han implementado restricciones de entrada en el controlador, de acuerdo con las limitaciones físicas del vehículo, en el que las ruedas no pueden superar un ángulo de giro de 0,7 rad.

$$-0,7 \leq u \leq 0,7 \quad (6)$$

### 3 Caso de uso

En esta sección, se ha diseñado un caso de uso con el objetivo de comprobar la utilidad del entorno de simulación propuesto en situaciones básicas de conducción automática. Se ha realizado un caso de seguimiento de líneas en el que el vehículo debe recorrer parte del mapa sin salirse de la carretera.

Se ha realizado una selección heurística de los parámetros de los controladores, siendo los del controlador longitudinal los siguientes:

$$K_p = 1,0 ; K_i = 0,2 ; K_d = 0 \quad (7)$$

En cuanto a las ponderaciones del MPC del controlador lateral, los valores son los siguientes:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (8)$$

$$R = \begin{bmatrix} 10 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 10 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 10 \end{bmatrix}_{N-1 \times N-1} \quad (9)$$

Para finalizar se ha establecido un horizonte de predicción  $H = 12$  y un tiempo de muestreo  $T_s = 0.15$

La simulaciones se han llevado a cabo en un ordenador Dell Precision con una tarjeta gráfica NVIDIA Quaddro P1000 y un sistema operativo Windows 10.

#### 3.1 Seguimiento de líneas

El caso de seguimiento de línea pone a prueba la propuesta de control integrada en el entorno de simulación para seguir la carretera a una velocidad constante de 30km/h. Se ha elegido esta velocidad como caso límite en entornos urbanos.

Para ello, primero es necesario generar la referencia que se va a utilizar. Esta referencia está definida en el centro del carril, ya que es el espacio más seguro para viajar de un vehículo. Como no se dispone de un algoritmo de percepción integrado en la plataforma, es necesario extraerla de los *waypoints* definidos intrínsecamente en las propias carreteras con la API de CARLA. Así mismo, es necesario ejecutar esta función de extracción de referencia en cada una de las iteraciones.

A fin de medir la calidad de los controladores implementados se recoge una serie de parámetros relativos al seguimiento de trayectorias, así como, el estado del vehículo en cada iteración y los errores lateral y longitudinal.

En la Figura 5 se presentan los resultados de la simulación realizada superpuestos con una imagen del mapa simulado. En el gráfico se pueden ver la referencia a seguir en azul con la trayectoria que ha recorrido el vehículo en gris. Es posible comprobar que el vehículo es capaz de realizar el recorrido sin salir de la carretera.

El error lateral, mostrado en la Figura 6, demuestra un crecimiento en las curvas, dándose el pico más alto en la de menor curvatura con un valor ab-

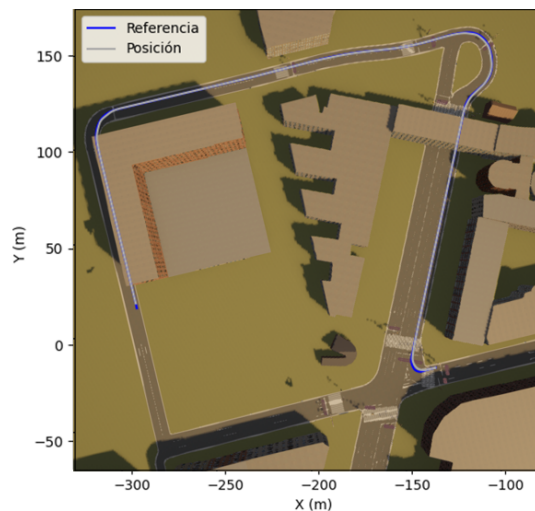


Figura 5: Resultado del seguimiento de trayectorias

soluta de  $1m$ . En este caso, los valores negativos representan un desviación lateral hacia la derecha de la referencia, mientras que los positivos son los desviados hacia la izquierda.

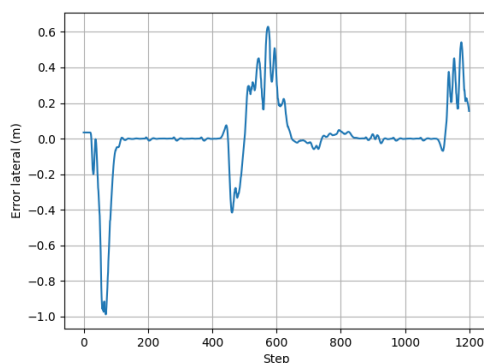


Figura 6: Error lateral en cada instante de la simulación

Por otro lado, el PID implementado para el seguimiento de velocidad consigue mantener una velocidad constante a lo largo de la mayoría del trayecto, a pesar de contar con error estático, como se observa en la Figura 7.

## 4 Conclusiones

En este trabajo se presenta un entorno de simulación basado en CARLA, en el que se introduce un mapa de la ciudad de Bilbao y el modelo dinámico de un Renault Twizy como punto de partida para futuras validaciones de algoritmos de vehículos automatizados. Dicho entorno es puesto a prueba mediante un caso de uso de seguimiento

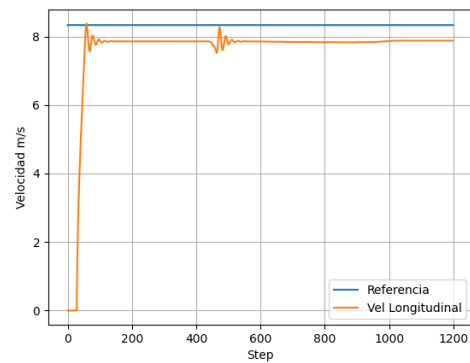


Figura 7: Seguimiento de la velocidad en cada instante

de línea con la integración de controladores independientes longitudinal y lateral que demuestran resultados aceptables.

Como trabajos futuros, se estima la implementación de sensores en CARLA para la generación de la trayectoria vehicular en casos de tráfico urbano, así como el testeo de diferentes algoritmos de aparcamiento, control cooperativo, evasión de obstáculos y toma de decisiones ante contingencias.

Se establece así una base para la futura simulación de situaciones de tráfico en entornos urbanos que serán posible validarlas con modelos reales.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del Gobierno Vasco ELKARTEK KK-2021/00123 y el programa de Formación de Personal Investigador de la UPV/EHU y Tecnalia 2019.

## References

- [1] Sofiane Bacha et al. "A review on vehicle modeling and control technics used for autonomous vehicle path following". In: *International Conference on Green Energy and Conversion Systems, GECS 2017* (2017). DOI: 10.1109/GECS.2017.8066221.
- [2] R.F. Benekohal and Joseph Treiterer. "CARSIM: CAR-following model for SIMulation of traffic in normal and stop-and-go conditions". en. In: *Transportation research record* 1194 (1988), pp. 99–111. ISSN: 0361-1981. URL: <http://dx.doi.org/>.
- [3] cognata. *cognata*. <https://www.cognata.com/>. Online; accessed 12 April 2021. 2021.
- [4] Alexey Dosovitskiy et al. "CARLA: An Open Urban Driving Simulator". In: *Proceedings of the 1st Annual Conference on*

- Robot Learning*. Ed. by Sergey Levine, Vincent Vanhoucke, and Ken Goldberg. Vol. 78. Proceedings of Machine Learning Research. PMLR, Nov. 2017, pp. 1–16. URL: <http://proceedings.mlr.press/v78/dosovitskiy17a.html>.
- [5] *Drive Constellation Nvidia*. <https://www.nvidia.com/en-us/self-driving-cars/simulation/>. Online; accessed 09 June 2021.
- [6] dSpace. *dSpace*. [https://www.dspace.com/en/inc/home/products/sw/automotive\\_simulation\\_models.cfm](https://www.dspace.com/en/inc/home/products/sw/automotive_simulation_models.cfm). Online; accessed 12 April 2021. 2021.
- [7] Metamoto. *Metamoto*. <https://www.metamoto.com/>. Online; accessed 12 April 2021. 2021.
- [8] rFactor. *rFactor Pro*. <https://www.rfpro.com/rfactor-pro-and-concurrent-team-up/>. Online; accessed 12 April 2021. 2014.
- [9] SAE. *SAE levels of driving automation*. <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>. Online; accessed 13 December 2020. 2019.
- [10] Wilko Schwarting, Javier Alonso-Mora, and Daniela Rus. “Planning and Decision-Making for Autonomous Vehicles”. In: *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 1.1 (2018), pp. 187–210. ISSN: 2573-5144. DOI: 10.1146/annurev-control-060117-105157.
- [11] Soheil Sohrabi et al. “Quantifying the automated vehicle safety performance: A scoping review of the literature, evaluation of methods, and directions for future research”. In: *Accident Analysis and Prevention* 152. February (2021), p. 106003. ISSN: 00014575. DOI: 10.1016/j.aap.2021.106003. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106003>.
- [12] Jessica Van Brummelen et al. “Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow”. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 89. March (2018), pp. 384–406. ISSN: 0968090X. DOI: 10.1016/j.trc.2018.02.012. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.012>.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0

# Comparativa entre modelos estocásticos de crecimiento bacteriano a distintas escalas

Nerea Martínez-López, Carlos Vilas and Míriam R. García  
Ingeniería de Procesos, IIM-CSIC, Vigo, España  
nmartinez@iim.csic.es, carlosvf@iim.csic.es, miriamr@iim.csic.es

## Resumen

*En la industria alimentaria la calidad y la seguridad del alimento, así como los procesos implicados en su producción, envasado y transporte, se optimizan acudiendo a la microbiología predictiva. Esta disciplina modela el comportamiento de microorganismos, tales como bacterias, empleando modelos primarios para describir su crecimiento.*

*Uno de los mayores retos en este contexto es modelar y simular el crecimiento cuando el número inicial de bacterias (inóculo) es reducido, ya que la población se comporta estocásticamente. Existen distintas alternativas de modelado, dependiendo de (1) el grado de detalle de la solución requerida, (2) los tiempos de cálculo y (3) la facilidad de calibración de sus parámetros.*

*En este trabajo se comparan las soluciones y tiempos de cálculo, a la vez que se discute la identificabilidad estructural, cuando se aborda el problema desde una escala microscópica, con modelado basado en individuos, o desde una escala mesoscópica, mediante la derivación de la equivalente ecuación de Fokker-Planck modificada.*

**Palabras clave:** Ecuación de Fokker-Planck modificada; procesos estocásticos; modelado multiescala; identificabilidad estructural.

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria está sufriendo una transformación gracias al uso de modelos matemáticos que permiten la optimización de los procesos productivos [12], los tratamientos de conservación [13], el envasado [14], así como el transporte y la distribución de alimentos [7]. En estos modelos, una parte fundamental es la descripción del crecimiento bacteriano. Las bacterias bajo estudio pueden ser tanto patógenas como deterioradoras del alimento (determinando la seguridad y calidad alimentaria), o bien resultar interesantes para los procesos de producción en la industria alimentaria, como aquellas que se encargan de iniciar procesos fermentativos o de producir bioconservantes.

Los modelos más conocidos y empleados, tanto

por la industria como por las agencias evaluadoras de riesgos (por ejemplo la EFSA [9]), están basados en estudios estadísticos puros o dinámicas deterministas. Estos últimos modelos reciben comúnmente el nombre de microbiología predictiva cuando se aplican en ingeniería de alimentos. Sin embargo, su uso está limitado cuando el inóculo es bajo, pues en este caso la población tiende a evolucionar estocásticamente.

Cuando el comportamiento de la población es estocástico, una opción son los modelos basados en individuos [3, 2, 8], que permiten la implementación de mecanismos, por ejemplo de división celular, de una forma sencilla e intuitiva. Sin embargo, su calibración y cómputo para tareas de optimización resulta, muchas veces, prohibitivo. Otra alternativa es acudir a los modelos mesoscópicos, que se centran en describir propiedades medias de la población, normalmente trabajando con distribuciones de probabilidad de las variables de interés.

En [5] se presenta un modelo de crecimiento estocástico de bacterias basado en individuos mediante la implementación de mecanismos de división bien estudiados (cada bacteria crece exponencialmente [4] y estocásticamente [1], y se divide al llegar a cierto tamaño una vez la bacteria está adaptada al medio [10]). Este modelo permite estimaciones de dinámica del número de bacterias para la fase exponencial y de una cota superior (conservadora) para el caso de la fase de latencia. En el mismo trabajo, se presenta la ecuación equivalente de Fokker-Planck modificada, comparando los resultados con datos obtenidos a partir de citometría de flujo para las distribuciones de probabilidad de tamaño celular en la población.

En el presente trabajo se analizan los resultados obtenidos por medio de dos enfoques de modelado (microscópico y mesoscópico) para la distribución de tamaños de una población de bacterias que evoluciona estocásticamente, a la vez que se compara la eficiencia computacional de ambos modelos. Se presenta, además, un breve análisis de la identificabilidad estructural, con el fin de detectar posibles dificultades en la calibración de estos modelos por medio de datos obtenidos con la técnica de citometría de flujo.

## 2. MODELADO BASADO EN INDIVIDUOS DEL CRECIMIENTO BACTERIANO

Supongamos que  $\mathcal{P} = \{1, 2, \dots, N\}$  representa una población compuesta por  $N \in \mathbb{N}$  bacterias. El modelo escogido trata de explicar el crecimiento exponencial de cada individuo  $i \in \mathcal{P}$  como un proceso que verifica la Ecuación Diferencial Estocástica (EDE) [1]:

$$dX_t^i = \mu dt + \xi dW_t^i, \quad (1)$$

de forma que la variación que experimenta con el tiempo el volumen del  $i$ -ésimo individuo ( $V_t^i$ , o  $X_t^i = \ln V_t^i$  en escala logarítmica) se explica como combinación de una fluctuación estocástica (conducida por un proceso de Wiener,  $W_t^i$ ) de intensidad  $\xi$ , más una componente de desarrollo determinista, cuantificada por el ratio de crecimiento  $\mu > 0$ . Para  $\xi = 0$  la incertidumbre es eliminada del proceso, y el volumen de cada individuo crece exponencialmente con el tiempo.

La división se modela añadiendo los nuevos individuos a la población (*células hijas*), y reajustando el tamaño del individuo que se ha dividido (*célula madre*) al tamaño de sus hijas. Se tiene que el número de individuos generados por una sola madre al término de cada división es  $N_h = 2^g - 1$ , donde  $g$  representa el número de planos en los que se divide la bacteria. Suponiendo que este proceso se activa para un individuo  $i \in \mathcal{P}$  cuando su tamaño iguala (o excede) cierto valor límite (definido en función de los tamaños de las madres,  $X_m \sim \mathcal{N}(x_m, \sigma^2)$ , variable aleatoria normal de media  $x_m = \ln(v_m)$  y varianza  $\sigma^2$ , ambos parámetros del modelo) la división se esquematiza:

$$\begin{cases} \mathcal{P} &= \mathcal{P} \cup \{N + j, 1 \leq j \leq N_h\}, \\ X_t^{N+j} &= X_t^i - g \ln(2), 1 \leq j \leq N_h, \\ X_t^i &= X_t^i - g \ln(2), \end{cases} \quad (2)$$

donde  $N$  representa el número de individuos de la población  $\mathcal{P}$  antes de la división, y el volumen de la madre es  $2g$  veces mayor que el de las hijas ( $v_m = 2^g v_h$ ). En este estudio se considera que la división tiene lugar de forma determinista (las bacterias se dividen a un volumen prefijado  $v_m$ ), por lo que se toma  $\sigma = 0$ , y así  $X_m = x_m \sim \delta_{x_m}$ .

Las simulaciones del modelo basado en individuos (1)–(2) se han llevado a cabo usando distintos esquemas numéricos para la ecuación del crecimiento. Se puede probar que la solución exacta de la EDE (1) es un proceso conocido como *browniano con deriva*:

$$X_t^i = X_{t_0}^i + \mu(t - t_0) + \xi(W_t^i - W_{t_0}^i), \quad t_0 \leq t < t_f,$$

donde  $t_0$  es el instante en el que el individuo  $i$  se origina (o finaliza su anterior división), mientras que  $t_f$  es el instante en el que se divide nuevamente. Por simplicidad, usamos  $t_0$  y  $t_f$ , pero conviene notar que  $t_0 = t_0(i, j)$  y  $t_f = t_f(i, j)$ , con  $j \geq 0$  el número de divisiones que ha experimentado la  $i$ -ésima bacteria hasta tiempo  $t_0$ .

Discretizando el intervalo  $[t_0, t_f]$  en  $n \in \mathbb{N}$  puntos  $\{t_k, 0 \leq k \leq n - 1\}$ , el crecimiento del individuo  $i \in \mathcal{P}$  puede implementarse, para  $1 \leq k \leq n - 1$ , empleando cualquiera de los esquemas numéricos:

### Esquema exacto:

$$X_{t_k}^i = X_{t_0}^i + \mu(t_k - t_0) + \xi(W_{t_k}^i - W_{t_0}^i). \quad (3)$$

### Euler–Maruyama:

$$X_{t_k}^i = X_{t_{k-1}}^i + \mu(t_k - t_{k-1}) + \xi \Delta W_k^i, \quad (4)$$

donde  $\Delta W_k^i = W_{t_k}^i - W_{t_{k-1}}^i$ . Ambos esquemas producen resultados idénticos.

Dado que  $X_t^i = \ln V_t^i$ , aplicando el Lema de Ito [6] se puede probar que  $V_t^i$  es un proceso que satisface la EDE (lineal y con ruido multiplicativo):

$$dV_t^i = (\mu + \frac{1}{2}\xi^2)V_t^i dt + \xi V_t^i dW_t^i, \quad t_0 \leq t < t_f,$$

cuya solución es el *browniano geométrico*:

$$V_t^i = V_0^i \exp(\mu(t - t_0) + \xi(W_t^i - W_{t_0}^i)).$$

Así, es posible implementar directamente el modelo de crecimiento en volumen para la partición  $\{t_k, 0 \leq k \leq n - 1\}$  con alguno de los esquemas:

### Esquema exacto:

$$V_{t_k}^i = V_0^i \exp(\mu(t_k - t_0) + \xi(W_{t_k}^i - W_{t_0}^i)). \quad (5)$$

### Euler–Maruyama:

$$V_{t_k}^i = V_{t_{k-1}}^i (1 + \alpha(t_k - t_{k-1}) + \xi \Delta W_k^i). \quad (6)$$

### Milstein–II.

$$\begin{aligned} V_{t_k}^i &= V_{t_{k-1}}^i (1 + \alpha(t_k - t_{k-1}) + \xi \Delta W_k^i) + \\ &V_{t_{k-1}}^i \alpha(t_k - t_{k-1}) (\xi \Delta W_k^i + \frac{\alpha}{2}(t_k - t_{k-1})) + \\ &V_{t_{k-1}}^i \frac{\xi^2}{2} ((\Delta W_k^i)^2 - (t_k - t_{k-1})), \end{aligned} \quad (7)$$

donde se ha tomado  $\alpha = \mu + \xi^2/2$ .

## 3. ECUACIÓN DE FOKKER - PLANCK MODIFICADA

Sea  $p(x, t)$  la función que describe la probabilidad de que las células tengan un tamaño  $x$  (en escala logarítmica) a tiempo  $t$ , es decir, la función de densidad de probabilidad (FDP). Una propiedad bien conocida de la FDP es:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x, t) dx = 1. \quad (8)$$



Cuando no se considera división ni muerte celular,  $p(t, x)$  se obtiene como la solución de la ecuación de Fokker–Planck:

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = \underbrace{\frac{\xi^2}{2} \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2}}_{\text{crecimiento celular con incertidumbre}} - \mu \frac{\partial p(x, t)}{\partial x}, \quad (9)$$

donde, al igual que en la sección anterior,  $\mu$  representa la velocidad de crecimiento determinista y  $\xi$  la intensidad del ruido.

Sin embargo, estamos considerando que, al llegar a cierto volumen  $v_m$ , las bacterias se dividen en  $2^g$  células hijas. La solución de la ecuación de Fokker–Planck clásica, teniendo en cuenta dicha división, no verificaría la igualdad (8), pues el valor de la integral aumentaría con el tiempo. Para evitar esto, se añade al modelo un término de normalización, resultando en la ecuación de Fokker–Planck modificada (EFPM) [5]:

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = \frac{\xi^2}{2} \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} - \underbrace{p(J(x_h, t) - J(x_m, t))}_{\text{Normalización}}, \quad (10)$$

siendo  $J(x, t)$  el flujo de la FDP [5]:

$$J(x, t) = \mu p(x, t) - \frac{\xi^2}{2} \frac{\partial p(x, t)}{\partial x}.$$

La derivación de la expresión (10) se puede consultar en el Apéndice A.

Dado que las células se dividen al alcanzar un tamaño  $x_m = \ln(v_m)$ , la probabilidad de encontrar células de tamaño mayor o igual que  $x_m$  es cero. Matemáticamente, esto se representa imponiendo condiciones frontera de *pared absorbente*, es decir:

$$p(x_m, t) = 0. \quad (11)$$

Además, el flujo de nuevas células que surgen de la división (es decir,  $J(x_h, t)$ ) es  $2^g$  veces el flujo de células que se dividen ( $J(x_m, t)$ ), de forma que  $J(x_h, t) = 2^g J(x_m, t)$ . Por lo tanto, la condición frontera en  $x_h$  quedaría:

$$-\frac{\xi^2}{2} \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_h} = \mu(2^g p(x_m, t) - p(x_h, t)) - 2^g \frac{\xi^2}{2} \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_m}. \quad (12)$$

Inicialmente, las células tienen un tamaño  $x_h$ . Por tanto, la distribución de probabilidad inicial es:

$$p(x, 0) = \delta_{x_h}(x), \quad (13)$$

donde  $\delta_{x_h}(x)$  es la delta de Dirac centrada en  $x_h$ .

La FDP respecto del volumen,  $p(v(x), t)$ , se obtiene mediante la expresión:

$$p(v(x), t) = \frac{p(x, t)}{dv(x)/dx} = \exp(-x)p(x, t). \quad (14)$$

## 4. RESULTADOS

Los valores de los parámetros empleados en las simulaciones (véase la Tabla 1) fueron obtenidos a partir de citometría de flujo para *Pediococcus acidilactici* [5]: una bacteria productora de pediocina que supone un antimicrobiano relevante para la industria alimentaria [12].

Tabla 1: Parámetros usados en las simulaciones.

Símb.	Significado	Valor	Uds.
$v_m$	Volumen de las madres	4.55740	$\mu\text{m}^3$
$\xi$	Intensidad del ruido	0.13439	$\text{h}^{-1/2}$
$\mu$	Velocidad crecimiento	1.16190	$\text{h}^{-1}$
$g$	Planos de división	2.00000	-

### 4.1. MODELADO BASADO EN INDIVIDUOS

Las simulaciones arrancan en  $t_0 = 0$  con una única bacteria de volumen  $V_0^1 = v_h$ , la cual evoluciona de acuerdo con la ecuación (1) y se divide según (2), hasta alcanzar un tiempo final de simulación. En la Figura 1 se muestra la evolución que experimenta el volumen de cada una de las bacterias de la población durante las primeras cinco horas de desarrollo, empleando el esquema exacto (5) y un paso de tiempo constante  $\Delta t = 0.01$  h. El resultado que se obtiene es idéntico cuando se parte de una bacteria de tamaño  $X_0^1 = \ln(x_h)$  y se aplica el método (3), realizando posteriormente la transformación  $V_t^i = \exp(X_t^i)$ , para cada  $i \in \mathcal{P}$ .

Dada la naturaleza estocástica del modelo, la trayectoria que se muestra en la Figura 1 para el volumen de cada bacteria  $i \in \mathcal{P}$  varía al tomar distintas realizaciones del proceso de Wiener  $W_t^i$  en la expresión (5). Se tiene, no obstante,  $E[V_t^i] = V_0^i \exp(\mu(t - t_0) + \xi^2(t - t_0)/2)$ , propiedad que se aprecia intuitivamente en la figura. Análogamente, se verifica  $E[X_t^i] = X_{t_0}^i + \mu(t - t_0)$ .

### 4.2. ECUACIÓN DE FOKKER – PLANCK MODIFICADA

Para implementar el modelo (10)–(14) se ha empleado el método de Diferencias Finitas (DF). Concretamente, se ha considerado un esquema de cinco puntos de DF centradas para aproximar la derivada segunda, y un esquema de cuatro puntos de DF progresivas para aproximar la derivada primera con respecto de  $x$ . Una explicación detallada de estos métodos se puede encontrar en [11]. Se han elegido 400 puntos de discretización en la variable  $x$ , dado que emplear un mayor número de puntos no altera significativamente los resulta-

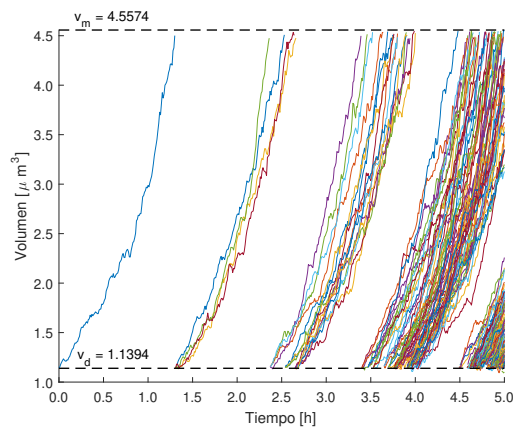


Figura 1: Evolución del volumen para el modelo de crecimiento y división (1)–(2). El número de bacterias para  $t = 5$  horas es  $N = 172$ .

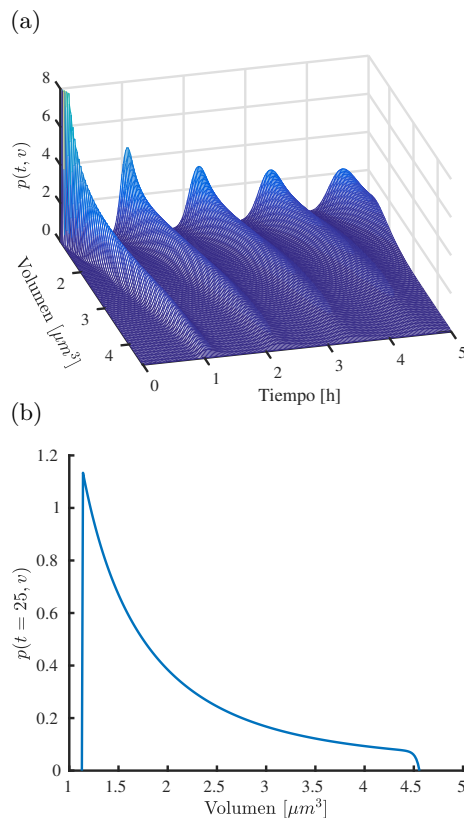


Figura 2: Solución numérica del sistema de ecuaciones (10)–(14). (a) Evolución en el tiempo hasta  $t = 5$  h. (b) Estado estacionario ( $t = 25$  h).

dos. La integración temporal se ha llevado a cabo usando el integrador *ode15s* en Matlab®.

La solución numérica obtenida con el proceso que se acaba de describir se muestra en la Figura 2. Para poder visualizar mejor la evolución de la distribución de probabilidad, se ha detenido la simulación en tiempo  $t = 5$  h -Figura 2(a)-. Desde el ins-

Modelado, Simulación y Optimización  
 Tabla 2: Comparación entre métodos de simulación. MBI = Modelo Basado en Individuos; EFPM = Ecuación de Fokker-Planck modificada; AN = Analítica; EM=Euler-Maruyama; MII=Milstein-II; DF=Diferencias finitas.

Modelo	Método	Tiempo comp. [s]	RMSE	
			$t$	$t_f$
MBI (X)	AN	813	-	-
MBI (X)	EM	744	0	0
EFPM (x)	DF	1	0.107	0.043
MBI (V)	AN	1365	-	-
MBI (V)	EM	685	0.031	0.017
MBI (V)	MI	876	0.019	0.010
EFPM (v)	DF	1	0.063	0.035

tante inicial, la probabilidad de encontrar células de mayor (resp. menor) tamaño, aumenta (resp. disminuye) con el tiempo. Como era de esperar, la probabilidad de obtener células de tamaño mayor que  $v_m$  es 0, ya que la división se produce al alcanzar dicho volumen máximo. Esto ocurre en la vecindad de los tiempos  $t \in \{1, 2.1, 3.3, 4.5, \dots\}$ . A medida que avanza el tiempo, también aumenta el tamaño de dicha vecindad, hasta generar un flujo continuo de células de volumen  $v_h$ . Aproximadamente a tiempo  $t = 25$  h se alcanza el estado estacionario -Figura 2(b)-. El tamaño más probable (modo de la distribución) se corresponde con  $v_h$ , y va decreciendo de forma no lineal hasta alcanzar el valor máximo  $v_m$ .

### 4.3. COMPARACIÓN ENTRE MODELOS Y MÉTODOS DE SIMULACIÓN

#### 4.3.1. ERROR Y TIEMPO DE CÁLCULO

La Tabla 2 resume los resultados obtenidos para los modelos basados en individuos y para la EFPM. Los cálculos se han llevado a cabo en Matlab R2016b®, usando una estación de trabajo con 32 GB de RAM (2400 MHz) y CPU Intel® Core™ i7-7700K (4.20 GHz). La columna *Tiempo comp.* indica el tiempo empleado por cada método para obtener la solución. En el caso del modelo basado en individuos, la simulación se para cuando el proceso alcanza el tiempo  $t_f = 17$  h. Para los distintos esquemas numéricos aplicados al modelo basado en individuos, el tiempo de computación aumenta exponencialmente con la duración del proceso - ver Figura 3-. Dado que el proceso es estocástico, la solución depende de la semilla que se use para generar los números aleatorios necesarios para construir trayectorias del browniano. En dicha figura se muestra la media de tiempos para

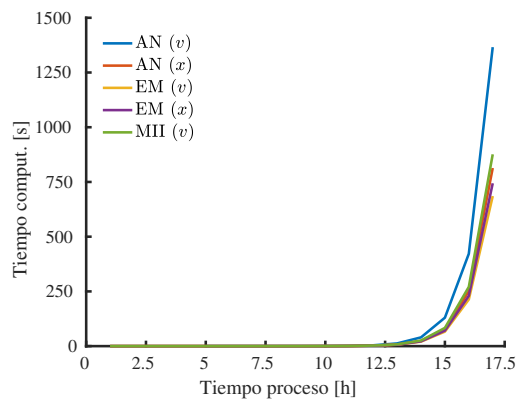


Figura 3: Evolución del tiempo de computación como función del tiempo de proceso para los distintos métodos de resolución del modelo basado en individuos.

250 simulaciones con distintas semillas. El método más eficiente es el esquema de Euler–Maruyama (con crecimiento en volumen) y el menos eficiente se obtiene implementando la solución analítica.

La primera columna del error ( $t$ ) se refiere a la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el cual se ha calculado empleando los perfiles obtenidos en todos los tiempos de proceso. La segunda columna del error ( $t_f$ ) muestra el RMSE calculado usando los perfiles a tiempo final. El RMSE de la primera columna es mayor que el de la segunda, pues el número de células al principio del proceso es pequeño, de manera que se obtienen perfiles muy ruidosos -ver Figura 4-. A medida que el proceso transcurre, el número de células aumenta significativamente y los perfiles se suavizan, aproximándose cada vez más a la solución obtenida mediante la EFPM. Los perfiles que se muestran en la Figura 4 para el modelo basado en individuos se corresponden con el valor medio de 3000 simulaciones con distintas semillas de generación de números aleatorios. Se puede ver, tanto en la Tabla 2 como en la Figura 4(d)-(f), que (tal y como se ha mencionado en la Sección 2) las soluciones analítica y Euler–Maruyama coinciden en el dominio  $X$ , pero el esquema de Euler–Maruyama es más eficiente computacionalmente. Respecto a la EFPM, se puede ver que representa con bastante precisión el comportamiento medio de los modelos basados en individuos. Las diferencias entre ellos vienen dadas, principalmente, porque los modelos basados en individuos permiten tamaños menores que  $x_h$ , mientras que la solución de la EFPM está limitada al dominio  $[x_h, x_m]$ . Sin embargo, la EFPM es mucho más eficiente que los modelos basados en individuos, los cuales, a partir de un cierto número de células, se vuelven demasiado costosos y presentan problemas de memoria.

#### 4.3.2. IDENTIFICABILIDAD ESTRUCTURAL

La medición directa de los parámetros necesarios para la implementación de los modelos que se presentan en este trabajo (Tabla 1) requiere experimentos complejos, donde las estimaciones no son fiables al referirse a propiedades individuales de cada célula (ver [5] para detalles). Una alternativa es el uso de distribuciones de probabilidad de tamaño celular, que se pueden medir rápidamente, y de forma relativamente barata, empleando la técnica de citometría de flujo. Sin embargo, las distribuciones habitualmente se miden solo en estado estacionario, por lo que son incapaces de proporcionar demasiada información útil para la estimación de estos parámetros.

De esta forma, se hace necesario establecer si, dada la información que proporciona la distribución de tamaños en el estado estacionario, podemos llegar a estimar los parámetros de la Tabla 1 de forma unívoca con uno u otro modelo. En tal caso, el modelo sería estructuralmente identificable.

Dos de los parámetros que intervienen en los modelos son estructuralmente identificables: el volumen de las madres  $v_m$ , y el número de planos de división  $g$ . Nótese que el valor del volumen de las madres corresponde con el final de la distribución de probabilidad, es decir, con el mayor tamaño celular cuya probabilidad es superior a cero. Los planos de división se pueden obtener mediante la relación entre los volúmenes de las madres y las hijas, correspondiendo estas últimas con el modo de la distribución.

Para el análisis de la identificabilidad estructural de la velocidad de crecimiento  $\mu$  y la intensidad del ruido  $\xi$ , se hace un estudio adimensional de la EFPM (véase el Apéndice B para más detalles):

$$\frac{\partial p(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{t}} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 p(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{x}^2} - \frac{\partial p(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{x}} - pL(J(0, \bar{t}) - J(1, \bar{t}))Pe, \quad (15)$$

donde  $Pe = 2\mu L/\xi^2$  y

$$J(\bar{x}, \bar{t}) = \frac{\partial p(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{x}} - p(\bar{x}, \bar{t})Pe,$$

$$J(0, \bar{t}) = 2^g J(1, \bar{t}),$$

$$p(1, \bar{t}) = 0.$$

Nótese que existen infinitas combinaciones de los parámetros  $\xi$  y  $\mu$  que resultan en el mismo valor de  $Pe$  y, por lo tanto, en soluciones idénticas de la ecuación (15). Como consecuencia, se deduce que los parámetros  $\xi$  y  $\mu$  no son estructuralmente identificables a partir de las distribuciones de tamaño obtenidas con citometría de flujo, pudiéndose extraer solo una relación de dependencia entre ellos.

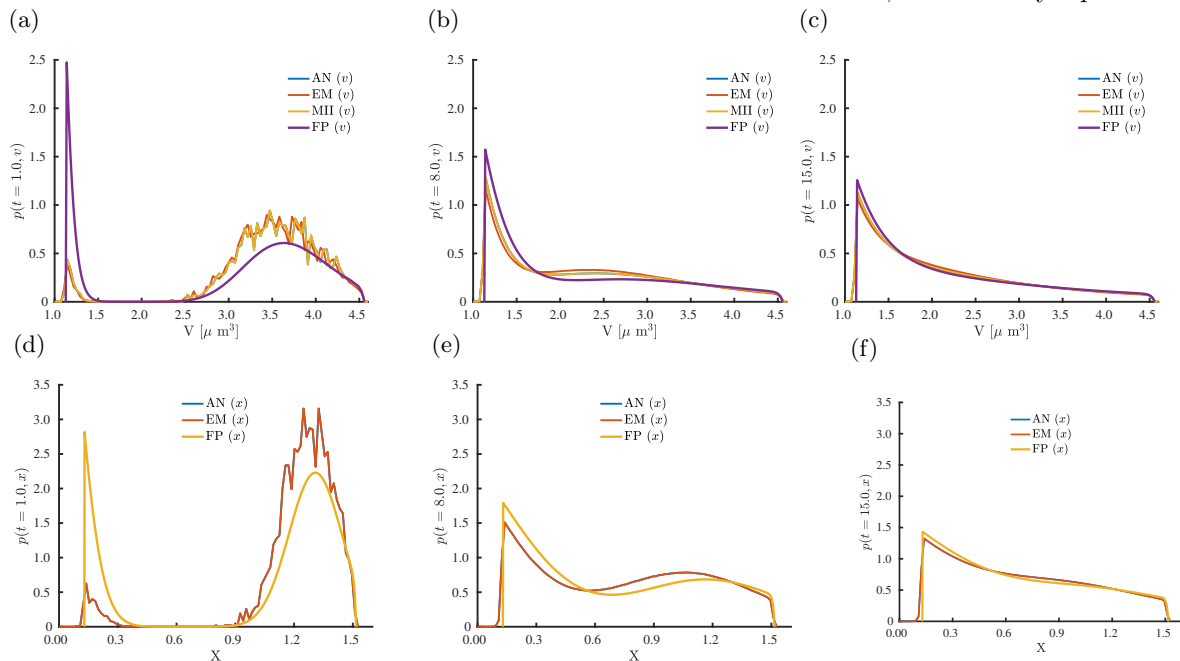


Figura 4: Comparación entre los resultados de simulación obtenidos con el modelo basado en individuos y la EFPM. Las figuras de arriba se corresponden con las soluciones obtenidas en el dominio  $v$  mientras que las de abajo fueron obtenidas en el dominio  $x$ . Los tiempos de proceso de las figuras son  $t = 1$  h (a),(d).  $t = 8$  h (b),(e).  $t = 15$  h (c),(f).

Este análisis de identificabilidad es válido siempre que se use una distribución estacionaria de tamaños como única fuente de información, y afectaría tanto a la EFPM como al modelo basado en individuos. Para este último tipo de modelado, además, la obtención de las distribuciones es más costosa y requiere mayor tiempo de computación.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han considerado distintas alternativas para modelar la evolución de poblaciones de bacterias cuando el crecimiento es estocástico. Por una parte, se ha hecho uso de modelos basados en individuos, para los cuales se han considerado varios esquemas: (i) solución exacta (el menos eficiente), (ii) Euler–Maruyama (el más eficiente), y (iii) Milstein–II. La raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre las soluciones analíticas y los esquemas numéricos es menor de 0.04 en todos los casos, lo que demuestra su robustez. Sin embargo, el tiempo de cálculo necesario y la memoria requerida en estos esquemas se incrementa exponencialmente con el número de células, es decir, con la duración del proceso simulado. Por otra parte, se ha usado la ecuación de Fokker–Planck modificada (EFPM) cuya principal ventaja, en comparación con los modelos basados en individuos, es la eficiencia para un número de células medio-alto. Además, se ha mostrado que la distribución de probabilidad obtenida mediante la EFPM se

ajusta a la media de los resultados obtenidos con los modelos basados en individuos. La EFPM se ha usado para mostrar que la velocidad de crecimiento ( $\mu$ ) y la intensidad de ruido ( $\xi$ ) no se pueden identificar simultáneamente usando datos de citometría de flujo en estado estacionario.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PIE 20213AT001 (NM), PGC2018-099312-B-C33 (CVF) y RTI2018-093560-J-I00 (MCIU/AEI/FEDER, UE), RYC2019-028006-I/AEI/10.13039/501100011033 (MRG).

Los autores quieren agradecer y dedicar este trabajo al Prof. Antonio A. Alonso, uno de los investigadores que iniciaron originalmente este trabajo. Agradecemos su apoyo incansable y su continuo asesoramiento.

## English summary

## COMPARING STOCHASTIC MODELS OF BACTERIAL GROWTH AT DIFFERENT SCALES

## Abstract

*Quality and safety in the food industry, as well as the processes involved in the production, packaging, and transport of food,*

may be optimised using predictive microbiology. This discipline models the behaviour of microorganisms and uses the so-called primary models to describe bacterial growth.

One of the main challenges consists of explaining and simulating the growth when the number of initial bacteria (inoculum) is reduced because of the stochastic behaviour. There exist different alternatives to modelling such stochastic processes depending on: (1) the required level of detail for the solution; (2) the computational time; and (3) the possibility of estimating parameters from fast and inexpensive measurements.

In this work, we compare the solutions, computational times and structural identifiability obtained using different alternatives: (1) microscopic scale considering individual-based models; and (2) mesoscopic scale considering the modified Fokker-Planck equation.

**Keywords:** Modified Fokker-Planck equation; Stochastic processes; Multiscale modelling; structural identifiability.

## Referencias

- [1] A. A. Alonso, I. Molina, and C. Theodoropoulos. Modeling Bacterial Population Growth from Stochastic Single Cell Dynamics. *Applied and environmental microbiology*, 80(17):5241–5253, 2014.
- [2] J. C. Augustin, R. Ferrier, B. Hezard, A. Lintz, and V. Stahl. Comparison of individual-based modeling and population approaches for prediction of foodborne pathogens growth. *Food Microbiology*, 45:205–215, 2015.
- [3] J. Ferrer, C. Prats, D. López, and J. Vives-Rego. Mathematical modelling methodologies in predictive food microbiology: A SWOT analysis. *International Journal of Food Microbiology*, 134(1-2):2–8, 2009.
- [4] I. Fishov, A. Zaritsky, and N. B. Grover. On microbial states of growth. *Molecular microbiology*, 15(5):789–94, mar 1995.
- [5] M. R. García, J. A. Vázquez, I. G. Teixeira, and A. A. Alonso (2018). Stochastic individual-based modeling of bacterial growth and division using flow cytometry. *Frontiers in Microbiology*, 8:2626.
- [6] P. E. Kloeden and E. Platen. *Numeric Solution of Stochastic Differential Equations*. Springer, 1992.
- [7] K. Koutsoumanis, A. Allende, A. Alvarez-Ordóñez, D. Bolton, M. Chemaly, R. Davies, A. De Cesare, L. Herman, F. Hilbert, R. Lindqvist, M. Nauta, L. Peixe, G. Ru, M. Simmons, P. Skandamis, E. Suffredini, S. Arason, K. Bekaert, M. R. García, M. Georgiadis, W. Messens, O. Mosbach-Schulz, and S. Bover-Cid. The use of the so-called ‘tubs’ for transporting and storing fresh fishery products. *EFSA Journal*, 18(4):1–123, 2020.
- [8] K. P. Koutsoumanis and Z. Aspidou. Individual cell heterogeneity in Predictive Food Microbiology: Challenges in predicting a “noisy” world. *International Journal of Food Microbiology*, 240:3–10, jan 2017.
- [9] A. Ricci, A. Allende, D. Bolton, M. Chemaly, R. Davies, P. S. Fernández Escámez, R. Girones, L. Herman, K. Koutsoumanis, R. Lindqvist, L. Robertson, G. Ru, M. Sanaa, M. Simmons, P. Skandamis, E. Snary, N. Speybroeck, B. Ter Kuile, J. Threlfall, H. Wahlström, J. K. Andersen, M. Uyttendaele, A. Valero, M. T. Da Silva Felício, W. Messens, and B. Nørrung. Guidance on the requirements for the development of microbiological criteria. *EFSA Journal*, 15(11):5052, nov 2017.
- [10] S. Taheri-Araghi, S. Bradde, J. T. Sauls, N. S. Hill, P. A. Levin, J. Paulsson, M. Vergassola, and S. Jun. Cell-Size Control and Homeostasis in Bacteria. *Current Biology*, 25(3):385–391, feb 2015.
- [11] A. Vande Wouwer, P. Saucez, and C. Vilas. *Simulation of ODE/PDE Models with MATLAB®, OCTAVE and SCILAB. Scientific and Engineering Applications*. Springer International Publishing, Cham, 2014.
- [12] J. A. Vázquez, M. P. González, and M. Murado. Preliminary tests on nisin and pediocin production using waste protein sources: factorial and kinetic studies. *Bioresource Technology*, 97(4):605–613, 2006.
- [13] C. Vilas, M. García, J. Banga, and A. Alonso. Desarrollo de una librería de componentes

en ecosimpro para la operación de plantas de procesamiento térmico de alimentos. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 5(1):51–65, 2008.

- [14] C. Vilas, M. Mauricio-Iglesias, and M. R. García. Model-based design of smart active packaging systems with antimicrobial activity. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, jun 2020.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

## APÉNDICES

### A. EFPM: OBTENCIÓN

Sea  $n(x, t)$  el número de células de tamaño  $x$  (en escala logarítmica) a tiempo  $t$ . Sea, además,  $J_n(x, t)$  el flujo de células. La evolución del número de células se puede representar de la siguiente forma:

$$\frac{\partial n(t, x)}{\partial t} = -\frac{\partial J_n(t, x)}{\partial x}. \quad (16)$$

Al llegar a cierto volumen  $v_m = \exp(x_m)$ , las células se dividen en  $2^g$  células hijas de tamaño  $v_h = v_m/2^g$ . Este fenómeno se puede representar usando una condición de muro absorbente en la frontera  $x_m$ :

$$n(x_m, t) = 0, \quad (17)$$

de forma que la condición frontera en  $x = x_h$  se define mediante los flujos:

$$J_n(x_h, t) = 2^g J_n(x_m, t). \quad (18)$$

Debido a esta división y, dado que la muerte de las células es despreciable en fase exponencial [5], el número de células  $n(x, t)$  será creciente. Esto se puede evitar usando la forma fraccional  $p(x, t)$ , donde:

$$p(x, t) = \frac{n(x, t)}{N(t)}, \text{ siendo } N(t) = \int_{x_h}^{x_m} n(x, t) dx.$$

Derivando respecto del tiempo<sup>1</sup>:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{N} \frac{\partial n}{\partial t} - \frac{p}{N} \frac{dN}{dt}. \quad (19)$$

El primer término del lado derecho de la ecuación (19) se puede expresar, usando la ecuación (16), de la siguiente forma:

$$\frac{1}{N} \frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{N} \frac{\partial J_n}{\partial x} = -\frac{\partial J}{\partial x},$$

<sup>1</sup>A partir de aquí se omitirán los argumentos de las funciones, excepto para los términos en la frontera, por motivos de claridad

donde  $J = J_n/N$ . Para el segundo término se tiene que

$$-\frac{p}{N} \frac{dN}{dt} = -\frac{p}{N} \int_{x_h}^{x_m} \frac{\partial n}{\partial t} dx.$$

Usando la ecuación (16) y reordenando términos:

$$-\frac{p}{N} \frac{dN}{dt} = \frac{p}{N} \int_{x_h}^{x_m} \frac{\partial J_n}{\partial x} dx = -p(J(x_h, t) - J(x_m, t)).$$

Por lo tanto, la ecuación (19) se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} - p(J(x_h, t) - J(x_m, t)), \quad (20)$$

que se corresponde con la expresión presentada en la Sección 3. Además, dividiendo las condiciones frontera (17)-(18) entre el número de células ( $N$ ), se tiene que:

$$p(x_m, t) = 0, \quad (21)$$

$$J(x_h, t) = 2^g J(x_m, t). \quad (22)$$

### B. FORMA ADIMENSIONAL DE LA EFPM

Para derivar una forma adimensional de la EFPM, utilizaremos la longitud característica  $L = x_m - x_h$  y la velocidad de crecimiento  $\mu$ . De esta forma, se puede definir:

$$\bar{x} = \frac{x - x_h}{L}, \quad \bar{t} = \frac{L}{\mu} t,$$

donde  $x \in [0, 1]$ . Las derivadas respecto de  $x$  y  $t$  quedarían, en el nuevo sistema de coordenadas adimensionales  $\bar{x}$  y  $\bar{t}$ , de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial \bar{x}}, \quad \frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2}{\partial \bar{x}^2}, \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\mu}{L} \frac{\partial}{\partial \bar{t}}.$$

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación (10), reordenando los términos, y usando un número adimensional similar al Péclet,  $Pe = 2\mu L/\xi^2$ , se tiene:

$$\frac{\partial p(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{t}} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 p(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{x}^2} - \frac{\partial p(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{x}} - pL(J(0, \bar{t}) - J(1, \bar{t}))Pe, \quad (23)$$

donde

$$J(\bar{x}, \bar{t}) = \frac{\partial p(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{x}} - p(\bar{x}, \bar{t})Pe.$$

Aplicando la misma transformación a las condiciones frontera (11)-(12), se tiene:

$$p(1, \bar{t}) = 0, \\ J(0, \bar{t}) = 2^g J(1, \bar{t}).$$



## PROGRAMACION DE OPERACIONES EN UNA REFINERIA CON ACCESO MARÍTIMO

Tomás García García-Verdier<sup>a\*</sup>, Gloria Gutiérrez<sup>a</sup>, Carlos G. Palacín<sup>a</sup>, Carlos Méndez<sup>b</sup>, César de Prada<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid  
Calle Real de Burgos s/n, 47011, Valladolid

<sup>b</sup>Center for Advanced Process Systems Engineering (CAPSE), INTEC (UNL - CONICET), Dpto. Ingeniería Industrial (FIQ-UNL), Güemes 3450, 3000, Santa Fe, Argentina

{tomasjorge.garcia@uva.es | gloria@autom.uva.es | carlos.gomez@autom.uva.es | cmendez@intec.unl.edu.ar | prada@autom.uva.es}

### Resumen

*El presente trabajo se centra en la optimización de la programación de operaciones llevadas a cabo en un sistema compuesto por una refinería y una terminal marítima.*

*El principal desafío radica en coordinar las decisiones que se tomen en ambas instalaciones, y lograr una solución óptima en términos económicos.*

*A partir de la premisa mencionada anteriormente, se presenta la formulación de un modelo de programación matemática mixto entero no lineal con representación continua del tiempo. Dicho modelo es capaz de dar soporte al proceso de toma de decisiones en forma integral.*

**Palabras clave:** Programación mixta entera no lineal; Representación continua de tiempo; Programación de crudo de petróleo; Refinería; Terminal marítima.

### 1 INTRODUCCIÓN

Las refinerías son instalaciones petroquímicas que transforman el crudo de petróleo en una gran cantidad de productos refinados. Pertenecen al nivel medio de la cadena de suministro de la industria petrolera.

Las decisiones que se toman en la programación de operaciones (*scheduling*) de una refinería tienen un fuerte impacto en el costo total de la cadena de suministro; por lo tanto, deben gestionarse cuidadosamente. El desafío consiste en llevar a cabo esta tarea de manera eficiente y con un alto nivel de confianza de manera que las soluciones obtenidas resulten competitivas económicamente y den seguridad al usuario. A raíz de lo mencionado previamente, la programación matemática asume un rol protagonista en el desarrollo de esta actividad.

Existe una gran variedad de trabajos que abordan este problema, entre los que destacan Furman et al. [2], Jia

et al. [5] y Lee et al. [6]. En los mismos se contemplan refinerías compuestas por tanques de almacenamiento y carga por separado. Los tanques de almacenamiento se encargan de recibir y almacenar los crudos descargados desde los barcos; en cuanto a los tanques de carga, estos se utilizan para la preparación de mezclas de crudos que alimentan a las unidades de destilación.

Un número menor de trabajos se ha centrado en refinerías de petróleo sin tanques de carga. En dichas refinerías, las mezclas de crudos se llevan a cabo en los tanques de almacenamiento y en los ductos que alimentan a las unidades de destilación. Algunos de los trabajos más relevantes son Cerdá et al. [1], Pinto et al. [7] y Reddy et al. [8], en los cuales se desarrollan modelos de programación matemática mixta entera lineal (*MILP*) y no lineal (*MINLP*) con representación continua del tiempo.

### 2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En muchas ocasiones, el suministro de crudo a una refinería se da a través de barcos los cuales arriban a una terminal marítima próxima a la misma. Dicho sistema refinería-terminal está conectado por uno o varios oleoductos que son utilizados para transferir el crudo desde los buques hasta los tanques de almacenamiento presentes en la refinería.

En la Figura 1 se muestra un esquema con las operaciones e instalaciones características de una refinería con acceso marítimo. En este caso concreto, el mismo se compone de instalaciones de descarga tales como un sistema de amarre a punto único o monoboia y un oleoducto. Luego, en refinería, se encuentran las instalaciones de almacenamiento y procesamiento: un parque de tanques de almacenamiento y un conjunto de unidades de destilación de crudo.

Las operaciones involucradas son: la descarga de crudo desde barcos a tanques a través del oleoducto;

el almacenamiento y mezcla de crudos en tanques; y el suministro de mezclas a las unidades de destilación provenientes de uno o más tanques con caudales variables a lo largo del horizonte de planificación.

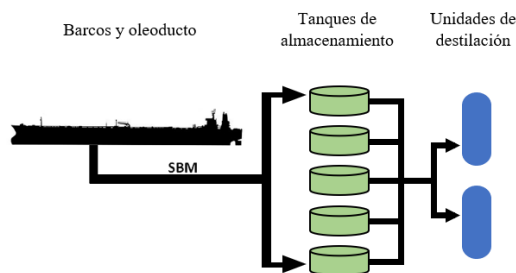


Figura 1: Esquema general de operaciones e instalaciones de una refinería de petróleo.

La integración de este sistema implica un desafío sumamente complejo debido a la necesidad de coordinar las decisiones tomadas tanto en la terminal como en la refinería. La dificultad de esta sincronización radica en el compromiso existente entre los objetivos de la terminal y los objetivos de la refinería; mientras que el primero se interesa en descargar los barcos lo más pronto posible, para evitar costos por demoras, el segundo se preocupa por disponer de crudos en los momentos y cantidades más convenientes para cumplir con el plan de producción.

Para abordar este problema, se propone un modelo matemático que optimiza de manera integral las actividades llevadas a cabo a corto plazo en el sistema refinería-terminal, teniendo en cuenta restricciones operativas.

## 2.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE

Los datos disponibles para resolver el problema son los siguientes: la fecha de arribo de los barcos a lo largo del horizonte de planificación, la fecha esperada de partida de los barcos, volumen y tipo de crudo transportado; la configuración de las instalaciones de descarga tales como el número de puntos de amarre, oleoductos y límites en el caudal de transferencia; el número de tanques de almacenamiento en refinería, sus capacidades, inventario inicial así como también los límites en los caudales de descarga desde tanques a unidades de destilación; información respecto a las unidades, tales como, las especificaciones de calidad que deben cumplir las mezclas de alimentación y los límites en los caudales de procesamiento; por último, datos económicos, entre los que se incluyen, costos de espera de barcos en el mar y de partida tardía, costos asociados a cambios en los tanques de alimentación (*changeover*), costos por falta o exceso de producción, ingresos por procesamiento de crudos e información respecto a la demanda de las unidades de destilación.

## 3 FORMULACION DEL MODELO

A continuación, se presenta la formulación del modelo *MINLP* con representación continua del tiempo, el cual se basa en la formulación propuesta por Reddy et al. [8]. Con el fin de no exceder la cantidad aconsejada de páginas, la nomenclatura de los conjuntos, parámetros y variables se presenta en un apéndice de soporte, al final del documento.

Es menester aclarar que, en los artículos citados, el orden de descarga de los barcos se encuentra preestablecido para lo cual se aplica la política de “primero en llegar, primero en ser atendido”. Sin embargo, el modelo propuesto en este trabajo permite optimizar dicha decisión ya que, a diferencia de los anteriores, la precedencia entre barcos no depende exclusivamente de los tiempos de arribo, sino que también se determina según los costos operativos evaluados en la función objetivo. Concretamente, la precedencia entre barcos no está sujeta al orden de los elementos del conjunto B, como se plantea en Cerda et al. [1], y tampoco existe una preasignación de *slots* de tiempo para cada barco como sucede en Reddy et al. [8]. En el presente trabajo se emplea una “precedencia predefinida” que tiene el conjunto de *slots* preordenado, y el algoritmo de optimización sólo debe disponer cada barco en uno de esos períodos de tiempo; Gómez Palacín, C. et al. [3,4].

Además, es importante destacar las siguientes características del modelo: se definen tres estados mutuamente excluyentes para los tanques (carga, descarga y reposo); los *slots* de tiempo son de duración variable y son comunes para todos los tanques; se activa un nuevo *slot* siempre que ocurra un cambio de estado en alguno de los tanques, por lo que, las actividades llevadas a cabo durante un *slot* fijan la duración de dicho *slot*.

### 3.1 OBJETIVO

El objetivo del modelo es maximizar el beneficio total a lo largo del horizonte de planificación, es decir, la diferencia entre los ingresos obtenidos del procesamiento de crudos y los costos operativos teniendo en cuenta el cumplimiento de la demanda y las restricciones de capacidad y operación.

### 3.2 SUPUESTOS DEL MODELO

La formulación del modelo propuesto se basa en las siguientes suposiciones:

- 1) Existe un único punto de amarre y un oleoducto que conecta a la terminal con la refinería, por lo tanto, solo es posible descargar un barco a la vez.

- 2) Un buque que haya iniciado su descarga de crudo sólo puede abandonar la terminal una vez que se vacíe completamente.
- 3) Se supone que cada barco transporta un único tipo de crudo y se considera que el volumen de crudo retenido en el oleoducto (*holdup*) es despreciable frente a la cantidad a descargar.
- 4) Un tanque de almacenamiento no puede recibir crudo desde un barco y alimentar a una unidad de destilación simultáneamente. Además, debe permanecer inactivo durante un determinado tiempo después de haber recibido una carga desde un barco.
- 5) Se permite, como máximo, la carga de cuatro tanques simultáneamente y no se permiten transferencias entre tanques.
- 6) Un tanque puede alimentar como máximo a dos unidades de destilación de manera simultánea.
- 7) Una unidad de destilación puede ser alimentada, como máximo, por tres tanques a la vez.
- 8) Se asume mezcla perfecta en cada tanque y se consideran despreciables los tiempos de cambio.
- 9) Cuando una unidad de destilación es alimentada por más de un tanque, se considera que los caudales provenientes de cada tanque se mezclan perfectamente en la tubería.
- 10) No se puede detener la alimentación a las unidades de destilación.

### 3.3 Restricciones

A partir de la restricción (1) se define que un barco se descarga durante el *slot*  $s$  si estaba descargándose durante el *slot* anterior y todavía no ha finalizado, o si comienza su descarga al inicio del *slot* actual.

$$xb_{b,s} = xb_{b,s-1} + xid_{b,s} - xfd_{b,s-1} \quad \forall b \in B, s \in S \quad (1)$$

Un barco puede concluir su descarga al final de un determinado *slot* siempre y cuando se estuviera descargando durante dicho *slot*.

$$xb_{b,s} \geq xfd_{b,s} \quad \forall b \in B, s \in S \quad (2)$$

Todos los barcos deben iniciar (3) y finalizar (4) su descarga dentro del horizonte de planificación.

$$\sum_s xid_{b,s} = 1 \quad \forall b \in B \quad (3)$$

$$\sum_s xfd_{b,s} = 1 \quad \forall b \in B \quad (4)$$

No se permite la descarga de más de un barco a la vez (5). Se establece una cantidad máxima de tanques que pueden ser cargados en paralelo (6).

$$\sum_b xb_{b,s} \leq 1 \quad \forall s \in S \quad (5)$$

$$\sum_q xq_{q,s} \leq \text{Tanques\_barco} \quad \forall s \in S \quad (6)$$

Si un barco se encuentra descargando crudo entonces debe haber, al menos, un tanque recibiendo ese crudo (7). Un tanque puede ser cargado siempre y cuando se esté descargando un barco (8).

$$\sum_q xq_{q,s} \geq xb_{b,s} \quad \forall b \in B, s \in S \quad (7)$$

$$xq_{q,s} \leq \sum_b xb_{b,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (8)$$

Cantidad máxima de unidades que puede alimentar simultáneamente un mismo tanque (9). Cantidad máxima de tanques que admite simultáneamente una misma unidad (10).

$$\sum_u y_{q,u,s} \leq C_{\text{dus\_tanque}} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (9)$$

$$\sum_q y_{q,u,s} \leq \text{Tanques\_cdu} \quad \forall s \in S, u \in U \quad (10)$$

Cada unidad de destilación debe ser alimentada constantemente (11).

$$\sum_q y_{q,u,s} \geq 1 \quad \forall s \in S, u \in U \quad (11)$$

Un tanque debe encontrarse en un único estado por *slot* (12).

$$xq_{q,s} + yq_{q,s} + zq_{q,s} = 1 \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (12)$$

Si un tanque se encuentra alimentando a una unidad significa que ese tanque se encuentra en estado de descarga (13).

$$yq_{q,s} \geq y_{q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, u \in U \quad (13)$$

Y viceversa, si un tanque se encuentra en modo de descarga significa que está alimentando a una o más unidades (14).

$$\sum_u y_{q,u,s} \geq yq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (14)$$

El fin de un *slot* es igual a su inicio más su duración (15). Y el inicio de un *slot* coincide con el fin del *slot* anterior (16). La sumatoria de la duración de todos los *slots* debe ser igual a la duración del horizonte de planificación (17).

$$ts_s = is_s + ds_s \quad \forall s \in S \quad (15)$$

$$is_s = ts_{s-1} \quad \forall s, (s-1) \in S \quad (16)$$

$$\sum_s ds_s = H \quad (17)$$

La duración de un *slot* es igual al tiempo de carga descarga o reposo. Los *slots* son comunes para todos los tanques (18).

$$ds_s = dcq_{q,s} + ddq_{q,s} + diq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (18)$$

Se aplica la técnica *big-M*, explicada por Winston y Goldberg [9], en la definición de las variables de duración, (19) a (23).

$$ddb_{b,s} \leq H * xb_{b,s} \quad \forall b \in B, s \in S \quad (19)$$

$$dcq_{q,s} \leq H * xq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (20)$$

$$ddq_{q,s} \leq H * yq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (21)$$

$$diq_{q,s} \leq H * zq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (22)$$

$$ddqu_{q,u,s} \leq H * y_{q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, u \in U \quad (23)$$

La duración de la descarga de un barco a un tanque no puede ser mayor que la duración de la carga de dicho tanque (24).

$$\sum_b ddbq_{b,q,s} \leq dcq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (24)$$

La sumatoria de los tiempos en los que un barco descarga a un conjunto de tanques debe ser menor al tiempo de descarga del barco multiplicado por la cantidad máxima admitida de carga de tanques en paralelo (25).

$$\sum_q ddbq_{b,q,s} \leq \text{Tanques\_barco} * ddb_{b,s} \quad (25)$$

$$\forall b \in B, s \in S$$

La duración de la descarga de un barco no puede superar a la duración del *slot* correspondiente (26).

$$\sum_b ddb_{b,s} \leq ds_s \quad \forall s \in S \quad (26)$$

La sumatoria de tiempos de tanques cargados en paralelo no puede ser superior a la longitud del *slot*

multiplicado por la cantidad máxima de tanques admitida (27).

$$\sum_q dcq_{q,s} \leq \text{Tanques\_barco} * ds_s \quad \forall s \in S \quad (27)$$

La duración de la carga de un tanque no puede ser positiva si no hay un barco descargando (28).

$$dcq_{q,s} \leq \sum_b ddb_{b,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (28)$$

El tiempo de alimentación a una unidad desde un determinado tanque no puede ser superior al tiempo en que dicho tanque se encuentra descargando (29).

$$ddq_{q,s} \geq ddqu_{q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, u \in U \quad (29)$$

La sumatoria de las duraciones de alimentación en paralelo desde un tanque a las unidades debe ser, al menos, el tiempo de descarga de dicho tanque (30).

$$\sum_u ddqu_{q,u,s} \geq ddq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (30)$$

Si un tanque alimenta a una unidad entonces la duración de esta tarea debe ser, al menos, igual al tiempo en que ese tanque se encuentra en modo descarga (31).

$$ddqu_{q,u,s} \geq ddq_{q,s} - H * (1 - y_{q,u,s}) \quad (31)$$

$$\forall s \in S, q \in Q, u \in U$$

La duración de descarga desde un barco a un determinado tanque debe ser mayor o igual a la duración del *slot* (32).

$$ddbq_{b,q,s} \geq dcq_{q,s} + ddb_{b,s} - ds_s \quad (32)$$

$$\forall s \in S, b \in B, q \in Q$$

A partir de las restricciones (33) y (34) se define el volumen cargado a cada tanque  $q$  desde el barco  $b$  durante el *slot*  $s$ .

$$fbq_{b,q,s} \leq \text{Carga\_max\_q} * ddbq_{b,q,s} \quad (33)$$

$$\forall s \in S, b \in B, q \in Q$$

$$fbq_{b,q,s} \geq \text{Carga\_min\_q} * ddbq_{b,q,s} \quad (34)$$

$$\forall s \in S, b \in B, q \in Q$$

El volumen de crudo descargado desde un barco durante un *slot*  $s$  es igual a la suma de volúmenes descargados en cada tanque (35).

$$fcb_{c,b,s} = \sum_q fcbq_{c,b,q,s} \quad \forall s \in S, b \in B, c \in C \quad (35)$$

El volumen total descargado desde un barco en un slot es igual a la suma de volúmenes descargados a cada tanque (36).

$$fb_{b,s} = \sum_q fbq_{b,q,s} \quad \forall s \in S, b \in B \quad (36)$$

El volumen total cargado a un tanque durante un slot es igual a la sumatoria de volúmenes cargados de cada crudo (37).

$$fbq_{b,q,s} = \sum_c fcbq_{c,b,q,s} \quad \forall s \in S, b \in B, q \in Q \quad (37)$$

Las restricciones presentadas anteriormente tienen como objetivo establecer de manera precisa la relación existente entre las variables relativas a los volúmenes descargados desde los barcos y aquellas correspondientes a los volúmenes cargados en los tanques para evitar incongruencias al momento de emplearlas en restricciones posteriores, especialmente en los balances de inventario.

Se calcula el volumen descargado desde un barco mediante (38) y (39).

$$fb_{b,s} \leq \text{Caudal\_max\_b}_b * ddb_{b,s} \quad \forall s \in S, b \in B \quad (38)$$

$$fb_{b,s} \geq \text{Caudal\_min\_b}_b * ddb_{b,s} \quad \forall s \in S, b \in B \quad (39)$$

Se debe descargar el volumen total de crudo presente en cada barco a lo largo del horizonte (40).

$$\sum_s fcb_{c,b,s} = \text{Vol}_{b,c} \quad \forall c \in C, b \in B \quad (40)$$

Se calcula el volumen cargado a una unidad desde un tanque con las restricciones (41) y (42).

$$fqu_{q,u,s} \leq \text{Descarga\_max\_q}_q * ddqu_{q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, u \in U \quad (41)$$

$$fqu_{q,u,s} \geq \text{Descarga\_min\_q}_q * ddqu_{q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, u \in U \quad (42)$$

El volumen cargado desde un tanque es igual a la sumatoria de volúmenes cargados de cada crudo (43).

$$fqu_{q,u,s} = \sum_c fcqu_{c,q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, u \in U \quad (43)$$

El volumen total cargado en una unidad es igual a la sumatoria de los volúmenes provenientes de cada tanque (44).

$$fu_{u,s} = \sum_q fqu_{q,u,s} \quad \forall s \in S, u \in U \quad (44)$$

Se calcula el volumen de alimentación a cada unidad de destilación mediante (45) y (46).

$$fu_{u,s} \leq \text{Caudal\_max\_u}_u * ds_s \quad \forall s \in S, u \in U \quad (45)$$

$$fu_{u,s} \geq \text{Caudal\_min\_u}_u * ds_s \quad \forall s \in S, u \in U \quad (46)$$

Cumplimiento de especificaciones en las mezclas de alimentación a las unidades, restricciones (47) y (48).

$$\begin{aligned} \sum_q \sum_c fcqu_{c,q,u,s} * \text{Propiedad}_{c,k} \\ \leq \text{Max\_prop}_{u,k} * fu_{u,s} \\ \forall s \in S, k \in K, u \in U \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \sum_q \sum_c fcqu_{c,q,u,s} * \text{Propiedad}_{c,k} \\ \geq \text{Min\_prop}_{u,k} * fu_{u,s} \\ \forall s \in S, k \in K, u \in U \end{aligned} \quad (48)$$

Volumen de crudo  $c$  presente en cada tanque al inicio de cada *slot* excluido el primer *slot* (49).

$$\begin{aligned} \text{stock\_c}_{q,c,s} = \text{stock\_c}_{q,c,s-1} \\ + \sum_b fcbq_{c,b,q,s-1} - \sum_u fcqu_{c,q,u,s-1} \\ \forall s \in S \setminus \{s_1\}, q \in Q, c \in C \end{aligned} \quad (49)$$

Volumen de cada crudo presente en cada tanque al inicio del horizonte (50).

$$\text{stock\_c}_{q,c,s} = \text{Stock0}_{q,c} \quad \forall q \in Q, c \in C, s = s_1 \quad (50)$$

Volumen de cada crudo presente en cada tanque al final de cada *slot* (51).

$$\begin{aligned} \text{stock\_c\_end}_{q,c,s} = \text{stock\_c}_{q,c,s} \\ + \sum_b fcbq_{c,b,q,s} - \sum_u fcqu_{c,q,u,s} \\ \forall s \in S, q \in Q, c \in C \end{aligned} \quad (51)$$

Volumen total presente en cada tanque al inicio de cada *slot*, excluido el primero (52).

$$\begin{aligned} \text{stock}_{q,s} = \text{stock}_{q,s-1} + \sum_b fbq_{b,q,s-1} - \sum_u fqu_{q,u,s-1} \\ \forall s \in S, q \in Q \end{aligned} \quad (52)$$

Volumen total presente en cada tanque al final de cada *slot* (53).

$$\begin{aligned} \text{stock\_end}_{q,s} = \text{stock}_{q,s} + \sum_b fbq_{b,q,s} - \sum_u fqu_{q,u,s} \\ \forall s \in S, q \in Q \end{aligned} \quad (53)$$

El volumen total en un tanque es igual a la sumatoria del volumen por crudo en ese mismo tanque, tanto al inicio (54) como al final de cada *slot* (55).

$$\text{stock}_{q,s} = \sum_c \text{stock\_c}_{q,c,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (54)$$

$$\text{stock\_end}_{q,s} = \sum_c \text{stock\_c\_end}_{q,c,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (55)$$

Volumen máximo y mínimo admitido en cada tanque al inicio de cada *slot* (56) y al final (57).

$$\text{Cap\_min}_q \leq \text{stock}_{q,s} \leq \text{Cap\_max}_q \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (56)$$

$$\text{Cap\_min}_q \leq \text{stock\_end}_{q,s} \leq \text{Cap\_max}_q \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (57)$$

En la restricción (58) se establece que para que un tanque pueda ser descargado después de recibir una carga, el tiempo transcurrido entre el final de la carga (fin de *slot*  $s$ ) y el inicio de la descarga (inicio de *slot*  $sbis$ ) debe ser mayor o igual a un determinado período de reposo.

$$is_{sbis} - ts_s \geq T_{\text{reposo}} * (x_{q,s} + y_{q,sbis} - 1) \quad \forall (s, sbis) \in S(s < sbis), q \in Q \quad (58)$$

La demanda de cada unidad a lo largo del horizonte puede cumplirse en forma exacta, por exceso o no cumplirse en su totalidad. A través de las restricciones (59) y (60) se calculan los niveles de sobreproducción y subproducción, respectivamente.

$$\text{sobreprod}_u \geq \sum_s fu_{u,s} - \text{Dem}_u \quad \forall u \in U \quad (59)$$

$$\text{subprod}_u \geq \text{Dem}_u - \sum_s fu_{u,s} \quad \forall u \in U \quad (60)$$

Las restricciones (61) y (62) permiten identificar si se producen cambios de tanques de alimentación para cada unidad entre períodos consecutivos.

$$co_{u,s} \geq y_{q,u,s} - y_{q,u,s+1} \quad \forall s, (s+1) \in S, q \in Q, u \in U \quad (61)$$

$$co_{u,s} \geq y_{q,u,s+1} - y_{q,u,s} \quad \forall s, (s+1) \in S, q \in Q, u \in U \quad (62)$$

Se aplica la técnica *big-M* para determinar que el inicio de la descarga de un barco debe coincidir con el inicio del *slot* durante el cual se lleva a cabo dicha tarea, (63) a (65). De manera similar se procede para determinar el final de la descarga (66) a (68).

$$\text{tinicio}_{b,s} \leq is_s + H * (1 - xid_{b,s}) \quad \forall s \in S, b \in B \quad (63)$$

$$\text{tinicio}_{b,s} \geq is_s - H * (1 - xid_{b,s}) \quad \forall s \in S, b \in B \quad (64)$$

$$\text{tinicio}_{b,s} \leq H * xid_{b,s} \quad \forall s \in S, b \in B \quad (65)$$

$$\text{tpartida}_{b,s} \leq ts_s + H * (1 - xfd_{b,s}) \quad \forall s \in S, b \in B \quad (66)$$

$$\text{tpartida}_{b,s} \geq ts_s - H * (1 - xfd_{b,s}) \quad \forall s \in S, b \in B \quad (67)$$

$$\text{tpartida}_{b,s} \leq H * xfd_{b,s} \quad \forall s \in S, b \in B \quad (68)$$

Se identifica, a lo largo del horizonte, el instante en el cual comienza (69) y finaliza (70) la descarga de un barco.

$$t_{\text{inicio}_b} = \sum_s \text{tinicio}_{b,s} \quad \forall b \in B \quad (69)$$

$$t_{\text{partida}_b} = \sum_s \text{tpartida}_{b,s} \quad \forall b \in B \quad (70)$$

Un barco puede comenzar su descarga luego de arribar a la instalación (71).

$$t_{\text{inicio}_b} \geq T_{\text{arribo}_b} \quad \forall b \in B \quad (71)$$

Un barco debe comenzar su descarga antes de partir (72).

$$t_{\text{inicio}_b} \leq t_{\text{partida}_b} \quad \forall b \in B \quad (72)$$

Se calcula la tardanza como el tiempo transcurrido entre la fecha de fin de descarga y la de partida prevista (73).

$$\text{tardanza}_b \geq t_{\text{partida}_b} - \text{Partida\_esperada}_b \quad \forall b \in B \quad (73)$$

Se calcula la espera como el tiempo transcurrido entre el arribo de un barco y el inicio de su descarga (74).

$$\text{espera}_b \geq t_{\text{inicio}_b} - T_{\text{arribo}_b} \quad \forall b \in B \quad (74)$$

La restricción (75) determina que la concentración de un determinado crudo en el caudal de salida de un tanque debe ser igual a la concentración de dicho crudo dentro del tanque. Notar que consiste en una restricción no lineal.

$$\text{stock}_{q,s} * fc_{q,c,u,s} = fu_{q,u,s} * \text{stock\_c}_{q,c,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, c \in C, u \in U \quad (75)$$

### 3.4 Función objetivo

La función objetivo está dada por la ecuación (76) y tiene en cuenta el ingreso obtenido del procesamiento de crudos, los costos asociados al cambio en tanques



de alimentación, sobreproducción, subproducción, tardanza y espera de los barcos.

$$\begin{aligned}
 \max z = & \sum_s \sum_u \sum_q \sum_c fcqu_{c,q,u,s} * Ingresos_c \\
 & - Cco * \sum_s \sum_u co_{u,s} \\
 & - \sum_u C_{sobrepod_u} * sobrepod_u \\
 & - \sum_u C_{subprod_u} * subprod_u \\
 & - \sum_b C_{demora_b} * espera_b \\
 & - \sum_b C_{tardanza_b} * tardanza_b
 \end{aligned} \quad (76)$$

#### 4 RESULTADOS

Se lleva a cabo la resolución de dos ejemplos. El primero consiste en un horizonte de planificación de 96 horas, una refinería con 8 tanques de almacenamiento, 2 unidades de destilación y 5 tipos de crudos. Además, se considera la llegada de 2 barcos, el primero a las 20 horas y el segundo a las 60 horas. La fecha de partida esperada es de sendas 25 horas posteriores a la llegada. La demanda en cada unidad de destilación es de 90.000 m<sup>3</sup>. El segundo ejemplo se plantea sobre un horizonte de planificación de 168 horas. Se considera la llegada de un barco adicional. Dicho tercer barco llega a las 100 horas y su partida esperada es a las 125 horas. La demanda en cada unidad es de 150.000 m<sup>3</sup>. Sin pérdida de generalidad, en los ejemplos presentados, se considera que la calidad de las mezclas se define a partir de una única propiedad cuya concentración se expresa en porcentaje en volumen. Resulta importante destacar que el modelo es escalable respecto a este punto y admite casos de estudio que contemplen un número mayor de propiedades.

Los valores de los parámetros se han tomado de ejemplos expuestos en los artículos citados.

Respecto al ejemplo 1, en la figura 2 se representan los niveles de inventario en cada tanque a lo largo del horizonte y en las figuras 3 y 4 se muestran los diagramas de Gantt de tanques y barcos, respectivamente. Luego, en las figuras 5, 6 y 7 se exhiben los mismos tipos de gráficos para los resultados del ejemplo 2.

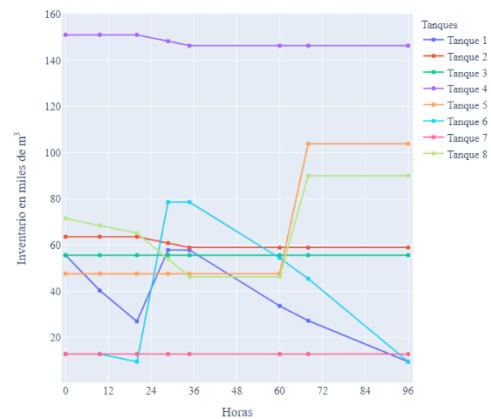


Figura 2: Nivel de inventario en tanques (ejemplo 1).

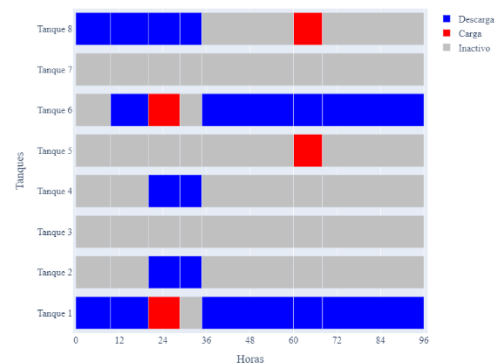


Figura 3: Diagrama de Gantt de tanques (ejemplo 1).

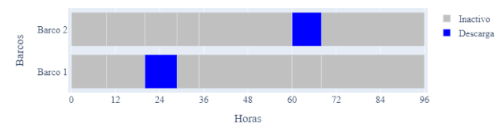


Figura 4: Diagrama de Gantt de barcos (ejemplo 1).

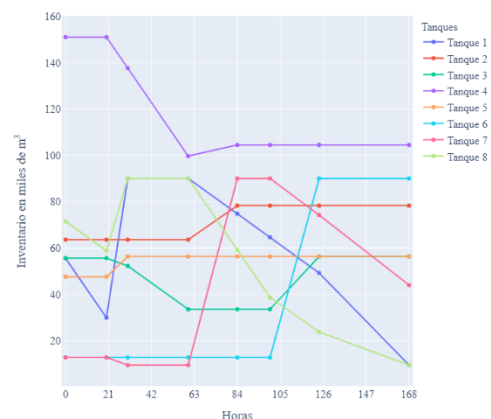


Figura 5: Nivel de inventario en tanques (ejemplo 2).

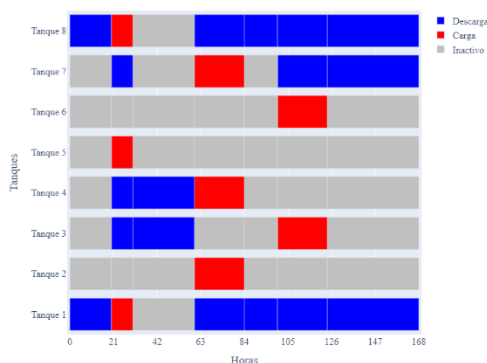


Figura 6: Diagrama de Gantt de tanques (ejemplo 2).

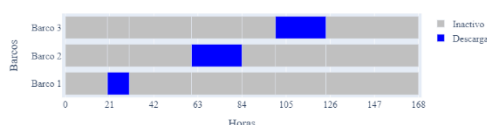


Figura 7: Diagrama de Gantt de barcos (ejemplo 2).

Ambos ejemplos fueron resueltos utilizando el *solver* *DICOPT* (*NLP solver: CONOPT 3, MILP solver: CPLEX*) dentro del *software* *GAMS 32.2.0* en un ordenador con procesador *Intel(R) Core(TM) i7-10510U 2.30 GHz* y *16 GB* de memoria *RAM*. El beneficio obtenido para el primer caso es de 1.582.817 € y se ejecuta en 63 segundos. El segundo ejemplo se ejecuta en 217 segundos y el beneficio es de 3.178.465 €.

## 5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se abordó el problema de programación de las operaciones llevadas a cabo en una refinería con acceso marítimo. A partir de los gráficos se observa el cumplimiento de las restricciones de operación tales como el transcurso de cierto período de reposo para un tanque que haya sido cargado o, no permitir simultáneamente la carga y descarga de un mismo tanque.

El modelo permite obtener rápidamente programas de producción factibles para un horizonte de planificación de hasta una semana (ejemplo 2). Aunque, debido a la no convexidad del mismo, no se puede garantizar un óptimo global.

Se han resuelto otros ejemplos además de los presentados en el trabajo y se observa que, al igual que en los casos anteriores, se obtienen soluciones en tiempos acotados.

El trabajo futuro se focalizará en implementar un enfoque estocástico el cual permita obtener soluciones más robustas. Se tiene interés en desarrollar un modelo de programación estocástica en dos etapas considerando incertidumbre en la llegada de barcos y

en la demanda de las unidades de destilación. Además, se tiene la intención de adaptar el modelo de manera que permita resolver redes más complejas que cuenten con más de un punto de amarre y oleoducto.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero brindado por la Agencia Estatal de Investigación a través del Subprograma Estatal de Formación del Programa Estatal de Promoción del Talento y su Empleabilidad en I+D+i, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020, cofinanciado por el Fondo Social Europeo, bajo el proyecto InCo4In (PGC 2018-099312-B-C31). También se agradece a la empresa Petróleos del Norte S.A.

## English summary

### CRUDE OIL OPERATIONS SCHEDULING IN A MARINE-ACCESS REFINERY

#### Abstract

*This work focuses on the optimization of short-term crude oil operations scheduling in a system composed of a refinery and a maritime terminal within the middle segment of the oil industry supply chain.*

*The main challenge lies in coordinating the decisions made at both facilities and achieving a solution that is economically competitive.*

*Based on the aforementioned premise, this work presents a continuous-time mixed integer nonlinear programming (MINLP) formulation in order to support the decision-making process in an integral way.*

**Keywords:** Mixed integer nonlinear programming; Continuous-time representation; Crude oil scheduling; Refinery; Marine terminal.

#### Referencias (10 ptos, negrita)

- [1] Cerdá, J., Pautasso, P. C., & Cafaro, D. C. (2015). Efficient Approach for Scheduling Crude Oil Operations in Marine-Access Refineries. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(33), 8219–8238. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b01461>
- [2] Furman, K. C., Jia, Z., & Ierapetritou, M. G. (2007). A Robust Event-Based Continuous Time Formulation for Tank Transfer Scheduling.

Industrial & Engineering Chemistry Research,  
46(26), 9126–9136.  
<https://doi.org/10.1021/ie061516f>

- [3] Gómez Palacín, C. (2020). Efficient scheduling of batch processes in continuous processing lines.
- [4] Gomez Palacin, C., Mendez, C. A., & De Prada, C. (2019). Slots Startup Synchronization with Shared Resources Dependency. Chemical Engineering Transactions, 74, 1321-1326. <https://doi.org/10.3303/CET1974221>
- [5] Jia, Z., Ierapetritou, M., & Kelly, J. D. (2003). Refinery Short-Term Scheduling Using Continuous Time Formulation: Crude-Oil Operations. Industrial & Engineering Chemistry Research, 42(13), 3085–3097. <https://doi.org/10.1021/ie020124f>
- [6] Lee, H., Pinto, J. M., Grossmann, I. E., & Park, S. (1996). Mixed-Integer Linear Programming Model for Refinery Short-Term Scheduling of Crude Oil Unloading with Inventory Management. Industrial & Engineering Chemistry Research, 35(5), 1630–1641. <https://doi.org/10.1021/ie950519h>
- [7] Pinto, J., Joly, M., & Moro, L. (2000). Planning and scheduling models for refinery operations. Computers & Chemical Engineering, 24(9–10), 2259–2276. [https://doi.org/10.1016/s0098-1354\(00\)00571-8](https://doi.org/10.1016/s0098-1354(00)00571-8)
- [8] Reddy, P. P., Karimi, I., & Srinivasan, R. (2004). A new continuous-time formulation for scheduling crude oil operations. Chemical Engineering Science, 59(6), 1325–1341. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.01.009>
- [9] Winston, W. L., & Goldberg, J. B. (2004). Operations research: Applications and algorithms. Belmont, CA: Thomson/Brooks/Cole



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

**APENDICE DE SOPORTE****Nomenclatura:****Conjuntos**

- $S$  = *slots* de tiempo.
- $B$  = barcos.
- $Q$  = tanques de almacenamiento.
- $U$  = unidades de destilación de crudo.
- $C$  = tipos de crudos.
- $K$  = propiedades de crudos.

**Parámetros**

- $H$  = longitud del horizonte de planeación (horas).
- $Tanques\_barco$  = cantidad máxima de tanques que pueden ser cargados al mismo tiempo.
- $Cdus\_tanque$  = cantidad máxima de unidades que puede alimentar un mismo tanque en forma simultánea.
- $Tanques\_cdu$  = cantidad máxima de tanques que pueden alimentar, simultáneamente, a una misma unidad.
- $Carga\_min\_q_q$  = caudal mínimo de carga de un tanque.
- $Carga\_max\_q_q$  = caudal máximo de carga de un tanque.
- $Caudal\_max\_b_b$  = caudal máximo de descarga de un barco.
- $Caudal\_min\_b_b$  = caudal mínimo de descarga de un barco.
- $Descarga\_max\_q_q$  = caudal máximo de descarga de un tanque.
- $Descarga\_min\_q_q$  = caudal mínimo de descarga de un tanque.
- $Caudal\_max\_u_u$  = caudal máximo de carga de una unidad de destilación.
- $Caudal\_min\_u_u$  = caudal mínimo de carga de una unidad de destilación.
- $Propiedad_{c,k}$  = valor de la propiedad  $k$  para el crudo  $c$ .
- $Max\_prop_{u,k}$  = valor máximo admitido de la propiedad  $k$  en el caudal de carga de la unidad  $u$ .
- $Min\_prop_{u,k}$  = valor mínimo admitido de la propiedad  $k$  en el caudal de carga de la unidad  $u$ .
- $Cap\_max_q$  = máximo nivel de inventario admitido en tanque  $q$ .
- $Cap\_min_q$  = mínimo nivel de inventario admitido en tanque  $q$ .
- $T\_reposo$  = tiempo mínimo de reposo de un tanque desde que finaliza la carga del mismo.

- $Dem_u$  = volumen total demandado por la unidad  $u$  a lo largo del horizonte.
- $Csobreprod_u$  = costo asociado a la unidad  $u$  por incurrir en sobreproducción a lo largo del horizonte.
- $Csubprod_u$  = costo asociado a la unidad  $u$  por incurrir en subproducción a lo largo del horizonte.
- $Ingresos_c$  = beneficio unitario obtenido del procesamiento del crudo  $c$ .
- $Cco$  = costo por cambio en tanques de alimentación.
- $T\_aribo_b$  = período de llegada del barco  $b$  a la terminal.
- $Partida\_esperada_b$  = período máximo en el que se espera que el barco  $b$  abandone la instalación.
- $Ctardanza_b$  = costo unitario de partida tardía del barco  $b$ .
- $Cdemora_b$  = costo unitario de espera en mar del barco  $b$ .
- $Vol_{b,c}$  = volumen de crudo  $c$  transportado por el barco  $b$ .
- $Stock0_{q,c}$  = inventario inicial de crudo  $c$  en el tanque  $q$ .

**Variables reales positivas**

- $ts_s$  = indica el instante en el que termina el *slot*  $s$ .
- $is_s$  = indica el instante en el que inicia el *slot*  $s$ .
- $ds_s$  = duración del *slot*  $s$ .
- $ddb_{b,s}$  = duración de la descarga del barco  $b$  durante el *slot*  $s$ .
- $dcq_{q,s}$  = duración de la carga del tanque  $q$  durante el *slot*  $s$ .
- $ddq_{q,s}$  = duración de la descarga del tanque  $q$  durante el *slot*  $s$ .
- $diqu_{q,s}$  = duración del estado de inactividad del tanque  $q$  durante el *slot*  $s$ .
- $ddqu_{q,u,s}$  = duración de la descarga del tanque  $q$  a la unidad  $u$  durante el *slot*  $s$ .
- $ddbq_{b,q,s}$  = duración de la descarga del barco  $b$  al tanque  $q$  durante el *slot*  $s$ .
- $fcqb_{c,b,q,s}$  = volumen de crudo  $c$  descargado desde el barco  $b$  al tanque  $q$  durante el *slot*  $s$ .
- $fbq_{b,q,s}$  = volumen descargado desde el barco  $b$  al tanque  $q$  durante el *slot*  $s$ .
- $fcbb_{c,b,s}$  = volumen de crudo  $c$  descargado desde el barco  $b$  durante el *slot*  $s$ .
- $fb_{b,s}$  = volumen descargado desde el barco  $b$  durante el *slot*  $s$ .
- $fqu_{q,u,s}$  = volumen descargado desde el tanque  $q$  a la unidad  $u$  durante el *slot*  $s$ .

- $fcu_{c,q,u,s}$  = volumen de crudo  $c$  descargado desde el tanque  $q$  a la unidad  $u$  durante el *slot*  $s$ .
- $fu_{u,s}$  = volumen cargado a la unidad de destilación  $u$  durante el *slot*  $s$ .
- $stock_{c,q,c,s}$  = nivel de inventario de crudo  $c$  en el tanque  $q$  al inicio del *slot*  $s$ .
- $stock_{q,s}$  = nivel de inventario en el tanque  $q$  al inicio del *slot*  $s$ .
- $stock_{end_{q,s}}$  = nivel de inventario en el tanque  $q$  al final del *slot*  $s$ .
- $stock_{c_{end_{q,c,s}}}$  = nivel de inventario de crudo  $c$  en el tanque  $q$  al final del *slot*  $s$ .
- $sobreprod_u$  = volumen excedente de producción respecto a la demanda de  $u$ .
- $subprod_u$  = volumen faltante de producción respecto a la demanda de  $u$ .
- $t_{inicio_b}$  = fecha de inicio de descarga del barco  $b$ .
- $tinicio_{b,s}$  = variable auxiliar empleada en técnica de *big-M*.
- $t_{partida_b}$  = fecha de fin de descarga del barco  $b$ .
- $tpartida_{b,s}$  = variable auxiliar empleada en técnica de *big-M*.
- $tardanza_b$  = tiempo transcurrido en caso que el barco  $b$  finalice su descarga luego de la fecha de partida esperada.
- $espera_b$  = tiempo transcurrido entre el arribo de un barco y su fecha de inicio de descarga.
- $xq_{q,s}$  = vale 1 si el tanque  $q$  se carga durante el *slot*  $s$ .
- $y_{q,u,s}$  = vale 1 si el tanque  $q$  alimenta a la unidad de destilación  $u$  durante el *slot*  $s$ .
- $yq_{q,s}$  = vale 1 si el tanque  $q$  se descarga durante el *slot*  $s$ .
- $zq_{q,s}$  = vale 1 si el tanque  $q$  se encuentra inactivo durante el *slot*  $s$ .
- $co_{u,s}$  = vale 1 si se modifican los tanques de alimentación de la unidad de procesamiento  $u$  entre dos *slots* consecutivos.

### Variables binarias

- $xb_{b,s}$  = vale 1 si el barco  $b$  se descarga durante el *slot*  $s$ .
- $xid_{b,s}$  = vale 1 si el barco  $b$  comienza su descarga al inicio del *slot*  $s$ .
- $xfd_{b,s}$  = vale 1 si el barco  $b$  finaliza su descarga al final del *slot*  $s$ .

# PROPULSIÓN Y DIRECCIÓN DE UN MICRORROBOT TIPO FLAGELO FLEXIBLE UTILIZANDO LA ANALOGÍA DEL COHETE. SIMULACIÓN EN COMSOL MULTIPHYSICS

E. Mancha-Sánchez\*, P. Rodríguez, A. Bravo, I. Tejado, B.M. Vinagre\*

{emancha\*, palomard, abravo, itejbal, bvinagre\*}@unex.es

Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, 06006 Badajoz

## Resumen

*Los microrrobots tienen el potencial de revolucionar la medicina. Por el momento se encuentran muchas limitaciones, entre las que destacan la fabricación, el suministro de energía y la propulsión. En este trabajo se utiliza la simulación computacional para realizar un estudio sobre la propulsión de un microrrobot tipo flagelo flexible teniendo en cuenta estas limitaciones haciendo una analogía con la propulsión de un cohete. Utilizando COMSOL Multiphysics se ha simulado un microrrobot autónomo con flagelo flexible impulsado por reacciones químicas, que han sido emuladas con la aplicación de distintas fuerzas aplicadas en la cabeza. Los resultados obtenidos permiten concluir que el microrrobot es propulsado tanto por las fuerzas aplicadas, como por el movimiento generado por el flagelo. Además, el flagelo realiza una función de estabilización del microrrobot.*

**Palabras clave:** Microrrobot, Autónomo, Flagelo, Simulación computacional, Cohete.

## 1. INTRODUCCIÓN

La robótica se ha convertido en una de las disciplinas más prometedoras para la medicina. Desde la cirugía robótica a los microrrobots. Estos últimos, dado su tamaño, pueden permitir una cirugía mínimamente invasiva con aún menos complicaciones [1], la liberación de fármacos de manera dirigida y controlada [2] o su utilización como biosensores [3]. Estos microrrobots están gobernados por distintas físicas que en el mundo macroscópico debido a su pequeño tamaño. En este aspecto, el número de Reynolds, es decir la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, se reduce ostensiblemente, de tal manera que las fuerzas viscosas se convierten en las dominantes, haciendo insignificante las fuerzas inerciales. Los sistemas de propulsión de estos microrrobots tienen que tener en cuenta estos factores.

La mayor parte de los mecanismos de propulsión suelen fijarse en los sistemas biológicos, ya sean macroscópicos, como los peces [4], o microscópi-

cos, como los flagelos bacterianos o los espermatozoides [5]. Del mismo modo, se utilizan sistemas de propulsión basados en la producción de propelentes que impulsen el microrrobot, generalmente mediante reacciones químicas, producidas por un catalizador situado en el microrrobot mediante compuestos presentes en el medio [6].

La fuente de energía sigue siendo uno de los elementos limitantes en el desarrollo de un microrrobot. Existen multitud de aproximaciones a la hora de alimentar al microrrobot: microrrobots impulsados por un campo magnético que le permiten mover un flagelo [7], activados por radiación infrarroja [8], mediante ultrasonidos [9], o a través de un campo eléctrico que hace girar una hélice [10]. Este tipo de microrrobots se denominan dirigidos o no autónomos, ya que necesitan de una fuente de energía externa a él para su movimiento. Presentan ciertas ventajas frente a los autónomos, en cuanto a que se puede modificar de manera más sencilla la energía aportada, permitiendo modular la cantidad de movimiento que genera el microrrobot. Por otro lado, aquellos microrrobots que poseen un sistema de propulsión, sin la necesidad de intervención directa, se conocen como autónomos. La energía de estos microrrobots suele provenir del entorno, por reacciones químicas, gradientes de pH, de temperatura, etc. La ventaja de este tipo de microrrobots es que permite una navegación autónoma por el organismo [11].

La dificultad de fabricación, control y suministro de energía de estos microrrobots pone en valor la utilización de herramientas alternativas a las tradicionales a la hora de hacer una primera aproximación al estudio de los microrrobots, así como para su optimización. La simulación computacional destaca a la hora de realizar este trabajo. Existen multitud de ejemplos en los que esta herramienta se ha utilizado anteriormente. Estos trabajos previos se basan tanto en la simulación de las condiciones en las que el microrrobot se sumerge, como en la actuación, o la forma de propulsión [12, 13, 14].

El objetivo de este trabajo es realizar una simulación computacional de un microrrobot autónomo propulsado por una reacción química. Esta reac-



ción, situada en la cabeza del microrrobot, genera par de rotación en la cabeza que se desplaza hasta el flagelo, provocando éste un desplazamiento del microrrobot. Se estudiaron los desplazamientos del microrrobot con y sin flagelo para demostrar la necesidad del flagelo. Además se estudiaron las velocidades y aceleraciones producidas como consecuencia de las fuerzas aplicadas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. MODELO

El modelo está compuesto por un microrrobot formado por una cabeza tipo elipsoide y un flagelo basado en [15], así como un canal, en el que el microrrobot fluye, con las medidas especificadas en la Tabla 1. Para las simulaciones se utilizó COMSOL Multiphysics con un modelo en 2D aplicando una interacción Fluido-Estructura (FSI, por sus siglas en inglés), en la que tanto el microrrobot (dominio sólido) como el fluido interactúan mutuamente.

Tabla 1: Medidas de los elementos del modelo

Elemento	Tamaño (ancho x alto) (mm)
Canal	$9 \times 25 - 50$
Cabeza	Semieje a 0,342 Semieje b 0,529
Flagelo	$0,064 \times 4$

Para esta simulación, se utilizó como fluido agua y, para los sólidos, politetrafluoroetileno (PTFE) para la cabeza y polidimetilsiloxano (PDMS) para el flagelo. Se realizaron distintos estudios sobre el movimiento y desplazamiento producido, tanto únicamente en la cabeza como en el microrrobot completo, al aplicarle una fuerza equivalente a la producida con la reacción química de impulso deseada. Para ello se utilizaron dos configuraciones distintas del modelo. En el primero (modelo 1) sólo se incluyó la cabeza sobre el que se le aplicaron las fuerzas dentro del canal con el fluido. El segundo (modelo 2) incluía el microrrobot completo (cabeza y flagelo) en el canal. Las fuerzas que genera la reacción química se aproximaron mediante la aplicación de fuerzas alternas a los lados de la cabeza como se detalla en el apartado 2.3.

### 2.2. ECUACIONES DINÁMICAS

Para el dominio *fluido*, de acuerdo con un fluido Newtoniano incompresible, las ecuaciones de continuidad y momento de Navier-Stokes son:

$$\rho \nabla \cdot u_{fluid} = 0 \quad (1)$$

Modelado, Simulación y Optimización

$$\rho \frac{\partial u_{fluid}}{\partial t} + \rho(u_{fluid} \cdot \nabla)u_{fluid} = \nabla \cdot [-pI + \mu(\nabla u_{fluid} + \nabla(u_{fluid})^T)] + F \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $u_{fluid}$  su velocidad,  $p$  la presión,  $I$  la matriz identidad,  $\mu$  la viscosidad dinámica,  $T$  la temperatura y  $F$  la fuerza externa aplicada al fluido. En esta simulación las fuerzas externas provienen de las fuerzas aplicadas en la cabeza, que interactúan con el dominio fluido debido a las físicas acopladas del FSI.

Para el dominio *sólido*, la ecuación de equilibrio viene dada por:

$$\rho \frac{\partial^2 u_{solid}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \sigma = F_V \quad (3)$$

donde  $\sigma$  es el tensor tensión de Cauchy,  $F_V$  la fuerza del cuerpo y  $u_{solid}$  la deformación del sólido. El tensor tensión de Cauchy se calcula del segundo tensor tensión de Piola-Kirchhoff  $S$  con:

$$\rho = J^{-1} F S F^T \quad (4)$$

donde  $J$  es el Jacobiano de la deformación, dado por:

$$J = |F| \quad (5)$$

y  $F$ , el gradiente de deformación, se puede expresar en términos del gradiente del vector desplazamiento  $u_{solid}$  como:

$$F = I + \nabla u_{solid} \quad (6)$$

El tensor de deformación del material elástico lineal  $\epsilon$  está escrito en términos del gradiente de desplazamiento:

$$\epsilon = \frac{1}{2}[(\nabla u_{solid})^T + \nabla u_{solid} + (u_{solid})^T u_{solid}] \quad (7)$$

La ley de Hooke relaciona el tensor de tensión, el tensor de deformación y la temperatura como sigue:

$$s = s_0 + c: (\epsilon - \epsilon_0 - \epsilon_{th}) \quad (8)$$

donde  $c$  es el 4º orden del tensor elástico, el operador “:” es el producto escalar de los dos tensores,  $s_0$  y  $\epsilon_0$  son las tensiones y deformaciones iniciales,  $\epsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref})$  es la dilatación térmica y  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica.

Para el FSI, se utiliza el método Lagrangiano-Euleriano arbitrario (ALE) [16] para resolver los dominios sólidos y fluidos. La fuerza total ejercida en el contorno sólido por parte del fluido es:

$$f_r = n \cdot [-pI + \mu(\nabla u_{fluid} + (\nabla u_{fluid})^T)] \quad (9)$$

donde,  $n$  es la normal. La fuerza aplicada en el contorno del dominio sólido está dada:

$$F_V = \rho \frac{\partial^2 u_{solid}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \sigma \quad (10)$$

donde  $F_V$  es la fuerza volumétrica que está calculada por:

$$F_V = \frac{F_{tot}}{V} \quad (11)$$

donde  $F_{tot}$  es la fuerza aplicada y  $V$  el volumen del dominio sólido. Una transformación de la fuerza es necesaria para acoplar el marco espacial (ecuaciones de Navier-Stokes) y el material (interfaz de mecánica de sólidos), esto se hace de acuerdo a:

$$F = f \frac{dv}{dV} \quad (12)$$

donde  $dv$  y  $dV$  son los factores de escala de los elementos de malla para el marco espacial y para el de material, respectivamente. El acoplamiento en la otra dirección consiste en la velocidad de la estructura  $\frac{\delta u_{solid}}{\delta t}$  que actúa como una pared móvil para el dominio fluido.

### 2.3. DOMINIOS Y CONDICIONES DE CONTORNO

Para el *dominio fluido* se utilizó agua como material, con una densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup> y una viscosidad dinámica de 0,001 Pa·s.

Para el *dominio sólido* se usó PDMS para el flagelo, con una densidad de 970 kg/m<sup>3</sup>, un módulo de Young de 750 kPa y un coeficiente de Poisson de 0,49. Para el material de la cabeza se usó PTFE con una densidad es de 2200 kg/m<sup>3</sup>, un módulo de Young de 400 MPa y un coeficiente de Poisson de 0,46.

Con el modelo 1, el microrrobot sin el flagelo, se realizaron dos simulaciones distintas. En la primera se aplicó un impulso de 0,05 mN en un punto de la cabeza (Figura 1a) a 45° del sistema de referencia global. En la segunda se aplicaron unas fuerzas alternas de 0,05 mN de periodo 0,025 s en dos contornos de la cabeza (Figura 1b). Para las fuerzas aplicadas, cuando el periodo de actuación de una fuerza terminaba, comenzaba el siguiente. Cada una de las fuerzas se mantiene de manera independiente un tiempo de actuación de un 10 % del periodo total, siendo este, en consecuencia de 0,25 s (Figura 3).

En el modelo 2, el microrrobot con el flagelo, se realizaron seis simulaciones distintas. En la primera de ellas se aplicó un impulso en un punto de la cabeza del microrrobot del mismo modo que

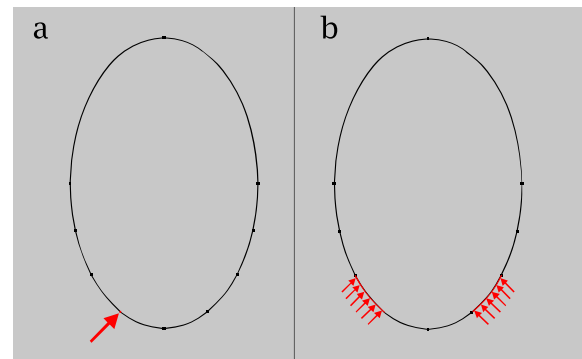


Figura 1: Localización de las fuerzas en microrrobot con sólo la cabeza. La flecha roja indica el lugar donde se aplica la fuerza y su sentido. a) Impulso puntual, b) pulso de fuerzas alternas aplicadas en los contornos marcados, primero se aplica el de la izquierda e inmediatamente después el de la derecha.

la primera simulación del primer modelo (Figura 2a). En este caso, debido a la presencia del flagelo, es necesario aplicar una fuerza mayor para desplazar el microrrobot alcanzando los 0,5 mN. En las otras cinco simulaciones se aplicaron dos fuerzas alternas en la cabeza del microrrobot (Figura 2b). El periodo de activación de las fueras se mantuvo (0,025 s), reduciéndose el periodo de la onda progresivamente. Pasando el periodo de activación de un 10 % del periodo al 30 % con pasos de 5 %, esto es 10, 15, 20, 25, 30 % (Figura 3).

### 2.4. MALLADO Y SIMULACIÓN

Se creó una malla 2D con elementos cuadrangulares y triangulares (Figura 4). Se utilizaron elementos cuadrangulares para los contornos de las geometrías. Los elementos triangulares se utilizaron para el resto de las geometrías no malladas. Los elementos cuadrangulares y triangulares generados en el microrrobot fueron de 224 y 484, respectivamente. Para el canal, como su tamaño variaba en longitud, se generaron más o menos elementos en las distintas configuraciones siendo el máximo número de elementos 898 y 12634, para los elementos cuadrangulares y triangulares, respectivamente. Para las simulaciones sobre las que se preveía un mayor desplazamiento del microrrobot se utilizó una regeneración de malla automática mediante el atributo de COMSOL “Remallado automático”. Con este atributo se conseguía que la malla se regenerara al alcanzar un valor máximo dado de distorsión. El tiempo de simulación fue de 3 s. Se usó un resolovedor totalmente acoplado que utiliza MUMPS como resolovedor lineal y un método no lineal con un factor de amortiguamiento automático.

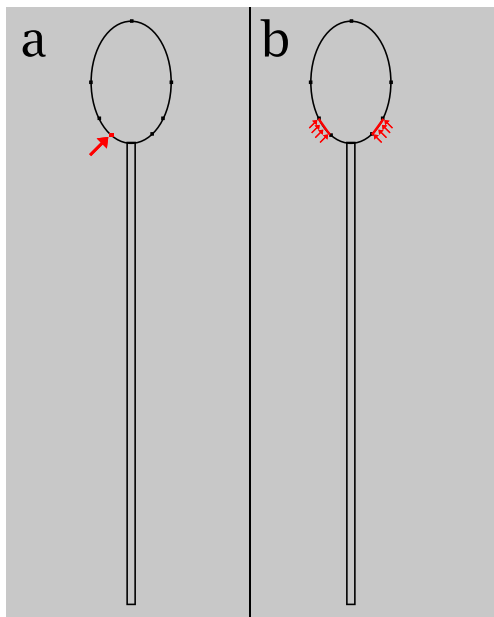


Figura 2: Localización del pulso de fuerza aplicado al microrrobot con flagelo. La flecha roja indica el lugar donde se aplica la fuerza y su sentido. a) Impulso puntual, b) pulso de fuerzas alternas aplicadas en los contornos marcados, primero se aplica el de la izquierda e inmediatamente después el de la derecha.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. DESPLAZAMIENTO

Para cada uno de los experimentos realizados con cada modelo se estudió el desplazamiento que la cabeza realizaba en los ejes  $x$  e  $y$ . En el modelo 1 la aplicación de un impulso puntual de la fuerza genera una deriva lateral (Figura 5). Por otro lado, la aplicación de las fuerzas alternas anteriormente descritas, genera un desplazamiento principalmente a lo largo del eje  $y$ . Como se observa en la Figura 5 la aplicación de estas fuerzas, también genera un desplazamiento no deseado a lo largo del eje  $x$  que propicia que la cabeza adquiera un desplazamiento descontrolado.

En el modelo 2, el que posee flagelo, el desplazamiento provocado por la aplicación del impulso puntual (Figura 6) sigue una tendencia muy similar al modelo sin flagelo. En este caso, se provoca un desplazamiento similar tanto en  $x$  como en  $y$ . En aquellos microrrobots a los que se les aplicaron fuerzas alternas, presentan un desplazamiento mayoritariamente en el eje  $y$ . Como se observa en la Figura 6, conforme aumenta el porcentaje de actuación de las fuerzas sobre la cabeza del microrrobot, aumenta el desplazamiento provocado. El mayor desplazamiento se produce con la aplica-

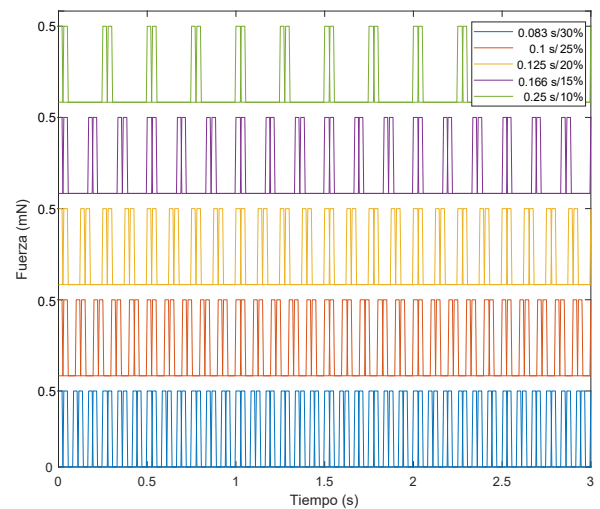


Figura 3: Gráfico de fuerzas aplicadas a la cabeza y el microrrobot.

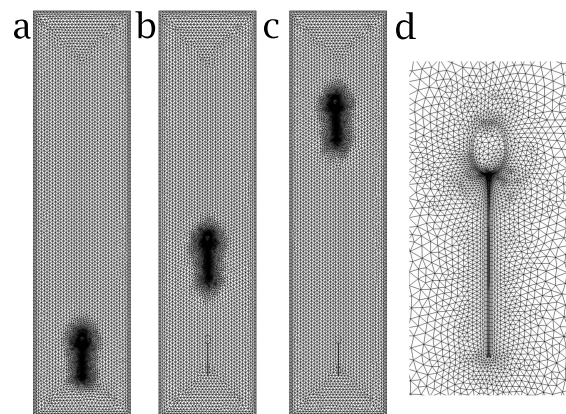


Figura 4: Mallado del microrrobot con flagelo. Remallado a distintos tiempos a) 0 s, b) 1,5 s, c) 3 s. d) Detalle del mallado en la zona del microrrobot.

ción de la fuerza con mayor porcentaje de actuación, en este caso 30 % con 29,24 mm. En la Tabla 2 se muestran los desplazamientos máximos de cada microrrobot. En la gráfica se observa además, que apenas existe desplazamiento en el eje  $x$ . Sin embargo, como se observa la Figura 7 este desplazamiento en  $x$  no es cero, sino que debido a la presencia alterna de las fuerzas aplicadas se produce un movimiento ondulatorio. A pesar de esto, el desplazamiento en  $x$  es ostensiblemente menor en el microrrobot con flagelo que sin él, además teniendo en cuenta que la fuerza aplicada en el microrrobot con flagelo es 10 veces mayor. Es decir, la presencia del flagelo favorece la estabilización del movimiento.

La estabilización provocada por el flagelo puede ser asimilada a la acción del combustible en un

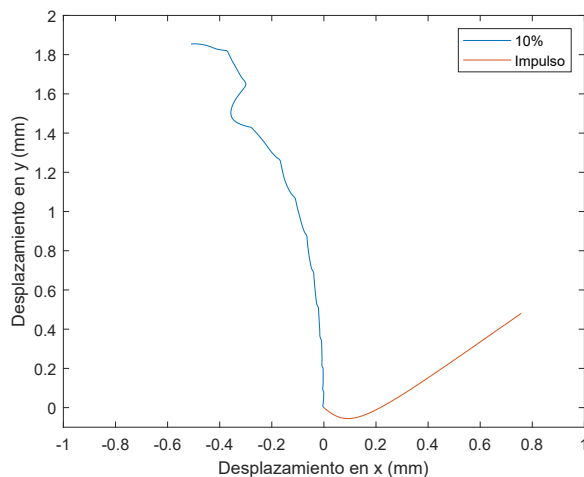


Figura 5: Desplazamiento de la cabeza en  $x$  e  $y$  con la aplicación de un par de fuerzas (10 %) y con un impulso puntual (Impulso).

cohetes como se modela en [17] (Figura 8a). En él, la acción del combustible se asemeja a la de un péndulo que se desplaza de manera dependiente a la rotación del cohete debido a la acción de sus propulsores. Estos propulsores, situados lateralmente y de manera trasera, estabilizan e impulsan, respectivamente, al cohete. En nuestro caso, la cabeza del microrrobot sería el cohete y los propulsores, tanto los laterales (componente  $x$  de las fuerzas aplicadas) como el trasero (componente  $y$  de las fuerzas). Por su parte, el flagelo actuaría tanto de propulsor como de péndulo, en este caso situado fuera del cuerpo. Como se observa en la Figura 8b, el flagelo, por cada componente  $x$  de la fuerza, genera una reacción en dirección contraria, haciendo que el sistema se estabilice (péndulo). Con este movimiento, además de estabilizar el microrrobot, se genera una forma de onda que lo impulsa haciendo las veces del propulsor del cohete.

### 3.2. VELOCIDAD

Se estudió la velocidad alcanzada por los microrrobots con flagelo. En la Figura 9 se observan las velocidades alcanzadas por los cinco microrrobots con flagelo. Como se ve en la figura, todas las curvas de velocidad presentan el mismo patrón. Utilizando como ejemplo la curva de 10 %, se observa cómo se produce un aumento brusco por cada par de fuerzas aplicadas. Observando detalladamente cada uno de esos picos, se ve cómo cada aumento presenta un primer pico, correspondiente a la primera fuerza aplicada, e inmediatamente después otro con la siguiente fuerza del par. Esta aplicación consecutiva de fuerzas permite que el aumento de velocidad se

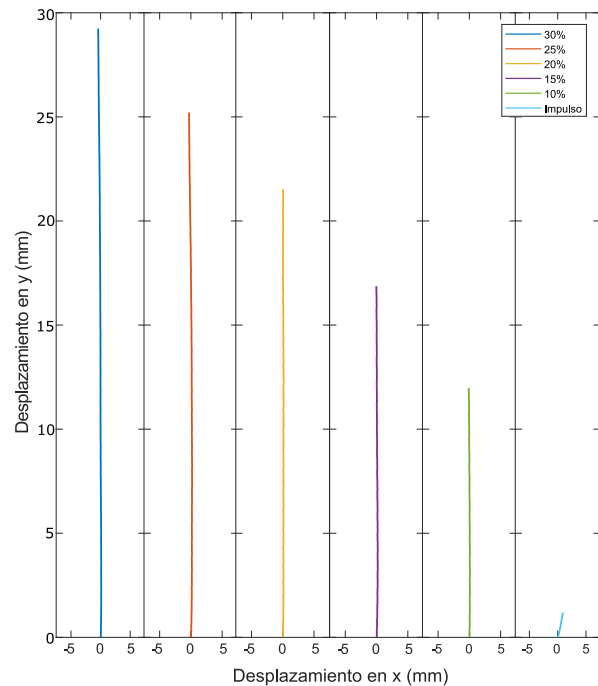


Figura 6: Desplazamiento de los microrrobots con flagelo en  $x$  e  $y$ .

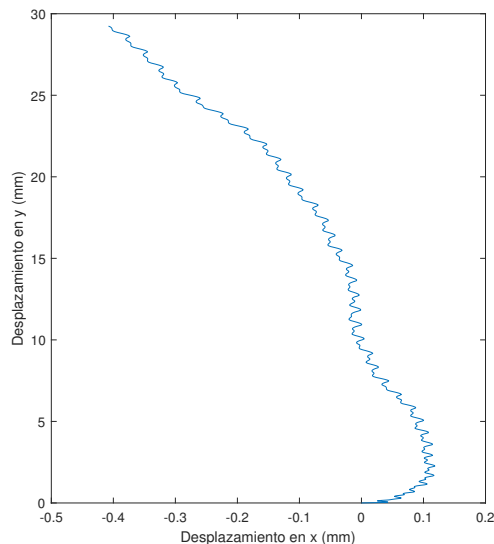
vaya acumulando, siendo esta acumulación mayor en aquel modelo en el que las fuerzas se dan con mayor frecuencia (30 %). Estos cambios en la velocidad son una relación directa a la aceleración provocada por las fuerzas aplicadas, como se comenta en el apartado 3.3. Esta velocidad termina estabilizándose a lo largo del tiempo. La velocidad media estabilizada, así como la velocidad máxima alcanzada pueden verse en la Tabla 2.

### 3.3. ACELERACIÓN

Por otro lado la aceleración producida en el movimiento es un parámetro importante a tener en cuenta para comprobar si el movimiento se está produciendo únicamente por el impulso generado por la fuerza o si, a su vez, este impulso y movimiento de la cabeza hace que el flagelo se mueva y genere su propio impulso. En la Figura 10 se observan las aceleraciones producidas en cada uno de los microrrobots con flagelo. Se puede ver cómo existen unos picos muy pronunciados de aceleración repetitivos provocados por las fuerzas externas aplicadas. Se observa cómo la aceleración no cae a cero como cabría esperar al eliminar las fuerzas externas. De este modo, una vez decae el impulso generado por las fuerzas aplicadas, se puede observar una serie de aceleraciones de menor

Tabla 2: Desplazamiento, velocidad media en estacionario y velocidad máxima de cada uno de los micro-robots

Fuerzas	Desplazamiento máximo (mm)	Velocidad media estacionario (mm/s)	Velocidad máxima (mm/s)
10 %	11,98	4,87	7,08
15 %	16,86	6,80	8,79
20 %	21,52	8,55	10,41
25 %	25,20	9,82	11,16
30 %	29,24	11,31	12,43

Figura 7: Desplazamiento del microrrobot con un 30 % de fuerza aplicada en  $x$  e  $y$ . Nótese la escala de eje  $x$ .

intensidad entre cada grupo de picos de aceleración. Estas aceleraciones más débiles son las que se producen debido al movimiento ondulatorio del flagelo, provocado, a su vez, por el par generado por las fuerzas aplicadas en la cabeza.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han llevado a cabo una serie de simulaciones computacionales de un microrrobot autónomo con flagelo flexible. En ellas, se realizó un primer estudio sobre la cinemática de la cabeza del microrrobot para conocer el efecto del flagelo, mostrando que, sin el flagelo, el movimiento provocado por el par de fuerzas tenía una pobre estabilidad relativa. Por otro lado, se aplicaron fuerzas alternas al microrrobot con flagelo para observar su movimiento y el valor añadido que aporta el flagelo a su movimiento. El flagelo en el microrrobot genera una propulsión añadida a las fuerzas aplicadas debido al movimiento que generan éstas en la cabeza. Por lo tanto

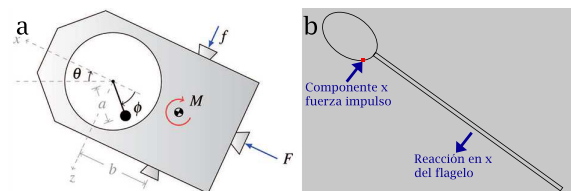


Figura 8: Similitudes entre: a) el cohete modelado por [17] y b) nuestro microrrobot.

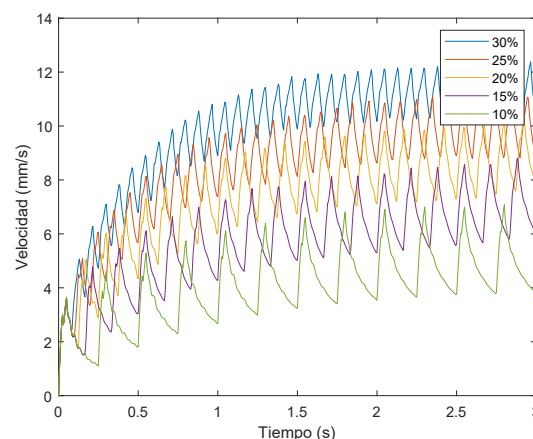


Figura 9: Velocidad de cada microrrobot con flagelo.

se ha demostrado la utilidad del flagelo como sistema estabilizador, así como para favorecer la propulsión.

Para poder controlar la dirección y la velocidad de movimiento son necesarias más simulaciones en las que se estudie las fuerzas de sustentación y el arrastre generado por el flagelo, así como la forma de onda generada. Además, es necesaria una optimización de los parámetros de entrada de la simulación, como son la fuerza aplicada, su dirección, y los materiales utilizados para la cabeza y el flagelo. El siguiente paso para poder comprender cómo funciona este microrrobot es realizar un modelo matemático asemejándolo a la propulsión de un cohete.



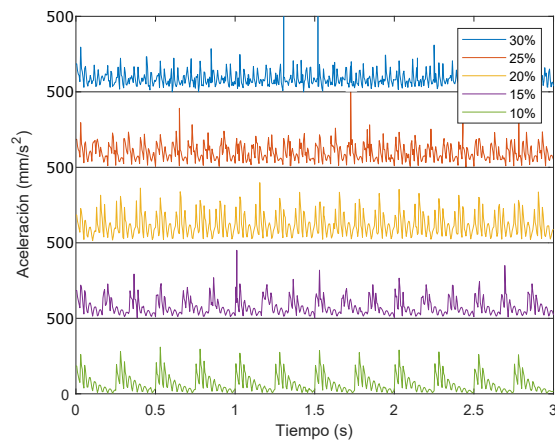


Figura 10: Aceleración de cada microrrobot con flagelo.

### Agradecimientos

Este artículo ha sido financiado por la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura mediante el proyecto IB18109 y la “Ayuda a Grupos” GR18159, por la Agencia Estatal de Investigación mediante el proyecto PID2019-111278RB-C22 / AEI / 10.13039/501100011033, y por los Fondos Europeos de Desarrollo Regional “Una manera de hacer Europa”.

### English summary

## PROPELLING AND STEERING OF A FLEXIBLE FLAGELLUM-LIKE MICROROBOT USING ROCKET ANALOGY. SIMULATION IN COMSOL MULTIPHYSICS

### Abstract

*Microrobots have the potential to revolutionize medicine. At the moment, there are many limitations, among which the manufacturing, the power supply and the propulsion stand out. In this work, computational simulation is used to carry out a study on propulsion of a microrobot with flexible flagellum taking into account these limitations, making an analogy with the propulsion of a rocket. Using COMSOL Multiphysics, an autonomous microrobot with a flexible flagellum driven by chemical reactions has been simulated. These reactions have been emulated with the applica-*

*tion of different forces applied to the head. The results obtained allow us to conclude that the micro-robot is propelled both by the applied forces and by the movement generated by the flagellum. In addition, the flagellum performs a stabilization function of the microrobot.*

**Keywords:** Microrobot, Autonomous, Flagellum, Computational Simulation, Rocket.

### Referencias

- [1] B. J. Nelson, I. K. Kaliakatsos, and J. J. Abbott, “Microrobots for minimally invasive medicine,” *Annual Review of Biomedical Engineering*, vol. 12, pp. 55–85, 2010.
- [2] M. Luo, Y. Feng, T. Wang, and J. Guan, “Micro-/Nanorobots at Work in Active Drug Delivery,” *Advanced Functional Materials*, vol. 28, no. 25, pp. 1–23, 2018.
- [3] L. Kong, J. Guan, and M. Pumera, “Micro- and nanorobots based sensing and biosensing,” *Current Opinion in Electrochemistry*, vol. 10, pp. 174–182, 2018.
- [4] S. Heo, T. Wiguna, H. C. Park, and N. S. Goo, “Effect of an Artificial Caudal Fin on the Performance of a Biomimetic Fish Robot Propelled by Piezoelectric Actuators,” *Journal of Bionic Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 151–158, 2007.
- [5] B. Chen, S. Jiang, Y. Liu, P. Yang, and S. Chen, “Research on the Kinematic Properties of a Sperm-Like Swimming Micro Robot,” *Journal of Bionic Engineering*, vol. 7, pp. S123–S129, 2010.
- [6] X. Ma, A. Jannasch, U. R. Albrecht, K. Hahn, A. Miguel-López, E. Schäffer, and S. Sánchez, “Enzyme-Powered Hollow Mesoporous Janus Nanomotors,” *Nano Letters*, vol. 15, no. 10, pp. 7043–7050, 2015.
- [7] B. Jang, E. Gutman, N. Stucki, B. F. Seitz, P. D. Wendel-García, T. Newton, J. Pokki, O. Ergeneman, S. Pané, Y. Or, and B. J. Nelson, “Undulatory Locomotion of Magnetic Multilink Nanoswimmers,” *Nano Letters*, vol. 15, no. 7, pp. 4829–4833, 2015.
- [8] M. Xuan, Z. Wu, J. Shao, L. Dai, T. Si, and Q. He, “Near Infrared Light-Powered Janus Mesoporous Silica Nanoparticle Motors,”



*Journal of the American Chemical Society*, vol. 138, no. 20, pp. 6492–6497, 2016.

- [9] Z. Wu, T. Li, J. Li, W. Gao, T. Xu, C. Christianson, W. Gao, M. Galarnyk, Q. He, L. Zhang, and J. Wang, “Turning erythrocytes into functional micromotors,” *ACS Nano*, vol. 8, no. 12, pp. 12 041–12 048, 2014.
- [10] K. Kim, X. Xu, J. Guo, and D. L. Fan, “Ultrahigh-speed rotating nanoelectromechanical system devices assembled from nanoscale building blocks,” *Nature Communications*, vol. 5, pp. 1–9, 2014.
- [11] B. Sun, G. Wood, and S. Miyashita, “Milestones for autonomous in vivo microrobots in medical applications,” *Surgery (United States)*, vol. 169, no. 4, pp. 755–758, 2021.
- [12] E. Mancha, J. Traver, I. Tejado, J. Prieto, B. Vinagre, and V. Feliu, “Artificial flagellum microrobot. Design and simulation in COM-SOL.” *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, vol. 693.
- [13] J. E. Traver, I. Tejado, C. Nuevo-Gallardo, M. A. López, and B. M. Vinagre, “Performance study of propulsion of N-link artificial Eukaryotic flagellum swimming microrobot within a fractional order approach: From simulations to hardware-in-the-loop experiments,” *European Journal of Control*, vol. 58, pp. 340–356, 2021.
- [14] G. Hwang, A. Mizushima, E. Lebrasseur, K. Misumi, N. Usami, A. Higo, and Y. Mita, “Mobile microrobotic cleaner in microfluidics,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 318, p. 112502, 2021.
- [15] I. S. Khalil, H. C. Dijkslag, L. Abelman, and S. Misra, “MagnetoSperm: A microrobot that navigates using weak magnetic fields,” *Applied Physics Letters*, vol. 104, no. 22, 2014.
- [16] J. Donea, S. Giuliani, and J. P. Halleux, “An arbitrary lagrangian-eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 33, no. 1-3, pp. 689–723, 1982.
- [17] J. W. Thompson and W. J. O’Connor, “Wave-based attitude control of spacecraft with fuel sloshing dynamics,” *Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2015, Multibody Dynamics 2015*, vol. LXIII, pp. 968–977, 2015.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# MODELADO Y SIMULACION DE UN AEROGENERADOR DE 5 MW ESCALADO A PARTIR DE UNO DE 7 KW

Laura Olaya Rúa

Facultad de Físicas, Universidad Complutense de Madrid, lolaya@ucm.es

Jesús Enrique Sierra-García

Universidad de Burgos, jesierra@ubu.es

Matilde Santos Peñas

Instituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, msantos@ucm.es

## Resumen

*En este trabajo se diseña e implementa una metodología para escalar el modelo de una turbina eólica de potencia nominal determinada al de una turbina de diferente potencia. Para ello, se presentan e implementan en MATLAB/Simulink los modelos que describen el funcionamiento de un aerogenerador, se identifican los parámetros que definen su potencia nominal, y se enumeran y aplican las modificaciones que deben realizarse para escalar un modelo a otro. Los resultados de simulación confirman la viabilidad de esta metodología, que puede resultar muy útil para obtener de forma sistemática y más sencilla el modelo de las más complejas turbinas de gran tamaño.*

**Palabras clave:** energía eólica, turbina eólica, modelado y simulación, escalamiento, potencia.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las turbinas eólicas pueden ser instaladas en diferentes entornos, dependiendo de su capacidad. Los aerogeneradores pequeños, con una potencia nominal de menos de 50 kW, normalmente se diseñan para el autoabastecimiento, uso residencial y algunas industrias no muy grandes. Los aerogeneradores grandes, con una potencia de megavatios, son empleados en la producción de energía para la red eléctrica.

Este trabajo busca identificar los factores que definen la potencia de una turbina eólica y diseñar una metodología para escalar el modelo de una turbina dada a una potencia deseada.

Contar con modelos de aerogeneradores de diferentes capacidades puede ser de utilidad en múltiples aplicaciones. En el trabajo de Coutinho et al. [3], los autores demuestran la importancia del modelado numérico de aerogeneradores para predecir el comportamiento de los mismos ante las cargas a las que están sometidos, incluso antes de su implantación

en parques eólicos. Emplean el programa GH Bladed 4.5 para simular dos turbinas de capacidades de 2 MW y 5 MW, con el fin de comparar su respuesta. Los autores Burmester et al. [1] comparan los coeficientes de sustentación y de arrastre de un prototipo de aerogenerador, obtenidos mediante simulación, con los datos obtenidos durante el funcionamiento de un aerogenerador real. Khan [8] realiza el modelado, simulación y análisis de una pequeña turbina aislada, mediante conjuntos de relaciones empíricas y físicas, además de su simulación digital.

En la industria se cuenta con herramientas de simulación de aerogeneradores de diferentes capacidades. Sin embargo, su adquisición puede ser costosa, además de que el tiempo de formación requerido para su uso puede ser muy largo. En este estudio se hace uso de las herramientas MATLAB/Simulink para obtener modelos definidos por un conjunto de ecuaciones de fácil comprensión y modificación.

El escalamiento de modelos de aerogeneradores, entre otros beneficios, puede ser de utilidad para predecir el comportamiento de turbinas de diferentes capacidades, comparar el comportamiento de prototipos frente a su contraparte real, y aprovechar medidas empíricas realizadas en una turbina de capacidad determinada para validar un modelo. Por ello, en este trabajo se propone un procedimiento para escalar un modelo de una turbina de 5MW a partir de uno de 7kW.

La metodología es versátil, de manera que permite obtener modelos de turbinas de mayor capacidad o más pequeñas, como la de un prototipo.

Esta metodología propuesta se ha validado realizando el escalamiento del modelo de una turbina de 7 kW desarrollado en [10] a una de mayor capacidad. En concreto, considerando la situación actual de la energía eólica, donde se tiende a la instalación de grandes turbinas offshore para hacerlas más rentables [16], se ha decidido escalar este modelo a una turbina

de 5 MW. Para ello se usa como base la turbina de 5 MW, desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) [7].

Los resultados se han validado con los valores esperados obtenidos con la simulación de la turbina objetivo mediante un software específico de alta precisión, FAST. Estos resultados confirman la viabilidad de esta metodología que puede resultar muy útil para obtener de forma sistemática y más sencilla el modelo de turbinas de gran tamaño.

A continuación, se detalla la organización del documento. En la sección 2 se describen los subsistemas de un aerogenerador, identificando las ecuaciones más relevantes. La sección 3 recoge los parámetros de la turbina de 5MW escalada desde la turbina de 7kW. En la sección 4 se muestran los resultados de simulación del modelo escalado. El documento finaliza con las conclusiones y trabajos futuros.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SUBSISTEMAS DE LA TURBINA

Con el fin de facilitar las modificaciones que se deben realizar en el modelo, el aerogenerador se divide en los siguientes subsistemas: el viento, la potencia, la relación de engranajes, y el generador.

### 2.1. El viento capturado

Uno de los principales parámetros que diferencian a una turbina pequeña de una grande es el radio de su rotor, cuyo impacto se ve reflejado en la siguiente expresión [2].

$$\rho A_{\infty} v_{\infty} = \rho A_r v_r = \rho A_w v_w \quad (1)$$

Donde  $A$  es el área de barrido [ $\text{m}^2$ ],  $v$  es la velocidad del viento [ $\text{m/s}$ ], el subíndice  $\infty$  se refiere a los parámetros del viento libre antes de interactuar con el rotor, el subíndice  $r$  se refiere a los parámetros a nivel del rotor, y  $w$  a los parámetros de la estela de viento que sale del rotor. La ecuación (1) describe la relación entre el caudal másico del flujo de aire antes, durante y después de su paso por el rotor. Al igual que sucede en una tubería sin pérdidas, el caudal másico en la entrada debe ser el mismo que en la salida. Por otro lado, la velocidad del viento disminuye a lo largo de su trayecto por el tubo de viento, debido a su interacción con el rotor [2]. Para mantener el caudal, el área aumenta a lo largo del tubo de viento. Esta área sólo se conoce a nivel del rotor y depende directamente de su radio.

En las turbinas grandes se busca que la captura del viento sea máxima a velocidades de viento menores a la velocidad nominal, con el fin de maximizar la

generación de potencia. Una vez alcanzada la potencia nominal, ésta debe mantenerse constante para garantizar una salida estable de potencia eléctrica. Esto se consigue mediante el control de ángulo de cabeceo o control de pitch [14].

El ángulo de pitch  $\theta$  [ $^{\circ}$ ] representa la rotación de las palas del rotor, que permite variar el ángulo entre las componentes de la velocidad de viento  $\phi$  [ $^{\circ}$ ] y el ángulo de ataque del viento  $\alpha$  [ $^{\circ}$ ] [4] (Figura 1)

$$\tan \phi = \frac{(1-a)v}{(1+a')\omega r} \quad (2)$$

$$\alpha = \phi - \theta \quad (3)$$

Donde  $\omega$  [ $\text{rad/s}$ ] es la velocidad angular del rotor, representada en la Figura 1 como  $\Omega$ . Tanto  $a$  como  $a'$  son factores de aprovechamiento de la velocidad del viento a nivel del rotor.

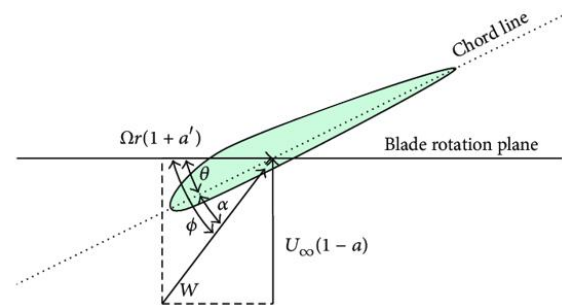


Figura 1: Triángulo de velocidades para una sección de pala [6].

Generalmente los aerogeneradores pequeños no implementan control de pitch dado que, al ser de uso residencial, no se requiere que la salida de potencia eléctrica sea tan estable. Cuando se supera el valor de viento nominal se realiza un plegado total de las palas por seguridad.

El ángulo de pitch suele estar tabulado respecto a la potencia de salida que se genera frente a una velocidad de viento determinada. Este puede ser implementado de distintas formas, como una tabla de búsqueda o un lazo de control [15].

### 2.2. La potencia

La aerodinámica del rotor se representa mediante las relaciones estáticas de la Teoría del Elemento de Pala [4], donde  $P_v$  [W] denota la potencia disponible en el viento en ausencia del rotor, y  $P$  [W] la potencia del aerogenerador una vez impulsado por el viento.

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4)$$

$$P = P_v C_p \quad (5)$$

La ecuación 5 indica que el coeficiente de potencia del aerogenerador ( $C_p$ ) actúa como una eficiencia de extracción de potencia del viento. Igualmente se evidencia en la ecuación 4 que el área de barrido del rotor  $A$  [m<sup>2</sup>] tiene un impacto directo sobre la capacidad de aprovechamiento de la potencia aerodinámica [9].

El valor máximo de  $C_p$  está definido por el límite de Betz, el cual establece que la potencia extraída del viento no puede ser superior al 59,3% de la potencia disponible en el volumen de aire a nivel del rotor [5]. El  $C_p$  se define como la relación entre la potencia de viento capturada y la potencia disponible [12].

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (6)$$

En la práctica se busca operar con coeficientes de potencia altos. Dado que los aerogeneradores pequeños normalmente no cuentan con un sistema de control, esto sólo se consigue en el rango de velocidades de viento comprendido entre la velocidad de puesta en funcionamiento y la velocidad nominal. Sin embargo, las turbinas de gran escala se pueden mantener operativas, aunque se haya superado la velocidad de viento nominal, consiguiendo operar a altos valores de  $C_p$  durante más tiempo.

El  $C_p$  tiene una gran dependencia de la velocidad del viento. Sin embargo, dada la complejidad de la toma instantánea de medidas de velocidad de viento a nivel del rotor, éste se suele representar en función de la velocidad del extremo de la pala (TSR, por sus siglas en inglés),

$$TSR = \lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (7)$$

Siendo  $\omega$  [rad/s] la velocidad angular del rotor,  $v$  [m/s] la velocidad del viento y  $R$  [m] el radio de la pala.

En el caso de la turbina NREL de 5 MW, el funcionamiento óptimo se logra a  $C_p = 0,482$ , cuando  $\lambda = 7,55$  [7]. La correlación  $C_p - \lambda$  es característica de cada tipo de aerogenerador y permite conocer el punto de operación óptimo de la turbina en todo momento. Ésta se obtiene en la industria mediante medidas empíricas o por simulaciones aerodinámicas.

Con el fin de obtener la característica  $C_p - \lambda$  de la turbina de 5 MW estudiada, se realiza una aproximación a la función analítica general del  $C_p$

$$C_p(\lambda, \theta) = c_1 \left( c_2 \frac{1}{\beta} - c_3 \theta - c_4 \theta^x - c_5 \right) e^{-c_6 \frac{1}{\beta}} \quad (8)$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\lambda + 0,08\theta} - \frac{0,035}{1 + \theta^3} \quad (9)$$

A partir de la base de datos existente del National Wind Technology center de la turbina de 5 MW [11], se extraen los valores de  $C_p$  frente a TSR para diferentes velocidades de viento, y se grafican las curvas características para ángulos de pitch de  $-1^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $1^\circ$ . Por otro lado, se extraen los parámetros de las funciones analíticas de  $C_p$  definidas en [10] y [12], correspondientes a aerogeneradores de 7 kW y 2 MW, respectivamente, para un ángulo de pitch de  $0^\circ$ , y se selecciona la función analítica más cercana a la curva esperada definida por el NREL. Finalmente se realiza un ajuste manual de los parámetros, con el fin de hacer coincidir la curva empírica con la función analítica, obteniéndose los siguientes valores:  $c_1=0,47$   $c_2=126$   $c_3=0,3$   $c_4=0,002$   $c_5=5,5$   $c_6=19$  y el exponente es  $x=2$ .

Como se observa en las ecuaciones (8) y (9), la característica  $C_p - \lambda$  depende del ángulo de pitch, demostrando que la inclinación de las palas tiene un efecto sobre la capacidad de extracción de potencia del viento del rotor. Esto se debe a que se produce una variación de la componente normal del viento sobre la superficie de las palas.

En la figura 2 se presenta la curva característica obtenida de forma analítica para un ángulo de pitch de  $0^\circ$  (línea azul), y se compara con las curvas características para ángulos de pitch de  $-1^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $1^\circ$ , obtenidas por NREL mediante simulaciones en FAST.

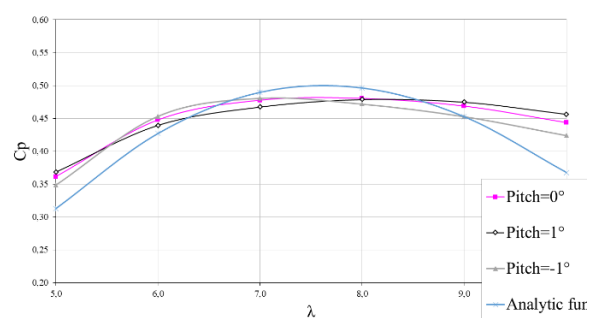


Figura 2: Representación de la característica  $C_p - \lambda$ .

En la figura 2 se puede observar cómo la variación del ángulo de pitch produce una variación del valor del TSR al cual se obtiene el  $C_p$  máximo. En concreto, para esta turbina de 5 MW, con un pitch de  $0^\circ$  el  $C_p$  máximo se obtiene en 7 y con pitch de  $1^\circ$  es 8.

### 2.3. La relación de engranajes

La relación de engranajes ( $n_g$ ) tiene como función multiplicar la velocidad de rotación del eje del generador con respecto a la velocidad del rotor. Los aerogeneradores pequeños suelen ser de transmisión

directa ( $n_g = 1$ ), dado que su rotor gira a velocidades suficientes para generar la potencia esperada. En aerogeneradores de gran tamaño esta relación debe ser mayor a 1 dada la alta inercia que encuentra la rotación. Al aumentar la velocidad de rotación, la relación de engranajes reduce el torque mecánico transferido al generador,

$$\tau_g = \frac{1}{n_g} \frac{P}{\omega} \quad (10)$$

La relación de engranajes se modela a partir de la segunda ley de Newton, donde el torque mecánico transmitido al generador ( $\tau_g - \tau_{em}$ ) [Nm] es función de la aceleración angular del eje de rotación y de la inercia de la masa en movimiento [12].

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\tau_g - \tau_{em}}{J_{eq}} - \frac{B_m}{J_{eq}} \omega \quad (11)$$

Siendo  $\tau_{em}$  [Nm] el torque electromagnético entre los imanes permanentes del generador, que representa una pérdida del torque útil, y  $B_m$  [Nm/(rad/s)] el coeficiente de amortiguamiento del eje del generador.  $J_{eq}$  [kg m<sup>2</sup>] representa la inercia equivalente del sistema rotor-generador, masa que se encuentra en movimiento,

$$J_{eq} = J_g + \frac{J_r}{n_g^2} \quad (12)$$

Donde  $J_g$  [kg m<sup>2</sup>] describe la inercia del eje giratorio del generador y  $J_r$  [kg m<sup>2</sup>] la inercia de rotación de las tres palas alrededor del buje.

$$J_r = 3 J_{blade} \quad (13)$$

Siendo  $J_{blade}$  [kg m<sup>2</sup>] la inercia de cada una de las palas del rotor.

## 2.4 El generador

Las turbinas de 5MW tienen habitualmente un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) [13], que se puede modelar mediante el circuito equivalente presentado en la Figura 3. En este circuito, el voltaje de salida del generador es equivalente a la fuerza electromotriz menos las pérdidas generadas en su armadura. Los parámetros del generador dependerán de la capacidad de la turbina.

La velocidad de rotación en el generador es la velocidad de rotación del rotor multiplicada por la relación de engranajes:

$$\omega_e = n_g \omega \quad (14)$$

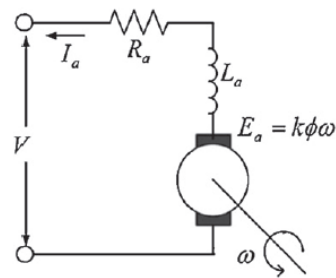


Figura 3: Circuito equivalente del PMSG.

La variación de corriente en el generador se obtiene al aplicar la ley de Kirchhoff al circuito equivalente del PMSG (Figura 3). En esta ecuación se ha supuesto que la carga  $R_L$  es puramente resistiva.

$$\frac{di}{dt} = \frac{K\omega_e - (R_a + R_L)I}{L_a} \quad (15)$$

Los diferentes parámetros se resuelven considerando que el aerogenerador se encuentra en estado estacionario a su potencia nominal. Para esto, se hace uso de valores esperados obtenidos con la simulación de la turbina objetivo [7], para una velocidad nominal de viento de 11.4 m/s.

Se define la constante electromotriz del generador  $K$ , que agrupa la constante  $k$  del generador y su constante de acoplamiento magnético  $\phi$ , como:

$$K = k\phi \quad (16)$$

Esta constante  $K$  se calcula aplicando la teoría del valor final a la ecuación (14), suponiendo que en estado estacionario la variación de corriente es nula.

De igual manera, para encontrar una expresión para el coeficiente de amortiguamiento del eje del generador  $B_m$ , se aplica la teoría del valor final a la ecuación (11), suponiendo que en estado estacionario la variación de la velocidad de rotación del rotor es nula.

Se calcula el torque electromagnético a partir de las operaciones realizadas a las ecuaciones 11 y 15.

$$\tau_{em} = KI \quad (17)$$

Se selecciona una resistencia de carga  $R_L$  [ $\Omega$ ] que permite obtener la potencia nominal a la velocidad de viento de 11.4 m/s. Con esta se calcula el voltaje de salida,

$$V = IR_L \quad (18)$$

A partir del voltaje y la corriente, se calcula la potencia eléctrica de salida a la velocidad nominal del viento, la cual debe ser igual a la potencia nominal,

$$P_{elec} = VI \quad (19)$$

Por último, se seleccionan valores para la resistencia e inductancia de armadura  $R_a$  [ $\Omega$ ] y  $L_a$  [H], respectivamente, que permitan conservar las igualdades establecidas por las operaciones realizadas.

### 3. PARÁMETROS ESCALADOS

A partir de la inspección de las ecuaciones (1-18) obtenemos la relación de dependencia entre todos los parámetros que intervienen en el modelo. Los resultados de este estudio se recogen en la tabla 1. Esta tabla permite evaluar el impacto de cada parámetro en el resto de los parámetros del modelo. Por ejemplo, en ella se puede observar que la velocidad del viento tiene el mayor impacto en la potencia y torque mecánico, estando elevada a la tercera potencia. La utilidad práctica de esta tabla es saber cuál es el efecto de modificar uno de los parámetros del modelo en los restantes parámetros. Por ejemplo, si doblamos el radio la potencia se multiplica por 4, porque la relación es cuadrática.

Tabla 1: Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo<sup>1</sup>

	P	R	J <sub>eq</sub>	n <sub>g</sub>	v	$\omega$	$\lambda$	$\rho$	C <sub>p</sub>	$\tau$	$\tau_{em}$
P		→ <sup>2</sup>			→ <sup>3</sup>	←		→	→	→	
R	→ <sup>2</sup>				←		→			→ <sup>2</sup>	
J <sub>eq</sub>				← <sup>2</sup>		←				←	
n <sub>g</sub>			← <sup>2</sup>			→				←	
v	→ <sup>3</sup>	←					←		→	→ <sup>3</sup>	
$\omega$	←		←	→			→		←	←	←
$\lambda$		→			←	→			←		
$\rho$	→									→	
C <sub>p</sub>	→				→	←	←			→	
$\tau$	→	→ <sup>2</sup>	←	←	→ <sup>3</sup>	←		→	→		←
$\tau_{em}$						←				←	

<sup>1</sup> En la tabla 1, las flechas hacia la derecha denotan una relación directa entre los parámetros relacionados por la celda y las flechas hacia la izquierda una relación inversa. La relación es lineal si no hay superíndice, cuadrática, si vale 2, o cúbica si vale 3.

Otro resultado observable es que la velocidad de rotor y el torque mecánico son las medidas que afectan a más parámetros. Por este motivo, la representación gráfica de estas señales puede proporcionar bastante información sobre el comportamiento del aerogenerador, sin necesidad de tener conocimiento de

otras variables. Además, como cabría suponer, la matriz de la tabla 1 es simétrica.

En la tabla 2 se presentan los parámetros que permiten escalar el modelo de una turbina de 7kW a una de 5MW. Los parámetros relativos al generador se obtienen mediante el procedimiento descrito en la sección 2.4. Los parámetros relativos a la turbina se obtienen de la definición de la turbina de 5 MW, desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) [7]. Los valores de inercia se obtienen de [7]. Estos valores también se pueden aproximar suponiendo que las palas son rectángulos de lado igual al radio, y ancho igual a un valor de cuerda de pala promedio; y que el generador se puede aproximar mediante un cilindro cuyo radio depende de las dimensiones del generador.

En la tabla se puede observar cómo la inercia es uno de los parámetros que más varía, dado el aumento significativo en las dimensiones de ésta. La turbina pequeña cuenta con parámetros que no varían, como el ángulo de pitch y la relación de velocidades entre el rotor y el generador, lo que no es posible para una turbina grande.

Tabla 2: Parámetros que permiten escalar el modelo

Parámetro		7 kW	5 MW	Unidades
Potencia nominal	P	7	5300	kW
Radio	R	3.2	63	m
Inercia de generador	J <sub>g</sub>		534116	kg m <sup>2</sup>
Inercia de pala	J <sub>blade</sub>		11776947	kg m <sup>2</sup>
Inercia equivalente	J <sub>eq</sub>	6.525	898320	kg m <sup>2</sup>
Relación engranajes	n <sub>g</sub>	1:1	97:1	
Ángulo de pitch	$\theta_b$	0	De 0 a 30	°
Constante amortiguamiento	B <sub>m</sub>	0.025	2.13	Nm/(rad/s)
Resistencia armadura	R <sub>a</sub>	0.275	0.08	$\Omega$
Resistencia carga	R <sub>L</sub>	8	16.1561	$\Omega$
Inductancia armadura	L <sub>a</sub>	0.0135	0.0135	H
Constante electromotriz	K	6.15	52	

### 4. RESULTADOS DE SIMULACION DEL MODELO ESCALADO

A continuación, se representan los resultados obtenidos en la simulación con MATLAB/Simulink de los modelos de aerogenerador de 7 kW y de 5 MW.



Los modelos se someten a una entrada de viento de tipo rampa que aumenta de 0 a 27 m/s (Figura 4). Esta señal ayuda a estudiar el comportamiento de las turbinas al sobrepasar las velocidades de puesta en funcionamiento, nominal y de corte o de frenado.

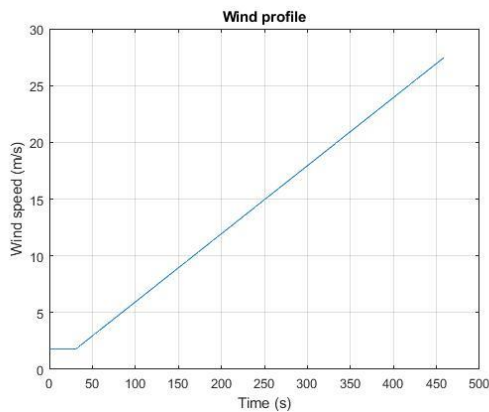


Figura 4: Perfil de viento de entrada en la simulación.

En la figura 5 se observa cómo para esta turbina de 5 MW la velocidad de viento de puesta en funcionamiento es de 3.5 m/s, la velocidad nominal a la cual la turbina alcanza su potencia nominal de 5.3 MW es 11.4 m/s, y la velocidad a la cual se frena la turbina es de 25 m/s [7], lo cual evita que se someta a esfuerzos mecánicos elevados y hace que la turbina funcione en condiciones de seguridad.

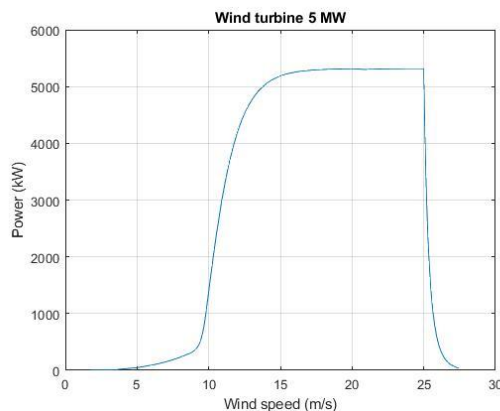


Figura 5: Potencia eléctrica de salida de la turbina de 5 MW.

Dada la capacidad de la turbina, ésta requiere un controlador de pitch para mantener la potencia nominal una vez que se alcanza la velocidad de viento de 11.4 m/s y hasta la velocidad de corte. Por este motivo, en la figura se aprecia una meseta al alcanzar los 5.3 MW.

En la figura 6 se presenta la evolución de la potencia de una turbina de 7 kW, considerada como pequeña en la industria. En ésta se observa como la potencia cae precipitadamente después de alcanzar la velocidad de

viento de 13 m/s, que es la velocidad de corte de la turbina, al no tener control de pitch. Estas ponen en marcha un sistema de frenado mediante el plegado de las palas o la rotación de la góndola. Lo anterior genera una disminución paulatina de la velocidad angular del rotor, por lo que la potencia tarda en hacerse nula, como se observa en la figura 6.

En la figura 6 se aprecia que la curva de potencia de la turbina de 7 kW no se estabiliza. Dado que las pequeñas turbinas suelen ser de autoconsumo, no requieren que su salida sea estable, pues no están obligadas a sincronizarse con la red.

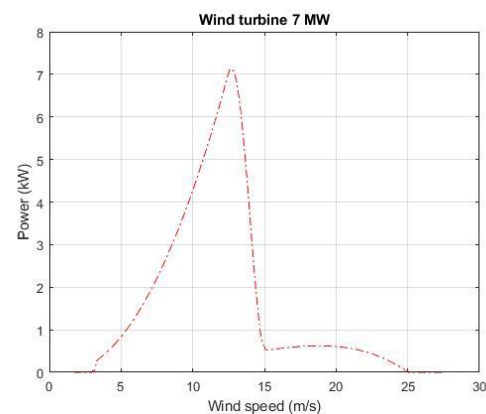


Figura 6: Potencia eléctrica de salida de la turbina de 7 kW.

Al comparar las figuras 5 y 6 se observa que la potencia crece más rápidamente en el aerogenerador de 7 kW, mientras que el de 5 MW presenta un aumento moderado de potencia en velocidades de viento bajas. Esto se debe a que la inercia del aerogenerador de 5 MW es considerablemente mayor al de la pequeña turbina (Tabla 2), lo que genera que oponga más resistencia al arranque.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha presentado el diseño de una metodología de escalamiento que permite obtener el modelo de un aerogenerador de cierta capacidad a partir de un modelo existente de diferente capacidad. Para ello, se han implementado en MATLAB/Simulink los modelos matemáticos que describen el funcionamiento de un aerogenerador, donde se han identificado los parámetros que definen su potencia nominal. La metodología se diseña como una serie de pasos y un análisis de sensibilidad que deben ser seguidos para lograr el escalamiento de un modelo. La metodología diseñada ha sido implementada para obtener el modelo de una turbina real de 5 MW a partir del modelo de una turbina de 7 kW con resultados satisfactorios.

Como trabajos futuros se propone validar estos datos con turbinas grandes offshore, e incorporando la dinámica de estas turbinas.

### Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido desarrollado con financiación del Proyecto MCI AEI/FEDER RTI2018-094902-B-C21, del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

### English summary

## MODELING AND SIMULATION OF A 5 MW WIND TURBINE FROM A 7 KW ONE

### Abstract

*In this work, a methodology is proposed to scale the model of a wind turbine of some nominal power to a turbine of different rated power. To do this, the models that describe the operation of a wind turbine are presented and implemented in MATLAB/Simulink. The parameters that define its rated power are identified, and the modifications that must be made to scale one model to another are listed and applied. The simulation results confirm the viability of this methodology, which can be useful to obtain in a systematic and simpler way the model of the most complex large turbines.*

**Keywords:** wind energy, wind turbine, modeling and simulation, scaling, electric power.

### Referencias

- [1] Burmester, S., Gueydon, S., & Make, M. (2016). Determination of Scaled Wind Turbine Rotor Characteristics from Three Dimensional RANS Calculations. *Journal of Physics: Conference Series*, 753(082003), 1.
- [2] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E. (2001). *Wind energy handbook* (Vol. 2). New York: Wiley.
- [3] Coutinho Silva, A., Leal dos Santos, C., Diógenes, S., Araújo, A., Corte Real Fernandes, E., Cordeiro de Araújo Bezerra, C., . . . de Andrade, L. (2017). 5 MW and 2 MW NREL wind turbines simulation comparison for steady loading calculations. *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, 24, 1.
- [4] Galvani, P. A., Sun, F., Turkoglu, K. (2016). "Aerodynamic modeling of NREL 5-MW wind Turbine for nonlinear control system design: A case study based on real-time nonlinear receding horizon control". *Aerospace*, 3(3), 27.
- [5] Heier, S. (2014). *Grid integration of wind energy: onshore and offshore conversion systems*. John Wiley & Sons.
- [6] Johnson, D. A., Gu, M., Gaunt, B. (2016). "Wind turbine performance in controlled conditions: BEM modeling and comparison with experimental results". *International Journal of Rotating Machinery*, Article ID 5460823.
- [7] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G. (2009). Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development (No. NREL/TP-500-38060). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- [8] Khan, J., & Iqbal, T. (2009). Analysis of a small wind-hydrogen stand-alone hybrid energy system. *Applied Energy*.
- [9] Mikati, M., Santos, M., Armenta, C. (2012). "Modelado y simulación de un sistema conjunto de energía solar y eólica para analizar su dependencia de la red eléctrica." *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 9(3), 267-281.
- [10] Mikati, M., Santos, M., Armenta, C. (2013). "Electric grid dependence on the configuration of a small-scale wind and solar power hybrid system". *Renewable energy*, 57, 587-593.
- [11] NREL, National Wind Technology Center, 1 March 2012. [Online]. Available: <https://wind.nrel.gov/forum/wind/viewtopic.php?t=582>. [Accessed 2020 December 2020].
- [12] Rolan, A., Luna, A., Vazquez, G., Aguilar, D., Azevedo, G. (2009, July). Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator. In: *2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (pp. 734-739). IEEE.
- [13] Shabestari, P. M., Mehrizi-Sani, A. (2020). Frequency response improvement of PMSG wind turbines using a washout filter. *Energies*, 13(18), 4797.
- [14] Sierra-García, J. E., Santos, M. (2020). "Performance analysis of a wind turbine pitch neurocontroller with unsupervised learning", *Complexity*, Article ID 4681767

- [15] Sierra-García, J. E., Santos, M. (2020). “Exploring reward strategies for wind turbine pitch control by reinforcement learning”. *Applied Sciences*, 10(21), 7462.
- [16] Tomás-Rodríguez, M., Santos, M. (2019). “Modelling and control of floating offshore wind turbines”. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 16(4), 381-390.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.e>)

# ESTIMACION DEL NIVEL DE ESTRES HIDRICO EN FRUTALES MEDIANTE TÉCNICAS MACHINE LEARNING PARA APLICACIÓN EN SISTEMAS DE RIEGO INTELIGENTES

Juan D. González-Teruel<sup>1</sup>, Victor Blanco<sup>3</sup>, Pedro José Blaya-Ros<sup>2</sup>, Rafael Domingo<sup>2</sup>, Fulgencio Soto-Valles<sup>1</sup>, Roque Torres-Sánchez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Cartagena, Dpto. Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Electrónica, [juando.gonzalez@upct.es](mailto:juando.gonzalez@upct.es); [pencho.soto@upct.es](mailto:pencho.soto@upct.es); [roque.torres@upct.es](mailto:roque.torres@upct.es)

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Cartagena, Dpto. Ingeniería Agronómica, [pedro.blaya@upct.es](mailto:pedro.blaya@upct.es); [rafael.domingo@upct.es](mailto:rafael.domingo@upct.es)

<sup>3</sup>Department of Horticulture, Tree Fruit Research and Extension Center, Washington State University, Wenatchee, WA 98801, USA, [victor.blanco@wsu.edu](mailto:victor.blanco@wsu.edu)

## Resumen

*El agua es un bien escaso, especialmente en las regiones áridas y semiáridas. Este es el caso de la Cuenca Mediterránea, donde sus condiciones demográficas y climáticas la hacen idónea para el cultivo de frutas y hortalizas, demandando un volumen mayor de recursos hídricos. Las estrategias de riego deficitario se han mostrado exitosas, pero resulta primordial el control del estrés hídrico de los cultivos. La medida directa del mismo se encuentra actualmente asociada al potencial hídrico de tallo a mediodía, cuya medida es costosa en tiempo y labores asociadas. A nivel agrario sería interesante definir unos niveles cualitativos del estrés hídrico del cultivo y poder estimarlos a partir de variables cuya medida sea automatizable, de manera que se puedan implementar sistemas de riego inteligente basados en las necesidades hídricas del cultivo. En este trabajo se presenta un estudio preliminar para la obtención de un modelo capaz de predecir cinco niveles de estrés del cultivo a partir de los datos temporales de potencial matricial y contenido volumétrico de agua en el suelo y de diferentes variables agro-climáticas. Se han evaluado múltiples algoritmos de Machine Learning, obteniéndose una precisión máxima en la estimación del 72,4 %.*

**Palabras clave:** Machine Learning, riego deficitario, estrés hídrico, riego inteligente.

## 1 INTRODUCCIÓN

La escasez de agua es un problema generalizado que se agudiza bajo condiciones de clima árido y semiárido. El informe de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) “Climate Smart Agriculture

Sourcebook” [1] estima para el año 2050 un incremento de la población mundial del 30 % (incremento de dos mil millones de personas) que requerirá de un aumento de la producción agrícola del 60 % para asegurar una demanda creciente de alimentos y establecer una cierta seguridad alimentaria. Este incremento en la producción agrícola de alimentos estará afectado significativamente por los efectos adversos del cambio climático que pueden empeorar la situación, como son el aumento de la temperatura y reducción de la precipitación y de los recursos hídricos disponibles [2]. En gran parte de la Cuenca Mediterránea, región caracterizada por un clima semiárido, el sector agrícola es el principal demandante de los recursos hídricos disponibles y debe convivir con la escasez de agua [3], afrontando en muchas ocasiones importantes recortes en las asignaciones de agua disponible para riego. Concretamente, la Cuenca del Segura afronta anualmente un déficit hídrico medio de 460 hm<sup>3</sup> que afecta a 2.700.000 ha de regadío [4].

Estos desequilibrios hídricos justifican la búsqueda de nuevas soluciones que mantengan e incluso incrementen las altas eficiencias del uso del agua y las producciones obtenidas con la modernización de sus regadíos. Consecuentemente, se asume globalmente que las soluciones deben fomentar un uso más eficiente del agua y la energía, para lo que las estrategias de riego deficitario han resultado ser una herramienta muy útil [5], junto a los riegos de precisión basados en la monitorización del continuo suelo-planta-atmósfera con sensores [6].

En relación a la reducción de los consumos de agua y el uso más eficiente, los esfuerzos deben centrarse en maximizar la productividad del agua más que en incrementar la producción [7], ya que no es posible,

en la mayoría de casos, poder satisfacer las necesidades hídricas máximas de los cultivos. De hecho, muchas comunidades de regantes españolas disponen de una dotación de riego para toda la campaña muy por debajo de los requerimientos teóricos. En estas condiciones, la distribución del riego a lo largo del ciclo de cultivo debe realizarse de manera que resulte efectiva en aliviar el estrés en las fases fenológicas más sensibles [8], [9]. Este es el objetivo de las estrategias de Riego Deficitario Controlado (RDC), que consisten en aportar un volumen de agua inferior a las necesidades teóricas, reduciendo el riego sólo en períodos del ciclo de cultivo donde el efecto sobre el rendimiento y calidad de la cosecha sea mínimo (períodos no críticos). En este sentido, resulta vital conocer el nivel de estrés hídrico al que está sometido el cultivo y el que puede soportar en cada fase fenológica.

El método más aceptado para la determinación del estado hídrico de los cultivos es la medida del potencial hídrico de tallo a mediodía,  $\psi_{stem}$ , con cámara de presión [10]. Sin embargo, se trata de un método destructivo y costoso en tiempo y labores asociadas. De forma alternativa, y con objeto de facilitar y automatizar la obtención del mismo, se ha estudiado la relación que pudieran tener ciertas variables agro-climáticas, como la temperatura del aire, la radiación solar, el Déficit de Presión de Vapor (DPV) o la Evapotranspiración de Referencia (ET<sub>o</sub>) con el  $\psi_{stem}$ , obteniéndose una correlación limitada [11], [12]. Intrigliolo y Castel [12] también buscaron una relación entre  $\psi_{stem}$  y el potencial matricial del suelo,  $\psi_{soil}$ , medido con sensores Watermark, encontrando cierta correlación entre ambas variables, pero con una alta dispersión, especialmente para  $\psi_{soil} > -45$  kPa. El potencial matricial o mátrico del agua en el suelo representa la fuerza con la que el agua es atraída por la superficie de las partículas sólidas del suelo, así como la fuerza de atracción entre las propias moléculas de agua. Martí et al. [13] utilizaron redes neuronales artificiales (ANN) para estimar el valor de  $\psi_{stem}$  a partir de un conjunto limitado de datos de variables climáticas y contenido de agua en el suelo, obteniendo un coeficiente de determinación de 0,926, mientras que Valdés-Vela et al. [14], a partir de las mismas variables, establecieron un enfoque diferente aplicando reglas fuzzy, lo que permitió discretizar las variables de entrada del sistema en clases cualitativas, haciendo su interpretación más accesible.

En este trabajo se plantea un enfoque inverso al de Valdés-Vela et al. [14], utilizando el valor continuo de variables climáticas y de contenido y potencial matricial del suelo para estimar no el valor exacto de  $\psi_{stem}$ , sino un nivel de estrés cualitativo del cultivo en base a un informe emitido por un experto a partir de  $\psi_{stem}$  medido y de la evolución de las distintas

variables climáticas y de suelo. El objetivo es, por tanto, obtener un modelo capaz de sustituir al experto, que estime un nivel de estrés cualitativo del cultivo a partir de variables cuya medida se pueda automatizar. En este estudio se presenta una primera aproximación al enfoque planteado, donde se evalúa la capacidad de una colección de algoritmos de Machine Learning para estimar el nivel de estrés de un cultivo frutal a partir de los datos temporales de variables agro-climáticas y de contenido y potencial matricial del suelo.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

#### 2.1.1 Descripción del cultivo y estrategias de riego

El experimento se llevó a cabo en una finca comercial de 0,5 ha de extensión localizada en Jumilla, Murcia, España (38° 8'N; 1°22'W, altitud 670 m) desde mayo de 2015 hasta agosto de 2018 en cerezos (*P. avium* L. "Prime Giant") adultos con 15 años, injertados en rizoma SL64 y con las variedades "Early Lory" y "Brooks" como polinizadores.

El método de riego empleado fue por goteo, con una línea de goteros por cada línea de árboles y tres emisores autocompensantes de 4 L h<sup>-1</sup> por árbol. El riego fue aplicado desde marzo hasta noviembre. Se aplicaron cinco tratamientos de riego diferentes, con dos repeticiones cada uno: (i) tratamiento de control (CTL), regado para satisfacer la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) máxima a lo largo del periodo de crecimiento (110 % ET<sub>c</sub>); (ii) tratamiento de déficit sostenido (DS), regado al 85 % de la ET<sub>c</sub> durante pre-cosecha y post-cosecha, a excepción de los 15-20 días después de la primera cosecha (diferenciación floral), donde el riego correspondió al 100 % de la ET<sub>c</sub>; (iii) dos tratamientos de riego deficitario controlado: RDC-1, regado al 90 % durante pre-cosecha, 100 % en diferenciación floral y 65 % de la ET<sub>c</sub> durante post-cosecha; y RDC-2, al 100 % durante pre-cosecha y diferenciación floral y al 55 % de la ET<sub>c</sub> durante post-cosecha y (iv) tratamiento agricultor (AGR), regado de acuerdo a la práctica normal del agricultor local, que consiste en regar por encima de los requerimientos hídricos del cultivo durante pre-cosecha y aplicar un déficit hídrico según su experiencia durante la post-cosecha.

#### 2.1.2 Medida de variables agro-climáticas

Para el estudio se utilizaron variables climáticas como temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar y velocidad del viento, cuyos valores medios horarios fueron obtenidos a partir de una estación meteorológica cercana a la instalación

experimental, perteneciente al Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR; <http://crea.uclm.es/siar/datmeteo/>). A partir de la temperatura y de la humedad relativa del aire se calculó el DPV, de acuerdo a [15].

### 2.1.3 Estado hídrico del suelo

El suelo del sitio en estudio es moderadamente pedregoso y presenta una textura franco-arenosa, con una distribución del tamaño de partículas de 67,5 % arena, 17,5 % limo y 15 % arcilla. El agua de riego, procedente de pozo, presentó una conductividad eléctrica (EC) media de  $0,8 \text{ dS m}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$ . El contenido volumétrico de agua en el suelo,  $\theta_v$ , se obtuvo para cada repetición a una profundidad de 20, 40 y 70 cm, utilizando sensores dieléctricos Enviroscan (Sentek Pty. Ltd., Adelaide, Australia). Se instaló un tubo de acceso por cada repetición, localizado a 0,23 m del emisor de riego y a 1,5 m del tronco del árbol. Asimismo, se obtuvo el valor del potencial matricial del suelo,  $\psi_{\text{soil}}$ , en cada repetición a 25 y 50 cm de profundidad utilizando sensores Decagon MPS6 (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA), localizados igualmente a 0,23 m del emisor de riego. Tanto  $\theta_v$  como  $\psi_{\text{soil}}$  fueron registrados por un datalogger Campbell Scientific CR1000 (CampbellScientific, Logan, UT, USA), programado para medir cada 30 s y el proporcionar el valor medio cada 10 min.

### 2.1.4 Medida del potencial de tallo a mediodía

$\psi_{\text{stem}}$

El potencial hídrico de tallo a mediodía,  $\psi_{\text{stem}}$ , se midió aproximadamente cada 10 días con una cámara de presión Scholander (Model 3000, Soil Moisture Equipment, Santa Barbara, CA, USA), de acuerdo a la metodología propuesta en [16]. Se seleccionaron hojas maduras y sanas del cuadrante norte cerca del tronco para evitar la exposición solar. Las hojas se cubrieron con bolsas de polietileno y papel de aluminio con al menos dos horas de antelación a la medida de  $\psi_{\text{stem}}$ . La medida de  $\psi_{\text{stem}}$  se llevó a cabo en los períodos fenológicos relevantes, es decir, desde abril hasta noviembre, ambos inclusive, realizándose dos medidas por repetición.

## 2.2 MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE ESTRÉS

### 2.2.1 Dataset

Para estimar el nivel de estrés del cultivo en base a variables agro-climáticas y de suelo se plantea un problema de clasificación basado en entrenamiento supervisado. Se consideran 10 entradas en el modelo, como son temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar, velocidad del viento, DPV,  $\psi_{\text{soil}}$  a 25

y 50 cm de profundidad y  $\theta_v$  a 20, 40 y 70 cm de profundidad. La salida del modelo es el nivel de estrés del cultivo, definido en cuatro posibles clases: 0, ausencia de estrés; 1, estrés hídrico incipiente; 2, estrés hídrico ligero; 3, estrés hídrico moderado y 4, estrés hídrico severo.

La frecuencia con la que se muestrearon las variables de suelo y clima y  $\psi_{\text{stem}}$  es dispar, debido a las propias limitaciones asociadas a la medida de este último y ya descritas con anterioridad. Dado que los niveles de estrés del cultivo fueron determinados por el experto a partir de cada medida de  $\psi_{\text{stem}}$ , su registro también presenta una periodicidad diferente a la de las variables climáticas y de suelo, que son las variables a partir de las cuales se pretende realizar la estimación del nivel de estrés. De esta forma, mientras que las variables de suelo y agro-climáticas fueron registradas cada 10 minutos, la estimación del nivel de estrés se obtuvo cada 15 días, aproximadamente. Así, entre cada registro del nivel de estrés se dispone de una sucesión de datos temporales de las variables de suelo y agro-climáticas. Como consecuencia, y ante la previsión de utilizar modelos de clasificación de Machine Learning para aprendizaje supervisado, ha sido necesario adaptar la dimensión entre los datos disponibles de las variables de entrada (suelo y agro-climáticas) y de salida del modelo (nivel de estrés). En este sentido, teniendo en cuenta que la dinámica del continuo suelo-planta-atmósfera presenta periodos transitorios dilatados, se considera que la evolución temporal de las variables físicas de entrada del sistema, y más concretamente la energía almacenada por las mismas a lo largo de un periodo de tiempo, puede ser un indicador relevante en la determinación del nivel de estrés del cultivo. Para representar dicha energía almacenada por las variables físicas, se ha calculado el área bajo la curva descrita por las mismas a lo largo de un periodo de tiempo  $T$ , utilizando un método de integración discreta basada en el cálculo de áreas trapezoidales, implementado en Matlab bajo la función *trapz*. Así, la sucesión de datos temporales de cada una de las variables de entrada queda reducida a un único valor representativo del periodo  $T$ .

Intuitivamente, el periodo de tiempo considerado en la integración de las variables de entrada es un factor a considerar, ya que a priori se desconoce la influencia que a corto y largo plazo puedan tener las mismas sobre la variable de salida. De esta forma, considerando  $T$  como el periodo de tiempo inmediatamente anterior al registro del nivel de estrés, se han definido de manera arbitraria tres valores para el mismo:  $T_1 = 6$  días,  $T_2 = 10$  días y  $T_3 = 30$  días. Dado que la fecha en la que se evaluó por primera vez el nivel de estrés del cultivo es solo 6 días posterior al inicio del registro de las variables



agro-climáticas y de suelo, al considerar  $T_2$  y  $T_3$  el tamaño del *dataset* se ve disminuido, ya que se pierden los ejemplos de las primeras semanas de ensayo. Teniendo en cuenta la pérdida de medidas por fallo de sensores y averías en el sistema de adquisición de datos, el número de ejemplos en el *dataset* es de 373, 366 y 351 para  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ , respectivamente. Los valores de las variables de entrada, una vez calculada su integral definida en  $T$ , fueron normalizados a valores en el intervalo  $[0,1]$ , correspondiendo 0 al valor original mínimo y 1 al máximo de cada variable en el *dataset*.

### 2.2.2 Modelos Machine Learning para estimar el nivel de estrés hídrico

Haciendo uso de la aplicación “Classification Learner” de Matlab se evaluaron todos los modelos disponibles en la misma para realizar la clasificación de los niveles de estrés, los cuales vienen enumerados en la Tabla 1. Los parámetros propios de cada algoritmo se mantuvieron por defecto.

Tabla 1: Modelos Machine Learning utilizados en el estudio.

Modelo	Variante
Árbol de decisión	Fino
	Medio
	Grueso
Análisis discriminante	Lineal
	Cuadrático
Support Vector Machine (SVM)	Lineal
	Cuadrático
	Cúbico
	Gaussiano fino
	Gaussiano medio
	Gaussiano grueso
K-Nearest Neighbours (KNN)	Fino
	Medio
	Grueso
	Coseno
	Cúbico
	Ponderado
Clasificadores agrupados	Boosted trees
	Bagged trees
	Subspace discriminant
	Subspace KNN
	RUSBoosted trees

Para evitar problemas de overfitting, se ha aplicado la técnica k-fold para realizar el cross-validation, que divide el *dataset* en *training set* (conjunto de entrenamiento) y *validation set* (conjunto de validación). Esta técnica divide el *dataset* en  $k$  *subsets* y realiza  $k$  iteraciones, de manera que en cada una de ellas asigna un *subset* diferente al *validation set* y realiza el entrenamiento con el resto de *subsets*.

Una vez finalizadas todas las iteraciones, la precisión del modelo se calcula como la media de las precisiones conseguidas en el *validation set* de todas las iteraciones. En este caso se han evaluado tres valores de  $k$  diferentes: 5, 15 y 50.

### 2.2.3 Evaluación de los modelos

Para evaluar la idoneidad de los modelos ensayados se ha recurrido a un indicador básico en problemas de clasificación, como es la precisión, definiéndose ésta como la relación entre el número de ejemplos que se han clasificado correctamente y el número total de los mismos:

$$\text{Precisión (\%)} = \frac{\text{Nº ejemplos clasificados correctamente}}{\text{Nº de ejemplos totales}} 100 \quad (1)$$

## 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 3.1 RELACIÓN TEMPORAL ENTRE LAS VARIABLES DE SUELO Y EL ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO

En la Figura 1 se presenta, a modo de ejemplo, la evolución temporal del potencial matricial del suelo medido a las profundidades de 25 y 50 cm en una de las repeticiones del tratamiento de riego CTL, desde finales de abril hasta finales de julio (período fenológico relevante), junto con los eventos de medida del nivel de estrés hídrico del cultivo. El potencial matricial del suelo se mide en unidades de presión y se suele expresar en valores negativos que representan la oposición del suelo al movimiento del agua. Se observa que, a 25 cm,  $\psi_{soil}$  generalmente presenta valores superiores que a 50 cm, lo que indica una mayor facilidad para extraer agua del suelo a 25 cm de profundidad. Esta diferencia puede deberse a una mayor compactación del suelo a medida que aumenta la profundidad, dado que el aumento de la densidad aparente del suelo aumenta su capacidad de retención de agua. No obstante, se registran valores de  $\theta_v$  superiores a 20 cm que a 40 cm de profundidad, lo que podría indicar que la diferencia de  $\psi_{soil}$  entre profundidades se debiera a una diferencia en la cantidad de agua disponible en el suelo como consecuencia del tiempo de infiltración.

Atendiendo a la relación entre los valores registrados de  $\psi_{soil}$  y los niveles de estrés hídrico del cultivo determinados por el experto, se observa que las dos primeras muestras de nivel de estrés coinciden con dos valles de  $\psi_{soil}$ , siendo el segundo (inmediatamente posterior al 13 de mayo) un tanto más acusado y generando un incremento del nivel de estrés, que asciende del nivel 2 al 3. Los dos siguientes eventos (previo y posterior al 27 de mayo)

vienen precedidos de un ligero restablecimiento del agua disponible en el suelo, volviendo el nivel de estrés al valor 2. Previo al 10 de junio se observa una caída de  $\psi_{soil}$  hasta aproximadamente -35 kPa en ambas profundidades. Sin embargo, la siguiente medida del nivel de estrés dio lugar a una reducción de éste con respecto a las medidas previas. A priori, el valor de  $\psi_{soil}$  en el instante en que se determina el nivel de estrés inmediatamente posterior al 10 de junio, no difiere mucho de otros casos anteriores en los que se habían obtenido un nivel de estrés 2 y la evolución temporal previa al 10 de junio de  $\psi_{soil}$  no sugiere que se vaya a producir una reducción del nivel de estrés, en base a la tendencia atisbada en los ejemplos anteriores. Por su parte, las últimas tres muestras de nivel de estrés mostradas en la Figura 1 vuelven a situarse en el nivel 2 y vienen precedidas de tendencias decrecientes de  $\psi_{soil}$ .

### 3.2. RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA ALMACENADA POR LAS VARIABLES FÍSICAS Y EL ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO

En la Figura 2 se muestran los diagramas de cajas y bigotes para diferentes variables de entrada del modelo en relación con los niveles de estrés hídrico del cultivo. Los valores de las variables de entrada se han calculado de acuerdo con el método descrito en la sección 2.2.1, teniendo en cuenta el período de integración  $T_3$ . Atendiendo a la mediana, la mayor diferenciación entre niveles de estrés está provista por la temperatura del aire, DPV y  $\psi_{soil}$ , aunque en el caso de este último, apenas existe diferenciación entre los niveles de estrés 0 y 1, y para ambos niveles se presentan numerosos datos atípicos. En general, se observa para todas las variables la existencia de una gran varianza en todos los niveles de estrés, algo más reducida en los niveles 3 y 4, aunque el nivel 4 no es representativo, ya que sólo existen 2 ejemplos en los que se haya llegado a dicho nivel de estrés. La alta varianza hace que se produzcan solapamientos entre niveles de estrés, por lo que, a pesar de apreciarse diferencias notables en la mediana entre niveles de estrés para ciertas variables, existen fronteras demasiado difusas entre los mismos.

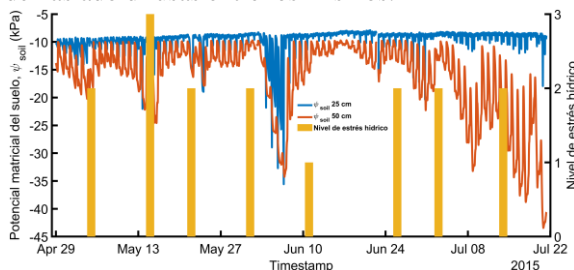


Figura 1: Evolución temporal de  $\psi_{soil}$  a 25 y 50 cm de profundidad y niveles de estrés obtenidos entre mayo y agosto de 2015.

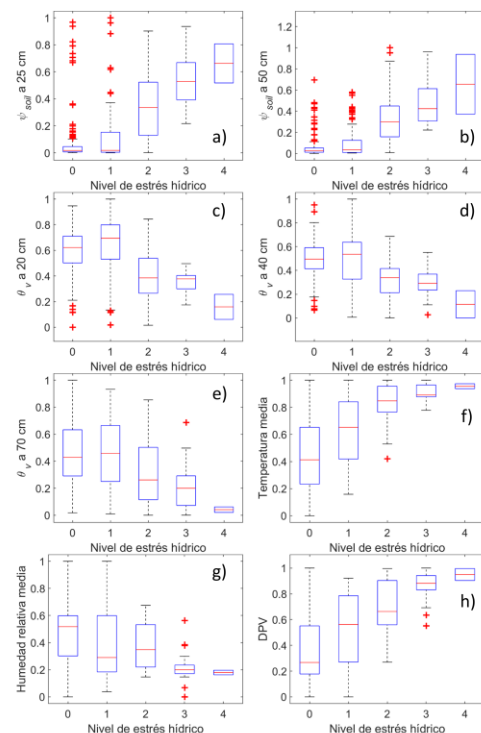


Figura 2: Diagrama de cajas y bigotes de los valores de energía normalizada almacenada por (a)  $\psi_{soil}$  a 25 cm, (b)  $\psi_{soil}$  a 50 cm, (c)  $\theta_v$  a 20 cm, (d)  $\theta_v$  a 40 cm, (e)  $\theta_v$  a 70 cm, (f) temperatura media del aire, (g) humedad relativa media del aire y (h) DPV para cada nivel de estrés hídrico del cultivo.

### 3.3. ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO

Tras aplicar los modelos descritos en la sección 2.2.2 para  $k = 5, 15$  y  $50$ , y para  $T_1, T_2$  y  $T_3$ , se muestra en la Tabla 2 el modelo con el que se ha conseguido la mayor precisión y el valor de la misma, de acuerdo a (1) para cada combinación de  $k$  y  $T$ . A excepción de la combinación  $k = 15, T_3$ , donde la mayor precisión se ha conseguido con un árbol de decisión medio, en el resto de los casos el modelo óptimo siempre es *Bagged trees*, también conocido como *Random Forest*. Los parámetros con los que se ha utilizado dicho modelo son: número máximo de bifurcaciones, 350; número máximo de predictores, 30; tasa de aprendizaje, 0,1 y dimensión del sub-espacio, 1.

No se observan diferencias significativas entre las precisiones logradas con las diferentes combinaciones de  $k$  y  $T$ , siendo la precisión máxima lograda de 72,4 % para  $k = 5$  y  $T_3$ . Para dicho caso, se presenta en la Figura 3 la tabla de verdad obtenida, donde aparecen la tasa de verdaderos positivos y falsos negativos. Se aprecia que el nivel de estrés 0 es

el que mayor tasa de acierto presenta, con un 89 % de los casos clasificados correctamente. El 11 % restante se distribuye en 10 % clasificado como nivel 1 y un 1 % como nivel 2. En cierto modo, este efecto viene favorecido por el hecho de que el nivel 0 es el que mayor representación tiene en el *dataset*, con casi un 50 %, mientras que las clases 1, 2, 3 y 4 poseen una representación de 28, 15, 6,5 y 0,6 %, respectivamente, lo que podría haber dado lugar a una “especialización” del modelo en la estimación del nivel 0. El nivel 2 presenta una tasa de verdaderos positivos del 54 %, habiéndose predicho la mayoría de los casos restantes como nivel 0. El nivel 2, en cambio, mejora la tasa de acierto del nivel 1, obteniéndose un 65 %, situándose la mayoría de falsos negativos en el nivel 1. En el caso del nivel 3, la tasa de acierto y de fallo se distribuye prácticamente por partes iguales, albergando el nivel 2 de manera exclusiva todos los falsos positivos. El nivel 4, como ya se citó anteriormente, no es representativo y, como consecuencia, el modelo no tiene capacidad de distinguirlo, asociándolo directamente al nivel inmediatamente inferior.

Tabla 2: Modelos óptimos y precisión lograda con los mismos, de acuerdo a (1), en la estimación del nivel de estrés del cultivo para diferentes combinaciones de  $k$  y  $T$ .

$k$	$T$		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$
5	Bagged trees (67,8 %)	Bagged trees (68,9 %)	Bagged trees (72,4 %)
15	Bagged trees (71,8 %)	Bagged trees (68,6 %)	Árbol de decisión Medio (69,5 %)
50	Bagged trees (68,4 %)	Bagged trees (67,5 %)	Bagged trees (71,5 %)

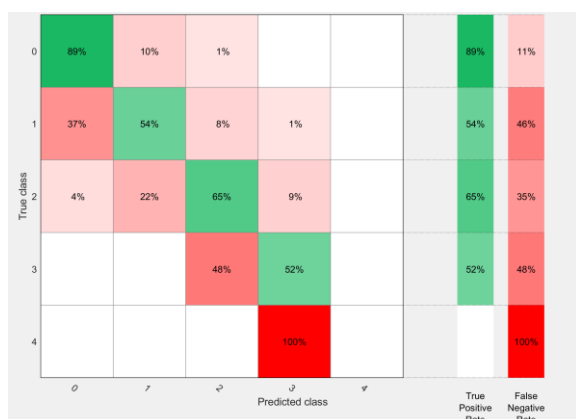


Figura 3: Tabla de verdad de la predicción del nivel de estrés hídrico con el modelo óptimo obtenido.

## 4 CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo un estudio preliminar para la estimación del nivel de estrés hídrico de cerezos adultos, sometidos a diferentes tratamientos de riego deficitario, a partir de la información temporal proporcionada por sensores de estado hídrico del suelo y de variables agro-climáticas. El nivel de estrés hídrico del cultivo ha venido determinado por un experto en base a las medidas de potencial hídrico de tallo a mediodía y de la evolución temporal del resto de variables físicas estudiadas. Dado que la medida del potencial hídrico de tallo es costosa en tiempo y labores, la periodicidad de su obtención es mucho más dilatada que la del resto de variables de suelo y agro-climáticas, por lo que para adaptar la información disponible a la hora de introducirla en un modelo de estimación, para cada muestra del nivel de estrés se ha definido un período de integración,  $T$ , inmediatamente previo a la obtención de la muestra, para el cual se ha calculado el área bajo la curva descrita por las diferentes variables de suelo y agro-climáticas. Se han evaluado múltiples modelos de Machine Learning para realizar la estimación del nivel de estrés hídrico del cultivo a partir de las modificadas variables de suelo y agro-climáticas. Finalmente, el modelo que mejor precisión ha obtenido es el *Bagged Trees* o *Random Forest* bajo el modo de *ensemble Bagging*, para  $k = 5$  y  $T_3$ , logrando una precisión de 72,4 %. El valor de  $k$  y del período de integración de las variables de entrada del modelo ( $T$ ) no se han mostrado excesivamente significativos en la precisión lograda por el modelo.

Se han observado dos posibles causas en la limitación de la precisión del modelo. Por un lado, la tabla de verdad presentada en la Figura 3 muestra una clara tendencia a la distribución de los falsos negativos entre los niveles contiguos al evaluado. Esto indica la existencia de una frontera difusa entre niveles de estrés que lleva al modelo a errar cuando se encuentra un ejemplo situado en la misma. Y, por otro lado, el método de adaptación del formato temporal de las variables de entrada mediante la integral definida en  $T$  de las mismas, tiene en cuenta la información temporal acumulada previa a cada muestra del nivel de estrés, pero no tiene en cuenta el orden en que se han sucedido los valores de las variables y, por tanto, la tendencia. Por lo tanto, en trabajos futuros se prevé trabajar con modelos adaptados a variables de entrada en formato de serie temporal o sucesiones y se revisará el tratamiento previo de los datos de las variables de entrada con el objetivo de reducir la difusividad de las fronteras entre niveles de estrés.

## Agradecimientos

Financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, el Ministerio de Educación y Formación Profesional y los Fondos Europeos Agrícolas de Desarrollo Rural, números de subvención: AGL2016-77282-C33-R, FPU17/05155, PID2019-106226-C22/AEI/10.13039/501100011033.

## English summary

### ESTIMATION OF THE WATER STRESS LEVEL IN FRUIT TREES USING MACHINE LEARNING FOR APPLICATION IN INTELLIGENT IRRIGATION SYSTEMS

*Water is a limited resource in arid and semi-arid regions. This is the case of the Mediterranean area, where its demographic and climatic conditions make it particularly prone to farming, demanding a major percentage of water resources. Deficit irrigation strategies have proved to be successful, but it is essential to control crop water stress. The measurement of crop water stress is currently associated with midday stem water potential, which is very time-consuming. At an agricultural perspective, it would be interesting to define qualitative levels of crop water stress and to be able to estimate them from variables whose measurement can be automated, so that intelligent irrigation systems can be implemented based on the water needs of the crop. In this work we present a preliminary study to obtain a model capable of predicting five levels of crop water stress from time data of water potential and volumetric water content in the soil and different agro-climatic variables. Multiple Machine Learning algorithms have been evaluated, obtaining a maximum estimation accuracy of 72.4%.*

**Keywords:** Machine Learning, deficit irrigation, crop water stress, smart irrigation.

## Referencias

- [1] J. M. Faurès *et al.*, *Climate-Smart Agriculture Sourcebook*. Rome: FAO, 2013.
- [2] IPCC, "Climate change and water technical paper of the intergovernmental panel on climate change," Geneva, 2008.
- [3] L. Santos Pereira, I. Cordery, and I. Iacovides, *Coping with water scarcity: Addressing the challenges*. Springer Netherlands, 2009.
- [4] EGDH, "Estudio General Demarcación Hidrográfica del Segura." Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia, 2007.
- [5] M. C. Ruiz-Sanchez, R. Domingo, and J. R. Castel, "Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain," *Spanish J. Agric. Res.*, vol. 8, no. S2, pp. 5–20, 2010.
- [6] J. Vera, I. Abrisqueta, W. Conejero, and M. C. Ruiz-Sánchez, "Precise sustainable irrigation: a review of soil-plant-atmosphere monitoring," *Acta Hortic. (in Press.)*, 2016.
- [7] E. Fereres and M. A. Soriano, "Deficit irrigation for reducing agricultural water use," *J. Exp. Bot.*, vol. 58, no. 2, pp. 147–159, 2007.
- [8] N. Katerji, M. Mastrorilli, and G. Rana, "Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis," *Eur. J. Agron.*, vol. 28, no. 4, pp. 493–507, May 2008.
- [9] R. G. Evans and E. J. Sadler, "Methods and technologies to improve efficiency of water use," *Water Resour. Res.*, vol. 44, 2008.
- [10] K. A. Shackel *et al.*, "Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees," *Horttechnology*, vol. 7, no. 1, pp. 23–29, 1997.
- [11] M. F. Ortuño *et al.*, "Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees," *Plant Soil*, vol. 279, no. 1–2, pp. 229–242, Feb. 2006.
- [12] D. S. Intrigliolo and J. R. Castel, "Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum," *Irrig. Sci.*, vol. 23, no. 2, pp. 93–102, May 2004.
- [13] P. Martí, M. Gasque, and P. González-Altozano, "An artificial neural network approach to the estimation of stem water potential from frequency domain reflectometry soil moisture measurements and meteorological data," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 91, pp. 75–86, Feb. 2013.
- [14] M. Valdés-Vela, I. Abrisqueta, W. Conejero, J. Vera, and M. C. Ruiz-Sánchez, "Soft computing applied to stem water potential estimation: A fuzzy rule based approach," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 115, pp. 150–160, Jul. 2015.
- [15] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, "Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements.," in *FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome.*, Food and Agriculture Organization, Ed. Rome, 1998.
- [16] H. McCutchan and K. A. Shackel, "Stem-water Potential as a Sensitive Indicator of

Water Stress in Prune Trees (*Prunus domestica* L. cv. French),” *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 117, no. 4, pp. 607–611, 1992.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# Gene variant design space for biosensor-based pathway dynamic regulation

María Camarena<sup>a</sup>, Yadira Boada<sup>a,b</sup>, Jesús Picó<sup>a</sup>, Pablo Carbonell<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Synthetic Biology and Biosystems Control Lab, I.U. de Automática e Informática Industrial (ai2).

Universitat Politècnica de València, Camí de Vera S/N, 46022, Valencia, Spain.

<sup>b</sup> Centro Universitario EDEM, Escuela de Empresarios, Muelle de la Aduana s/n, 46024, Valencia, Spain.

E-mails: macape7@etsii.upv.es, yaboa@upv.es, jpico@ai2.upv.es, pjcarbon@isa.upv.es

## Abstract

*Inside a cell, protein, production and biosensor pathways can be genetically engineered within a dynamic regulation architecture that provides robustness to cell factories. Here we investigated how the selection of gene variants and their associated expression efficiency and kinetic parameters can lead to a wide diversity of dynamic responses in terms of protein or metabolite production. Results show that there is a trade-off between gene expression efficiency and pathway performance, and it can be eventually related to the evolutionary fingerprint of each gene variant. Therefore, the organism source of gene variants is a factor that needs to be considered in the design of dynamic regulation for genetic circuits.*

**Keywords:** dynamic regulation, biosensors, cell factories, biomanufacturing.

## 1 INTRODUCTION

The current changing economic and structural context promotes constant evolution in all industrial sectors. Existing industries must face these changes, and new industries are structured on the basis of the specific geopolitical scenario. Biomanufacturing aims to be an industrial model of biochemical production that adapts to market needs while respecting established institutional frameworks. Industrial processes based on biomanufacturing by means of biological processes not only provide viable biological models at mass production levels, but also offer cheaper and less risky results at a smaller-scale, as these processes are intrinsic to biological production [13]. This type of industry based on biomanufacturing boosts the bioeconomy, which acts as a nexus between economy and ecology, ensuring economic and technological development while preserving and maintaining the planet's natural conditions. The development of the bioeconomy is underway in more than 50 countries [5], and the industrial processes that promote it are expanding, enhancing the current market opportunities.

Metabolic engineering is based on the modification of organisms to engineer metabolic pathways to produce substances that would not be produced biologically in

that organism (such as drugs or substances of pharmacological and commercial interest). This is why metabolic engineering is usually linked to genetic engineering, whereby the DNA of organisms is uniquely altered to express the genes of interest in the most optimal way possible. By using genetic modification and metabolic engineering [8], production of metabolites of interest can be achieved by dynamically adjusting cellular metabolic parameters, such as, the kinetic constant or affinity rate of target metabolite [7]. However, maintaining a homogeneous and controllable production of a metabolite in a biofactory is not so simple. This is due to the time-varying and non-homogeneous conditions of these production pathways inside the cell, which are difficult to control by dynamic adjustments. In [2], a biosensor based model was proposed to measure the naringenin production as a target metabolite using bacteria as a host microorganism. The biosensor is based on kaempferol, which is another metabolite used as a proxy of the naringenin level. To model a metabolic pathway dynamics, the kinetic parameters of a single enzyme variant for each enzyme from the naringenin synthesis pathway are used.

Here we describe a new approach that takes into account the kinetic parameters of different enzyme variants that catalyses kaempferol from naringenin. Considering both enzyme parameters and phylogenetic distances between host organisms (bio-producers), we obtained the design space for tuning the biosensor dynamic.

## 2 OBJECTIVE OF THE STUDY

Naringenin is a flavonoid with broad pharmaceutical interest due to its antioxidant, anti-inflammatory, cardioprotective, antitumor properties, among others [10], and herein lies its pharmaceutical and commercial interest. The construction of viable genetic circuits capable of producing significant amounts of naringenin must consider several factors. In [2], the circuit itself considers the possibility of monitoring naringenin production by synthesizing a biosensor that consumes naringenin to provide a control signal. Therefore, there must be a trade-off between the amount of naringenin consumed and the kaempferol produced.



The objective of this study is to assess how the variation of three fundamental parameters on which the production of the biosensor will depend can impact naringenin production. The aim is to identify the proper conditions between kaempferol production and naringenin degradation. In this regard, the two enzymes involved in the synthesis of kaempferol from naringenin will be considered. For both F3H and FLS, enzymes of study as shown in Figure 1, the parameters to be analyzed are:  $K_m$ ,  $k_{cat}$  and the F3H and FLS enzyme concentration respectively. The enzyme concentration depends on the efficiency of gene expression in the host organism. This expression efficiency can depend on the phylogenetic distance from the organism from which the gene originates to the host organism, into which the gene is to be inserted [6]. This point will be discussed in more detail in section 3.2 below.

For this purpose, we assumed a scenario where the two genes that synthesize both enzymes are varying, while all other genetic circuits remain constant. Since experimental of enzyme parameters is not complete for all known enzyme variants, in this study we intend to sample the design space defined by the parameter ranges of each enzyme and evaluate their dynamic responses. In summary, the object of this study is to assess the effect produced on a regulated system described in [2] by varying the three parameters mentioned above, in order to establish a relationship between enzymatic efficiency (independent of phylogeny) and gene expression efficiency (directly dependent on taxonomic distance).

### 3 MATERIALS AND METHODS

#### 3.1 MODELING THE PATHWAY DYNAMIC REGULATION ARCHITECTURE

Figure 1 shows the naringenin pathway, the biosensor and the antithetic controller to dynamic naringenin regulation. This genetic is considered our cell factory inside the host organism. Our approach assumes that for every  $k$ -cell, the kinetics of the enzyme-catalyzed reactions involved in the naringenin metabolic pathway from  $L$ -tyrosine to naringenin can be modeled as the set of rate equations 1 obtained from mass balance equations and considering dilution due to cell growth rate  $\mu$ .

$$\frac{d[S_0^k]}{dt} = V_0 - V_{S_0} - \mu[S_0] \quad (1)$$

$$\frac{d[P_i^k]}{dt} = V_{S_i} - V_{P_i} - \mu[P_i] \quad (2)$$

For each reaction,  $V_j$  are the fluxes (molecules·min<sup>-1</sup>).  $S_i$  and  $P_i$  is the number of molecules of the substrates and products in the  $i$

step of the pathway, respectively, i.e.,  $L$ -tyrosine,  $p$ -coumaric acid,  $p$ -coumaroyl-CoA, naringenin chalcone, and naringenin, which is the product of interest.

We assume that the flux  $V_0$  corresponding to the precursor  $L$ -tyrosine remains constant, and all fluxes  $V_j$  obey Michaelis-Menten kinetics [2] as follows:

$$V_j = k_{cat_j} [E_j] \frac{[S_j]}{K_{m_j} + [S_j]} \quad (3)$$

where  $k_{cat_j}$  is the catalytic rate of each enzyme (min<sup>-1</sup>), and  $K_{m_j}$  the Michaelis-Menten constant for each substrate. The enzyme kinetic parameters were obtained from Brenda [11].

The amount of the enzymes corresponding to each step of the production pathway, i.e. TAL, 4CL, CHI and CHS [2], were selected for a nominal case so that the precursor flux  $V_0$  yields 1 g L<sup>-1</sup> of naringenin as in [2].

Similarly, for the biosensor, and using the same assumptions as for the metabolic pathway, the kinetics of the enzyme-catalyzed reactions involved in the metabolic pathway from naringenin to kaempferol, i.e. FLS and F3H, were modeled as:

$$\frac{d[Di^k]}{dt} = V_N - V_{Di} - \mu[Di] \quad (4)$$

$$\frac{d[Ka^k]}{dt} = V_{Di} - \mu[Ka] \quad (5)$$

where  $V_j$  are the fluxes of each reaction (molecules·min<sup>-1</sup>),  $Di$  is Dihydrokaempferol, and  $Ka$  is kaempferol, which is the effector flavonoid measured by a biosensor promoter. As for the pathway model 1, the flux  $V_{Di}$  obeys Michaelis-Menten kinetics:

$$V_N = k_{catF3H} [F3H] \frac{[N]}{K_{mN} + [N]} \quad (6)$$

$$V_{Di} = k_{catFLS} [FLS] \frac{[Di]}{K_{mDi} + [Di]} \quad (7)$$

The kinetic parameters were also obtained from the Brenda database.

In Figure 1, the biosensor uses a Qdor protein and a qdoR-PqdoI transcription factor that inhibit the production of the anti- $\sigma$  molecules [12]. Kaempferol captures the QdoR transcription factor and inactivates it. Further details of the transcription/translation (TX/TL) model are given in [2].

Finally, for the controller in Figure 1, we consider a model based on ordinary differential equations for the antithetic feedback integral controller proposed in

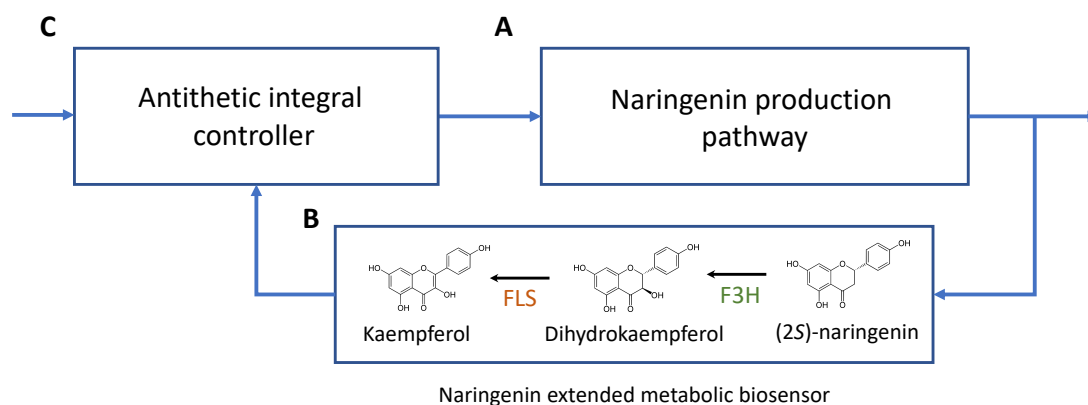


Figure 1: Schema of the dynamically regulated cell factory for naringenin production. A. The production pathway in the forward chain converts *l*-tyrosine into (2*S*)-naringenin, the target product. B. The reverse chain consists of a biosensor that contains two enzymes, FLS and F3H, that convert naringenin into kaempferol, a molecule that can be detected by means of transcription factor QdoR. C. An antithetic integral controller as in [2] regulates the overexpression of enzymes in the production pathway in order to cope with perturbations such as variations in availability of precursors.

[1, 9]. The antithetic mechanism relies on the mutual annihilation between  $\sigma$  protein and its co-factor anti- $\sigma$ , leading to an integral-like behavior controller.

This predictive model has been used in this study varying three main parameters which are explained in the following sections.

### 3.2 EFFECT OF GENE VARIANT SELECTION ON THE DYNAMIC RESPONSE

As mentioned in section 2, there is a taxonomic relation between the efficiency of the enzyme expression in the host organism and the organism source of the gen. The efficiency of gene expression is determined by many factors, including the solubility of the protein in the organism, the underlying non-toxicity of its production in the host, the maximum amount of protein produced, among other factors [6].

Two organisms having similar genomes (whose taxonomic distance is short) present similar phenotypes. However, the greater the taxonomic distance between two organisms, the more differences there will be in the expression of their genes, resulting in different cellular environments. Therefore, to achieve efficient enzyme expression it is reasonable to consider that the more genetically similar two organisms are, the better the protein is expressed and the higher concentrations can be reached. For this reason, and in order to analyze the trade-off between efficiency of expression and performance of the regulation circuit, we assumed that the closest taxonomic sources should express more enzyme concentration in the host [6]. In this study, we have considered differences among the concentration parameters as function of the enzyme variant for each enzyme involved in the target path-

way, i.e. the kaempferol metabolic pathway.

Table 1 list the kinetic parameters for both enzymes F3H and FLS, and their respective taxonomic distances between the host and the target organism from they were obtained. Kinetic parameters were collected from BRENDA and Uniprot databases. As shown, for  $K_{cat}$  values, the available information is scarce. The simulations were therefore performed using a constrained working range for both  $k_{cat}$  and  $K_m$ , as explained in the next section. It should be noted that these kinetic values do not depend on the affinity between the host organism and the gene source.

Taxonomic distances have been calculated using the enzyme selection tool Selenzyme [4], which allows the entry of both host and enzyme reaction of study. This is considered to be useful for the implementation of more structurally robust genetic circuits. Here, we have introduced the *Escherichia coli* organism entry as a host, but it should be noted that similarly other hosts and organism families could be used for future studies. Table 1 illustrates how the kinetic constants vary depending on the organism to be considered. In the study, a concentration range was also performed. The concentrations of both enzymes were varied in a range from to determine the effects produced on kaempferol production. This will be discussed in more detail in section 4.

Table 1: FLS parameters of interest

FLS variants				
Enzyme variant	Organism	Phylogenetic Distance	Km	Kcat
Trifunctional UDP-glucose 4,6-dehydratase/UDP-4 -keto-6-deoxy-D-glucose	Arabidopsis thaliana	29	0,116	2860
Flavonol synthase/ flavanone 3-hydroxylase	Arabidopsis thaliana	29	0,059	-
Jasmonate-induced oxygenase 2	Arabidopsis thaliana	29	0,0093	-
Bifunctional dihydroflavonol 4-reductase/flavanone 4-reductase	Pyrus communis	30	0,001	-
Flavonol synthase/ flavanone 3-hydroxylase	Citrus unshiu	31	0,045	-
Leucoanthocyanidin dioxygenase	Zea mays	29	0,0584	6,6
Bifunctional dihydroflavonol 4-reductase/flavanone 4-reductase	Malus domestica	31	0,01	-
F3H variants				
Enzyme variant	Organism	Phylogenetic Distance	Km	Kcat
Flavanone 3-dioxygenase 3	Oryza sativa subsp. japonica (Rice)	30	0,0063	-
Flavone synthase	Petroselinum crispum	31	0,005	-
Naringenin;2-oxoglutarate 3-dioxygenase (Fragment)	Petunia hybrida	29	0.0056	-
Naringenin;2-oxoglutarate 3-dioxygenase	Arabidopsis thaliana	29	0,024	-
flavanone 3-dioxygenase	Artemisa annua	31	0,045	-

## 4 RESULTS

All computational simulations were performed using the metabolic pathway model in equations (4-7), and the model in [2] for the antithetic controller dynamics.

To implement the enzymatic analysis, the study has been approached in two ways: considering the differences between kinetic parameters and, on the other hand, considering the difference in F3H and FLS concentrations underlying the taxonomic distance between host organism and gene-provider.

In terms of phylogeny, the sequences of the enzymes F3H and FLS (coded by the biosensor genes) from organisms phylogenetically closer to the host organism (*E. coli*) are assumed to be the most efficient in terms of expression. As a matter of fact, the similarity between genes from closer organisms is greater than between taxonomically distant organisms, so they will be better candidates in terms of structural viability [3]. In other words, if the host and target organisms are phylogenetically close, the enzyme expression in the host is assumed to be greater and thus more protein concentrations will be reached. For this reason, considering more than one possible enzyme variant for the F3H and FLS enzymes is highly relevant in both naringenin degradation and kaempferol production. To determine the effect of the different variants, we worked in a range of different concentrations for each of the enzymes and, as expected, we obtained variations in both naringenin degradation and kaempferol production, being greater the higher the concentration of protein synthesized.

Regarding enzyme kinetics, multiple kinetic scenarios will be simulated taking into account different possibilities of values depending on the enzyme variant, and several data (kaempferol production) can be obtained generating a range of values for the kinetic parameters of both enzymes. Kaempferol production is used as a substrate for the biosensor explained in [2], high values of this enzyme should be avoided in order to diminish biosensor leakage of the target. Focusing the study on the variation of kaempferol production was therefore considered relevant.

For the study, kinetic variations of F3H and FLS have been taken into account in order to evaluate the amount of kaempferol produced in relation to the  $k_{cat}/K_m$  ratios of both enzymes. The kinetic parameters of both enzymes have been assumed to be equivalent, i.e. the efficiency calculated as  $k_{cat}/K_m$  is the same for both enzymes in each simulation performed.

The study data were obtained by using different values of the enzymatic parameters of F3H and FLS enzymes into the dynamic model proposed in [2]. The values of  $4K_m$  have been varied from 0.001 to 1 mM. The values of  $k_{cat}$  have been varied from 0.01 to  $10\text{ s}^{-1}$ .

Figure 2 shows how kaempferol production depends on the biosensor enzymatic efficiency. Enzymatic efficiency which is the ratio  $k_{cat}/K_m$ . Results show a kinetic efficiency range between 0.7 and 1, where kaempferol production increases.  $k_{cat}\text{ (s}^{-1}\text{)}$  must be at least in the order of  $10^3$  higher than  $K_m\text{ (mM)}$  to obtain a relevant increase in kaempferol production, and thus biosensor. Therefore, this range is considered decisive for selecting a variant enzyme pair to show good sampling results.

In Figure 3, the variation of naringenin production (g/L) in relation to the variation of kaempferol production (g/L) is shown. It can be seen that the initial and final naringenin amounts are saturated ( $1.0265\text{ g/L}$  maximum;  $0.016\text{ g/L}$  minimum), so there is only one range of kaempferol that actually affects naringenin production.

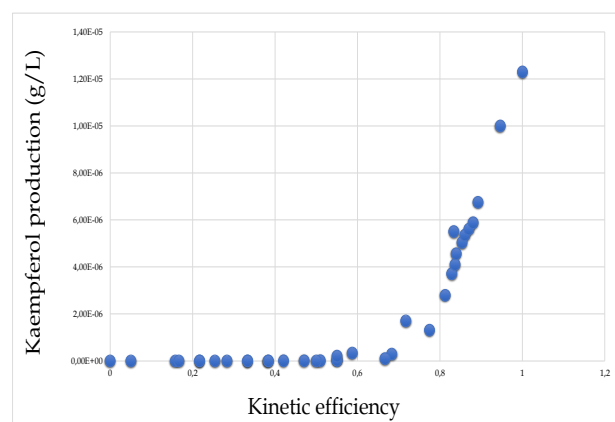


Figure 2: Kaempferol production (g/L) depending on enzymatic efficiency based on  $k_{cat}/K_m$  ratio

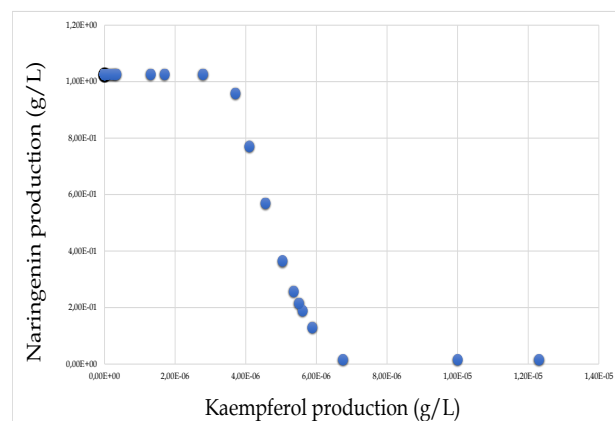


Figure 3: Naringenin production (g/L) depending on Kaempferol production (g/L)

In other words, there is a range where naringenin production is affected as a result of the controller action. The conversion of naringenin as a substrate into kaempferol must be carefully tuned and, whenever possible, to interfere as little as possible with narin-

genin production in order to generate a representative level of sensing.

As the enzymatic efficiency increases, the amount of naringenin consumed to generate kaempferol is considerably small until the amount of kaempferol reaches  $4 \times 10^{-6} \text{ g/L}$ . However, when productions above  $5 \times 10^{-6} \text{ g/L}$  are reached, the amount of consumed naringenin starts to be significantly high and this can compromise naringenin production. Kaempferol production has to be appropriately tuned, so the selection of enzymes has to be based on the trade-off between enzymatic efficiency and naringenin degradation.

## 5 CONCLUSIONS

We improved the performance of the kaempferol-biosensor for different enzyme variants in the naringenin metabolic pathway proposed in [2], as an example of efficient dynamic pathway regulation. We have analyzed the impact of selecting different variants, with their associated parameters, in the dynamic response of the regulated circuit. Interestingly, we observed that increasing the kinetic efficiency of the biosensor led to a higher production of kaempferol, which, in turn, decreased the production of the target molecule naringenin. These results show that an appropriate selection of the biosensor enzymes is necessary in order to avoid excessive cross-talk and leakage.

However, efficiency of enzymes can often be considered as a competing objective with expression efficiency, as enzyme expression efficiency depends directly on organisms genetic similarity and consequently on their taxonomic distance. Such distant sequences are generally less efficient in terms of expression in the host. Therefore, a trade-off needs to be achieved by means of a design tool. To that end, Selenzyme, the enzyme selection tool [4], has been used to obtain the phylogenetic distances of the target organisms to *E. Coli*, in order to qualify the gene expression efficiency. This can ensure the highest possible similarity between the genetic structure of the host and the target is of crucial relevance to ensure the expression efficiency of the introduced gene.

As a future work and using new available data, this gene-variant analysis could be improved by including other gene indicators like the genetic sustainability, enzyme efficiency ratio, among other parameters. The potential for automation of enzyme selection offers great prospects for the future in the chemical and biochemical industry. Without automated processes, enzyme selection is costly and inefficient due to the testing requirements needed to select the correct enzymes. Through automation, only the enzymes of greatest interest are selected as the object of study.

## Acknowledgement

MC was supported by an AI2-UPV studentship. PC acknowledges funding from UPV Talento Programme and European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement number 814408 (ShikiFactory100). This research was partially supported by grants MINECO/AEI, EU DPI2017-82896-C2-1-R and MICINN/AEI, EU PID2020-117271RB-C21.

## References

- [1] Stephanie K. Aoki, Gabriele Lillacci, Ankit Gupta, Armin Baumschlager, David Schwein-gruber, and Mustafa Khammash. A universal biomolecular integral feedback controller for robust perfect adaptation. *Nature*, 570(7762):533–537, jun 2019.
- [2] Yadira Boada, Alejandro Vignoni, Jesús Picó, and Pablo Carbonell. Extended metabolic biosensor design for dynamic pathway regulation of cell factories. *iScience*, 23(7):101305, 2020.
- [3] Pablo Carbonell, Guillaume Lecointre, and Jean-Loup Faulon. Origins of specificity and promiscuity in metabolic networks. *Journal of Biological Chemistry*, 286(51):43994–44004, 2011.
- [4] Pablo Carbonell, Jerry Wong, Neil Swainston, Eriko Takano, Nicholas J Turner, Nigel S Scruton, Douglas B Kell, Rainer Breitling, and Jean-Loup Faulon. Selenzyme: Enzyme selection tool for pathway design. *Bioinformatics*, 34(12):2153–2154, 2018.
- [5] James M Clomburg, Anna M Crumley, and Ramon Gonzalez. Industrial biomanufacturing: the future of chemical production. *Science*, 355(6320), 2017.
- [6] Gerhard Hannig and Savvas C Makrides. Strategies for optimizing heterologous protein expression in escherichia coli. *Trends in biotechnology*, 16(2):54–60, 1998.
- [7] Cynthia Ni, Christina V. Dinh, and Kristala L.J. Prather. Dynamic Control of Metabolism. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 12(1):annurev-chembioeng-091720-125738, jun 2021.
- [8] Jens Nielsen. Metabolic engineering. *Applied microbiology and biotechnology*, 55(3):263–283, 2001.
- [9] Noah Olsman, Ania-Ariadna Baetica, Fangzhou Xiao, Yoke Peng Leong, Richard M. Murray, and John C. Doyle. Hard Limits and Performance

- Tradeoffs in a Class of Antithetic Integral Feedback Networks. *Cell Systems*, 9(1):49–63.e16, jul 2019.
- [10] Bahare Salehi, Patrick Valere Tsouh Fokou, Mehdi Sharifi-Rad, Paolo Zucca, Raffaele Pezzani, Natália Martins, and Javad Sharifi-Rad. The therapeutic potential of naringenin: a review of clinical trials. *Pharmaceuticals*, 12(1):11, 2019.
- [11] I. Schomburg, L. Jeske, M. Ulbrich, S. Placzek, A. Chang, and D. Schomburg. The BRENDA enzyme information system—From a database to an expert system. *Journal of Biotechnology*, 261:194–206, nov 2017.
- [12] Solvej Siedler, Steen G Stahlhut, Sailesh Malla, Jérôme Maury, and Ana Rute Neves. Novel biosensors based on flavonoid-responsive transcriptional regulators introduced into escherichia coli. *Metabolic engineering*, 21:2–8, 2014.
- [13] Roland Wohlgemuth, Tomasz Twardowski, and Alfredo Aguilar. Bioeconomy moving forward step by step—a global journey. *New Biotechnology*, 61:22–28, 2021.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



# COMPARACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA LA ESTIMACIÓN DE ACTITUD EN CONTROLADORA DE VUELO PARA UAV PROFESIONAL

David Gallarta-Sáenz, Javier Rico-Azagra, Montserrat Gil-Martínez, Ramón Rico-Azagra  
{david.gallarta, javier.rico, montse.gil}@unirioja.es, ramonrico92@gmail.com

Grupo de Investigación de Ingeniería de Control, Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Universidad de La Rioja

## Resumen

*Este trabajo presenta dos estrategias de integración multisensorial a través de las cuales se pretende encontrar un método apropiado para la estimación de actitud de un dron mediante filtros de Kalman y filtros complementarios explícitos. Para ello, se simulan los sensores de bajo coste, en concreto, unidades de medida inercial (IMU, Inertial Measurement Unit), que están incorporados en una controladora de vuelo diseñada para un UAV (Unmanned Aerial Vehicle) de ámbito profesional. De esta forma se dispone de unos datos fehacientes que resultan de gran interés para abordar la puesta en funcionamiento del sistema en pruebas reales, al poder implementar su sistema de control de forma adecuada en base a dicha información. La aplicación se desarrolla en MATLAB-Simulink® por tratarse de un entorno adecuado para el trabajo con sistemas dinámicos.*

**Palabras clave:** Estimación de Actitud, Unidad de Medida Inercial, Filtro Complementario Explícito, Filtro de Kalman, Controladora de Vuelo, UAV Profesional.

## 1. INTRODUCCIÓN

La estimación de la actitud [18, 19] es una tarea clave dentro del posicionamiento y la navegación de vehículos no tripulados [4, 17, 20]. Las técnicas de estimación han experimentado un importante crecimiento en los últimos años debido a la popularidad adquirida por este tipo de vehículos, así como por la evolución de los sistemas electromecánicos que han reducido tanto su tamaño como su precio de forma considerable, dando lugar a los denominados MEMS (*Microelectromechanical Systems*). Se trata de dispositivos accesibles y adecuados para embarcarlos en drones [6, 8] y en vehículos terrestres [1] sin que sus dimensiones supongan restricciones. Dentro de estos sistemas se encuentran los sensores de bajo coste, instrumentos encargados de adquirir los datos que posteriormente se procesarán para calcular información relativa al vehículo, como puede ser su actitud.

Por los motivos mencionados, las líneas de investigación en este campo se encuentra en pleno auge y están enfocadas, principalmente, en mejorar la precisión y en reducir el coste computacional de las pruebas, para conseguir sistemas eficientes teniendo en cuenta las limitaciones operativas de *hardware* asociadas a este tipo de vehículos.

El planteamiento de un simulador reduce el tiempo de ejecución de pruebas durante la primera fase de un proyecto, pudiendo conseguir gran cantidad de datos interesantes para la posterior ejecución del sistema de control, sin comprometer la integridad mecánica del dron. En este trabajo se modela el sistema de estimación incorporado en una controladora de vuelo de ámbito profesional, diseñada por el grupo de investigación Ingeniería de Control del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de La Rioja dentro del proyecto URpilot (Figura 1).

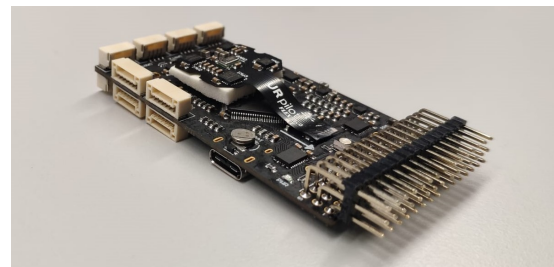


Figura 1: Controladora URpilot.

Para llevar a cabo esta aplicación también se modelan los sensores incorporados en dicha controladora, junto con los estimadores basados en filtros complementarios explícitos (ECF) [3, 15] y filtros de Kalman (KF) [11, 14]. De forma general, los filtros de Kalman consiguen estimaciones precisas gracias a su capacidad para mitigar el ruido del sistema, pero exigen un alto coste computacional. En la actualidad, estos algoritmos son empleados en múltiples aplicaciones: navegación [13], seguimiento de objetos [12] o fusión de datos de sensores [5, 10]. Por su parte los filtros complementarios implican un menor coste computacional, por lo que son óptimos para dispositivos en los cuales la potencia de cálculo del microcontrolador es limitada.

Para que el resultado de la estimación de la actitud en simulación sea lo más preciso posible, se proponen dos estrategias de fusión sensorial [2, 7] cuyas arquitecturas corresponden a integración filtrada en cascada de estado total e integración filtrada centralizada de estado total, respectivamente. En ellas se presentan diferentes combinaciones de los filtros mencionados para aprovechar al máximo sus virtudes, con el objetivo de simplificar el diseño de los mismos, es decir, el ajuste de los parámetros que los caracterizan, y de reducir el coste computacional. Asimismo, esta dualidad facilita la obtención de resultados de la misma naturaleza, al trabajar con diferentes modelos del mismo tipo de sensor, los cuales serán analizados y comparados para definir la técnica de estimación óptima para nuestro caso particular.

En el segundo apartado de este trabajo se explica el funcionamiento de la controladora de vuelo y el modelado de los sensores disponibles en ella. Posteriormente, se presentan las estrategias de estimación de actitud desarrolladas. Y, por último, los resultados alcanzados y las conclusiones extraídas.

## 2. PLATAFORMA EMPLEADA

### 2.1. CONTROLADORA DE VUELO URpilot

La controladora de vuelo desarrollada en el proyecto URpilot está compuesta por dos unidades funcionales (Figura 2). Por un lado, la unidad principal, denominada como «core», incorpora el microcontrolador STM32F767, los sistemas fundamentales y los conectores empleados para el conexión de elementos externos. Esta unidad dispone de todos los sensores necesarios para el control de vuelo: una IMU ICM20689, un magnetómetro IST8310 y un barómetro MS5611. Además, lleva incorporado, como dispositivo adicional, un GPS que incluye un magnetómetro HMC5883.

Por otro lado, la unidad sensorial o «flex» integra sensores adicionales que mejoran la estimación del estado de la aeronave. Este segundo módulo incorpora tres IMUs (ICM20689, ICM20602 y MPU6000), un magnetómetro IST8310 y un barómetro MS5611. Como puede observarse en la Figura 1, la PCB se encuentra fabricada en material flexible y está concebida para situarse sobre la unidad principal. Este sistema permite aislar la unidad sensorial de las vibraciones producidas durante el vuelo, mejorando la adquisición de medidas por parte de los sensores.

En la Figura 3 se presenta un esquema modular de la controladora en el cual se detalla la electrónica embarcada y las conexiones existentes entre los distintos componentes.

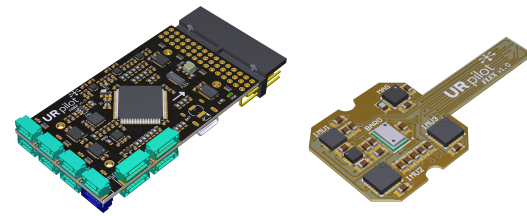


Figura 2: Unidad principal «core» (izq.) y unidad sensorial «flex» (dcha.).

El sistema de control de vuelo está ideado para que las estimaciones del estado del UAV realizadas durante el mismo se ejecuten empleando los sensores incorporados en la unidad sensorial, por ser los que se encuentra más aislados de las vibraciones que perjudican a la estimación. En caso de producirse un error en esta unidad, el sistema puede mantener la capacidad de vuelo gracias a los sensores incorporados en la unidad principal.

Durante el proceso de diseño de la controladora, para optimizar el funcionamiento de la misma, se decide programar los sensores en cuestión para muestrear a una frecuencia de 4 kHz, excepto el giroscopio perteneciente a MPU6000 que trabaja a 1 kHz.

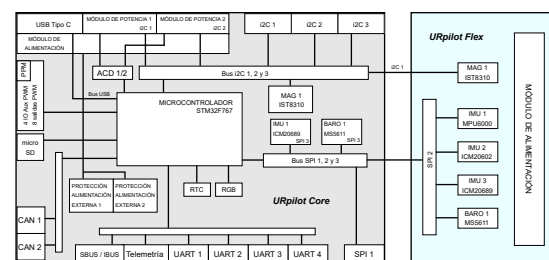


Figura 3: Esquema modular de la controladora de vuelo URpilot.

### 2.2. SIMULADOR *HARDWARE* DE LOS SENSORES

El modelado de los sensores se realiza mediante el bloque *IMU simulation model* disponible en la *toolbox Sensor Fusion and Tracking* de Simulink®, precisando sus parámetros a partir de la información proporcionada por el fabricante en las hojas de características.

Los datos de entrada necesarios en dicho bloque son la aceleración lineal, la velocidad angular y la orientación de referencia tomadas en el sistema de coordenadas de navegación local, obteniendo como datos de salida las medidas del acelerómetro, del giroscopio y del magnetómetro en el sistema de coordenadas del cuerpo. Esta es la información utilizada por los filtros para estimar la actitud.

En la tabla 1 se muestran las características más relevantes de ICM20689, ICM20602 y MPU6000.

Tabla 1: Características principales de las IMUs.

Sensor		Bias		Ruido espectral
ICM20689	Acel.	$\pm 80$	mg	$150 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
	Giro.	$\pm 5$	$^{\circ}/\text{s}$	$0.006 ^{\circ}/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$
ICM20602	Acel.	$\pm 25$	mg	$100 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
	Giro.	$\pm 1$	$^{\circ}/\text{s}$	$0.004 ^{\circ}/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$
MPU6000	Acel.	XY $\pm 50$	mg	$400 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
	Giro.	Z $\pm 80$	mg	$0.005 ^{\circ}/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$

Además, tal y como se indica en la hojas de características, estos sensores disponen de cuatro modos de funcionamiento que permiten ajustar su rango de escala completa (I) y su factor de escala de sensibilidad (II). Todos ellos se programan en el denominado modo 0, definiendo los siguientes valores:  $\pm 250 ^{\circ}/\text{s}$  (I) y 131 LSB/( $^{\circ}/\text{s}$ ) (II) en lo que respecta al giroscopio y  $\pm 2 \text{ g}$  (I) y 16384 LSB/g (II) para el acelerómetro.

### 3. ARQUITECTURAS DE INTEGRACIÓN MULTISENSORIAL

En este apartado se explica la estructura y el funcionamiento de las estrategias de integración multisensorial planteadas para la estimación de actitud, cuyos resultados se analizan y comparan para elegir la solución que más se adecue a nuestro sistema.

En la práctica, el ajuste de los parámetros para los distintos filtros se realiza *ad hoc* en base a resultados experimentales, hasta conseguir el comportamiento deseado.

#### 3.1. ESTRATEGIA 1: INTEGRACIÓN FILTRADA EN CASCADA DE ESTADO TOTAL

Esta arquitectura (Figura 4), en primer lugar, aplica un estimador independiente en los sensores. En concreto, se utiliza un ECF para procesar los datos de cada IMU, obteniendo múltiples valores de *roll* y *pitch*. De esta forma, la solución de cada uno de los subsistemas de navegación compone el vector de medidas  $z$  del filtro de Kalman. De forma teórica,  $z$  es el vector que contiene las medidas de los sensores, afectadas por ruido, y que actúan como observaciones en el filtro.

Posteriormente, mediante un filtro de Kalman se integran los valores de *roll* y *pitch* de las diferentes IMUs. Tras analizar sus características y los resultados previos, se opta por utilizar únicamente los datos de dos sensores, ICM20689 e ICM20602, ya que se espera, a priori, un mejor comportamiento.

La arquitectura actual no toma ningún subsistema como referencia, al contrario que ocurre en la integración filtrada en cascada de estado de error, y ante la previsible distorsión de los resultados se omite la información de MPU6000.

En definitiva, la solución integrada para este primer caso comprende los resultados provenientes de los ECF corregidos mediante estimaciones de su actitud realizadas por el algoritmo de integración, siendo este un filtro de Kalman.

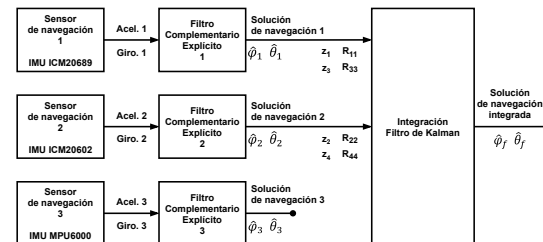


Figura 4: Arquitectura de integración filtrada en cascada de estado total.

Es importante mencionar que los errores presentes en los sistemas de navegación comprenden una mezcla de errores sistemáticos y ruido blanco, los cuales deben modelarse de forma correcta, que se suavizarán a través del KF.

Debe comentarse que, al igual que sucedía con el subsistema tomado como referencia, esta estructura tampoco plantea realimentación, la cual reduce la independencia entre los subsistemas dificultando la detección de problemas en los sensores, al no poder comparar directamente los resultados. Por tanto, la ausencia de esta característica permite identificar de forma directa posibles mal funcionamientos de los sensores implicados.

En la tabla 2 se muestran los parámetros tras el proceso de *tuning* para los controladores PI que intervienen en los ECF.

Tabla 2: Parámetros de los controladores PI.

Sensor	kp	ki
ICM20689	1.2000	0.014
ICM20602	0.0001	0.300
MPU6000	0.0001	0.050

#### 3.2. ESTRATEGIA 2: INTEGRACIÓN FILTRADA CENTRALIZADA DE ESTADO TOTAL MODIFICADA

En este caso se utiliza una modificación de la arquitectura de integración filtrada centralizada de estado total (Figura 5).

De forma general, un filtro de estado total es adecuado para integrar sistemas de determinación de la posición.

Por su parte, un filtro de estado de error, más complejo al trabajar en lazo cerrado y en lazo abierto de forma simultánea, se utiliza en sistemas que disponen de sensores navegación inercial.

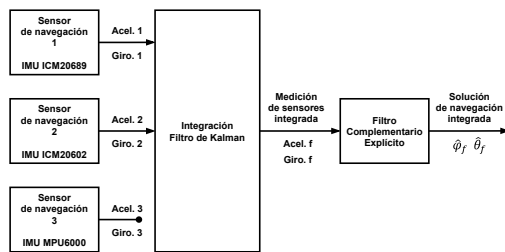


Figura 5: Arquitectura modificada de integración filtrada centralizada de estado total.

En este trabajo, a pesar de emplear sensores inerciales, se parte de un filtro de estado total al cual se le aplica una modificación: desacoplar un KF complejo, dependiendo de las características dinámicas del sistema puede ser Extendido o *Unscented*, en un filtro de Kalman lineal y un filtro complementario explícito. Dicho cambio simplifica los filtros, los cuales siguen siendo válidos para el sistema, facilita el ajuste de sus parámetros y reduce el coste computacional, bastante elevado en este tipo de arquitectura. Esto también es posible gracias a que las mediciones de una IMU no incorporan de forma predeterminada ningún algoritmo de estimación, siendo adecuadas para una arquitectura centralizada.

A diferencia de la arquitectura en cascada, las medidas de los sensores se integran directamente en un filtro de Kalman, es decir, los datos *raw* de los acelerómetros y de los giroscopios en lugar de las estimaciones. Al igual que en la situación anterior, para este proceso de fusión solo se emplean dos de las IMUs. De esta forma se obtienen datos de acelerómetro y giroscopio filtrados y compensados, gracias a las características dinámicas de los sensores, que se pasan a un ECF, tal y como se ha adelantado anteriormente, para estimar los valores definitivos de *roll* y de *pitch*.

En esta arquitectura, al disponer de un único filtro de Kalman, los errores sistemáticos y el ruido de todos los sensores se modelan en el mismo algoritmo. Esto asegura la correlación entre errores y la ponderación de las mediciones, pero requiere un diseño exhaustivo del filtro por la gran cantidad de información a definir. Además, como ya se ha comentado anteriormente, su principal desventaja es el elevado coste computacional que acarrea, el cual se reduce gracias a la modificación efectuada.

Para este caso, los parámetros del controlador para el ECF son  $k_i = 0.250$  y  $k_p = 0.014$ .

## 4. RESULTADOS

Para la consecución de los resultados presentados se realizan pruebas introduciendo en las IMUs una velocidad angular para cada eje, de tal forma que se genera una rotación constante que cubre un amplio rango en el que puede funcionar un sensor de este tipo. En cuanto a la aceleración lineal, se aporta una señal aleatoria que actúa como ruido del sistema, simulando, de forma simplificada, las aceleraciones que pueden afectar a un UAV.

En la Figura 6 se muestran los valores de *roll* (°) y de *pitch* (°) obtenidos a partir de los ECF que se implementan de forma directa sobre cada IMU en la primera estrategia. Asimismo, estos resultados se comparan con el valor de referencia, calculado a partir de la velocidad angular aplicada al sistema.

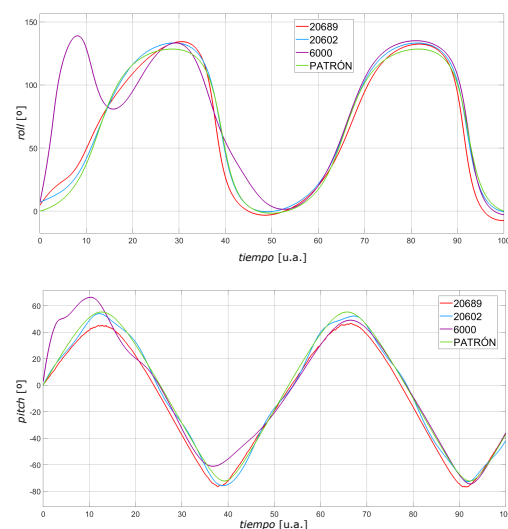


Figura 6: Estimación de *roll* (arriba) y *pitch* (abajo) para cada una de las IMUs.

Ambas gráficas obedecen a un comportamiento similar: el sensor ICM20602 es el que más se ajusta al valor patrón, mientras que, tal y como se esperaba, el MPU6000 se aleja de forma clara de la referencia al comienzo del experimento debido a su *bias*, aunque mejora su estimación a lo largo del tiempo debido a la estabilización del filtro.

En la Figura 7 se presenta el resultado de fusionar en la segunda estrategia los datos de los acelerómetros ( $m/s^2$ ), en sus tres componentes, correspondientes a ICM20689 e ICM20602. Se puede observar cómo mediante el KF se logra reducir el ruido de las señales originales y compensar las características dinámicas de cada sensor.

Una vez expuestos los datos intermedios que se obtienen en los dos casos planteados, a continuación, se muestran las estimaciones de *roll* y de *pitch* (°) para cada una de las estrategias (Figura 8), mostrando también la referencia.

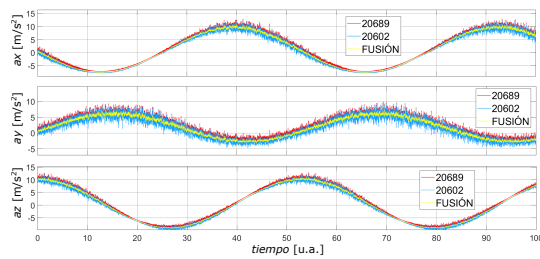


Figura 7: Fusión de acelerómetros en la segunda estrategia.

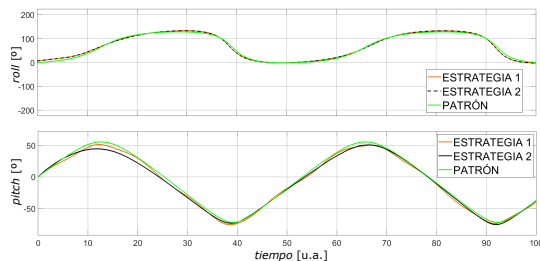


Figura 8: Estimaciones de *roll* y *pitch* en cada estrategia.

Se aprecia que ambas estructuras estiman resultados muy similares, por lo que la integración de los valores estimados de forma individual para el primer caso o de los datos *raw* de los sensores en el segundo no tiene influencia relevante en los valores finales de actitud.

Para poder comparar de forma cuantitativa los resultados y confirmar el análisis previo, se exhiben los errores angulares ( $^{\circ}$ ) dinámicos para *roll* y para *pitch* (Figura 9), mostrando en las sub-gráficas superiores el error de las estimaciones individuales de los sensores y en las inferiores el error tras los procesos de integración.

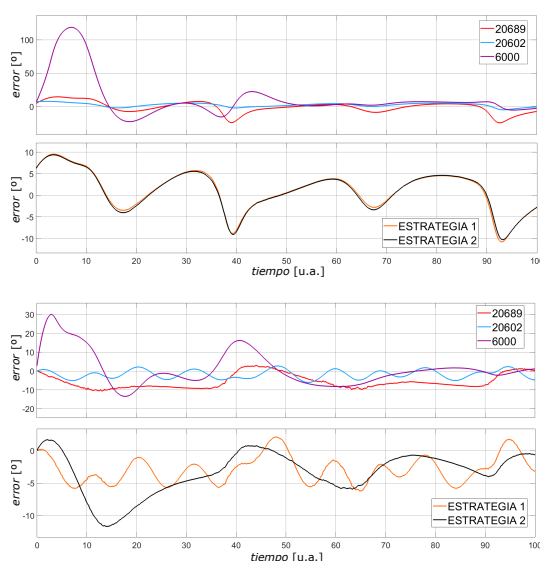


Figura 9: Errores angulares dinámicos en *roll* (arriba) y en *pitch* (abajo).

En lo que a *roll* se refiere, se advierte que el error de ICM20689 oscila entre  $+15^{\circ}$  y  $-25^{\circ}$ . En estas gráficas se corrobora que ICM20602 es la IMU que mejor comportamiento presenta, al tener como valores más alejados de la referencia  $+8^{\circ}$  y  $-4^{\circ}$ , consiguiendo una estimación bastante precisa. En cuanto a MPU6000, debido a su gran *bias* presenta un error elevado al comienzo del experimento, aunque mejora progresivamente manteniéndose entre  $\pm 20^{\circ}$ . Por otro lado, tal y como se ha comentado, las dos estrategias de integración arrojan resultados muy similares, encontrándose sus errores entre  $\pm 10^{\circ}$  en ambos casos.

Algo similar sucede al representar el error angular de *pitch*. De nuevo, el sensor que presenta un mejor comportamiento es ICM20602, aunque en los tres casos se reduce el error. Sin embargo, la primera estrategia de fusión muestra mejores resultados puesto que su error varía entre  $+2^{\circ}$  y  $-6^{\circ}$ , frente a  $+2^{\circ}$  y  $-12^{\circ}$  de la segunda.

Para completar la comparación de todas las estimaciones de actitud ejecutadas, en la Figura 10 se presentan los errores RMS asociados a las simulaciones para cada una de las IMUs.

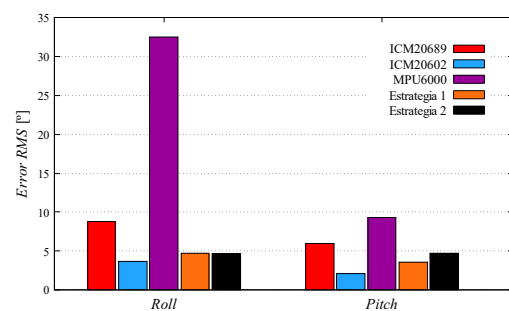


Figura 10: Error RMS en las estimaciones.

Para ilustrar la carga computacional referente a cada estrategia, se realizan varias simulaciones, con una duración de 100 unidades arbitrarias en Simulink, de las distintas opciones para estimar la actitud. A continuación, se recogen los tiempos medios de ejecución:

- ICM20602: 50.48 segundos
- Estrategia 1: 74.63 segundos
- Estrategia 2: 57.32 segundos

A raíz de los resultados obtenidos para las dos estrategias, se confirma que el desacoplo de un filtro de Kalman, que agrupa todos los parámetros, en otro más sencillo combinado con un ECF (estrategia 2) supone un tiempo de ejecución inferior al arrojado por la estrategia 1, en la cual se implementan tres ECF en paralelo y posteriormente un KF, implicando un mayor coste computacional para el microcontrolador.



## 5. CONCLUSIONES

En base a los resultados presentados y tras el análisis de los mismos, se puede afirmar que las mejoras obtenidas en las dos estrategias de integración frente a los resultados del sensor que menor error presenta, ICM20602, no son suficientes para justificar el coste computacional que implica la ejecución de los filtros para cada estrategia. Aunque se reduce el ruido de las medidas, especialmente al emplear el KF con los datos *raw* del acelerómetro y del giroscopio, los resultados de actitud alcanzados mediante fusión no reducen el error respecto a los valores de referencia.

Por estos motivos, se plantea como solución final para la estimación de actitud según las particularidades de nuestro sistema una arquitectura en redundancia, independiente para *roll* y *pitch*, que dispone de tres IMUs trabajando de forma simultánea: una de ellas se toma como referencia para calcular el valor de actitud que recibe el sistema de control, aunque las otras dos están en funcionamiento en todo momento. Esta estructura permite solucionar de forma casi inmediata el fallo de alguna de ellas sin perder la información relativa a la actitud del cuerpo.

El dispositivo predeterminado es ICM20602 debido a sus prestaciones (ver Figuras 9 y 10). Esta será la IMU principal mientras su error angular instantáneo en valor absoluto para *roll* y *pitch* sea inferior a  $10^\circ$  y a  $5^\circ$ , respectivamente. Si se supera dicho umbral, automáticamente se toma como sensor de referencia ICM20689 que será el encargado de proporcionar los datos mientras ICM20602 no recupere la normalidad o cuando presente errores angulares inferiores a  $25^\circ$  y  $15^\circ$  para los ángulos en cuestión. En caso contrario, y como último recurso, se toman los datos extraídos de MPU6000 para implementar el sistema de control.

Tal y como se observa en la Figura 6, dado que la actitud estimada por MPU6000 difiere en gran medida del patrón al inicio del experimento, la monitorización de la IMU de referencia puede servir para informar al piloto del estado del vehículo. De acuerdo a la estructura de redundancia planteada, una activación temprana de dicha IMU no solo evidenciaría un malfuncionamiento de los otros dos sensores sino que también supondría un riesgo para el control del UAV.

Para terminar de ilustrar el funcionamiento de este sistema, en la Figura 11 se muestra la estimación de *pitch*. En la prueba mostrada se altera el comportamiento normal de ICM20602 para que entre en funcionamiento ICM20689 y poder hacer frente a las anomalías detectadas, tal y como se observa en las zonas remarcadas de la gráfica.

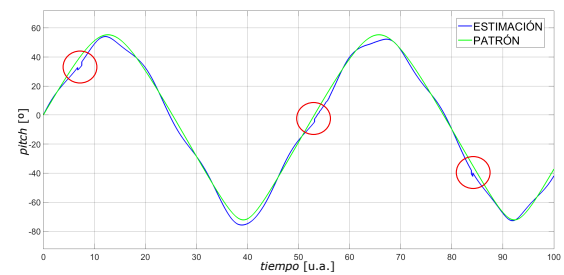


Figura 11: Funcionamiento de la estructura en redundancia para *pitch*.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda prestada por el Gobierno de La Rioja a través del proyecto de I+D ADER 2017-I-IDD-00035 y por la Universidad de La Rioja a través de la Ayuda a Grupos de Investigación REGI 2020/23.

## English summary

### COMPARISON OF STRATEGIES FOR ATTITUDE ESTIMATION IN FLIGHT CONTROLLER FOR PROFESSIONAL UAV

#### Abstract

*This work presents two multisensor integration strategies by which is intended to find an appropriate method for estimating the attitude of a drone using Kalman filters and explicit complementary filters. For this purpose, low-cost sensors are simulated, specifically, the Inertial Measurement Units, which are incorporated in a flight controller designed for a professional Unmanned Aerial Vehicle. In this way, reliable data is available and it can be of great interest to address the start up of the system in real tests, allowing for implementation its control system properly based on this information. This application is developed in MATLAB-Simulink®, as it is a suitable environment for working with dynamic systems.*

**Keywords:** Attitude Estimation, Inertial Measurement Unit, Explicit Complementary Filter, Kalman Filter, Flight Controller, Professional UAV.



## Referencias

- [1] Belter, D., & Nowicki, M. R. (2019). Optimization-based legged odometry and sensor fusion for legged robot continuous localization. *Robotics and Autonomous Systems*, 111, 110–124.
- [2] Chérigo, C., & Rodríguez, H. (2017). Evaluación de algoritmos de fusión de datos para estimación de la orientación de vehículos aéreos no tripulados. *RIDTEC*, 13(2), 90–99.
- [3] Euston M, Coote P, Mahony R, Kim J, Hamel T. A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed-Wing UAV. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*. 2008;340-5.
- [4] Fu, C., Hong, W., Lu, H., Zhang, L., Guo, X., & Tian, Y. (2018). Adaptive robust backstepping attitude control for a multi-rotor unmanned aerial vehicle with time-varying output constraints. *Aerospace Science and Technology*, 78, 593–603.
- [5] Fung, M. L., Chen, M. Z. Q., & Chen, Y. H. (2017). Sensor fusion: A review of methods and applications. *Proceedings of the 29th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2017*, 3853–3860.
- [6] García, J., Molina, J. M., & Trincado, J. (2020). Real evaluation for designing sensor fusion in UAV platforms. *Information Fusion*, 63, 136–152.
- [7] Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems* (2nd ed.). Artech House.
- [8] Hoang, M. L., & Pietrosanto, A. (2021). Yaw/Heading optimization by drift elimination on MEMS gyroscope. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 325, 112691.
- [9] Jin, R., Jiang, J., Qi, Y., Lin, D., & Song, T. (2019). Drone Detection and Pose Estimation Using Relational Graph Networks. *Sensors*, 19(1476).
- [10] Khaleghi, B., Khamis, A., Karray, F. O., & Razavi, S. N. (2013). Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art. *Information Fusion*, 14(1), 28–44.
- [11] Kim, P. (2011). *Kalman Filter for Beginners: with MATLAB Examples*.
- [12] Kim, T., & Park, T. H. (2020). Extended kalman filter (EKF) design for vehicle position tracking using reliability function of radar and lidar. *Sensors (Switzerland)*, 20(15), 1–18.
- [13] Li, S., Ozo, M. M. O. I., De Wagter, C., & de Croon, G. C. H. E. (2020). Autonomous drone race: A computationally efficient vision-based navigation and control strategy. *Robotics and Autonomous Systems*, 133.
- [14] Ma, H., Yan, L., Xia, Y., & Fu, M. (2020). *Kalman Filtering and Information Fusion*. Springer.
- [15] Mahony, R., Hamel, T., & Pflimlin, J.-M. (2008). Non-linear complementary filters on the special orthogonal group. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 53(5), 1203–1218.
- [16] Noordin, A., Basri, M. A. M., & Mohamed, Z. (2018). Sensor Fusion Algorithm by Complementary Filter for Attitude Estimation of Quadrotor with Low-cost IMU. *Telkommnika*, 16(2), 868–875.
- [17] Rico-Azagra, J., Gil-Martínez, M., Rico-Azagra, R., & Maisterra, P. (2016). Low-cost attitude estimation for a ground vehicle. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 417, 121–132.
- [18] Rico-Azagra J, Rico R, Maisterra P, Gil-Martínez M. Comparación de algoritmos de estimación de actitud. En: XXXVI Jornadas de Automática. Bilbao, España: CEA-IFAC; 2015. p. 911-20.
- [19] Svacha, J., Mohta, K., Watterson, M., Loianno, G., & Kumar, V. (2018). Inertial Velocity and Attitude Estimation for Quadrotors. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 7810–7816.
- [20] Verma, M., Dehaeze, T., Zhao, G., Watchi, J., & Collette, C. (2021). Virtual sensor fusion for high precision control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 150.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Robust control strategy for improving the performance of a soft robotic link

Luis Nagua, Jorge Muñoz, Lisbeth Mena, Concepción A. Monje, and Carlos Balaguer  
Systems Engineering and Automation Department , RoboticsLab  
University Carlos III of Madrid  
Madrid, Spain

lnagua@ing.uc3m.es, jmyanezb.ing@uc3m.es, lmena@pa.uc3m.es, cmonje@ing.uc3m.es, balaguer@ing.uc3m.es

## Abstract

*The robotic neck mechanism considered in this paper has as main element a soft link that emulates a human neck with two DOF (flexion, extension and lateral bending). The mechanism is based on a Cable-Driven Parallel Mechanism (CDPM) with components easy to manufacture in a 3D printer. Due to the soft link properties and the platform mechanics, it is important to provide a robust control system. Two designs, a robust PID controller and a Fractional Order PI controller (FOPI) are proposed and compared, the fractional order control showing an enhanced performance. Both control approaches are tested in the real prototype, validating the soft neck feasibility and showing the robustness of the platform to mass changes at the neck tip.*

**Keywords:** Soft robotic neck, Cable-Driven Parallel Mechanism (CDPM), Fractional order control, Robust control.

## 1 Introduction

In the case of humanoid robotics, a robot with soft links has the following main advantages: a) simplicity of design, favoring an under-actuated architecture; b) accessibility and adaptability to complex environments; and c) safer interaction with the human and the environment.

There are several humanoid neck mechanisms developed by different researchers. They can be divided into two categories: serial necks and parallel necks. The neck in series is very used due to its easy control, since each DOF is operated independently. For instance, HRP-4 [1] and Honda ASIMO-2002 [2] have two DOF (pitch, yaw).

Parallel robot necks are based in general on a parallel manipulator, which consists of a mobile platform, a fixed base, several identical active chains and a passive backbone, if necessary. This type of mechanism is interesting for the following reasons: the number of actuators is minimal; the number of sensors necessary for the closed-loop control of the mechanism is also minimal; when the actuators are locked, the manipulator remains

in its position, which is an important safety aspect for certain applications, such as medical robotics [3], where they design a micro-robot for intestinal inspection which uses pneumatic actuators in its bendable portion.

In this paper we present a soft link to be used interchangeably in various limbs of the humanoid robot, like neck and spine, under the constraints of scalability, controllability of its stiffness and integration. The first step towards this goal is the design and performance analysis of a prototype of soft link working as a neck, studying its mathematical model and proposing a control system that guarantees the performance robustness to mass changes at the tip. The proposed soft neck simulates the structure of the human neck, where the cables simulate the muscles and tendons and the flexible link the spinal column. All this in a configuration of parallel mechanism.

Due to the neck design and its elastic behavior, the actuators will have different load torques at every different position, going through a varying load path for every movement. Therefore, a robust controller is necessary, and a Fractional Order Control approach is considered and compared to a robust PID controller design.

The most common Fractional Order Controllers (FOC) are Fractional Proportional Integral Derivative ( $PI^\lambda D^\mu$ ) ones, used for the first time by Podlubny [4] and further developed in works such as [5], [6], or [7].

The usual approach, specially for motion control, is to use a Fractional Derivative control, leaving the integrator out. This control scheme has the advantage of using the position sensor as an integrator, which simplifies the controller, while the steady state error is still cancelled, making the integral part unnecessary, as in [8], and later in [9] or [10]. Our situation is different, since the different neck inclinations will mean a variable system perturbation that needs to be addressed in order to cancel the stationary error. This will lead to choose a controller with integral part, as in similar approaches [11], [12] and [13].

In order to tune the controller, different meth-

ods are available. Many of them are based on the numeric solution of nonlinear equations systems [7][12][10]. Others are based on optimization methods, such as Particle Swarm Optimization algorithm (PSO) [6][13], Artificial Bee Colony algorithm (ABC) [14][15], Firefly Algorithm (FA) [16], or Differential Evolution method (DE) [17]. See [18] for a comparative study of optimization algorithms applied to FOC.

We will tune the proposed FOC using Monje's Method as described in [5]. The PID controller will be also tuned following this approach, but modified in order to allow its application to integer order controllers.

The paper is organized as follows. Section II introduces the soft neck proposal and its mathematical model. Section III presents the control problem and proposes two controllers that grant the robustness of the system to mass changes at the neck tip. Section IV discusses the results obtained from the control of the neck using a PID and a FOC. Finally, Section V outlines the main conclusions of the work.

## 2 Robotic Neck

The design of this neck is based on the configuration of a parallel robot according to the advantages mentioned in [19]. Fig. 1 shows the different motions that the human neck can perform, together with the range of movement associated to each motion. This Figure has been extracted from [20]. As can be appreciated, the human neck has three main motions: rotation, flexion and extension, and lateral bend.

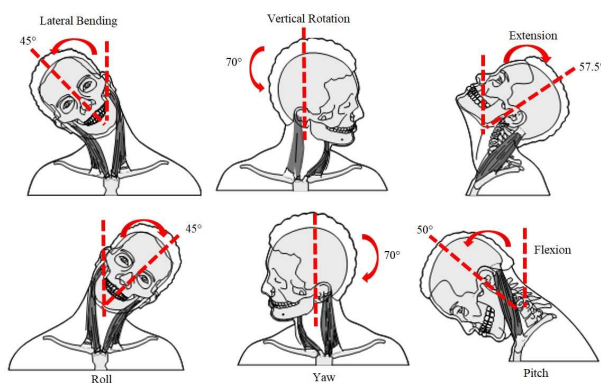


Figure 1: Human neck motions.

The constraints for the design of our soft robotic neck are the following: two Degrees of Freedom (DOF) with a maximum tilt angle of 40°, under a criterion of flexibility and inspired by the human neck structure; it uses a soft link as neck; the mechanism supports different loads at the neck tip.

The CAD design of the neck is shown in Fig. 2, and its equivalent schematic representation in Fig. 3.

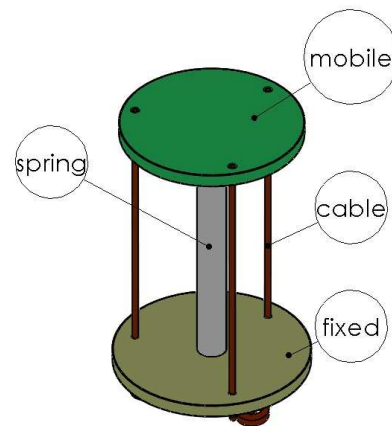


Figure 2: Prototype functional scheme.

The soft neck shown in Fig. 3(a) consists of: a fixed base, a moving platform, three flexible cables with negligible mass and a soft link made of flexible Thermoplastic Elastomer (TPE) material. The moving platform is driven by three cables and the connection points are  $\vec{B} = (B_1; B_2; B_3)$ ; the other end of each cable connects to a roller driven by a motor and the cables pass through the fixed base at points  $\vec{A} = (A_1; A_2; A_3)$ . We will denote the cable length between  $A_i$  and  $B_i$  as  $L_i$ .

There are two independent parameters: angle  $\theta_p$  between the fixed base plane and the moving platform plane (tilt angle); and angle  $\theta_s$  between axis  $s$  and axis  $X$  (orientation angle).  $s_o$  and  $t_0$  are dependent parameters, and once given values to the independent parameters,  $s_o$  can be solved.

The homogeneous transformation matrix (1) represents the projection from frame  $oxyz$  to  $OXYZ$ .

$${}^O T_{o'} = \begin{bmatrix} {}^O R_{o'} & P_o \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

where  $P_o$  is the position vector of point  $o$  with respect to the base coordinate frame,  $P_o = [s_o \cos \theta_s \quad s_o \sin \theta_s \quad t_0]^T$ , and  ${}^O R_{o'}(\theta_s, \theta_p)$  is the rotational matrix that describes the orientation of the moving platform using the Euler angles with orientation  $ZYZ$ .

The inverse position kinematics problem is to calculate the cable lengths  $L = [L_1 \quad L_2 \quad L_3]^T$  given the desired moving platform posture  $x = [\theta_s \quad \theta_p]^T$ .

The cable lengths are calculated by:

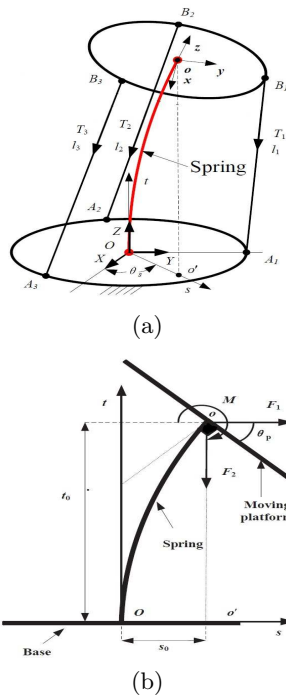


Figure 3: Robot neck diagrams. (a) CDMP model. (b) Lateral bending of the neck.

$$L_i = \left\| {}^O T_{O'} \vec{oB}_i - \vec{OA}_i \right\| \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

However,  $s_o$  and  $t_o$  cannot be arbitrary numbers. In this case,  $s_o$  and  $t_o$  will be resolved geometrically, considering the flexion of the soft link (see Fig. 3(b)) as an arc with curvature radius

$$R = \frac{L_o}{\theta_p} \quad (3)$$

where  $L_o$  is the length of soft link. Based on triangle geometries, one has

$$R = s_o + R \cos \theta_p \quad (4)$$

and equalizing equations (3) and (4), the result is

$$s_o = \frac{L_o(1 - \cos \theta_p)}{\theta_p} \quad (5)$$

and  $t_o$  is given by

$$t_o = \frac{L_o \sin \theta_p}{\theta_p} \quad (6)$$

whose constants values are given in Table 1.

The implementation is performed varying  $\theta_p$  from  $0^\circ$  to  $40^\circ$  and  $\theta_s$  from  $0^\circ$  to  $360^\circ$ . The results of the inverse position kinematics are shown in Fig. 4, where the cable lengths are located in the z-axis.

Table 1: PARAMETERS OF SELECTED COMPRESSIVE SPRING

$L_o$ [m]	$\vec{OA}_i$ [m]	$\vec{oB}_i$ [m]
0.107	0.05	0.05

As shown in Fig. 4, for large values of  $\theta_p$ , the variation in cable length is also large. This is because the more the mobile base is tilted, the greater amount of force required.

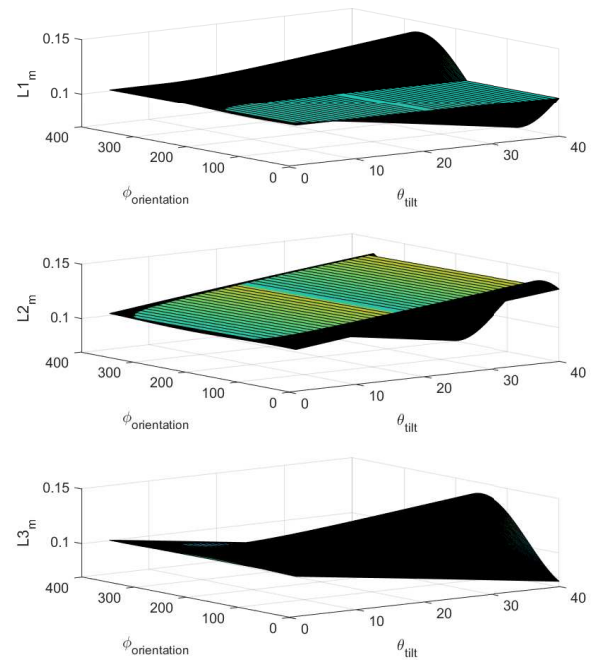


Figure 4: Inverse position kinematics.

### 3 Control Problem

The control problem, represented in Fig. 5, focuses on the motors driving the neck tendons. The platform target positions are defined by their orientation and inclination ( $\theta_s$  and  $\theta_p$ , respectively). Solving the inverse kinematics as described in the previous section, the lengths for each cable are obtained. Due to the transmission mechanism, each cable length corresponds to a specific motor angular position; therefore, motor position control is needed to achieve and hold the platform target positions.

In order to achieve each required motor position  $\theta_i$ , a feedback control loop configuration is used (output position, velocity actuated). The neck prototype developed for this purpose is equipped with encoder position sensors, and each motor receives velocity commands in *rpm*. The angular position  $\theta_m$  measured by the encoder is compared

to the reference angular position  $\theta_i$  resulting from the application of the inverse kinematics, and the controller will then be in charge of commanding the servomotors in velocity.

The motor model obtained from the experimental identification process using velocity input and position output, results in:

$$G(s) = \frac{54.89}{54.89 + s} \cdot \frac{k_{enc}}{s}, \quad (7)$$

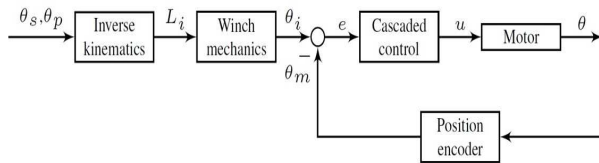


Figure 5: Structure and interfaces of the soft neck control scheme

where  $k_{enc} = 6$  is a known gain introduced by the encoder.

The time and frequency responses of the motor model are shown in Fig.6. Note that phase margin  $\phi_m = 83.8deg$  at the gain crossover frequency  $\omega_c = 5.965rad/s$ .

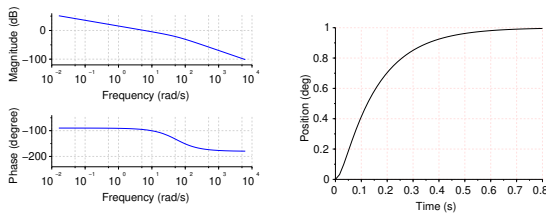


Figure 6: Bode diagram (left) and feedback unit step response (right) for the motor model.

In order to tune the controllers, phase margin  $\phi_m$  and gain crossover frequency  $\omega_c$  specifications will be used. Having an integrator in the plant, it is common practice to avoid the integrator in the controller, leading to a proportional derivative approach; but in this case, because of the elastic nature of the system, the tendons will need different forces at the different positions, resulting in a variable motor torque needed for the different neck inclinations, making it necessary to use an integral controller for stationary error cancellation. In addition, the neck will accept different payloads attached to the tip, which adds uncertainties to the model and asks for a robust control system.

According to this, the control specifications to be met have been selected according to Monje's

Method [5], which considers the following constraints:

- Phase margin  $\phi_m$  and gain crossover frequency  $\omega_c$
- Robustness to mass changes on the tip at a nominal crossover frequency  $\omega_c$
- Robustness to model uncertainties

From the basic definitions of phase margin  $\phi_m$  and gain crossover frequency  $\omega_c$  [21], the following two equations are obtained:

$$0 = \arg [G(j\omega_c) C(j\omega_c)] + \pi - \phi_m \quad (8)$$

$$0 = |G(j\omega_c) C(j\omega_c)| - 1 \quad (9)$$

In order to achieve control robustness, another specification is normally considered. First stated by Hendrik Bode, and later in works such as [12], [22], [5], [10], open loop flat phase specification is another common constraint in controller design, as demonstrated in [23]. In our system, the model gain is affected by the payloads of the device, as proved in [24]. Therefore, meeting this specification will make the system robust to changes in the payload configuration. The formulation for this constraint is shown in the following equation (see [5]):

$$\left( \frac{d(\arg (C(j\omega_{cg})G(j\omega_{cg})))}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_{cg}} = 0. \quad (10)$$

In order to validate the platform and compare the results, two controllers will be designed: a robust PID controller and a Fractional Order Proportional Integral (FOPI) controller, both based on the fulfillment of the control specifications previously defined. In the next sections, the design of these controllers will be detailed.

### 3.1 PID Control

The PID controller formula can be stated as follows:

$$C(s) = k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d s \quad (11)$$

with  $k_p$ ,  $k_i$  and  $k_d$  the proportional, integral and derivative gains, respectively.

The open loop system is given by:



$$C(s)G(s) = \frac{k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d s}{1 + \frac{1}{54.89} s} \cdot \frac{k_{enc}}{s} \quad (12)$$

To find the values of  $k_p$ ,  $k_i$  and  $k_d$  that meet the specifications, equations (8), (9) and (10) need to be solved. Using Scilab fsolve function, and considering  $\omega_c = 20\text{rad/s}$  and  $\phi_m = 45\text{deg}$ , the resulting controller parameters are  $k_p = 3.216$ ,  $k_i = 29.967$  and  $k_d = 0.0000061$ . The Bode diagram of the open loop system with this controller and the step response are shown in Fig. 7, where it is clearly seen that the specifications are fulfilled.

The specifications of  $\omega_c$  and  $\phi_m$  have been set to those given values in order for the system to have a fast response (related to the value of  $\omega_c$ ) and a certain overshoot (related to the value of  $\phi_m$ ). The higher the gain crossover frequency, the higher the system speed; the lower the phase margin, the higher the overshoot. With  $\phi_m = 45\text{deg}$  we can guarantee a certain overshoot (underdamped system, as shown in Fig. 7) and the robustness to mass changes can be more appropriately studied.

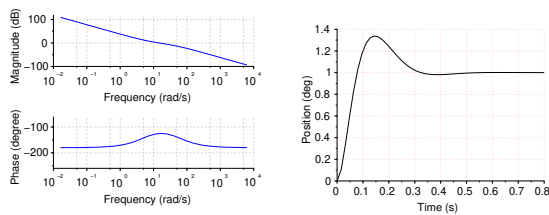


Figure 7: Bode diagram (left) and step response (right) for the PID control system

### 3.2 Fractional Order Control

Here we propose a FOC described by (13):

$$C(s) = k_p + k_a s^\alpha \quad (13)$$

where  $k_p$  is the proportional gain,  $k_a$  is the fractional gain, and  $\alpha$  is the fractional order. According to the sign of  $\alpha$ , the resulting controller can have a fractional order derivative component (positive  $\alpha$ ) or an fractional order integral component (negative  $\alpha$ ).

Having three parameters available, the specifications can be fulfilled, granting the system robustness to gain changes. The open loop system is modeled by the following equation:

$$C(s)G(s) = \frac{k_p + k_a s^\alpha}{1 + \frac{1}{54.89} s} \cdot \frac{k_{enc}}{s} \quad (14)$$

Again, solving the nonlinear equations system using Scilab fsolve function, we can find the values

of  $k_p$ ,  $k_a$  and  $\alpha$  that meet the specifications stated in equations (8), (9) and (10). Considering the same  $\omega_c = 20\text{rad/s}$  and  $\phi_m = 45\text{deg}$  performance specifications, the resulting controller parameters are  $k_p = 2.99$ ,  $k_a = 22.744$  and  $\alpha = -0.9$ . Having a negative fractional order, the resulting controller is a Fractional Order Proportional Integrator (FOPI).

The Bode diagram of the open loop system with this controller and its closed loop response are shown in Fig. 8. A flat phase slope at the required gain crossover frequency can be seen in the figure, which also shows that the phase margin requirement is met.

Another asset of the FOPI is the following. The phase margin tends to  $\phi_m = 0\text{deg}$  for varying gains in the case of the PID control system, as can be seen in the Bode diagram of Fig. 7, which affects the stability of the system very negatively. However, the fractional order  $\alpha$  of the integrator in the case of the FOPI, when  $\alpha \neq 1$  (our particular case), guarantees that the controller's phase is  $\phi_c > -90\text{deg}$ , since the contribution in phase of the FO integrator is  $-\alpha \cdot 90\text{deg}$ . This fact enhances the system stability for varying gains, since the phase margin will never reach zero value.

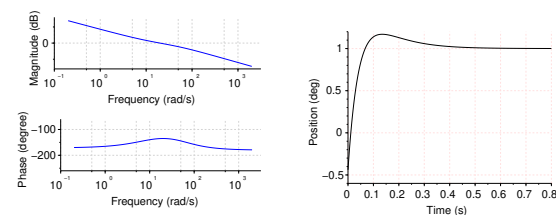


Figure 8: Bode diagram (left) and step response (right) for the FOPI control system

## 4 Experimental results

The experiments were designed to test both controllers robustness and performance. In that sense, different masses were attached to the neck tip, which, together with the different neck inclinations, introduces actuators gain variations in the system and makes this case study very suitable to study controllers robustness to model uncertainties. The different masses attached to the upper platform were  $m = (0g, 200g, 400g, 600g, 800g, 1000g)$ , and the neck experiments were carried out with the PID and FOPI control systems.

The results from the experiments show that both systems present good robustness and performance, as illustrated in Fig. 9. However, it is clear that the PID control strategy presents bigger overshoot variations for the different masses than the FOPI



control approach. Besides, the stability is worse in general terms in the case of the integer order controller, which shows that the introduction of the fractional order  $\alpha$  in the controller improves system stability.

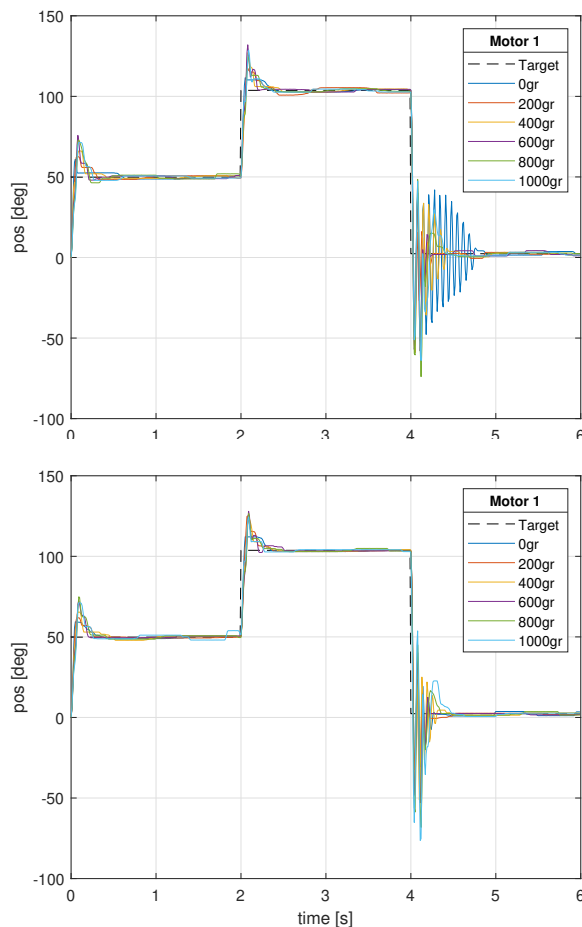


Figure 9: Step responses of the two proposed controllers, PID (top) and FOPI (bottom), for different masses located at the tip. Step inputs of  $50deg$  and  $-100deg$ .

As can be observed in Fig. 10, the system stability is very poor for the PID controller in the reverse trajectory, when the neck returns to the initial position. Under this condition, the neck elastic action combined with the mass inertia reduces the motor load torque to a value close to zero, increasing the system gain and consequently the crossover frequency. Due to the tiny phase margin at high frequencies for the PID controller (see Fig. 7), this fact will decrease system stability. In fact, during the experiments with the PID controller and for certain position references, the amplitude of oscillation reached a high value that triggered the driver protections and switched the system into an error state, reason why the target position had to be redefined.

This situation is greatly mitigated by the use of

the fractional order controller because of its effect on the phase margin. The FOC exponent (0.9 in our case) makes the controller phase to be  $\phi_c > -90$ , which results in an open loop phase margin  $\phi_m > 0$  for whatever gain crossover frequency, as shown in Fig. 8. This is contrary to what happens with the integer order controller, where the phase margin tends to zero as the gain increases, making the system less stable.

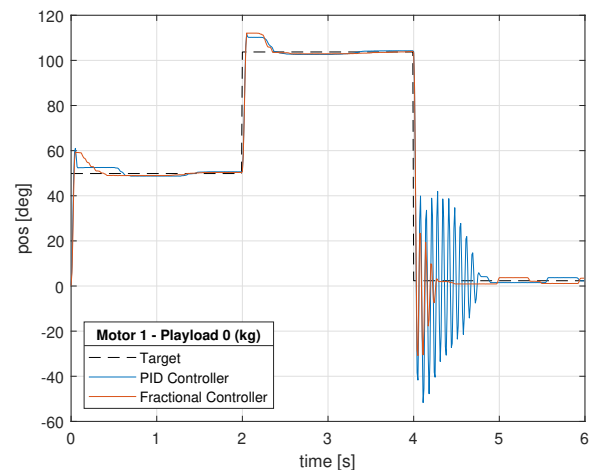


Figure 10: Comparison of PID and FOPI control systems for the case of 0g payload. Step inputs of  $50deg$  and  $-100deg$ .

The performance of the system with both controllers is show in the video at: [link](#).

## 5 Conclusions

This paper has presented the design of a soft robotic neck with two DOF providing pitch and roll movements. The movement constraint is a maximum inclination of  $40^\circ$ . The electromechanical design of the prototype have been addressed, which uses a coil compression spring to simulate the cervical vertebrae and cables that act as muscles. The mathematical model of the neck has been presented, including its inverse kinematics.

Two methods have been applied for the control of the soft robotic neck: a standard PID control approach and a Fractional Order PI (FOPI) one. The results validate both controllers for their use in the soft neck platform; however, due to the neck inherent varying gain property, the FOPI control system presents a better performance, showing a more enhanced robustness and stability for the entire actuation range when compared with the PID control alternative.

## Acknowledgement

The research leading to these results has received funding from the project Desarrollo de articulaciones blandas para aplicaciones robóticas, with reference IND2020/IND-1739, funded by the Comunidad Autónoma de Madrid (CAM) (Department of Education and Research), and from RoboCity2030-DIH-CM, Madrid Robotics Digital Innovation Hub (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos, FaseIV; S2018/NMT-4331), funded by "Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid" and cofunded by Structural Funds of the EU.

## References

- [1] H. Hirukawa, F. Kanehiro, K. Kaneko, S. Kajita, K. Fujiwara, Y. Kawai, F. Tomita, S. Hirai, K. Tanie, T. Isozumi *et al.*, "Humanoid robotics platforms developed in HRP," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 48, no. 4, pp. 165–175, 2004.
- [2] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent asimo: System overview and integration," in *IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, vol. 3. IEEE, 2002, pp. 2478–2483.
- [3] G. Thomann, M. Bétemps, and T. Redarce, "Study of a new intelligent tool for the colonoscopy," *CMBES Proceedings*, vol. 27, 2002.
- [4] I. Podlubny, "Fractional-order systems and  $\pi^\lambda d^\mu$  -controllers," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, no. 1, pp. 208–214, Jan 1999.
- [5] C. A. Monje, B. M. Vinagre, V. Feliu, and Y. Chen, "Tuning and auto-tuning of fractional order controllers for industry applications," *Control engineering practice*, vol. 16, no. 7, pp. 798–812, 2008.
- [6] A. Rastogi and P. Tiwari, "Optimal tuning of fractional order pid controller for dc motor speed control using particle swarm optimization," *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, ISSN, pp. 2231–2307, 2013.
- [7] K. Ranjbaran and M. Tabatabaei, "Fractional order [pi], [pd] and [pi][pd] controller design using bode's integrals," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 6, no. 1, pp. 200–212, Mar 2018.
- [8] L. Dorcak, "Numerical models for the simulation of the fractional-order control systems," *arXiv preprint math/0204108*, 2002.
- [9] M. F. Silva and J. T. Machado, "Fractional order  $pd^\alpha$  joint control of legged robots," *Journal of Vibration and Control*, vol. 12, no. 12, pp. 1483–1501, 2006.
- [10] T. Qingshun, W. Chunfu, Y. Yuanhui, L. Guodong, and Z. Fengyu, "Design and implementation of fractional order controller for service robots," *International Journal of Control and Automation*, vol. 8, no. 5, pp. 209–220, 2015.
- [11] C. A. Monje, Y. Chen, B. M. Vinagre, D. Xue, and V. Feliu, *Fractional-order Systems and Controls: Fundamentals and Applications*. Springer, 2010.
- [12] I. Petráš, "Fractional-order feedback control of a dc motor," *Journal of electrical engineering*, vol. 60, no. 3, pp. 117–128, 2009.
- [13] K. Khandani and A. A. Jalali, "Robust fractional order control of a DC motor based on particle swarm optimization," in *MEMS, NANO and Smart Systems*, ser. Advanced Materials Research, vol. 403. Trans Tech Publications, 2 2012, pp. 5030–5037.
- [14] D. Karaboga and B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (abc) algorithm," *Journal of global optimization*, vol. 39, no. 3, pp. 459–471, 2007.
- [15] A. Rajasekhar, P. Kunathi, A. Abraham, and M. Pant, "Fractal order speed control of dc motor using levy mutated artificial bee colony algorithm," in *2011 World Congress on Information and Communication Technologies*, Dec 2011, pp. 7–13.
- [16] V. H. Haji and C. A. Monje, "Fractional-order PID control of a chopper-fed DC motor drive using a novel firefly algorithm with dynamic control mechanism," *Soft Computing*, vol. 22, no. 18, pp. 6135–6146, 2018.
- [17] F. Martín, C. A. Monje, L. Moreno, and C. Balaguer, "DE-based tuning of  $\pi^\lambda d^\mu$  controllers," *ISA Transactions*, vol. 59, pp. 398–407, 2015.
- [18] S. Al-Ratrout, A. Saleem, and H. Soliman, "Optimization methods in fractional order control of electric drives: A comparative study," in *2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)*. IEEE, 2015, pp. 1–6.

- [19] S. Behzadipour and A. Khajepour, “Cable-based robot manipulators with translational degrees of freedom,” in *Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control*. InTech, 2006, pp. 221–236.
- [20] L. Nagua, C. A. Monje, J. Muñoz, and C. Balaguer, “Design and performance validation of a cable-driven soft robotic neck,” *Spanish Robotics Conference*, 2018.
- [21] W. K. Ho, C. C. Hang, and L. S. Cao, “Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specifications,” *Automatica*, vol. 31, no. 3, pp. 497–502, 1995.
- [22] C. Monje, F. Ramos, V. Feliu, and B. Vinagre, “Tip position control of a lightweight flexible manipulator using a fractional order controller,” *IET Control Theory & Applications*, vol. 1, no. 5, pp. 1451–1460, 2007.
- [23] Y. Chen, C. Hu, and K. L. Moore, “Relay feedback tuning of robust PID controllers with iso-damping property,” in *42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No. 03CH37475)*, vol. 3. IEEE, 2003, pp. 2180–2185.
- [24] V. Feliu, B. M. Vinagre, and C. A. Monje, “Fractional-order control of a flexible manipulator,” in *Advances in Fractional Calculus*. Springer, 2007, pp. 449–462.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# EVALUACIÓN DE DESCRIPTORES LOCALES EN LOCALIZACIÓN VISUAL CON IMÁGENES OJO DE PEZ

María Flores, David Valiente, Arturo Gil, Adrián Peidro, Oscar Reinoso, Luis Payá  
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad s/n 03202 Elche (Alicante), España  
{m.flores, dvaliente, arturo.gil, apeidro, o.reinoso, lpaya}@umh.es

## Resumen

*Un robot móvil debe ser capaz de localizarse en el entorno en el que se encuentra para navegar de forma autónoma. Para tal fin, en este trabajo se utiliza un método denominado Adaptive Probability-Oriented Feature Matching (APOFM). Este algoritmo consiste en obtener la pose relativa a partir de información visual de un par de imágenes, como un algoritmo de odometría visual. La principal característica de este método es que realiza un filtrado de los puntos característicos detectados utilizando información proporcionada por un modelo 3D del entorno. En dicho modelo, cada punto tiene asignada una probabilidad de existencia de correspondencia. Con esto se consigue un menor número de falsos positivos. Los objetivos principales de este trabajo son evaluar este método con distintos tipos de características locales y comparar su efectividad con un método de odometría visual estándar, además de analizar los resultados empleando imágenes tomadas con una cámara con lente de ojo de pez. Tras los distintos experimentos, la solución más precisa al estimar la pose relativa se ha obtenido con el método APOFM extrayendo la información visual con ORB.*

**Palabras clave:** Adaptive Probability-Oriented Feature Matching, odometría visual, localización, características locales.

## 1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de conseguir una navegación autónoma eficaz, un robot móvil debe ser capaz de resolver el problema de localización. En la literatura, se han empleado varios tipos de sensores y técnicas [1] para obtener la posición y orientación de un robot móvil de forma precisa. De entre todos los tipos de sensores que pueden ir a bordo del robot móvil, los sistemas de visión han recibido un gran interés. Este hecho se debe a que la información que proporciona al robot móvil puede aplicarse tanto para resolver el problema de localización como para realizar otras tareas de navegación autónoma.

En cuanto a las técnicas de localización que utilizan la información que ofrece este tipo de sen-

sor, se encuentra la odometría visual [12]. En este método, la pose se estima de forma incremental a partir de los cambios que el movimiento causa en las imágenes [4]. Las ventajas que presenta este enfoque son varias, por ejemplo, que no se ve afectado por el posible deslizamiento de las ruedas y que puede utilizarse para resolver el problema de localización en diferentes tipos de robots, no solo en los robots móviles con ruedas. Un ejemplo de ello se puede ver en [17] donde utilizan un proceso de odometría visual estéreo a partir de imágenes que han sido tomadas a bordo de un vehículo submarino autónomo.

Cabe señalar que el empleo de las cámaras con gran campo de visión tiene muchas ventajas en una gran cantidad de aplicaciones robóticas. Las cámaras omnidireccionales pueden capturar imágenes con un campo de visión de 360° alrededor del robot. Hay diferentes configuraciones posibles para obtener imágenes omnidireccionales [11] aunque los sistemas más utilizados son los catadióptricos y de ojo de pez. Un sistema catadióptrico está compuesto por una cámara de perspectiva convencional con un espejo convexo. De esta manera, se genera una vista completa de 360 grados (una esfera completa). Por ejemplo, Román et al. [8] muestran el desarrollo y evaluación de un enfoque de agrupamiento incremental para obtener modelos jerárquicos compactos del entorno utilizando un sistema de visión catadióptrico como fuente de información. Otra forma de aumentar el campo de visión es mediante la combinación de una lente ojo de pez y una cámara de perspectiva convencional. Por ejemplo, Matsuki et al. [7] proponen un método que extiende la odometría dispersa directa para utilizar la imagen completa incluso con una fuerte distorsión. Por ello, evalúan el enfoque utilizado con imágenes de ojo de pez.

La principal diferencia entre los sistemas de visión comentados en el párrafo anterior es que un sistema formado por una única lente de ojo de pez presenta un menor campo de visión en comparación con un sistema catadióptrico. A pesar de tal hecho, resulta interesante evaluar un algoritmo de odometría visual utilizando imágenes de este tipo de cámara ya que dispone de algunas característi-

cas relevantes comparado con el catadióptrico, como su reducido tamaño y ligereza. Además, el sistema de visión catadióptrico es estructuralmente más complejo.

Para resolver el problema de odometría visual, es necesario extraer y relacionar la información más relevante de las imágenes. En este trabajo, se emplea un algoritmo de odometría visual propuesto en trabajos de investigación previos [15], llamado Adaptive Probability-Oriented Feature Matching (APOFM). La finalidad de esta propuesta es resolver el problema de localización basado en el método estándar de odometría visual (en adelante, se mencionará como SVOM, Standard Visual Odometry Method) pero utilizando información de probabilidad asociada a la existencia de puntos característicos dentro del entorno. Dicha información es proporcionada por un modelo de escena que establece relaciones entre puntos 3D con alta probabilidad de existencia y sus proyecciones sobre un par de imágenes. De esta manera, estas proyecciones definen áreas de las imágenes donde es más probable que aparezcan puntos con correspondencias. El APOFM mejora el procesamiento de imágenes (detección y descripción de características y búsqueda de correspondencias) en SVOM, obteniendo una búsqueda de coincidencias más robusta y un rechazo de valores atípicos. De esta manera, la solución de localización obtenida es más precisa.

En el trabajo anterior [15] se evaluó este método utilizando las imágenes capturadas por un sistema catadióptrico y utilizando solo puntos característicos SURF para extraer la información visual. Teniendo en cuenta esto, el presente estudio emplea diferentes tipos de detectores y descriptores de puntos característicos (SURF, ORB, FAST y KAZE) y evalúa la influencia del tipo de característica sobre el rendimiento de la odometría visual utilizando APOFM con imágenes tomadas con una cámara de lente de ojo de pez. En la sección dedicada a los experimentos (Sección 4), se analizan tanto los resultados del proceso de búsqueda de correspondencias como la precisión de la odometría visual en la estimación de la posición y orientación del robot, y estos resultados se comparan con los obtenidos con un método de odometría visual estándar. Como ya se ha comentado, otro objetivo de los experimentos es analizar el comportamiento de este método con imágenes de lente de ojo de pez. Para lograr tal fin, hemos utilizado un conjunto de imágenes de este tipo disponible públicamente [19].

Este trabajo se encuentra estructurado de la siguiente forma: los diferentes tipos de características locales utilizados en este trabajo se presentan

en la Sección 2; en la Sección 3 se describe el método empleado; los resultados obtenidos durante los experimentos se muestran en la Sección 4; y, finalmente, las conclusiones se exponen en la Sección 5.

## 2. CARACTERÍSTICAS LOCALES

Para extraer y describir la información relevante de una imagen, se pueden emplear principalmente dos tipos de métodos: características globales o locales. En cuanto a los descriptores de apariencia global, cada imagen se describe con un único vector. Se espera que este descriptor sea invariable frente a cambios globales. Por ejemplo, Amorós et al. [3] presentan una comparación de técnicas de descripción de apariencia global (incluyendo el uso de la información de color) para creación de mapas y localización utilizando solo la información proporcionada por imágenes omnidireccionales.

Por el contrario, las características locales son patrones o estructuras (por ejemplo, puntos, bordes o pequeñas áreas) presentes en una imagen. Difieren de su vecindario inmediato en términos de intensidad, color y/o textura [13]. En este sentido, Valiente et al. [14] comparan los resultados de un método de odometría visual con imágenes omnidireccionales extrayendo la información visual con estas dos técnicas.

Las citadas características locales se pueden considerar como la combinación de un detector de características y un descriptor. Los detectores se utilizan para encontrar las características esenciales de la imagen, mientras que los descriptores describen las características extraídas y generan un vector descriptivo. Hay varios tipos de características locales propuestas en la literatura. Joshi y Patel [6] exponen una evaluación de distintos métodos de detección y descripción.

En este trabajo, hemos usado los siguientes tipos de características locales: SURF [5] (basado en blobs y con el vector descriptor real), FAST [9] (esquinas y con vector descriptor binario), ORB [10] (esquinas y con vector descriptor binario) y KAZE [2] (blobs y con vector descriptor real).

## 3. MÉTODO APOFM

APOFM consiste en resolver el problema de localización basado en un algoritmo de odometría visual estándar, pero incorporando información de probabilidad proporcionada por un modelo de la escena. Este modelo consiste en una distribución de probabilidad que caracteriza dinámicamente la aparición de correspondencias encontradas en ite-

raciones anteriores. La técnica empleada para este propósito es el Proceso Gaussiano (GP) [16]. En la Figura 1 se muestra el digrama de APOFM con los distintos pasos que lo componen. En la primera iteración ( $t = 1$ ) del algoritmo, dado que todas las proyecciones de los puntos 3D de la escena tienen la misma probabilidad de ser una correspondencia, la pose relativa se estima resolviendo el SVOM. De este modo, primero se detectan los puntos característicos en cada imagen ( $I_0$  e  $I_1$ ), después se extraen los vectores descriptores de todos los puntos detectados y, posteriormente, se buscan correspondencias en función de la similitud entre descriptores. La medida de similitud utilizada para los descriptores de características binarias es la distancia Hamming y, por el contrario, para otros formatos de descriptores es la distancia euclídea al cuadrado. Por lo tanto, de estos tres pasos se ha obtenido un conjunto de correspondencias 2D a 2D. El último paso es estimar el movimiento relativo usando la geometría epipolar y el conjunto de puntos obtenido en el paso anterior. Dado que para emplear la matriz esencial es necesario conocer los parámetros intrínsecos de la cámara, se ha realizado el proceso de calibración previamente. De esta forma, al ejecutar el algoritmo, los valores de estos parámetros son conocidos.

En este trabajo, la pose relativa se expresa mediante cinco parámetros angulares ( $\theta, \gamma, \alpha, \phi, \beta$ ) y un factor de escala ( $\rho$ ). Los tres primeros parámetros angulares están asociados con la orientación ( $\theta, \gamma, \alpha$ ). Los otros dos ( $\phi, \beta$ ), junto con el factor de escala ( $\rho$ ), están asociados a la traslación expresada en coordenadas esféricas, donde  $\rho$  es la distancia relativa entre los centros de ambas cámaras (excepto por un factor de escala),  $\phi$  es el ángulo en el plano x-y y  $\beta$  el ángulo de elevación desde dicho plano. Los valores de los cinco parámetros angulares son los que se estiman en este trabajo y se muestran en la sección correspondiente a los experimentos. Después de esta primera iteración, ya se ha obtenido información sobre correspondencia de características. De esta forma, es posible obtener el modelo y emplear esta información en el algoritmo.

### 3.1. MODELO 3D DE PROBABILIDAD

Para poder crear el modelo, cuyos pasos se pueden ver en la Figura 2, en primer lugar, se deben recuperar las coordenadas 3D de cada par del conjunto de correspondencias 2D a 2D con los que se ha estimado la pose anterior. A este ejercicio se le conoce como problema de triangulación. En este sentido, dado un par de imágenes, si los puntos característicos coincidentes son en realidad la proyección del mismo punto 3D, sus rayos deben intersectar en este punto 3D. Sin embargo, este hecho no siempre ocurre debido a la presencia de varios tipos de ruido (por ejemplo, error debido a que los parámetros de calibración no son precisos o ruido durante la detección de características). Por lo tanto, el problema de triangulación se reduce a encontrar la mejor solución, por ejemplo, utilizando el método del punto medio donde se supone que el punto 3D es el punto medio de la perpendicular común a ambas líneas 3D. No obstante, las dos líneas 3D no se cruzan en algunos casos porque la coincidencia de este par de puntos característicos es un falso positivo, lo que significa que no son la proyección del mismo punto 3D, aunque sus descriptores sean similares y por ello han sido asociados incorrectamente durante el paso de búsqueda coincidente.

Para poder evaluar la efectividad del APOFM y SVOM con respecto a los falsos positivos, hemos agregado un bloque, denominado contador de falsos positivos. En este bloque, dado un punto 3D, se vuelve a proyectar sobre la segunda imagen, empleando el modelo de la cámara. Si está cerca del punto característico con el que se han obtenido (junto con su correspondencia en la primera imagen) sus coordenadas 3D, significa que el punto característico es la proyección de este punto 3D y, por lo tanto, el par de puntos coincidentes es un verdadero positivo. En caso contrario, estamos ante un falso positivo. De este modo, se calcula la distancia entre estos dos puntos, como se puede ver en la Figura 2, y si es mayor a un determinado valor ( $a$ ) se trata de un falso positivo.

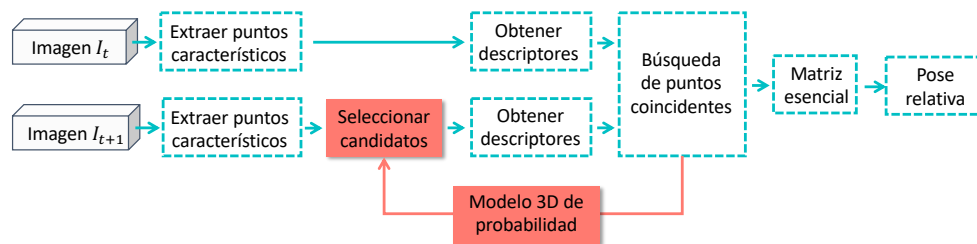


Figura 1: Diagrama del algoritmo del APOFM. Los bloques de APOFM añadidos al SVOM se han resaltado con otro color (rojo).



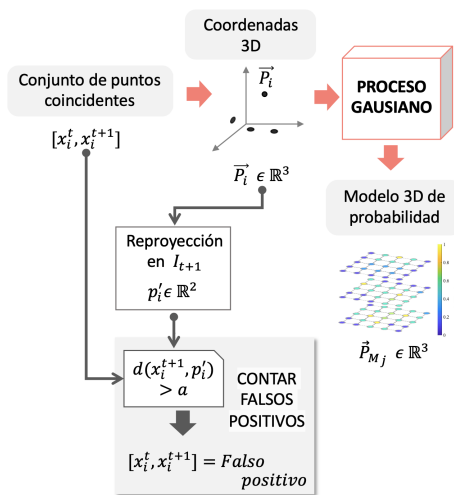


Figura 2: Crear del modelo 3D y contar falsos positivos.

Después de resolver el problema de triangulación, el siguiente paso es crear el modelo de la escena. Para realizar esta tarea se ha recurrido al GP. El bloque GP recibe datos de entrada de entrenamiento que corresponden al conjunto de coordenadas 3D y datos de salida de entrenamiento que son un vector de unos que indican que la proyección de estos puntos 3D en el par de imágenes ha sido considerado correspondientes. Además, hay un conjunto de puntos de test que son los puntos 3D que definen el modelo. La salida del GP es la media y la covarianza de la distribución condicional predicha para los puntos de prueba. Como el objetivo es crear un modelo de probabilidad de la escena, la predicción debe tomar valores entre cero y uno. Para este fin, se emplea una función logística (sigmoidea). Finalmente, el mapa global se actualiza usando Bayesian Committee Machine (BCM).

### 3.2. SELECCIÓN DE PUNTOS CANDIDATOS

Una vez el modelo de escena 3D con probabilidad es creado ( $t = 1$ ) o actualizado ( $t > 1$ ), el robot móvil se mueve a una nueva posición, y se toma una imagen  $I_{t+1}$ , de la cual se extraen los puntos característicos. Después, se proyecta la información de probabilidad 3D en esta nueva imagen.

Para proyectar de 3D a 2D y viceversa, se deben conocer tanto los parámetros intrínsecos como extrínsecos. Los primeros se han obtenido previamente con el proceso de calibración. Por contra, los segundos se estiman empleando el modelo de vehículo y aplicando la transformación de la estructura del robot móvil al sistema de referencia

de la cámara (se conoce porque la cámara está en todo momento instalada en la misma posición a bordo del robot móvil). Estos datos de odometría solo se utilizan para el mapeo de puntos 2D a 3D y de 3D a 2D.

En esta etapa del algoritmo, se tienen dos conjuntos de puntos en coordenadas de píxel: uno con información de imagen (puntos característicos) y otro con probabilidad basada en correspondencias (proyección del modelo 3D de la escena). El paso de selección de puntos candidatos viene dado por una búsqueda del punto más cercano en el segundo conjunto a cada punto del primero. Esta búsqueda se basa en una medida métrica, concretamente la distancia City-block, y la técnica para encontrar al vecino más cercano es el algoritmo del árbol kd. Un punto característico se considerará candidato si la distancia calculada es menor que un umbral específico ( $\chi$ ) cuyo valor está dado por la inversa de la función de distribución acumulativa de chi-cuadrado. Si el punto característico se clasifica como candidato para encontrar una coincidencia en la imagen  $I_t$ , a dicho punto se le asocia la probabilidad del punto proyectado más cercano. De esta forma, los puntos candidatos se pueden filtrar de acuerdo con el valor de probabilidad asociado, obteniendo un conjunto de puntos característicos candidatos cuya probabilidad de encontrar una coincidencia es mayor que una probabilidad mínima ( $\rho_{min}$ ). En la Figura 3, se muestra el esquema de selección de puntos candidatos.

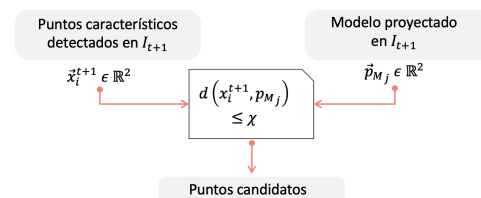


Figura 3: Clasificación de los puntos característicos como candidatos.

Los siguientes pasos son buscar correspondencias, obtener la matriz esencial y extraer la pose relativa, que corresponden al algoritmo de odometría visual estándar. Sin embargo, la diferencia radica en que de la segunda imagen únicamente se extraen los descriptores de los puntos clasificados como candidatos, ya que solo estos puntos buscarán sus puntos coincidentes en la primera imagen.

## 4. EXPERIMENTOS

Como se indica en la Sección 3, APOFM estima la pose relativa a partir de puntos de características locales. Teniendo en cuenta esto, los experimen-

tos realizados en este trabajo tienen dos objetivos principales: (a) evaluar el comportamiento del APOFM con varios tipos de características locales para determinar cuál de ellos proporciona una estimación más precisa de la pose relativa; y (b) realizar una comparación entre APOFM y SVOM con el fin de evaluar la mejora lograda con el método APOFM. Por tanto, se han realizado un total de ocho pruebas como resultado de la combinación de los dos métodos y las cuatro características locales.

Para evaluar la influencia del tipo de características, hemos realizado un estudio sobre los siguientes aspectos: el número de características detectadas con cada tipo de puntos característicos, cuántos de ellos han encontrado coincidencia en la otra imagen y los falsos positivos (Sección 4.1); el error al resolver el problema de localización (Sección 4.2); y el tiempo de cálculo (Sección 4.3). En cada figura, el resultado que se muestra es el promedio de los valores obtenidos con cada par de imágenes. Todos los experimentos se han realizado con un PC con CPU Intel Core i7-10700 R a 2.90GHz y Matlab 2019 como software.

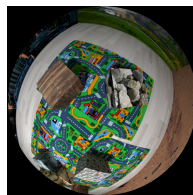


Figura 4: Ejemplo de una de las imágenes disponibles en la base de datos.

Con respecto a las imágenes, hemos utilizado un conjunto de datos público [19], que proporciona, a su vez, un conjunto de imágenes tomadas con una cámara de lente de ojo de pez (ver Figura 4) y un archivo de salida con las posiciones de la cámara en las que ha capturado cada imagen (ground truth). Se compone de un total de 200 imágenes con una resolución de 640x480 píxeles.

#### 4.1. NÚMERO DE PUNTOS Y CORRESPONDENCIAS

Como se ha mencionado, el algoritmo de APOFM, así como el de SVOM, a partir de un par de imágenes, detectan puntos característicos locales en cada una y obtienen un conjunto de correspondencias entre ellos que se emplean para resolver el problema de localización. Por lo tanto, esta parte del algoritmo será lo que estudiaremos en esta subsección.

En el eje X de la Figura 5, se muestra la cantidad de puntos característicos detectados en función del método empleado para su detección y descripción

(es independiente al método escogido para resolver el problema de odometría). El eje Y de esta misma figura representa el número de estos puntos que finalmente han encontrado correspondencia en la otra imagen. El número de coincidencias sí depende del método de odometría empleado, por lo que el número obtenido con cada uno está representado con un color distinto. Tras analizar la Figura 5, podemos concluir que ORB y KAZE ofrecen el mayor número de correspondencias. Por el contrario, SURF proporciona el menor número de coincidencias con ambos métodos. En el caso de KAZE, se obtienen más correspondencias de puntos, aunque la cantidad de puntos característicos detectados no sea tan elevada como al emplear ORB o FAST. Por lo que respecta a los métodos de odometría, podemos observar que el algoritmo SVOM encuentra más coincidencias que APOFM. Esto último era predecible, ya que el segundo método no utiliza todos los puntos característicos detectados en este paso, sino solo aquellos que se han considerado candidatos a encontrar sus coincidencias debido a su probabilidad de existencia.

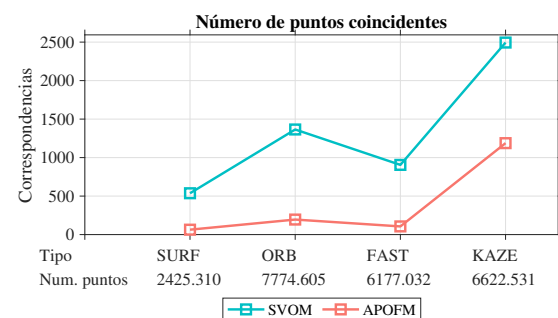


Figura 5: El número medio de puntos detectados se muestra en la parte inferior del eje X y en el eje Y se representa el número medio de ellos que han encontrado correspondencia.

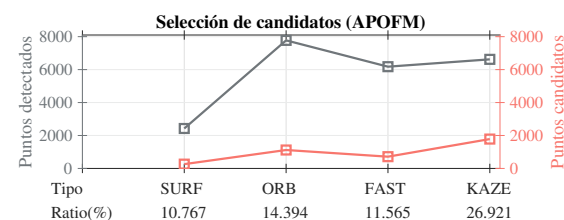


Figura 6: Número medio de puntos clasificados como candidatos.

En la Figura 6, se muestra el número de puntos característicos detectados y cuántos de ellos se han considerado como candidatos, así como el ratio entre dichos valores, únicamente para el algoritmo APOFM. De esta forma, podemos extraer que el número de puntos característicos que se consideran durante la búsqueda de correspondencia es menor que el conjunto de características inicial ya

que se ha filtrado por probabilidad de existencia.

Además de lo mencionado, es importante analizar cuántos de estos pares de correspondencias son verdaderos positivos y cuántos son falsos positivos. En este sentido, la Figura 7 muestra el valor medio y la desviación estándar del número de falsos positivos en cada caso. Con APOFM, el valor medio y la desviación estándar es menor en todos los casos excepto con KAZE. De esta forma, podemos decir que con este método se consigue un menor número de valores atípicos en la búsqueda de correspondencias en ambas imágenes.

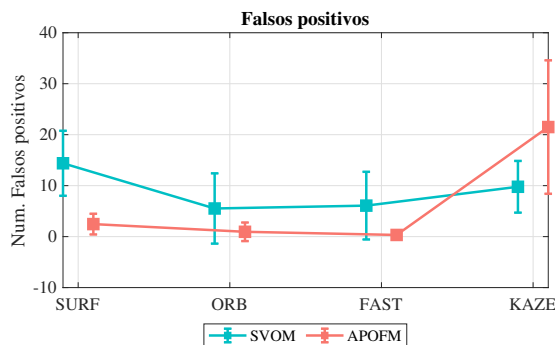


Figura 7: Falsos positivos.

#### 4.2. ESTIMACIÓN DE LA POSE RELATIVA

No se puede obviar que el objetivo es estimar la pose relativa con la mayor precisión posible. Por lo tanto, se debe estudiar el error obtenido con cada combinación y así ver cómo funciona el método de localización dependiendo del tipo de puntos característicos utilizados como entrada. Para calcular el error, se ha utilizado el ground truth proporcionado por la base de datos. Como se ha comentado con anterioridad, el movimiento relativo se descompone en una traslación definida por dos parámetros angulares  $\phi$  y  $\beta$  (Figura 8(a) y Figura 8(b), respectivamente) y una rotación que viene dada por  $\theta$ ,  $\gamma$  y  $\alpha$  (Figura 9(a), Figura 9(b) y Figura 9(c)).

Analizando las figuras correspondientes a la traslación, podemos observar que el error es mayor con SURF, como cabía esperar considerando los resultados obtenidos en la anterior subsección, es decir, menor precisión y menor número de puntos detectados y coincidencias. En cuanto a la Figura 8(a), el método APOFM presenta un error menor con respecto a SVOM en todos los casos, excepto cuando se utiliza KAZE, aunque la diferencia de error entre ambos métodos es pequeña. No obstante, en relación con la desviación estándar, APOFM presenta mejores resultados. De esto se puede concluir que la mejor solución de localiza-

ción se ha obtenido con la combinación del método APOFM y ORB, estando el error en  $\phi$  en torno a  $4^\circ$ . En cambio, APOFM proporciona el menor error, con independencia del tipo de característica, estimando el parámetro  $\beta$ . En cuanto a la rotación, APOFM estima la orientación con más precisión que SVOM. Del mismo modo que en la traslación, la mejor solución de localización, esto es, el menor error, se obtiene con ORB.

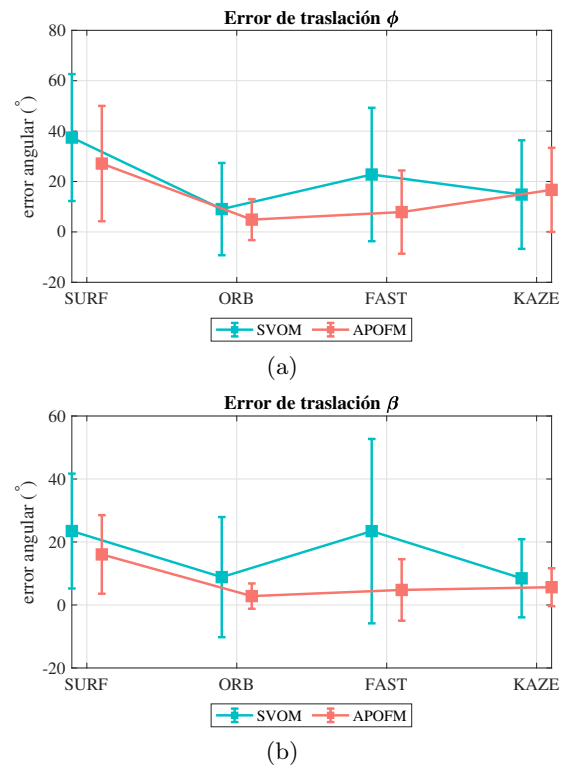


Figura 8: Error calculando (a)  $\phi$  y (b)  $\beta$ .

#### 4.3. TIEMPO DE CÁLCULO

Finalmente, también es necesario analizar el tiempo de cálculo computacional requerido en cada una de las combinaciones estudiadas en las subsecciones anteriores. En el Cuadro 1 se muestra la media de del tiempo de estimación de la pose relativa a partir de cada par de imágenes.

Cuadro 1: Tiempo medio de cálculo en segundos.

	SURF	ORB	FAST	KAZE
SVOM	2,34s	14,66s	13,64s	2,04s
APOFM	1,26s	3,51s	2,68s	12,05s

El tiempo transcurrido durante la estimación de la pose relativa es menor para APOFM cuando las características locales son SURF, ORB y FAST. Esto se debe a que, en el caso de APOFM, el número de puntos característicos correspondientes

a  $I_{t+1}$  que tiene que encontrar una coincidencia es menor que en el caso de SVOM, pues los puntos característicos han sido filtrados (candidatos). De esta manera, el tiempo asociado con este paso y las características SURF, ORB y FAST también es más reducido, salvo cuando se usa KAZE.

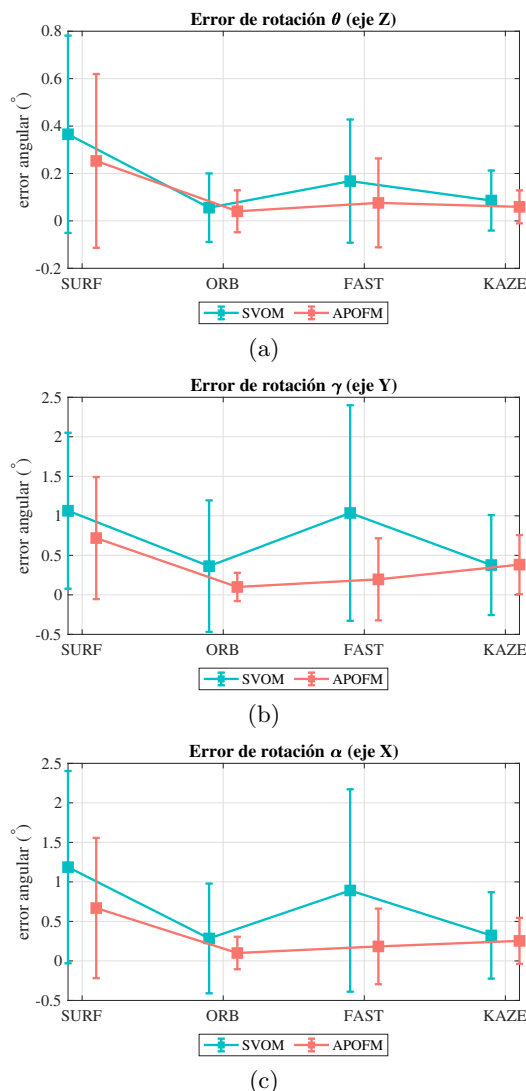


Figura 9: Error calculando (a)  $\theta$ , (b)  $\gamma$  y (c)  $\alpha$ .

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo, el problema de localización se resuelve utilizando una base de datos con imágenes ojo de pez disponibles públicamente. Hemos estudiado el comportamiento del método APOFM al utilizar distintos detectores y descriptores de características locales. APOFM modela el entorno de forma dinámica con puntos 3D que presentan cierta probabilidad de existencia de puntos característicos. En este sentido, las correspondencias de características se pueden encontrar en áreas determinadas de las imágenes. Dicho modelo dinámico

se obtiene empleando una técnica de aprendizaje automático, el GP.

En [15], los autores evalúan este método utilizando imágenes tomadas por un sistema de visión catadióptrico y características SURF únicamente. Por el contrario, en el presente análisis se ha examinado el comportamiento de la técnica de localización mediante un total de ocho pruebas como resultado de combinar un algoritmo (el SVOM o el APOFM) y un tipo de característica local (SURF, ORB, FAST o KAZE). Para cada caso, hemos estudiado varios aspectos.

Tras analizar los resultados, podemos concluir que el método APOFM ha superado considerablemente al SVOM con respecto a la solución de localización y el tiempo de cálculo cuando las características locales son SURF, ORB y FAST. La diferencia entre ambos métodos cuando usan KAZE es insignificante, y el error al usar el método APOFM es un poco mayor. La combinación del método APOFM y ORB proporciona una localización más precisa (el error se encuentra alrededor de los  $4^\circ$  para el parámetro de traslación  $\phi$ ), así como un tiempo de cálculo más reducido en comparación con SVOM.

En resumen, el problema de localización que se resuelve usando el método APOFM se ha mejorado empleando otros tipos de puntos característicos, concretamente ORB. Como trabajo futuro, sería interesante evaluar este método con otras características locales, como ASIFT [18], que es invariante a transformaciones afines. Además, otra investigación futura podría consistir en ampliar estos resultados comparativos a otros modelos de imágenes no lineales. Dado que este método se basa en un modelo de la escena, sería interesante también evaluar este método en exteriores, ya que podría presentar algunas limitaciones en cuanto a la creación del modelo 3D (el entorno no está tan acotado como en interiores).

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por la Generalitat Valenciana mediante la beca con referencia ACIF/2020/141.

## English summary

## EVALUATION OF LOCAL DESCRIPTORS IN VISUAL LOCALIZATION WITH FISHEYE IMAGES

## Abstract

*To navigate autonomously, a mobile robot must be able to localize itself in the environment.*

*To that end, in this work, a method called Adaptive Probability-Oriented Feature Matching (APOFM) is used. This algorithm obtains the relative pose from visual information (a pair of images), as a visual odometry algorithm. The main feature of this method is that it performs a filtering of the feature points using the information provided by a 3D model of the environment, in which each point is assigned a probability of existence of correspondence. This results in fewer false positives. The main objectives of this work are to evaluate this method with different types of local features and compare its effectiveness with the standard visual odometry method, and also to analyze the results using images taken by a fisheye lens camera. After the different experiments, the most precise solution estimating the relative pose was obtained with the APOFM method, extracting the visual information with ORB.*

**Keywords:** Adaptive Probability-Oriented Feature Matching, visual odometry, localization, local features.

## Referencias

- [1] ALATISE, M. B., AND HANCKE, G. P. A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods. *IEEE Access* 8 (2020), 39830–39846.
- [2] ALCANTARILLA, P. F., BARTOLI, A., AND DAVISON, A. J. KAZE features. In *Computer Vision – ECCV 2012* (Berlin, Heidelberg, 2012), A. Fitzgibbon, S. Lazebnik, P. Perona, Y. Sato, and C. Schmid, Eds., Springer Berlin Heidelberg, pp. 214–227.
- [3] AMORÓS, F., PAYÁ, L., MAYOL-CUEVAS, W., JIMÉNEZ, L. M., AND REINOSO, O. Holistic descriptors of omnidirectional color images and their performance in estimation of position and orientation. *IEEE Access* 8 (2020), 81822–81848.
- [4] AQEL, M. O. A., MARHABAN, M. H., SARIPAN, M. I., AND ISMAIL, N. B. Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications. *SpringerPlus* 5, 1 (2016), 1897.
- [5] BAY, H., ESS, A., TUYTELAARS, T., AND VAN GOOL, L. Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding* 110, 3 (2008), 346–359. Similarity Matching in Computer Vision and Multimedia.
- [6] JOSHI, K., AND PATEL, M. I. Recent advances in local feature detector and descriptor: a literature survey. *International Journal of Multimedia Information Retrieval* 9, 4 (2020), 231–247.
- [7] MATSUKI, H., VON STUMBERG, L., USENKO, V., STÜCKLER, J., AND CREMERS, D. Omnidirectional DSO: Direct Sparse Odometry With Fisheye Cameras. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3, 4 (2018), 3693–3700.
- [8] ROMÁN, V., PAYÁ, L., CEBOLLADA, S., AND REINOSO, Ó. Creating incremental models of indoor environments through omnidirectional imaging. *Applied Sciences* 10, 18 (2020).
- [9] ROSTEN, E., AND DRUMMOND, T. Machine learning for high-speed corner detection. In *Computer Vision – ECCV 2006* (Berlin, Heidelberg, 2006), A. Leonardis, H. Bischof, and A. Pinz, Eds., Springer Berlin Heidelberg, pp. 430–443.
- [10] RUBLEE, E., RABAUD, V., KONOLIGE, K., AND BRADSKI, G. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. In *2011 International Conference on Computer Vision* (2011), pp. 2564–2571.
- [11] SCARAMUZZA, D. *Omnidirectional Camera*. Springer US, Boston, MA, 2014, pp. 552–560.
- [12] SCARAMUZZA, D., AND FRAUNDORFER, F. Visual odometry [tutorial]. *IEEE Robotics Automation Magazine* 18, 4 (2011), 80–92.
- [13] TUYTELAARS, T., AND MIKOLAJCZYK, K. Local invariant feature detectors: A survey. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision* 3, 3 (2008), 177–280.
- [14] VALIENTE, D., FERNÁNDEZ, L., GIL, A., PAYÁ, L., AND REINOSO, O. Visual odometry through appearance-and feature-based method with omnidirectional images. *Journal of Robotics* 2012 (2012).
- [15] VALIENTE, D., PAYÁ, L., JIMÉNEZ, L. M., SEBASTIÁN, J. M., AND REINOSO, Ó. Visual information fusion through bayesian inference for adaptive probability-oriented feature matching. *Sensors* 18, 7 (2018).
- [16] WILLIAMS, C. K., AND RASMUSSEN, C. E. *Gaussian processes for machine learning*, vol. 2. MIT press Cambridge, MA, 2006.
- [17] WIRTH, S., CARRASCO, P. L. N., AND CODINA, G. O. Visual odometry for autonomous underwater vehicles. In *2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen* (2013), IEEE, pp. 1–6.
- [18] YU, G., AND MOREL, J.-M. ASIFT: An Algorithm for Fully Affine Invariant Comparison. *Image Processing On Line* 1 (2011), 11–38.
- [19] ZHANG, Z., REBECQ, H., FORSTER, C., AND SCARAMUZZA, D. Benefit of large field-of-view cameras for visual odometry. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2016), pp. 801–808.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL DE FUERZA PARA UN ROBOT DE REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR

J.V. García-Pérez, A. Blanco, J.M. Catalán, S. Ezquerro, J. Álvarez-Pastor, M. Arnau-Papí  
N. Garcia-Aracil, Universidad Miguel Hernandez, Instituto de Bioingeniería, j.garciap@umh.es

## Resumen

*El envejecimiento de la población aumentará la incidencia de las enfermedades relacionadas con la edad, como los accidentes cerebrovasculares. La robótica ha demostrado ser efectiva en la aplicación de terapias de rehabilitación a personas que presenten una pérdida de movilidad asociada a estas patologías. Existen numerosos sistemas de control apropiados para la interacción entre robots y pacientes en este tipo de terapias. De entre ellos, en este artículo se propone el uso de campos de potencial de fuerza en un dispositivo robótico de rehabilitación de miembro superior para pacientes que hayan sufrido pérdida de movilidad debido a un accidente cerebrovascular. En la primera parte del artículo se expone la formulación de los campos de potencial y se define el dispositivo robótico en el que han sido implementados. Posteriormente, se plantea una experimentación con sujetos sanos para comprobar la validez de esta estrategia de control. Los resultados muestran una disminución del error en los movimientos de los sujetos y abren la puerta a pruebas posteriores con pacientes reales.*

**Palabras clave:** Robótica de rehabilitación, Sistemas de control, Campos de potencial de fuerza.

## 1 INTRODUCCIÓN

La población mayor de 65 años aumentará a nivel mundial más de un 200% en los próximos años, según datos de la Organización Mundial de la Salud [14]. Esto conllevará un aumento de casos de enfermedades relacionadas con la edad, como los accidentes cerebrovasculares, que pueden provocar, entre otras patologías, una pérdida parcial o total de movilidad en una o varias de las extremidades de quienes los sufren.

Se ha demostrado que ejercicios basados en movimientos voluntarios pueden producir resultados clínicos significativos en la rehabilitación motora [11, 12]. Asimismo, existen numerosos estudios que avalan la eficacia

de la terapia asistida por robots en la recuperación de la función motora en pacientes con este tipo de afecciones [1, 9, 13, 19].

Para lograr los mejores resultados en la terapia de rehabilitación es fundamental mantener al paciente en su nivel óptimo de esfuerzo [5]. Por ello, en sujetos que son capaces de iniciar el movimiento del brazo hacia un objetivo o incluso de realizarlo por completo con ciertas dificultades, interesa que el robot no aplique una asistencia total, sino que ayude a la persona realizando parte del esfuerzo, o bien que le corrija cuando se aleje demasiado del recorrido deseado.

La mayoría de estrategias de control relacionadas con el ámbito de la rehabilitación consisten en la implementación de controles de impedancia [15], si bien existen algunos casos en los que se han empleado campos de potencial de fuerza como alternativa [8, 16]. En este artículo se ha optado por la segunda opción debido a que su implementación resulta más sencilla por no requerir del sensado de las fuerzas de interacción con el usuario.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 SUJETOS

Para comprobar el funcionamiento de los campos de fuerza desarrollados se llevó a cabo una experimentación con 8 usuarios sanos, 7 varones y una mujer, de entre 23 y 45 años ( $28, 25 \pm 7$ , 23 años).

### 2.2 DISPOSITIVO ROBÓTICO DE REHABILITACIÓN

Los campos de potencial de fuerza desarrollados en este artículo han sido implementados en el dispositivo robótico de rehabilitación Rubidium, comercializado y distribuido por la empresa iDRhA [10]. Este dispositivo es una plataforma robótica planar de 2 grados de libertad activos, portátil, de tipo escritorio, diseñada para la rehabilitación de miembro superior.

Consiste en un mecanismo en forma de



paralelogramo articulado, accionado por dos motores eléctricos que le permiten aplicar una fuerza máxima en el efector final de 110 N, en un espacio de trabajo acotado por un semicírculo de 410 mm de radio. También dispone de un mando externo que cuenta con una seta de emergencia con la que detener de inmediato todo el sistema en caso de que sea necesario.

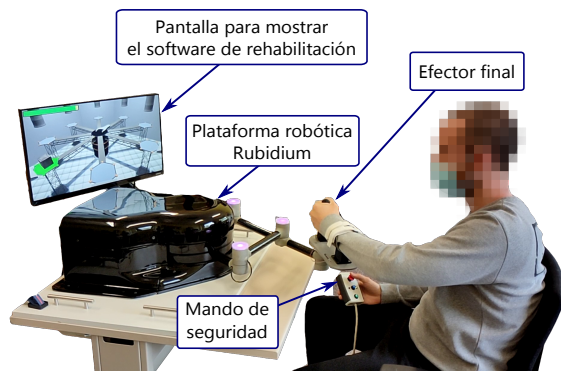


Figura 1: Set-up utilizado para la implementación y validación de los campos de potencial de fuerza

## 2.3 CAMPOS DE FUERZA

### 2.3.1 Túnel

En este modo de funcionamiento se busca ayudar al usuario a seguir una trayectoria rectilínea. En primer lugar, se genera el recorrido a partir de los puntos inicial y final deseados para, posteriormente, calcular una fuerza perpendicular a éste que atraiga al efector final hacia él y cuya magnitud será proporcional a la distancia entre ambos según la ecuación 1.

$$\|\vec{F}_t\| = F_{\max} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-\delta^2}{2c^2}\right)\right) + F_f \quad (1)$$

donde

- $\|\vec{F}_t\|$  es la magnitud de la fuerza a aplicar
- $F_{\max}$  es la máxima fuerza que puede aplicar el robot
- $\delta$  es la distancia del usuario a la trayectoria
- $c$  es un parámetro que permite ajustar el ancho de la gaussiana
- $F_f$  es una fuerza que se añade para compensar la fricción que pueda presentar el robot

De este modo se genera todo un campo de potencial de fuerzas atractivo, de acuerdo con la Figura 2. En ella se representa la magnitud

de la fuerza aplicada en colores y se muestra la trayectoria con sus puntos inicial y final en color negro.

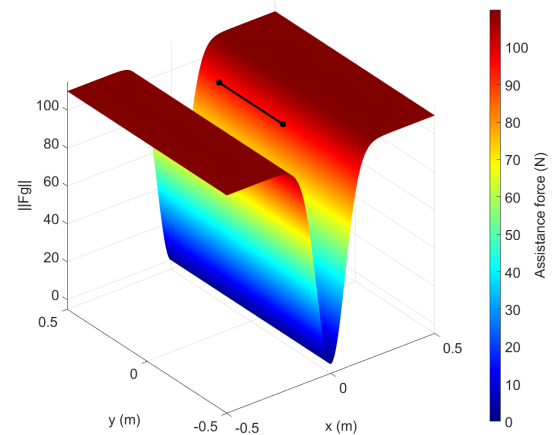


Figura 2: Campo de potencial de fuerza simulando un túnel en torno a una trayectoria rectilínea

### 2.3.2 Túnel con extremos

Este campo de fuerza es una modificación del túnel en la que se busca evitar que el usuario sobrepase los puntos inicial y final de la trayectoria rectilínea. Para ello, cuando éste se encuentra más allá de alguno de estos puntos se aplica una fuerza calculada de forma análoga a la Ecuación 1.

Todo ello da como resultado un campo de potencial de fuerzas como el de la Figura 3, en la que se muestra en negro la trayectoria con sus puntos inicial y final y la fuerza aplicada es representada mediante una escala de colores.

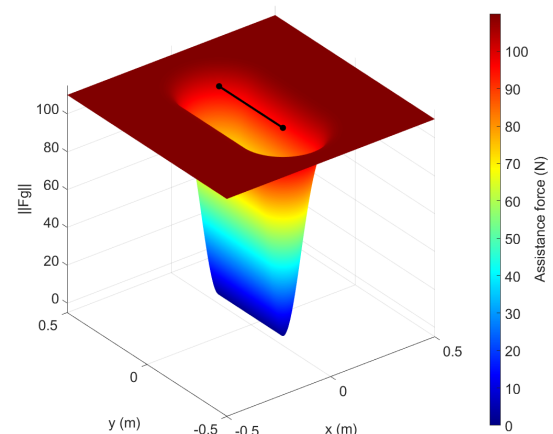


Figura 3: Campo de potencial de fuerza en torno a una trayectoria rectilínea cerrada en sus extremos

## 2.4 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Los participantes debían realizar una de las tareas de rehabilitación del robot Rubidium, que aparece representada en la Figura 4.

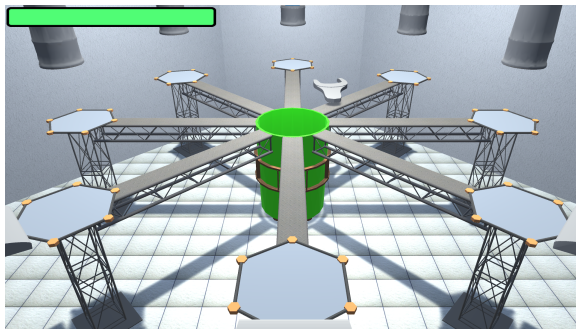


Figura 4: Captura de pantalla del software de rehabilitación utilizado para la validación de los campos de potencial de fuerza

Los sujetos se situaban frente al dispositivo robótico, sobre el cual se dispuso una pantalla que permitía visualizar el software de rehabilitación. A continuación, se les explicaba el funcionamiento del juego y se les colocaba el brazo sobre el robot, agarrando el efector final con su mano tal y como se muestra en la Figura 1.

La posición del efector final del equipo se utilizaba para mover el cursor en el software de rehabilitación, representado mediante una llave fija como la que aparece en la Figura 4.

El juego comenzaba al situar la llave fija en el centro del escenario. Acto seguido, aparecía una caja en una de las plataformas exteriores y se daba un tiempo a la persona para alcanzarla. Una vez se cogía la caja o bien se agotaba el tiempo, se debía volver al centro de la pantalla para repetir el proceso.

Puesto que los sujetos que participaron en la experimentación eran capaces de realizar movimientos rectilíneos sin asistencia, se establecieron ciertas condiciones con la intención de propiciar el fallo y estudiar así si existen diferencias al introducir los campos de potencial de fuerza frente a realizar los movimientos de forma libre.

- Todos los participantes realizaron 3 veces seguidas la misma tarea bajo distintas condiciones. En una ocasión no se aplicaba ningún campo de fuerza, en otra, para cada desplazamiento se añadía un túnel de fuerza y, en la restante, se establecía el túnel de fuerza con extremos entre el centro del escenario y cada objetivo. El orden en el que se aplicaron estas condiciones fue aleatorio

para cada usuario.

- Los campos de fuerza fueron calibrados para aplicar 100 N a 7 cm de distancia a la trayectoria.
- En cada tarea aparecían 8 objetivos siguiendo un orden en sentido horario, comenzando desde el más alejado del usuario.
- Se dejó un descanso entre tareas de un minuto de duración.
- Los participantes utilizaron siempre su mano no hábil y no se podían ayudar con la otra.

La Figura 5 resume el protocolo seguido durante la experimentación.

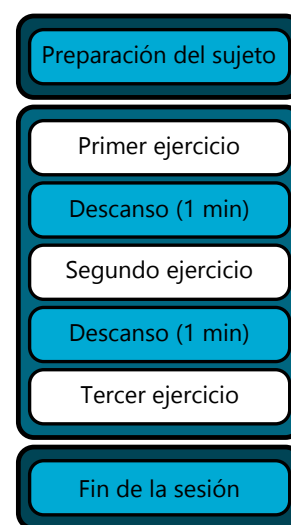


Figura 5: Etapas de la experimentación realizada

## 2.5 DATOS ADQUIRIDOS

Durante toda la sesión el robot registró la posición del efector final, al que está acoplada la mano del usuario, así como la fuerza aplicada debida a los campos de potencial.

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 6 muestra la posición de uno de los sujetos del estudio registrada en las diferentes condiciones de asistencia: en rojo, sin campos de potencial o en modo libre (Fig. 6a); en verde, aplicando túneles de fuerza entre el centro de la tarea y los objetivos (Fig. 6b), y en azul, incorporando extremos a estos túneles (Fig. 6c). La trayectoria ideal se representa mediante líneas discontinuas en color negro.

Puede apreciarse cómo la presencia de túneles de fuerza, tanto con extremos como sin ellos, provoca

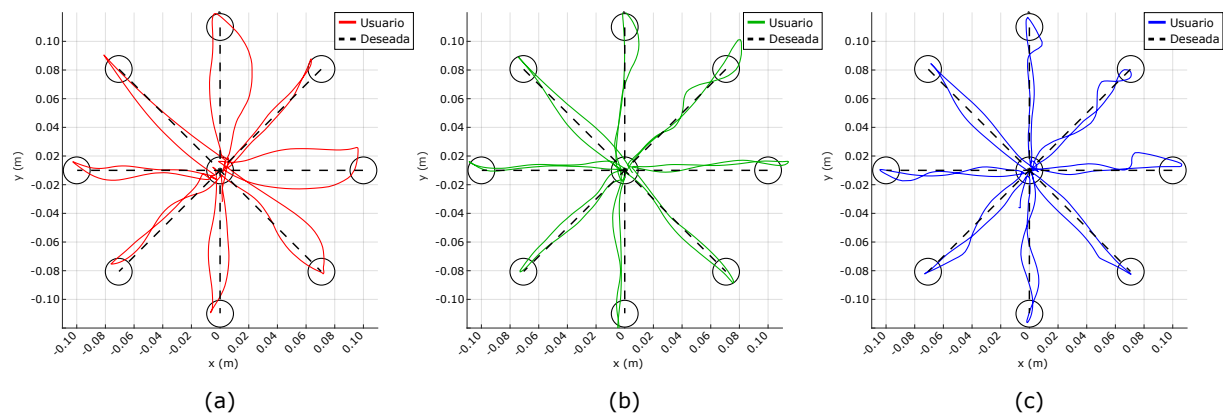


Figura 6: Trayectorias descritas por un usuario bajo diferentes condiciones de asistencia. (a) Rojo: modo libre, sin asistencia. (b) Verde: con túneles de fuerza sin extremos. (c) Azul: con túneles de fuerza con extremos.

que las trayectorias sean más rectilíneas. Por otra parte, el hecho de añadir extremos a los túneles de fuerza impide que se sobrepasen los objetivos, lo que puede resultar interesante en etapas avanzadas de la rehabilitación, en las que se busca que el paciente adquiera una mayor destreza y un control motor más fino.

Para estudiar la efectividad de los campos implementados a la hora de corregir el movimiento del usuario, se ha llevado a cabo el siguiente proceso:

1. Dividir los datos registrados en *trials*, que comprenden el movimiento de ir desde el centro hasta un objetivo y volver.
2. Calcular el error en posición para cada *trial*, entendido como la distancia del usuario hasta la trayectoria deseada en cada instante:  $\varepsilon$ .
3. Obtener el valor medio de dicho error:  $\bar{\varepsilon}$ .
4. Calcular, para cada usuario, la media de los errores medios anteriores:  $\langle \bar{\varepsilon} \rangle$ .

Los errores medios de todos los usuarios han sido representados en el diagrama de la Figura 7, agrupados para las 3 condiciones de la experimentación: sin fuerza, con el túnel y con el túnel con extremos.

Tabla 1: Error en las trayectorias registradas bajo diferentes condiciones de asistencia

Condición	Error en trayectoria (mm)
Modo libre	2,05 (1,81, 2,13)
Túnel de fuerza	1,29 (0,99, 1,65)
Túnel de fuerza con extremos	1,26 (1,05, 1,57)

Nota: Mediana ( $Q_1$ ,  $Q_3$ )

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos. Al igual que en la Figura 7, se observa que

la mediana de los errores calculados disminuye cuando se aplican campos de fuerza, presentando dispersiones razonablemente similares. Cabe esperar que, en futuras investigaciones con sujetos que sí que presenten dificultades de movimiento, la diferencia entre los errores cometidos con y sin campos de fuerza aumente notablemente.

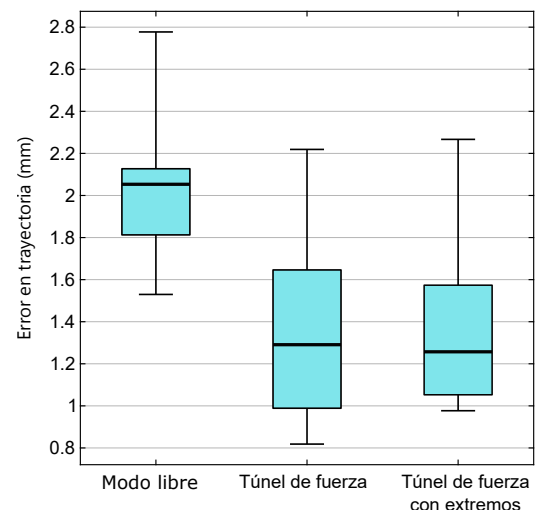


Figura 7: Error en trayectoria de los usuarios en las diferentes condiciones de la experimentación.

## 4 CONCLUSIÓN

En este artículo se ha expuesto la implementación de dos campos de potencial de fuerza, diseñados para ser utilizados en terapias robóticas de rehabilitación. En primer lugar, se ha presentado un campo de fuerza que emula un túnel en torno a una trayectoria rectilínea cuyo objetivo no es ayudar al usuario a efectuar el movimiento, sino guiarlo para evitar que se aleje de dicha trayectoria, así como otro campo que además evita que se sobrepasen sus extremos. A continuación,

se ha planteado una experimentación con 8 sujetos sanos en la que se ha comparado el desempeño durante una tarea de rehabilitación bajo diferentes condiciones: con campos de potencial y sin ellos. Finalmente, los resultados extraídos han permitido demostrar que el error medio en el seguimiento de la trayectoria disminuye significativamente al aplicar campos de potencial de fuerza y abren la puerta a futuras investigaciones con pacientes reales.

### Agradecimientos

Este estudio ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, perteneciente a la Agencia Estatal de Investigación (AEI), a través de la ayuda PEJ2018-002670-A y de la ayuda PEJ2018-002684-A. (Cofinanciado por el Fondo Social Europeo. FSE invierte en tu futuro), y por la Conselleria de Educación, Cultura y Deporte de la Generalitat Valenciana (GVA), a través de la ayuda ACIF/2018/214 y de la ayuda APOTIP/2020/014.

### English summary

## DESIGN AND IMPLEMENTATION OF FORCE CONTROL ALGORITHMS FOR AN UPPER-LIMB REHABILITATION ROBOT

### Abstract

*The aging of population will increase the incidence of age-related diseases, such as strokes. Robotic devices have proven their effectiveness in rehabilitation therapies for people who have a lack of mobility due to these diseases. There are many different systems to control the robot-human interaction in this type of therapies. This article proposes the use of force potential fields in a robotic upper-limb rehabilitation device for stroke patients. In the first part of the article the formulation of the force potential fields is shown and the robotic device used for the study is presented. Finally, an experimentation with healthy subjects is proposed to check the validity of this control strategy. The results show a decrease in the error in the subjects' movements and open the door to further tests with real patients.*

**Keywords:** Robotic rehabilitation, Control systems, Force potential field.

### Referencias

- [1] Aisen, M. L., Krebs, H. I., Hogan, N. et al. (1997). The effect of robot-assisted therapy and rehabilitative training on motor recovery following stroke. *Archives of neurology*, 54(4), pp. 443-446.
- [2] Badesa, F. J., Morales, R., Garcia-Aracil, N. et al. (2012). Multimodal interfaces to improve therapeutic outcomes in robot-assisted rehabilitation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 42(6), pp. 1152-1158.
- [3] Catalan, J. M., Garcia, J. V., Lopez, D. et al. (2018). Patient Evaluation of an Upper-Limb Rehabilitation Robotic Device for Home Use. *2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob)* (pp. 450-455). IEEE.
- [4] Catalán, J. M., Garcia, J. V., Lopez, D. et al. (2018) Evaluation of an upper-limb rehabilitation robotic device for home use from patient perspective. *International Conference on NeuroRehabilitation* (pp. 449-453). Springer, Cham.
- [5] Catalán, J. M., García-Pérez, J. V., Blanco, A. et al. (2021) Differences in Physiological Reactions Due to a Competitive Rehabilitation Game Modality. *Sensors*, 21(11), 3681.
- [6] Clemente, F. J. B. (2014). *Interfaz multimodal y control biocooperativo para sistemas de neuro-rehabilitación asistida por robots*. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández).
- [7] Díaz, I., Catalan, J. M., Badesa, F. J. et al. (2018). Development of a robotic device for post-stroke home tele-rehabilitation. *Advances in Mechanical Engineering*.
- [8] Díez, J. A., Badesa, F. J., Lledó, L. D., et al. (2016). Design and development of a pneumatic robot for neurorehabilitation therapies. *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference* (pp. 315-326). Springer, Cham.
- [9] Fasoli, S. E., Krebs, H. I., Stein, J. et al. (2003). Effects of robotic therapy on motor impairment and recovery in chronic

- stroke. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 84(4), pp. 477-482.
- [10] Innovative Devices for Rehabilitation & Assistance. <https://idrha.es/>
- [11] Jones, T. A., Chu, C. J., Grande, L. A. et al. (1999). Motor skills training enhances lesion-induced structural plasticity in the motor cortex of adult rats. *Journal of Neuroscience*, 19(22), pp. 10153-10163.
- [12] Kempermann, G., van Praag, H., Gage, F. H. (2000). Activity-dependent regulation of neuronal plasticity and self repair. *Progress in brain research*, 127, pp. 35-48.
- [13] Krebs, H. I., Hogan, N., Aisen, M. L., et al. (1996). Robot-Aided[26] MP Ottensmeyer. *Telerobotic surgery: Feedback time delay effects on Neurorehabilitation," IEEE Transactions on RehabilitationEngineering, vol. task assignment," Master's thesis, MIT, Cambridge, MA, 6*, pp. 75-87.
- [14] Mackay, J., Mensah, G. A. (2004). *The atlas of heart disease and stroke*. World Health Organization.
- [15] Marchal-Crespo, L., Reinkensmeyer, D. J. (2009). Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 6(1), pp. 1-15.
- [16] Mihelj, M., Nef, T., Riener, R. (2007). A novel paradigm for patient-cooperative control of upper-limb rehabilitation robots. *Advanced Robotics*, pp. 21(8), 843-867.
- [17] Ottenbacher, K. J., Smith, P. M., Illig, S. B. et al. (2004). Trends in length of stay, living setting, functional outcome, and mortality following medical rehabilitation. *Jama*, 292(14), pp. 1687-1695.
- [18] Richards, L., Hanson, C., Wellborn, M. et al. (2008). Driving motor recovery after stroke. *Topics in stroke rehabilitation*, 15(5), pp. 397-411.
- [19] Volpe, B. T., Krebs, H. I., Hogan, N. et al. (1999). Robot training enhanced motor outcome in patients with stroke maintained over 3 years. *Neurology*, 53(8), p 1874.

under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication

# DESARROLLO DE UN EXOESQUELETO PARA EL ANTEBRAZO Y LA MUÑECA UTILIZANDO UN SOLO ACTUADOR

Jesús Álvarez-Pastor<sup>1</sup>, Luis Daniel Lledó<sup>1</sup>, Santiago Ezquerro<sup>1</sup>, Alicia Garrote<sup>2</sup>, Teresa Costa<sup>2</sup>,  
Andrea Blanco<sup>1</sup>, José Vicente García-Pérez<sup>1</sup> y Nicolás García-Aracil<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Miguel Hernández, Av. de la Universidad, s/n, 03202, Elche. [jesus.alvarezp@umh.es](mailto:jesus.alvarezp@umh.es)

<sup>2</sup> Hospital la Pedrera, Dénia

## Resumen

*Las previsiones más recientes determinan que el número de accidentes cerebrovasculares aumentará en el futuro, y por este motivo, serán esenciales para acelerar la recuperación del paciente el empleo de nuevas terapias de rehabilitación asistidas por sistemas robóticos. Este artículo describe el diseño, desarrollo y control de un exoesqueleto ligero para el antebrazo y la muñeca utilizando un único actuador. Además, se ha llevado a cabo un estudio piloto con pacientes en el Hospital la Pedrera de Dénia con el objetivo de analizar la usabilidad del sistema, y los resultados se recogen en el presente estudio.*

**Palabras clave:** robótica, rehabilitación, asistencia, exoesqueleto

## 1 INTRODUCCIÓN

Los accidentes cerebrovasculares son la principal causa de discapacidad en la población adulta europea afectando aproximadamente a 1 millón de personas anualmente, y se estima que el número absoluto de accidentes cerebrovasculares habrá aumentado un 36% para 2025 [2]. Los supervivientes tendrán que hacer frente a un gran número de consecuencias relacionadas con trastornos cognitivos y lingüísticos, parálisis, dolor y trastornos emocionales [8].

Las terapias de rehabilitación motora tradicionales normalmente están compuestas por el paciente y su entorno físico próximo y son conducidas por el terapeuta a cargo. Aunque estas terapias son efectivas, ante el previsible aumento de accidentes cerebrovasculares en el futuro, sería necesario dotar a los terapeutas con nuevas herramientas que complementen las actuales.

Los sistemas robóticos utilizados en terapias de rehabilitación para los miembros superiores combinan interfaces y escenarios de rehabilitación orientados al robot [9]. La robótica aplicada a la rehabilitación pretende aumentar la intensidad

de la terapia y la motivación del paciente [4] así como ofrecer un entorno seguro, especialmente necesario en los inicios de la rehabilitación [12]. Cabe destacar que los exoesqueletos rígidos con más de 2 grados de libertad, son, en la mayoría de los casos, pesados y voluminosos debido a los actuadores utilizados en cada articulación [5, 1, 11]. Esto provoca que las terapias realizadas con un sistema robótico pesado sean menos cómodas que las terapias tradicionales. El desarrollo de un sistema robótico donde prime el confort del usuario afectaría positivamente al paciente y a los resultados de la rehabilitación.

El objetivo de este trabajo es el de proponer un exoesqueleto rígido para miembros superiores diseñado para llevar a cabo la rehabilitación de una forma cómoda. El exoesqueleto desarrollado es más ligero que otros sistemas robóticos similares puesto que ofrece 3 grados de libertad actuados utilizando un solo actuador. La experimentación validará si el exoesqueleto puede interactuar con un brazo humano con precisión y seguridad mientras que se realiza una terapia ocupacional simple. Además, mediremos el grado de comodidad percibido por el paciente durante la terapia con el dispositivo mediante un test de usabilidad.

## 2 MÉTODOS

### 2.1 Exoesqueleto de antebrazo y muñeca

El sistema robótico presentado en este artículo está basado en la patente registrada número WO2020183049A1 y se compone de un exoesqueleto ligero de miembro superior fijado a una mesa regulable en altura, adaptada a personas con movilidad reducida y tiene una masa de 2,25 kg.

Se trata de un dispositivo con 3 grados de libertad (Figura 1) optimizado para terapias de rehabilitación donde el paciente tiene movilidad reducida en la muñeca y el brazo. Un ordenador se encarga del control en tiempo real mientras que la interfaz gráfica de usuario proyecta actividades sincronizadas con los movimientos



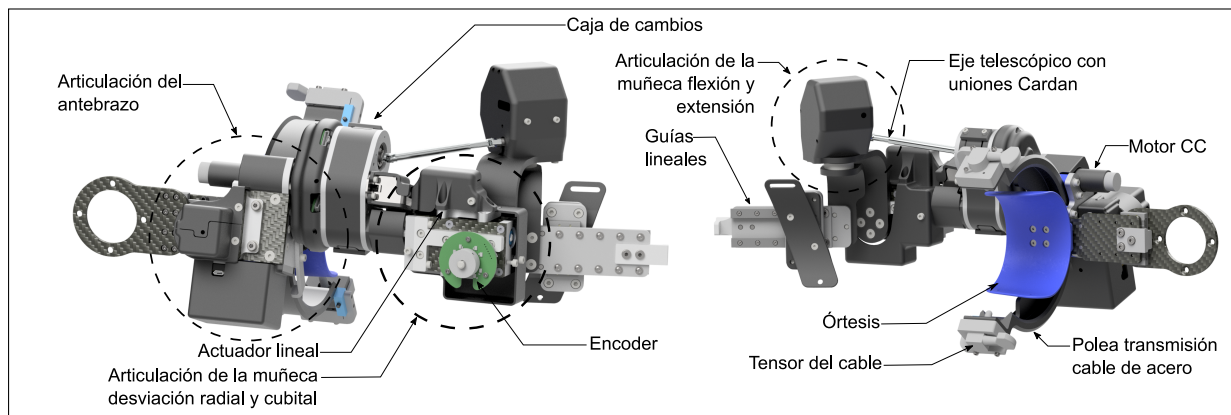


Figura 1: Exoesqueleto de antebrazo y muñeca. La carcasa de la articulación de la muñeca desviación radial y cubital ha sido eliminada para ver los componentes interiores.

del exoesqueleto. El dispositivo ha sido llamado “AWEXOS”, del inglés, “arm and wrist exoskeleton”.

### 2.1.1 Requisitos del sistema

Nuestro objetivo era diseñar un exoesqueleto de miembro superior para los movimientos del antebrazo y la muñeca utilizando un único actuador. De esta forma, sería posible crear un dispositivo robótico ligero que que facilitara llevar a cabo la rehabilitación de una forma más cómoda para el paciente.

El rango máximo de movimiento del antebrazo y los movimientos de la muñeca [10] están recogidos en la Tabla 1. Cabe destacar que, en las actividades de la vida diaria [7], se utiliza un rango menor. Debido a que, en algunos casos, la morfología del exoesqueleto no nos permitió alcanzar el rango máximo de la articulación, los rangos articulares del dispositivo han sido diseñados de acuerdo con los rangos típicos de la vida diaria.

Además, el actuador del exoesqueleto debe de ser capaz de actuar las articulaciones del antebrazo y la muñeca mientras que el usuario sostiene una carga de 2 kg en su mano. De acuerdo con [6], se establece que el par motor necesario para manipular una botella llena de 2 litros de agua es cercano a  $1,4 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

### 2.1.2 Accionamiento y transmisión

El corazón del exoesqueleto consiste en una pequeña caja de cambios que permite el movimiento de las 3 articulaciones utilizando un pequeño actuador. Las diferentes partes de la caja de cambios están representadas en la Figura 2. Los componentes principales de la caja de cambios son: un árbol de transmisión primario y

tres árboles de transmisión secundarios, cada uno de ellos acoplados a una articulación mecánica.

El árbol primario es accionado por un motor de corriente continua (MAXON DCX 19S, 17 Vátios) que incorpora una reductora con un ratio de reducción de 62:1. En el árbol primario, está montado un tren de tres engranajes, de los cuales solo un engranaje puede estar activo a la vez. Entonces, el engranaje activo transmite el par torsor a uno de los árboles secundarios permitiendo que la articulación se mueva. El ratio de reducción del conjunto es 1:1.

Como se muestra en la Figura 2, el árbol primario es hueco y cuenta con tres pares de agujeros transversales. Un eje interior, ubicado en la oquedad del árbol primario, sostiene tres pares de bolas dentro de los agujeros mencionados. El eje interior se traslada longitudinalmente a lo largo de 3 posiciones con la ayuda de un pequeño posicionador lineal (la flecha violeta en la Figura 2 muestra la traslación de eje). En el caso particular de la Figura 2, el eje interior, colocado en la posición 2, empuja el par de bolas correspondiente hacia el engranaje de en medio. De esta manera, el árbol primario es restringido radialmente con el engranaje central y permite la transmisión del par torsor hacia el árbol secundario 2. Este proceso nos permite elegir la transmisión que deseamos

Tabla 1: Rango articular del exoesqueleto y del brazo humano

Movimiento articular	Brazo	Vida diaria	Exoesqueleto
Pronación (AB)	90°	40°	70°
Supinación (AB)	80°	35°	70°
Extensión (M)	60°	40°	24°
Flexión (M)	90°	35°	90°
D. Radial (M)	20°	13°	10°
D. Cubital (M)	35°	30°	26°

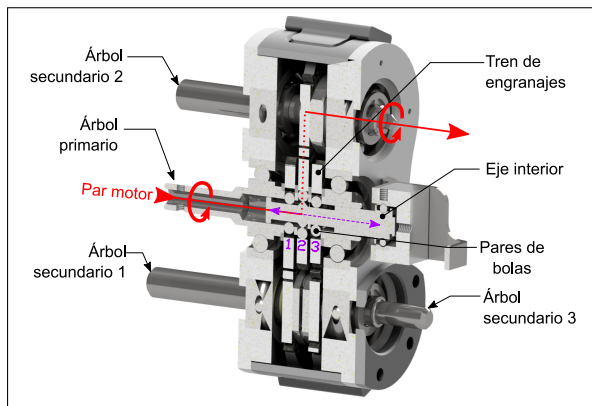


Figura 2: Caja de cambios. Vista transversal seccionada. La flecha violeta representa la traslación longitudinal del eje interior realizada por el actuador lineal. La flecha roja representa la transmisión del par motor.

actuar en cada instante.

La articulación de flexión y extensión de la muñeca está actuada por un conjunto tornillo sinfín-corona con una reducción de 10:1. Las reducciones combinadas permiten un momento torsor en la articulación de 6,82 N·m. La articulación se acopla al árbol secundario 2 mediante un eje telescópico con uniones Cardan en sus extremos. La articulación de desviación radial y cubital de la muñeca tiene la misma configuración de transmisión que la articulación anterior. Un acoplamiento rígido une el árbol secundario 3 con la articulación. La articulación del antebrazo está actuada mediante cable de acero enrollado en una polea que gira sobre otra. La reducción entre poleas es de 9:1 permitiendo un par torsor en la articulación de 6,1 N·m. Con el fin de evitar que, las poleas se muevan cuando las articulaciones de la muñeca están siendo actuadas, un freno electromagnético está acoplado al eje de la articulación del antebrazo.

Cabe destacar que los tornillos sinfín y las transmisiones por cable de acero originan incertidumbres en la posición de las articulaciones debidas a la holgura que existe entre dientes. Además, debido a la morfología de la articulación de flexión y extensión de la muñeca, la velocidad angular de las uniones Cardan no son constantes.

### 2.1.3 Sensores y electrónica

La unidad computacional central ejecuta el algoritmo de control del exoesqueleto. Un microcontrolador en tiempo real controla el posicionador lineal y su driver. Una controladora dedicada (EPOS4 COMPACT 50/5) se utiliza para controlar el motor de corriente continua

MAXON. Los dispositivos se alimentan a través de una fuente de alimentación de 150 W a 24 V, 12 V y 5 V dependiendo en las necesidades.

Para solventar las incertidumbres provocadas por la holgura entre transmisiones mecánicas, las posiciones articulares son registradas a través de un encóder absoluto y rotativo (Orbis RLS) montado en cada articulación. Para solucionar los problemas en la posición de la articulación de flexión y extensión de la muñeca inducidos por la variación cinética de la unión cardan, se instaló un encóder adicional en el eje secundario 2 (Figura 2), en el que se acopla la unión Cardan.

### 2.1.4 Control y software

Se ha desarrollado un interfaz para gestionar el uso del exoesqueleto de rehabilitación AWEXOS por parte de diferentes usuarios. De esta manera se registran datos de movimiento para cada usuario. Para implementar la interfaz gráfica se ha utilizado el componente WinForms de la tecnología .NET de Windows. Winforms es una interfaz de programación incluida en .NET Framework que proporciona una manera fácil y

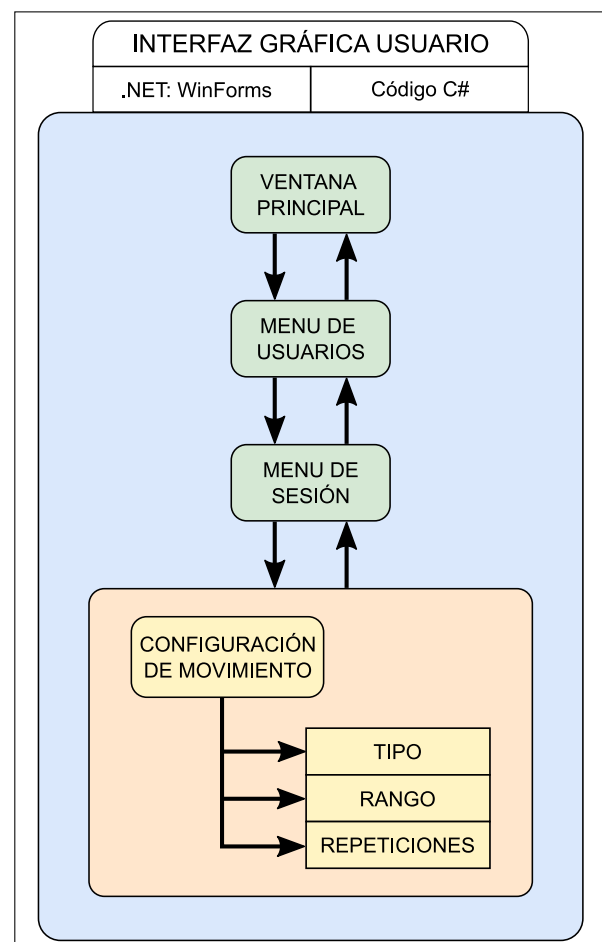


Figura 3: Interfaz gráfica de usuario desarrollada

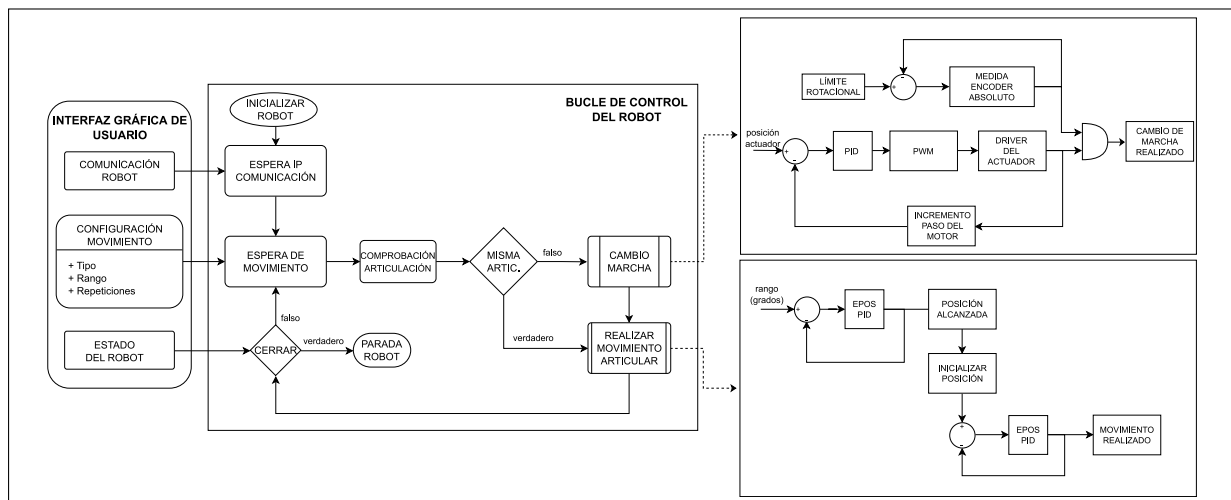


Figura 4: Diagrama de flujo del lazo de control

rápida de construir desktop apps, gestionando controles, gráficos, enlace de datos y entrada del usuario. El lenguaje de programación utilizado para el desarrollo ha sido C#.

En la Figura 3 se muestra un diagrama de bloques de la interfaz gráfica de usuario desarrollada. La VENTANA PRINCIPAL es el punto de entrada al sistema software y da acceso al MENÚ DE USUARIOS, el cual permite añadir, modificar o eliminar usuarios. Una vez seleccionado un usuario, se pasa a la ventana MENÚ DE SESIÓN donde se muestra los datos asociados a cada una de las sesiones de rehabilitación que ha llevado a cabo el usuario seleccionado. En el último bloque, se produce la configuración del movimiento a realizar durante la sesión. En esta parte se decide el tipo de movimiento del brazo (pronación/supinación del antebrazo, movimiento radial/cubital o flexión/extensión de la muñeca), el rango articular y la cantidad de repeticiones que se debe realizar en la sesión.

Finalmente, el software de interfaz gráfica crea una base de datos con los datos de los usuarios con el objetivo de registrar una evolución del estado funcional del brazo del paciente a través de una serie de sesiones de rehabilitación.

El principal criterio de diseño del robot ha sido la seguridad, por lo tanto, este se ha tenido en cuenta tanto en la estructura como en el control software. Al utilizar un sólo motor para controlar tres posibles movimientos, se ha diseñado un lazo de control para dicho motor, así como para el posicionador lineal. Este lazo de control se ejecuta dentro del ordenador central. El posicionamiento del motor se lleva a cabo a través del controlador digital EPOS4 donde se le indica el número de cuentas para girar a partir de un cálculo

directo del rango articular y la reducción de las articulaciones.

La figura 4 muestra el diagrama de flujo del lazo de control. En primer lugar, el robot espera la dirección IP del ordenador donde se ejecuta la interfaz gráfica de usuario. Desde esta interfaz, se envía el tipo, el rango y las repeticiones a completar, y el sistema recibe este paquete de datos con un módulo de comunicación mediante protocolo UDP (User Datagram Protocol). Estos datos son analizados para comprobar si se tiene que realizar un cambio de marcha. En la figura también se muestra el diagrama de bloques del cambio de marcha. El actuador desplaza el engranaje hasta la posición deseada y se comprueba en todo momento si el encoder absoluto varía hasta alcanzar un umbral de rotación. Mientras tanto, el motor gira paso por paso para completar el engranaje de la marcha. Una vez que el encoder absoluto registra el cambio de valor rotacional, se ha producido un cambio de marcha.

Después, se produce el giro del motor dependiendo del rango articular a partir del PID de la EPOS 4. Primero, el robot alcanza la posición deseada y luego debe volver hasta su posición inicial. Al completar este proceso durante un número de repeticiones, el sistema volverá a pasar a un modo de espera para recibir configuraciones de movimientos o su propia desconexión.

## 2.2 Protocolo de experimentación

Antes del inicio de la sesión, los pacientes fueron sometidos a una evaluación general para comprobar su rango de movimiento y asegurar que la experimentación se podría llevar a cabo

con seguridad. Después de inicializar el sistema, colocamos al paciente a la izquierda del sistema robótico en una posición cómoda y atamos el exoesqueleto a su brazo. La pantalla donde se proyectaría la actividad, estaba ubicada en frente del paciente, a 1 metro de distancia del sistema robótico. La actividad consistía en un brazo humano imitando los movimientos hechos por el exoesqueleto de forma sincronizada. En la Figura 5, se muestra a un paciente utilizando el dispositivo.

Cada sesión está estructurada en tres bloques con un descanso de dos minutos por bloque. Cada bloque tiene una duración de diez minutos. La sesión se describe a continuación:

- La articulación del antebrazo realiza diez repeticiones del movimiento de pronación y otras diez repeticiones del movimiento de supinación.
- La articulación de la muñeca realiza diez repeticiones del movimiento de flexión y otras diez repeticiones del movimiento de extensión.
- La articulación de la muñeca realiza diez repeticiones del movimiento de desviación radial y otras diez repeticiones del movimiento de desviación cubital.

La evaluación del rango articular de los pacientes estableció que el rango máximo del exoesqueleto podía ser alcanzado. Después de finalizar los tres bloques de actividad, cada paciente debía responder a una corta encuesta que nos permitiría comprobar si el sistema robótico cumplía con los requisitos establecidos.

Se realizó un test de usabilidad para evaluar el grado de satisfacción del participante después de la sesión, la conformidad de acuerdo con las expectativas del paciente y el desempeño

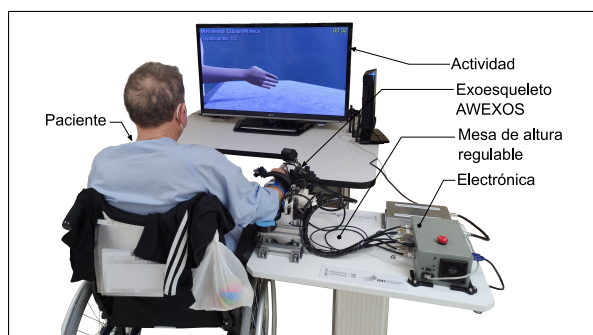


Figura 5: Paciente realizando una actividad con el dispositivo robótico

del sistema robótico. Para ello, utilizamos una escala de usabilidad del sistema (SUS) [3]. Este test se componía de diez preguntas sobre juicios subjetivos de usabilidad. Las respuestas medían el nivel de acuerdo o desacuerdo de los usuarios utilizando una escala Liker (desde 1, “totalmente en desacuerdo” hasta 5, “totalmente de acuerdo”) [13] con respecto al sistema robótico.

## 2.3 Pacientes

El protocolo de experimentación fue aprobado por el comité de ética del “Hospital La Pedrera”. Los sujetos que participaron leyeron y comprendieron el propósito y los requisitos del estudio y firmaron un consentimiento informado antes de que la validación comenzara.

El criterio de inclusión incluía pacientes post-ictus con movilidad reducida en el antebrazo y muñeca derechos. Además, tenían que tener la capacidad de comunicarse y de comprender las instrucciones de la actividad. Finalmente, participaron en el estudio siete pacientes post-ictus, hombres y con edades comprendidas entre 40 y 70 años. En la tabla 2 se detallan los datos clínicos de los pacientes.

## 3 Resultados

La media de las puntuaciones de la encuesta realizada se muestran en la Figura 6, en la imagen de la izquierda. El gráfico naranja representa los valores de cada respuesta en la escala Liker para obtener la puntuación máxima en la escala de usabilidad del sistema. Por otro lado, el azul representa la media de las respuestas de los pacientes. Las puntuaciones basadas en la escala Liker son traducidos a un sistema de puntuación específico determinado en [3]. Este sistema de puntuación puntúa del 0 al 100%. Los resultados traducidos se muestran en la Figura , en la imagen de la derecha.

El valor medio de las puntuaciones obtenidas equivale a un 82% y representa la puntuación SUS del sistema robótico descrito en este trabajo.

Tabla 2: Datos de los pacientes

ID	Índice Barthel	STREAM	Sexo	Patología
1	25	3	M	síndrome Guillain Barré
2	40	7	M	Ictus hemorrágico
3	30	**	M	Ictus isquémico
4	65	0	M	Ictus isquémico post-COVID-19
5	5	5	M	Ictus isquémico
7	45	14	M	Post-COVID-19
8	75	9	M	Ictus isquémico

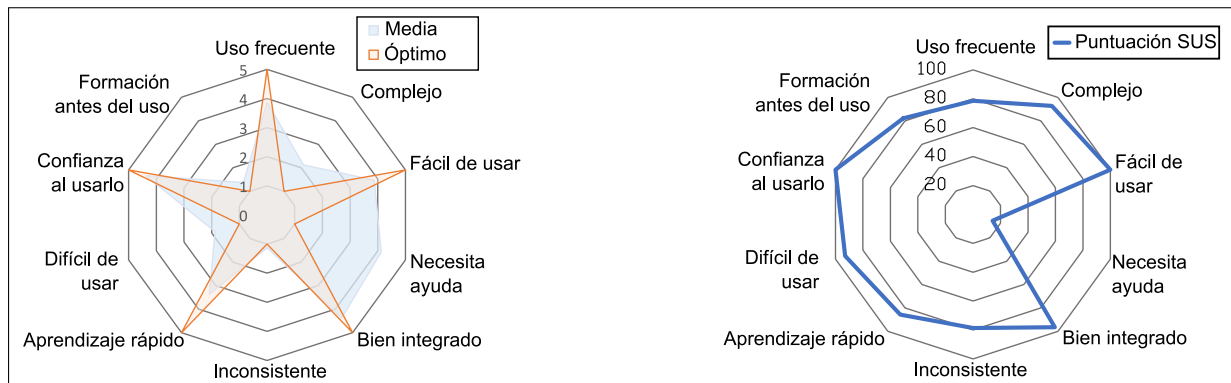


Figura 6: Respuestas a la encuesta y gráfico de puntuación SUS

Por otro lado, durante las siete sesiones, registramos el rango de movimiento alcanzado por los pacientes y todos ellos llegaron al máximo rango articular que podía abarcar el exoesqueleto.

#### 4 Discusión

Un exoesqueleto de antebrazo y muñeca ha sido diseñado incorporando una novedad patentada con la cual es posible actuar tres articulaciones con un único motor de corriente continua. Esta invención aporta las siguientes ventajas para las terapias de rehabilitación y la medicina:

- Sistemas robóticos más ligeros y menos voluminosos
- Consumo de energía menor
- Sistemas robóticos más asequibles

Como hemos visto en la Figura 6, la media de las respuestas es cercana a las respuestas óptimas, en la mayoría de los casos. Cabría destacar que en la respuesta que evaluaba la necesidad de ayuda para utilizarlo difiera de la respuesta óptima debido a que se probó en pacientes con movilidad reducida tras un accidente cerebrovascular. Por lo tanto, necesitaban de ayuda para instalar el sistema robótico en su brazo.

La puntuación SUS calculada es igual a un 82% lo que implica que la usabilidad del sistema está comprendida entre “BUENA” y “EXCELENTE”, demostrando que el dispositivo es confortable en su uso. Experimentaciones adicionales podrían probar el impacto positivo de estas terapias utilizando exoesqueletos ligeros.

#### 5 Conclusión

El exoesqueleto con tres grados de libertad y un actuador ha sido validado para ser empleado en

terapias de rehabilitación en pacientes post-ictus. La usabilidad del sistema es buena de acuerdo con la escala SUS y ofrece varias ventajas. Se realizarán futuras experimentaciones para validar las posibles ventajas que tiene de cara a la rehabilitación de los pacientes.

#### Agradecimientos

Gracias a Gemma Mas y María Victoria Pomares del Hospital de la Pedrera. Este estudio ha sido subvencionado por la Agència Valenciana de la Innovació (INNVAL10/19/065), el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, perteneciente a la Agencia Estatal de Investigación (AEI), a través de la ayuda PEJ2018-002670-A y de la ayuda PEJ2018-002684-A. (Cofinanciado por el Fondo Social Europeo. FSE invierte en tu futuro), y por la Consellería de Educación, Cultura y Deporte de la Generalitat Valenciana (GVA), a través de la ayuda APOTIP/2020/014.

#### English summary

#### DEVELOPMENT OF AN ACTIVE EXOSKELETON FOR FOREARM AND WRIST REHABILITATION USING A SINGLE ACTUATOR

#### Abstract

*Recent research states that the number of strokes will increase in the future. For this reason, it is paramount to introduce new rehabilitation therapies to accelerate the recovery of the patient. This article describes the design, development and control of a light exoskeleton for the forearm and wrist using a single actuator. Furthermore, a pilot study has been done with patients in La Pedrera Hospital in*



*Denia to analyse the system's usability. The results are presented in this study.*

**Keywords:** robotics, rehabilitation, assistance, exoskeleton.

## Referencias

- [1] Badesa, F. J., Llinares, A., Morales, R., Garcia-Aracil, N., Sabater, J. M., & Perez-Vidal, C. (2014). Pneumatic planar rehabilitation robot for post-stroke patients. *Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications*, 26(02), 1450025.
- [2] Béjot, Y., Bailly, H., Durier, J., & Giroud, M. (2016). Epidemiology of stroke in Europe and trends for the 21st century. *La Presse Médicale*, 45(12), e391-e398.
- [3] Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, 189(194), 4-7.
- [4] Catalán, J. M., García-Pérez, J. V., Blanco, A., Martínez, D., Lledó, L. D., & García-Aracil, N. (2021). Differences in Physiological Reactions Due to a Competitive Rehabilitation Game Modality. *Sensors*, 21(11), 3681.
- [5] Culmer, P. R., Jackson, A. E., Makower, S., Richardson, R., Cozens, J. A., Levesley, M. C., & Bhakta, B. B. (2009). A control strategy for upper limb robotic rehabilitation with a dual robot system. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 15(4), 575-585.
- [6] Díez, J. A., Blanco, A., Catalán, J. M., Badesa, F. J., Sabater, J. M., & Garcia-Aracil, N. (2017). Design of a prono-supination mechanism for activities of daily living. In *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation II* (pp. 531-535). Springer, Cham.
- [7] Gates, D. H., Walters, L. S., Cowley, J., Wilken, J. M., & Resnik, L. (2016). Range of motion requirements for upper-limb activities of daily living. *American Journal of Occupational Therapy*, 70(1), 7001350010p1-7001350010p10.
- [8] Lai, S. M., Studenski, S., Duncan, P. W., & Perera, S. (2002). Persisting consequences of stroke measured by the Stroke Impact Scale. *Stroke*, 33(7), 1840-1844.
- [9] Loureiro, R. C., Harwin, W. S., Nagai, K., & Johnson, M. (2011). Advances in upper limb stroke rehabilitation: a technology push. *Medical & biological engineering & computing*, 49(10), 1103-1118.
- [10] Norkin, C. C., & White, D. J. (2016). *Measurement of joint motion: a guide to goniometry*. FA Davis.
- [11] Rehmat, N., Zuo, J., Meng, W., Liu, Q., Xie, S. Q., & Liang, H. (2018). Upper limb rehabilitation using robotic exoskeleton systems: a systematic review. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2(3), 283-295.
- [12] Sale, P., Franceschini, M., Mazzoleni, S., Palma, E., Agosti, M., & Posteraro, F. (2014). Effects of upper limb robot-assisted therapy on motor recovery in subacute stroke patients. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 11(1), 1-8.
- [13] Likert, R. (1974). A method of constructing an attitude scale. *Scaling: A sourcebook for behavioral scientists*, 233-243.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



# ELECTRONICS IMPROVEMENTS FOR LOW-LEVEL CONTROL IN THE HUMANOID ROBOT TEO

J. M. Garcia-Haro

Higher Polytechnic School, Universidad Francisco de Vitoria, Ctra. Pozuelo-Majadahonda Km 1,800,  
28223 Pozuelo de Alarcón, Spain; juanmiguel.garcia@ufv.es

E. D. Oña, R. de Santos-Rico, S. Martinez and C. Balaguer

System Engineering and Automation Department, University Carlos III, Av de la Universidad 30, 28911  
Madrid, Spain; eona@ing.uc3m.es, rasantos@it.uc3m.es, scasa@ing.uc3m.es; balaguer@ing.uc3m.es

## Abstract

*This work began with developing the first electronic integration to allow the operation of commercial TEO devices pre-selected. However, different problems were discovered during the implementation of the whole set. These were caused by the malfunction of the system and the particular design. For this reason, this paper is focused on the analysis of the first hardware architecture to propose and develop a solution that improves the performance of the joint motor control. Significantly, the detected problems are voltage drops in the power supply signals of some devices, electrical noise coupling or overshoots produced by the switching of the power inverter of the driver, and the electromechanical disconnections of various signals caused by the relative motion between devices. The consequence was that the robot joints control was not robust, preventing them from moving accurately. After the analysis, new interconnection electronics was developed. This electronic has been designed to be more integrated with the mechanic parts, improving subsystems location, and integrating new solutions to reduce the electrical problems. The new electronics have been tested in the humanoid robot arms with good results.*

**Keywords:** low-level control, humanoid, electronics.

## 1 INTRODUCTION

A hardware architecture is characterised by its components and the connections between these components. First of all, the connection between the components must have sufficient bandwidth. As the whole architecture shall be able to process data in real-time, the connection as well has to be able to transmit data in real-time [2][15]. Evaluating the needed bandwidth for servo control, it is evident that it can be dealt with one or more typical CAN buses. CAN bus is one of the best options because of its characteristics, i.e. it can transmit messages in real-time. In other words, the message with the highest priority will be delivered within a guaranteed latency time [6][13].

So the different humanoid robots share a peculiarity among them. All of these robots have the same kind of distributed hardware architecture. There are low-level control systems (drivers) which control each joint.

Nevertheless, all of them must work synchronised to control a more complex mechanical system. For this purpose, it is necessary to share data among all the control systems through a high-speed communication system [1].

The RoboticsLab research group at the University Carlos III of Madrid is working with the humanoid robot TEO (Task Environment Operator) (Figure 1). Like the other humanoid robots, TEO has a distributed hardware architecture.

The architecture of TEO is divided into three parts. The first one is the central computer system which consists of two CPUs. The second part is the low-level control system, in which the ISCM8005 driver is used for each joint. And finally, the communication system. CAN bus networks have been selected to share the information among drivers and CPUs.

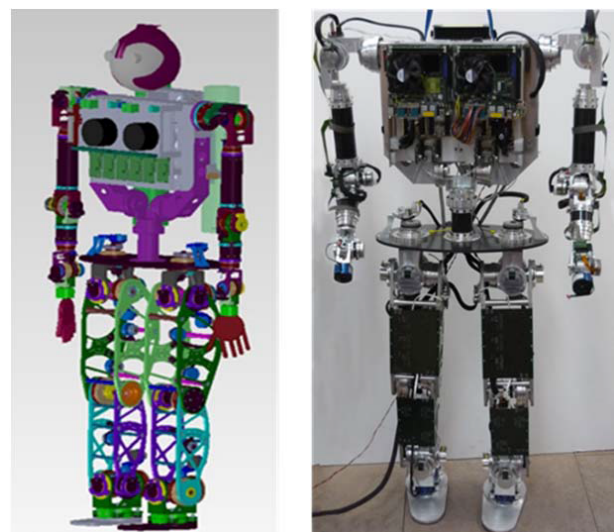


Figure 1: The Humanoid Robot TEO: Whole-Body 3D model representation (left) and real and developed humanoid robot TEO (right).

The synchronised operation of these parts is possible because the first interconnection electronics or electronics of integration has been developed. This electronics serves to interconnect sensory, power and communication signals from all the control systems and protect the hardware. However, during the setting up of the whole body, different problems caused by the operation of the system and the particularity of the design were discovered. These problems are:

- Brief disconnections between the driver and the motor/encoder affecting the transmission of information.
- Voltage drops causing the shutdown of the devices.
- EMI emissions producing incorrect readings by the driver.

Thus, in this paper, we explain in six parts the development of a new electronics of integration to solve the problems of the first electronic. In section two, we give details about what the hardware architecture and their sub-systems are. In section three and four, the first electronics of integration of the hardware architecture and its problems that have arisen in the low-level control of the joints of the arms are described. In section five, the updated developed integration electronics is described and which tools have been used to improve joint motor control. In the last section, the conclusions are exposed.

## 2 TEO HARDWARE ARCHITECTURE

The RoboticsLab research group at the University Carlos III of Madrid (UC3M) is working on the development of the platform TEO. The purpose is to suit better the needs for using this platform in a human environment, equipping it with a special sensors system, composed of force/torque sensors in the wrists and the feet, together with cameras in the head, and inertial sensors in the chest [9].

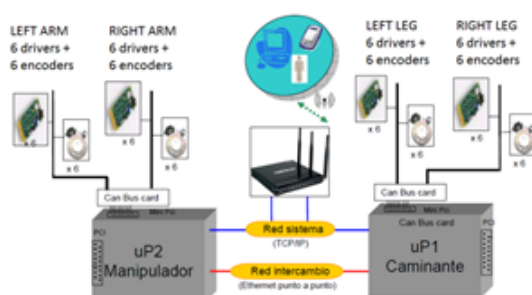


Figure 2: Old TEO hardware architecture.

TEO addresses challenges in the fields of motion, safety, energy efficiency, and power autonomy performance. The mechatronics of this structure has been inspired to perform human adaptable locomotion and achieve complex tasks with humans physically. For this reason, the robot TEO has 28 degrees of freedom [10]: 12 DoF for the locomotion tasks, 12 DoF for the manipulation tasks, 2 DoF for the hip joints and 2 DoF for the neck joints.

The hardware architecture of TEO consists of three sub-systems. The first sub-system is the primary computer system. It has two central CPUs (Intel Core 2 Duo 2 x 2.13 GHz processor), and they are located in the chest. The aim is to divide the tasks between the two CPUs. The first CPU will be responsible for controlling the legs, keeping the balance and generating walks. The second CPU will perform mainly manipulation and grasping tasks with the arms and the trunk.

The second sub-system is communications. On the one hand, the communications between the two main boards or CPUs of the robot are implemented through a high-speed Ethernet connection. In that way, we can achieve speeds up to 1 Gbps. On the other hand, a high velocity CAN bus network is used to transmit the sensory and position motor information from and to the drivers [14]. Thus, there are four CAN bus networks (one per each limb).

The third sub-system is the joint motor controller. First of all, the actuators that TEO uses are brushless DC motors from Maxon, generating up to 90.5 mNm of nominal torque. These motors work in combination with strain wave gearings (CSD-series from Harmonic Drive LLC). The ISCM8005 driver is used to control position, velocity and torque. This driver allows controlling different kinds of motors with high current and voltage values. Besides, AMT203-V relative encoder from CUI INC is included to know the relative position and velocity. The drivers are located under the primary computer system, while the motors are situated in their joints (Figure 2).

## 3 ELECTRONIC DESIGN OF TEO. V1.0

The first integration electronics was developed according to the distribution of the central microprocessors, the drivers and the motors. On the one hand, the microprocessors were placed in the chest, and the drivers were under them. On the other hand, the motors were placed along the arms. There were three motors on the shoulder, giving it 3 DoF (Degrees of Freedom) in the sagittal, frontal and axial planes; one on the elbow offering 1 DoF in the frontal plane, and two further on the wrist attributing 2 DoF in the frontal and axial planes (Figure 3).

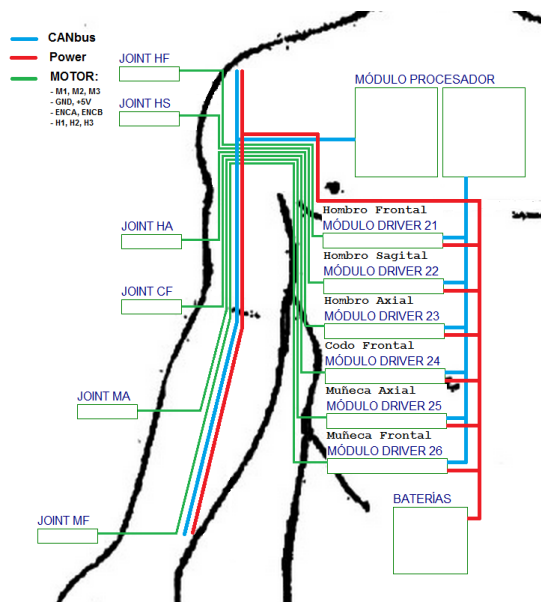


Figure 3: Old TEO hardware distribution.

With this distribution, interconnection electronics should ensure that all systems are physically communicated and integrated. For this purpose, the CAN bus should be interconnected from the microprocessors to the drivers and encoders along the arms (three signals). It also was necessary to wire up from the power supply (positive and negative signals) to supply the drivers and the microprocessors.

Moreover, the drivers should supply their hall sensors and encoders. Thus, drivers should support the entire electrical load. Besides, input sensory information and output control information should be transmitted between the drivers and the joint (motor, hall sensor, and encoder) respectively (eight signals per joint) (Figure 4). In summary, the electronics had more than 50 signals (wires) parallel with a maximum length of 0.5 meters which interconnected the sub-systems.

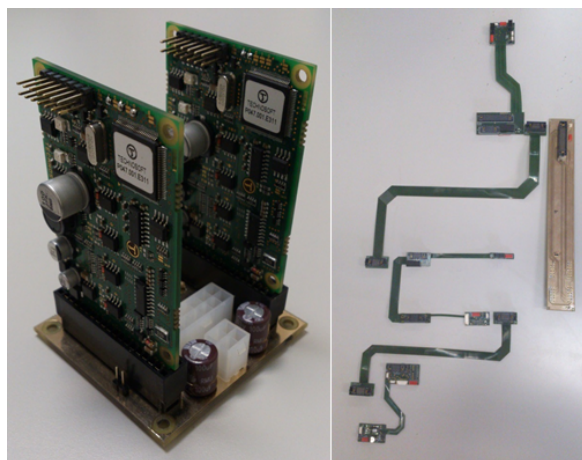


Figure 4: The ISCM8005 driver (left). Interconnection electronics (right).

## 4 SETTING UP PROBLEMS IN TEO

The main operation of the low-level control is based on transmitting position data of each joint from the microprocessor to the drivers. On the other hand, sensory information from the encoder and hall sensors must also send to the drivers. Finally, the drivers must respond to the received information and send it to the motors to control them. For the TEO case, during the system's operation, some issues arose in the first interconnection electronic for controlling the joints. The consequence was that the different signals were not electrically clear and accurate, predominantly sensory and communication signals. It was discovered that this interconnection electronics was not able to protect the system against EMI emissions, voltage drops or brief disconnections. Thus, the joint motor controller failed because the hardware architecture had design problems. These three troubles affected negatively the operation of the robot when the drivers attempted to control the position, velocity or torque of the motor.

### 4.1 Brief Disconnections

The brief disconnections between the motor and the driver are the first problem. These troubles are produced by defective electromechanical contacts. There are two causes. The first one is the relative movement between the electronic control and the motor/encoder. The drivers for the arms are located in the chest, under the motherboards. So there are relative movements concerning the joints in the arms and the drivers. Such movements can cause a faulty contact between the connectors of the interconnection electronics during the operation, causing the loss of the information signal (encoder signals, hall sensor signals, communication signals or power signals). Also, another problem associated is the quality of the connectors. In this case, the connectors used are not very robust, and it has a high tolerance for movements (not kept fixed). So, this feature increases the likelihood of disconnection.

The other cause is produced during the operation of the whole system. During the system's operation, some bending and twisting forces appear due to the synchronised movements of the motors. These forces are transmitted to the skeleton of the robot. Moreover, the interconnection electronics is mechanically coupled to the skeleton. Hence, the electronics also supports bending and twisting forces. The continued application of forces on the electronics produce breaks in the weldings and, therefore, the disconnections of systems. Besides, electronics of integration has two features that foster this undesired state. First, it is divided into several PCBs, and second, the thickness of the PCBs is very fine (to reduce weight). So, the probability that some welding is broken is greater. Finally, if any welding is broken, the system will stop.

## 4.2 Voltage Drops

The voltage drops are the second problem. This problem arises during the low-level joint motor control when the motors need more energy in some particular situations. These special situations are associated with moments when electricity demand is far greater than the average regular demand. In particular, during acceleration and braking would be the moments when the motors absorb the most current. The motors need to consume more power (more torque) to overcome the forces and inertia opposite the movement (gravity, friction).

On the one hand, the DC brushless Maxon flat motors that TEO uses have three hall sensors powered from 5 volts to 18 volts. On the other hand, the driver can supply 5 volts. So the hall sensors take advantage of this feature to be powered to 5 volts. However, this means that they are working with the minimum allowed voltage.

Furthermore, the driver must support the entire electrical load. It supplies 5 volts to the hall sensors and the encoder too and 36 volts to the motors. So, when there is greater electrical demand, the power supply voltage of the hall sensors drops below 5 volts. At this moment, the hall sensors do not have enough voltage and break down. The system loses information about the position of the rotor, and finally, the low-level control fails.

## 4.3 Overshoots

The overshoot is the third problem, and the ISCM8005 driver produces it. The power electronic of this driver is a typical six-pulse bridge inverter that feeds brushless DC motors with a PWM voltage. The PWM (Pulse Width Modulation) is the technique used to switch the gates in the inverter (Figure 5).

Furthermore, the evolution of power semiconductors has led to the creation of efficient and ever faster transistors. The high switching frequency of electronic transistors used in current converters (usually IGBTs) causes unintended consequences. Some consequences are the increased electromagnetic emissions and the likely impact of surge voltage due to the high values of  $\partial V / \partial t$  (rate of voltage change over time) at the terminals of the motors.

On the one hand, the fast-switching speed of semiconductor devices in power inverter leads to self-inflicted voltage transients due to the stray parasitic noise or overshoot [7][4]. Electrical noise in electric machines is caused by the interaction of the fundamental and harmonic flux densities. The electrical noise is generated when the harmonic flux produced is concentrated at a particular frequency, such as the switching frequency.

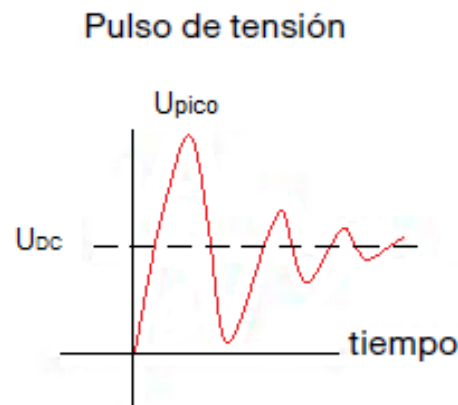


Figure 5: Overshoot's generation during the switching.

On the other hand, the wiring and the motor can be considered a resonant circuit excited by the driver. When the resistors, inductances and capacitors' values are such that the peak voltage exceeds the highest values of the source voltage ( $V_{dc} = 5V$ ), the circuit response to this excitation is considered an overshoot. The overshoots mainly affect the insulation between spirals, and its value is determined by the "rise time" of the voltage pulse, the cable length, the minimum time between pulses, and the switching frequency [3]. Finally, overshoots' trouble produces electromagnetic emissions coupled to other signals (power, encoder, hall sensors). This one is the main problem that produces incorrect readings by the driver and thus seriously affects the motor control at a low level.

## 4.4 Methods for improving electronic

There are numerous widely methods used to minimise the overshoot of the drivers. The four main methods are a "careful design" of the PCB to minimise parasitic inductance, adding a "bootstrap circuit" for delaying the ignition transistor itself, including a "snubber circuit" for attenuating peak overshoots, or attaching a "circuit CSI" (Common Source Inductance) for delaying the ignition of the transistor itself. The disadvantage to applying these methods is that these methods directly attack the problem at the root. In this case, the overshoot is generated in the three-phase inverter of the driver, which is completely closed to us. The driver is a commercial product which the necessary information and tools are not provided us for being able to apply the methods explained [5][16][8].

Therefore, to keep reusing ISCM8005 drivers, the only solution was to work with the switching frequency of the PWM voltage. The method consisted of decreasing the switching frequency to reduce the rise time and the minimum time between pulses and thus to mitigate or eliminate the overshoot.



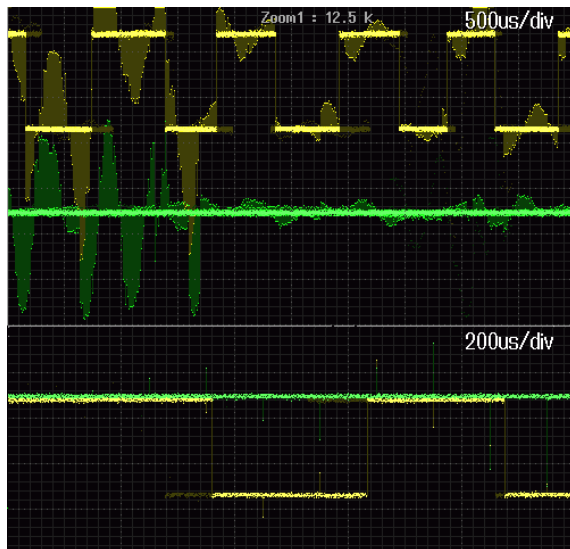


Figure 6: Hall signal with the first interconnection electronics (100KHz and 10KHz).

For this, two experiments were prepared. In both experiments, a trapezoidal signal simulating a reference position was applied to the motor. In the first experiment, the switching frequency was 100 KHz, and in the second experiment, the frequency was 10 KHz.

Figure 6 shows the hall and power signals. The yellow waveform represents the hall signal, and the green one represents the power of the hall sensor. We can see that the overshoot is reduced by lowering the switching frequency. However, this decline is not sufficient, and the problem persists. This result is due to the internal electronics ISCM8005 driver. Figure 7 shows the sensing electronic for the hall sensors signals. This electronic is not very robust. This means that the driver's sensitivity is great when it has to read data from the hall sensors. The high sensitivity allows misinterpreting overshoots generated by the inverter most likely.

For example, when the hall signal is at a high level and a negative peak is produced, the voltage can be near zero volts, and the driver can interpret the hall signal as low level. Similarly, when the hall signal is at a low level and a positive peak is produced, the voltage can be near 5 volts, and the driver can interpret the hall signal as high level.

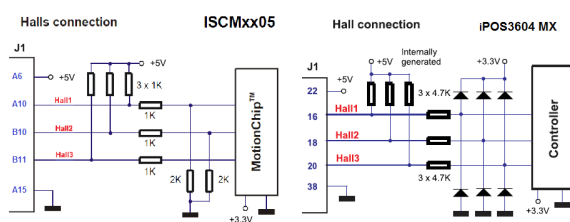


Figure 7: Sensory electronic: ISCM8005 (left), iPOS3604 (right).

## 5 TEO V2.0 IMPROVED MECHATRONICS

In the first version, the interconnection and protection devices were separated in a different board, as figures 3 and 4 show. So this means that each board could have diverse problems. For this reason, it has been developed a single modular electronics which is valid for any joint of the arm.

The main aims in the development of electronic design are three. We agreed that a new controller should be integrated into a small space so that the drivers could be situated along the arms. Thus, the relative movements between the controller and the joint motor would be removed, and the wiring would be reduced. It should also be able to integrate a power system to reduce the electrical load on the driver. Finally, it should have the components and devices needed to reduce overshoots and voltage drops (Fig. 8).

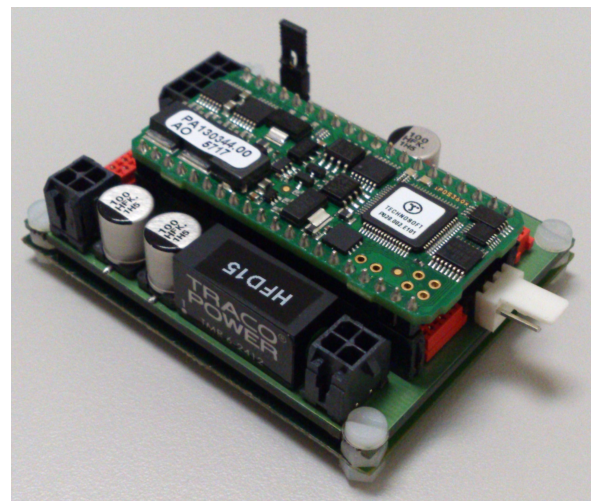


Figure 8: New electronic of integration with the driver.

First of all, the problem of brief disconnection directly depends on the hardware architecture distribution and indirectly depends on the size of the ISCM8005 drivers. The dimensions of these drivers are 79.57x45.62x17.8 mm. Hence, they are pretty big to place them along the arm. For these reasons, we have decided to use another driver with the same power features but smaller than the ISCM8005 driver.

The new driver is from Technosoft too, and it is iPOS3604MX-CAN. It is more intelligent and evolved than the ISCM8005 driver, and its size is 55x26.4x13.1 mm. Besides, the best advantage of this driver is the type of plug-in that it uses. In the ISCM8005 driver, the plug-in is a card edge connector, and it forces to be connected with the electronics vertically, wasting much space. However, the iPOS3604MX-CAN driver has standard header square pins, which allow being connected horizontally.

Using the iPOS3604 driver with its horizontal plug-in, we could change the hardware architecture distribution completely. Now, drivers are placed next to the motor. Thus, we achieve firstly prevent relative movements of all joints. The net CANbus and power signals are wired only. So, electromagnetic interference could not be coupled to other signals, which were in parallel with them. Furthermore, we have changed the connectors. Now, the connectors used are more robust, and it has a low tolerance for movements. Therefore, the likelihood of disconnection is very low.

For the problem of the voltage drops, we have added a DC-DC converter module which regulates the input voltage from 36 volts to 12 volts. The goal of this converter module is to divide the electrical loads and avoid voltage drops during the operation. With this converter, the new supply distribution is separated into three parts. One power supply must provide 36 volts to the motor. The electronic of the driver and the hall sensors must be stocked up with 12 volts by a second source. The third power supply, which generates 5 volts inside the driver, must feed the encoder. Thereby, the necessary current is obtained directly from the main power supply (batteries) and not from the driver. Consequently, the electrical loads are divided, and thus, the supply signals are more stable.

Additionally, the integration of the decoupling capacitors also helps to minimise the voltage drops. These decoupling capacitors must be placed as close to the supply inputs as possible. Thereby, when the system demands extra power, the capacitors provide it quickly.

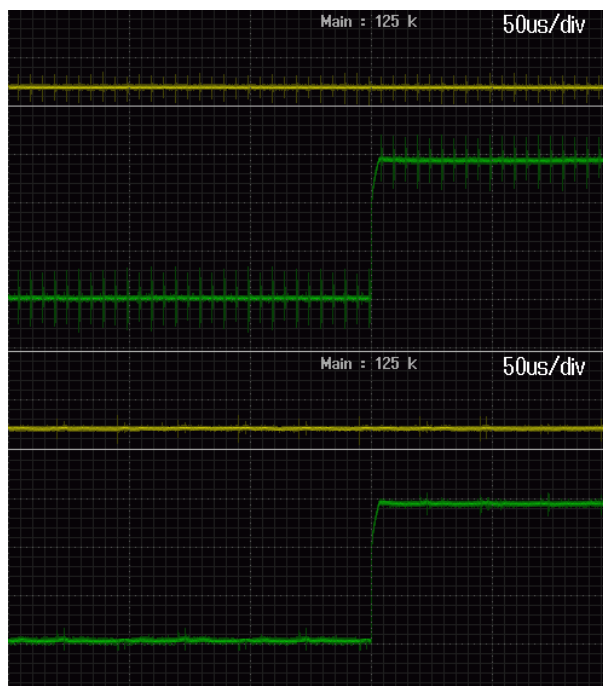


Figure 9: Hall signal with the new electronics of integration (100KHz and 40KHz).

At last, the problem of overshoots depends on the driver ISCM8005. The fast-switching speed on the power inverter produces overshoots. Besides, the electronic sensing for the hall signals is not very robust, so the high sensitivity allows misinterpreting overshoots coupled to the hall signals.

The new driver is more evolved. However, the power inverter still generates overshoots, although overshoot intensity is lower than the previous one. The solution to this problem lies in the sensory electronic. This electronics is less susceptible to electromagnetic interference, and therefore the capability to misinterpret the hall signals is lower (Figure 7).

For the prevention of the coupling of overshoot, three methods have been used. The first method is reducing the length of the wires. In this case, with the new distribution, the drivers are situated next to the motor. So the length of the wires to communicate between them is shorter.

The second method is associated with the decoupling capacitors. The electromagnetic interference caused by the driver is shunted through the capacitor (local decoupling), reducing the effect it has on the rest of the circuit [17].

The last method is shielding the signal. For this, the wiring has been shielded with a metallic mesh connected to the ground. Ground planes have been developed in the printed circuit board of the interconnection electronics. This protection technique makes a field, which is able to avoid the coupling of EMI emissions to the signal inside the metallic mesh or the ground plane [11][12].

To test whether improvements are effective, we have reapplied the same two experiments to new electronics. In both experiments, a trapezoidal signal simulating a reference position has been applied to the motor. Now, switching frequencies are 100 KHz and 40 KHz.

Figure 9 shows the hall signal (green waveform) and the hall supply signal (yellow waveform). On the one hand, the hall supply signal still has overshoots, but now the amplitude peaks of the noise are not large enough. Hence, the overshoots do not affect the average voltage of the supply signals. The new power distribution and the addition of protection devices (decoupling capacitors) prevent the voltage drops appearance.

On the other hand, the waveform of the hall signal does not show any electrical noise. The EMI interference's intensity generated by the switching of the power inverter is no longer critical. Therefore, the sensory electronic is able to filter small overshoots, and the driver can obtain correct signals readings from the hall sensors.



## 6 CONCLUSIONS

In this paper, we have been detected and evaluated the different problems that arose in the first interconnection electronic during the operation of the whole system. Firstly, the brief disconnection because the electromechanical contacts were defective. Secondly, the voltage drops in the hall sensor and encoders because the driver supported the entire electrical load. Finally, the overshoot's coupling to the signals due to switching the power inverter inside the ISCM8005 driver.

To solve these problems, we have defined a new hardware architecture distribution, and we have developed a new modular electronic of integration. The methods and devices, which we have used in the development, are valid. The new distribution has removed all the relative movements between the drivers and motors. The new power distribution has divided the electrical loads. And the new iPOS3604 driver has improved the reading of the sensor signals. So, we have achieved to improve the operation of the low-level control.

## Acknowledgement

This research was funded by the SHARON project, with reference SHARON-CM-UC3M, funded by the Carlos III University of Madrid, and from the RoboCity2030-DIH-CM Madrid Robotics Digital Innovation Hub ("Robotica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos, Fase IV"; S2018/NMT-4331), funded by "Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid" and cofunded by Structural Funds of the EU.

## References

- [1] M. Arbulú and et al. The rh-1 full-size humanoid robot: Design, walking pattern generation and control. *Applied Bionics and Biomechanics*, 6(3-4):301–344, 2009.
- [2] T. Asfour and et al. Armar-iii: An integrated humanoid platform for sensory-motor control. In *Humanoid Robots, 6th IEEE-RAS International Conference on*, pages 169–175. IEEE, 2006.
- [3] J. Cros and et al. EMI tests on a brushless actuator: comparison of different operation modes. In *Fifth European Conference on Power Electronics and Applications*, pages 138–143. IET, 1993.
- [4] T. G. Habetler and D. M. Divan. Acoustic noise reduction in sinusoidal PWM drives using a randomly modulated carrier. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6:356–363, 1991.
- [5] M. Ingels and M. S. Steyaert. Design strategies and decoupling techniques for reducing the effects of electrical interference in mixed-mode IC's. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, 32(7):1136–1141, 1997.
- [6] F. Kanehiro, H. Hirukawa, and S. Kajita. Openhrp: Open architecture humanoid robotics platform. *The International Journal of Robotics Research*, 23(2):155–165, 2004.
- [7] Q. Liu and et al. EMI suppression in voltage source converters by utilizing DC-link decoupling capacitors. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 22(4):1417–1428, 2007.
- [8] J. E. Makaran. Gate charge control for MOSFET turn-off in PWM motor drives through empirical means. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 25(5):1339–1350, 2010.
- [9] S. Martínez and et al. Teo: Full-size humanoid robot design powered by a fuel cell system. *Cybernetics and Systems*, 43:163, 2012.
- [10] S. Martínez de la Casa Díaz. Human inspired humanoid robots control architecture. 2012.
- [11] M. I. Montrose. *Printed circuit board design techniques for EMC compliance*, volume 1. IEEE Press Piscataway, NJ, 1996.
- [12] H. W. Ott. *Electromagnetic compatibility engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- [13] I.-W. Park, J.-Y. Kim, S.-W. Park, and J.-H. Oh. Development of humanoid robot platform KHR-2. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2:519–536, 2005.
- [14] P. Pierro. Stabilizer architecture for humanoid robots collaborating with humans. 2012.
- [15] K. Regenstein and et al. Designing a computer architecture for the humanoid robot Armar-III. In *Proceedings of French-German Workshop on Humanoid and Legged Robots*, 2006.
- [16] L. Rossetto, S. Buso, and G. Spiazzi. Conducted EMI issues in a 600-W single-phase boost PFC design. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 36(2):578–585, 2000.
- [17] F. Zare. EMI issues in modern power electronic systems. *The IEEE EMC Society Newsletters*, (221):53–58, 2009.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# DETECCIÓN DE AGARRE DE OBJETOS DESCONOCIDOS CON SENSOR VISUAL-TÁCTIL

Julio Castaño-Amorós, Pablo Gil, Ines Fernández, Santiago Puente  
Grupo de Automática, Robótica y Visión Artificial, Universidad de Alicante  
julio.ca@ua.es, pablo.gil@ua.es, ifs23@alu.ua.es, santiago.puente@ua.es

## Resumen

*La manipulación robótica sigue siendo un problema no resuelto. Implica muchos aspectos complejos como la percepción táctil de una amplia variedad de objetos y materiales, control de agarre para planificar la postura de la mano robótica, etc. La mayoría de los trabajos anteriores sobre este tema han estado utilizando sensores caros. Este hecho dificulta la aplicación en la industria. En este trabajo, se propone un sistema de detección de agarre mediante un sensor táctil de tecnología de imagen y bajo coste, conocido como DIGIT. El método desarrollado basado en redes convolucionales profundas es capaz de detectar contacto o no contacto, con precisiones superiores al 95%. El sistema ha sido entrenado y testado con una base de datos propia de más de 16000 imágenes procedentes de agarres de diferentes objetos, empleando distintas unidades de DIGIT. El método de detección forma parte de un controlador de agarre para una pinza ROBOTIQ 2F-140.*

**Palabras clave:** Percepción táctil, agarre robótico, sensor DIGIT, Redes Neuronales Convolucionales

## 1. INTRODUCCIÓN

La percepción táctil se está convirtiendo en esencial en cualquier tarea de manipulación robótica [8]. Los datos procedentes de sensores táctiles se han usado con éxito para obtener información del objeto que se está manipulando, como forma, rigidez o textura del material entre otras [9] con el objetivo de aplicarlo a tareas de reconocimiento de objetos [14]. También, es frecuente usar las señales táctiles para adaptar la fuerza con la que se agarran los objetos [4] cuando se manipulan o para planificar la pose del robot para asegurar un mejor agarre [2], todo ello con el objetivo de evitar que el objeto se escurra y se caiga.

Recientemente, han proliferado las aproximaciones basadas en técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo que tratan de resolver parcial o totalmente el problema de conseguir agarres robóticos estables de objetos [3], [1] y [17].

A pesar de la versatilidad que proporcionan las técnicas de aprendizaje, la gran mayoría de aproximaciones conocidas son muy dependientes de la tecnología táctil empleada y del tipo de datos o señal que proporcionan este tipo de sensores. Los sensores táctiles pueden ser piezo-resistivos, capacitivos, ópticos, magnéticos, con transductores barométricos, etc. [9]. Esto hace que, hasta la fecha, se hayan propuesto arquitecturas neuronales muy diversas en función de la naturaleza de la señal, del rango de ésta, del tipo de sensor y, por lo tanto, de la tarea táctil que se pretende llevar a cabo [18].

En este trabajo, se presenta una primera aproximación para detectar agarre de objetos desconocidos, es decir, de los que no se dispone de información previa, y además se hace uso de un novedoso sensor visual-táctil de bajo coste, conocido como DIGIT [7].

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: primero se describe el sistema de agarre robótico utilizado, formado por sensores DIGIT montados en una pinza ROBOTIQ 2F-140. En segundo lugar, se presenta la metodología empleada para la detección de contacto utilizando aprendizaje profundo. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos junto con los trabajos futuros.

## 2. SISTEMA DE AGARRE

### 2.1. SENSOR VISUAL-TÁCTIL

Si se desea que un sistema robótico autónomo adquiera el nivel de manipulación humana, se requiere obligatoriamente dotarlo de sensores táctiles y, además, que éstos ofrezcan capacidades inteligentes para trabajar en entornos con cierto desconocimiento. En este trabajo se ha optado por construir varias unidades de un sensor de bajo coste del tipo visual-táctil, que sea fácilmente replicable para que pueda ser instalado en una gran variedad de aplicaciones de agarre. Dentro de la tecnología visual-táctil destacan los sensores Gelsight [16], Gelslim [5] y de nueva creación DIGIT [7].

DIGIT es un sensor que está compuesto de un elastómero, una lámina acrílica, una cámara de

color PCB y LEDs. El elastómero puede ser transparente o reflectivo y si se desea puede incorporar marcadores. Estos componentes se ensamblan en una carcasa formada por varias piezas de plástico o resina que pueden fabricarse con impresoras 3D (Fig. 1 y Fig. 2). La cámara captura hasta 60 imágenes/s y a una resolución de 320x240 píxeles.

En este trabajo, se han construido tres unidades distintas de sensores DIGIT, que denotamos en la experimentación como A, B y C. Todas las unidades que han sido construidas se realizaron con elastómeros reflectivos y sin usar marcadores. También, se ha incorporado y probado con diferentes tipos de material para la fabricación de la carcasa (PLA y PTEG) que envuelve todas las partes. Por lo que las tres unidades no son exactamente iguales, ya que el sensor C fue impreso en PLA y PTEG, mientras que A y B solo en PETG. Por otro lado, la dureza del gel influye en la deformación del elastómero. Esto es algo a tener en consideración para dotar al sensor de más o menos sensibilidad a la medida de contacto.

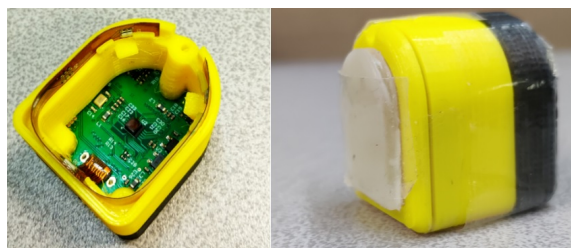


Figura 1: Sensor DIGIT.

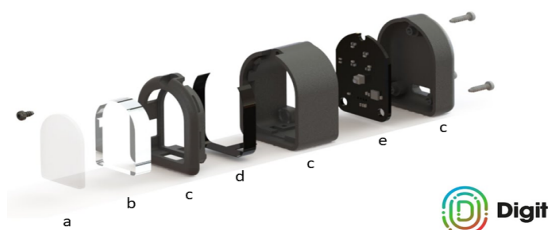


Figura 2: Partes del sensor DIGIT: a) Elastómero, b) Lámina acrílica, c) Carcasa 3D, d) LEDS, e) Cámara. Imagen extraída de [7].

## 2.2. PINZA ROBÓTICA

Para llevar a cabo los agarres, unidades de DIGIT se han montado en cada uno de los dos dedos de una pinza ROBOTIQ 2F-140 (Fig. 3). Este tipo de pinza tiene dos dedos articulados con dos articulaciones cada uno. Los dedos forman una única cadena cinemática por lo que se adapta a la forma del objeto durante el agarre y no pueden moverse de modo independiente. Este tipo de pinza puede ser empleada tanto para agarres internos como

externos. Los agarres internos consisten en aplicar fuerza desde el interior del objeto con la cara externa de los dedos, mientras que el agarre externo es el tradicional de aplicar fuerza con la cara interior de los dedos sobre la superficie externa del objeto. En este trabajo, los sensores se han montado de modo que su orientación permite obtener lecturas en configuración de agarre externo. Para montar estos sensores sobre los dedos de la pinza, se ha tenido que diseñar y construir una carcasa que permite integrar los sensores sin prácticamente restar espacio de trabajo de la pinza.

Una vez montados en la pinza, cada uno de los sensores por separado son conectados mediante USB, protocolo de comunicación serie, al mismo PC con el que se controlan los movimientos de la pinza. En este PC se emplea el software Robot Operative System (ROS) versión Kinetic Kame. En él se lleva a cabo tanto el control de la pinza como el procesamiento de las imágenes táctiles. Aunque el firmware de la pinza permite trabajar en un modo de operación en el que es posible fijar una fuerza final deseada para detectar cuando se produce contacto entre objeto y dedo y cuando no, este modo de operación no se ha empleado. El motivo de no emplearlo, es que este modo de funcionamiento no siempre permite una detección de contacto adecuada. Esto es porque es muy dependiente de la habilidad del sistema para medir el amperaje y compararlo con un amperaje de referencia definido a partir de la fuerza deseada, que a su vez es dependiente del tipo de objeto que se quiere agarrar. Si los materiales de los objetos que se pretende agarrar son distintos, estos valores de amperaje de referencia no tienen porque ser los mismos para todos, y habría que calibrar el sistema para ello. Razón por la que desde un punto de vista de incertidumbre, se ha preferido que sea un sensor táctil como DIGIT el que se encargue de esta tarea. DIGIT nos ha permitido trabajar en agarres de objetos distintos y desconocidos, sin tener un modelo matemático y sin necesidad de calibrado.

## 3. MÉTODO DE AGARRE

A continuación, se presenta el método empleado para agarre basado en la detección de contacto táctil. Como ya se ha mencionado, el método permite agarrar objetos distintos y desconocidos sin necesidad de disponer de complejos modelos matemáticos y sin requerir calibrado de la pinza/sensores. El método propuesto hace uso de técnicas de aprendizaje profundo. En concreto, una arquitectura neuronal con capas convolucionales entrenadas con una metodología de aprendizaje supervisado, que se comenta a continuación.

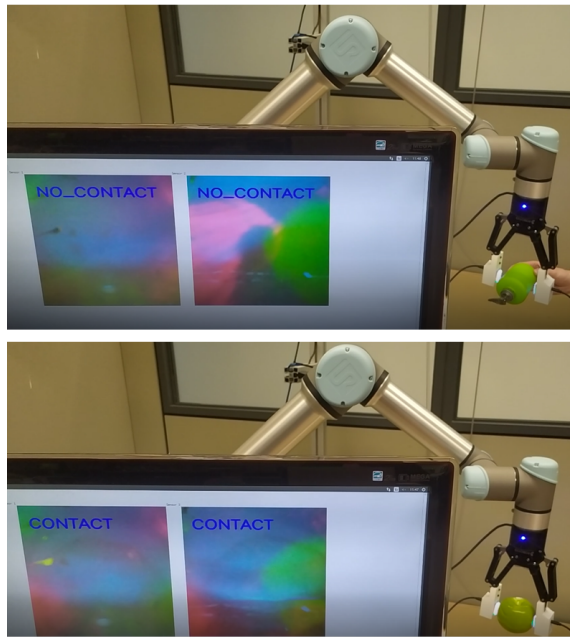


Figura 3: Sistema físico de agarre.

### 3.1. ARQUITECTURA NEURONAL PROPUESTA

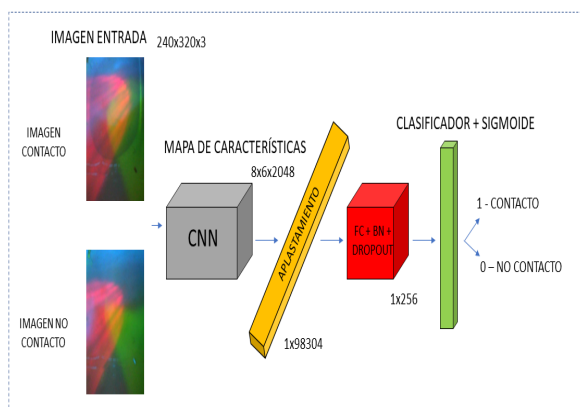


Figura 4: Arquitectura neuronal propuesta.

La arquitectura usada está compuesta de una estructura neuronal base compuesta por múltiples capas convolucionales (CL) y de agrupación (PL) que se emplea para la extracción de características de las imágenes táctiles que se toman como entrada. A ésta se le ha añadido una capa del tipo completamente conexa (FC) y un clasificador de una única neurona y una función de activación de tipo sigmoide, que nos permite una clasificación binaria de las imágenes táctiles a la entrada, para así detectar si hay o no hay contacto. Además, se ha aplicado un proceso de normalización por lotes (BN), así como se ha analizado la aplicación de un proceso de regularización empleando técnicas de "dropout" para evitar y/o reducir el sobreajuste (Fig. 4).

Esta arquitectura neuronal ha sido diseñada para su aplicación en el controlador propuesto en la Fig. 5. Con este controlador se pretende realizar una realimentación táctil basada en imagen, para garantizar un agarre estable.

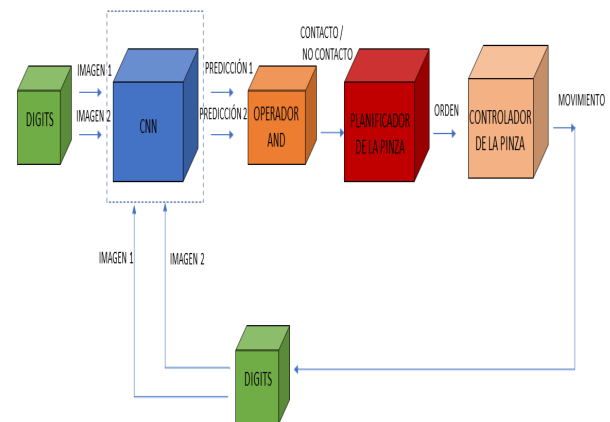


Figura 5: Controlador propuesto.

En trabajos previos como [17], en los que se empleaban imágenes táctiles sintéticas obtenidas a partir de los valores de los electrodos de sensores BIOTAC SP, era suficiente con emplear una red convolucional sencilla, la cual se limitaba a 3 o 4 capas convolucionales. Sin embargo, la complejidad de las imágenes táctiles obtenidas con DIGIT ha obligado a estudiar y analizar numerosos modelos neuronales profundos de clasificación, con un número mucho mayor de capas, para emplearlas como estructura neuronal base. Los modelos analizados pueden alcanzar varios cientos de neuronas por capa, y más de cincuenta capas en algunos casos. En concreto, en este trabajo se han plasmado algunos de los resultados obtenidos empleando como estructura convolucional base, modelos como VGG-19 [12], InceptionV3 [13] o MobileNetV2 [11]. Estos modelos, solo pretenden ser una muestra de los muchos que hay en el estado del arte, y que nos permite analizar la influencia de la profundidad, número de neuronas, el tiempo de entrenamiento o la precisión en la inferencia cuando se trabaja con imágenes táctiles de compleja interpretación como son las de DIGIT. A continuación, se describen brevemente las características de estos modelos base:

*VGG19* está compuesta por 19 capas convolucionales con filtros de 3x3, capas de agrupamiento de tipo máximo y 2 capas completamente conectadas al final. La capa de clasificación que por defecto emplea VGG ha sido sustituida por una capa adicional completamente conectada y un clasificador binario como ya se ha mencionado anteriormente.

*InceptionV3* es más compleja que VGG19 y está



compuesta por 48 capas, aunque algunas de estas capas en realidad son bloques de capas, formadas por capas más sencillas. Así, la principal diferencia radica en que incorpora capas adicionales conocidos como bloques Inception. Estos bloques son capas convolucionales cuyo tamaño de filtro varía dinámicamente, para de este modo extraer características con diferentes niveles de detalle en cada uno de los bloques de filtrado.

*MobileNetV2*, a diferencia de las otras, emplea muchos menos parámetros y operaciones matemáticas, reduciendo los tiempo de entrenamiento e inferencia. Además, de las conocidas capas convolucionales en la primera y penúltima capa de la red, así como una capa completamente conectada en la última, añade capas intermedias conocidos como bloques residuales de cuello de botella. Cada uno de estos bloques realizan una operación de suma que combina los resultados antes y después de aplicar tres pequeños filtros convolucionales.

### 3.2. DATOS DE ENTRENAMIENTO

Para llevar a cabo el entrenamiento y detección ha sido necesario crear una base de datos de imágenes táctiles procedentes de los tres sensores táctiles construidos (A, B y C). Las imágenes táctiles son obtenidas de la interacción de la pinza con diferentes objetos desconocidos. Es decir, el sistema no tiene cocimiento a priori de la forma, material o tamaño de éstos. La idea es conseguir una respuesta del sistema generalista, que permita detectar contacto con superficies de objetos cuyo comportamiento táctil por rigidez o textura, por ejemplo, difiera bastante de unos a otros. En total se han empleado 16444 imágenes táctiles procedentes de 9 objetos distintos: 4 variedades de suela, pelota, manzana, envase, aerosol y frasco (Fig. 6). De las que 8222 son de interacción con contacto con los objetos (40 % A, 30 % B y 30 % C), y otras 8222 registran no contacto (43 % A, 25 % B y 32 % C).



Figura 6: Representación de objetos empleados

## 4. EXPERIMENTACION

Para llevar a cabo la fase de entrenamiento y validación se ha usado una plataforma NVIDIA DGX A100. Y la fase de inferencia se realiza en un PC convencional i5-8400 @ 2.8Ghz, 16 GiB DDR4 RAM. Toda la experimentación se ha desarrollado en Python 3.7.3 con librerías Keras 2.4.0 y Tensorflow 2.4.1.

### 4.1. ENTRENAMIENTO

En la fase de entrenamiento, se ha llevado a cabo un ajuste hiperparamétrico para cada una de las estructuras base neuronales con las que se ha testado nuestra arquitectura. El objetivo es obtener un modelo subóptimo para cada modelo base, capaz de aprender contacto desde imágenes táctiles.

El conjunto de datos presentado en la sección 3.2, se ha dividido en tres subconjuntos: 70 % de las muestras se han empleado para entrenar, 20 % para validar y 10 % para testear. Las muestras para cada subconjunto se escogieron aleatoriamente, asegurando que no hay muestras idénticas en ninguno de los subconjuntos.

Notar que además, se han aplicado técnicas de aumento de datos para incrementar el número de muestras en la etapa de entrenamiento, no así en la de validación y test. De este modo, también se ha conseguido que todos los conjuntos estén bien balanceados, es decir, recojan el mismo número de muestras con contacto y sin él. Mientras que conseguir imágenes táctiles distintas de contacto es una labor costosa temporalmente pero sencilla, registrar imágenes distintas sin contacto no es fácil porque en ausencia de contacto el estado del sensor generalmente no cambia o varía muy poco. El proceso de aumento de datos ha consistido en transformaciones de ligeros zoom, rotaciones y operaciones de volteo.

En esta fase, se han probado distintos mecanismos de entrenamiento, desde entrenar la arquitectura desde cero, a emplear modelos preentrenados para resolver otros problemas de clasificación. Los mejores resultados se han obtenido a partir de modelos base preentrenados con un conjunto de datos completamente distinto (es decir no procedentes de sensores visual-táctiles), procedente de *ImageNet*, conjunto de imágenes RGB que se emplean para clasificar escenas de objetos [10] (ver Cuadro 1). En concreto, en el caso *VGG19*, el mejor resultado se obtuvo congelando los pesos de las 6 primeras capas y con reajuste del resto de capas. Se ha empleado tamaño de lote de 32, función de pérdida de entropía cruzada y optimizador de *Adam* con tasa de aprendizaje fijada en  $1e^{-6}$ , así como dropout de 0,5. Para el caso de *Incep-*

*tionV3*, se han congelado las 249 primeras capas y reajustado el resto. Todos los parámetros respecto a VGG se mantienen a excepción del optimizador empleado que ahora es *RMSprop* con una tasa de aprendizaje de  $1e^{-5}$ , este es más rápido que *Adam* y diseñado para redes más densas. El *dropout* se ha aumentado hasta 0,6. Finalmente, para el caso de redes más ligeras como es el caso de *MobileNetV2*, se han congelado solo las primeras 4 capas. Se ha aumentado el tamaño de lote hasta 64, y el resto de configuración es la misma que para *Inception*, aunque se ha prescindido de *dropout*. Mientras que *VGG19* ha requerido 100 épocas para aprender, el resto lo ha hecho en 10.

Cuadro 1: Resultados de test de nuestra arquitectura con los modelos base optimizados en función de las métricas Acc (exactitud), P (precisión), R (exhaustividad) y Time (tiempo de inferencia)

CNN	Acc	P	R	Time
<i>VGG</i>	99,9 %	99,8 %	100 %	140ms
<i>Inception</i>	99,7 %	99,5 %	100 %	90ms
<i>MobileNet</i>	98,1 %	97,3 %	98,9 %	70ms

El Cuadro 1 muestra los mejores resultados de la arquitectura presentada en la Fig. 4, empleando como CNN extractora de características, distintos modelos base. La arquitectura en todos los casos se testeó con el 10 % de las muestras reservadas para los tres sensores (A,B,C), siendo el promedio de éxito el que se muestra en la tabla.

## 4.2. DETECCIÓN Y GENERALIZACIÓN

Finalmente, la última etapa de la experimentación ha consistido en determinar cómo de bien, el método propuesto, detecta contacto de agarre (Fig. 7) y además, si es capaz de detectar aún cambiando la unidad del sensor. En primer lugar, se pretende ver qué éxito de detección se obtiene cuando una misma unidad de DIGIT es empleada tanto para optimizar la arquitectura neuronal como para testear el agarre de distintos objetos. En segundo lugar, hasta que punto el éxito de detección se ve comprometido cuando se sustituyen las unidades DIGIT de la pinza por otras, por ejemplo como consecuencia de una rotura del elastómero. En este caso, la idea es seguir trabajando con el mismo modelo neuronal optimizado para la unidad estropeada, y sin necesidad de reajuste hiperparamétrico, conseguir que el sistema de detección se pueda seguir empleando para una nueva unidad DIGIT de sustitución. Este tipo de experimentación también es de mucho interés, aunque no se produzca rotura, cuando se quiere transferir resultados

a aplicaciones reales, por ejemplo reutilizando el código sin etapas de reajuste, si se quiere replicar el sistema en distintos robots.

En primera instancia, se ha optimizado la arquitectura propuesta con datos del sensor A (6186 muestras) y se ha testeado primero con muestras de agarre distintas de A (687), y después con muestras de un sensor B (436). Lo mismo se ha repetido para el sensor B. Esto es, se ha optimizado el sistema para datos de B (4367) y se ha testeado con nuevas muestras de B (436), y por separado con únicamente muestras de una unidad distinta, es decir, A (687).

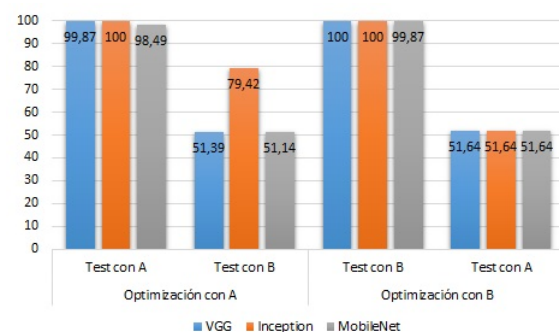


Figura 7: Resultados de detección I

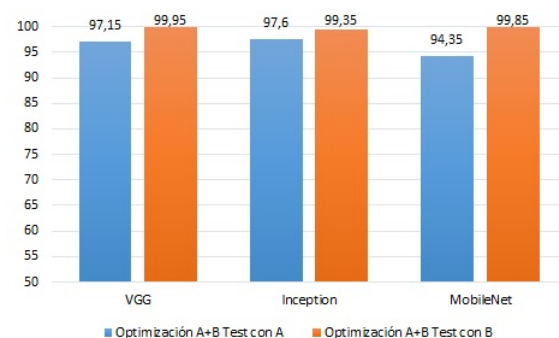


Figura 8: Resultados de detección II

Como se observa en la Fig. 7 el sistema alcanza tasas muy altas de detección  $\geq 98,5\%$  cuando se entrena con imágenes de la misma unidad del sensor que luego se instala en la pinza. Sin embargo, a la arquitectura propuesta le cuesta mucho generalizar (mejor de los casos 79 %). Es decir, funcionar correctamente cuando el sistema entrenado con una unidad es probado con una unidad de sensor distinta. Y esto se produce incluso aunque el modelo base sea distinto.

De aquí, se deduce que se requiere optimizar la arquitectura con variabilidad de muestras procedentes de distintas unidades de fabricación de DIGIT. Por lo tanto, en segunda instancia, se ha aumentado la variabilidad de muestras mezclando



en la optimización, muestras de distintas unidades, como son A y B (6186, 4367), y se han hecho tests con muestras nuevas de ambas unidades indistintamente, tal y como se muestra en la Fig. 8, probándose una importante mejoría en la detección  $\geq 94,3\%$ . Esto nos sugiere que es posible aumentar bastante la tasa de éxito de generalización si aumentamos la variabilidad de imágenes de entrenamiento, incluyendo otras procedentes de distintas unidades del sensor.

Además como ya se observó en el Cuadro 1, optimizando el modelo con los tres sensores contruidos (A, B y C), y detectando agarre con cada uno de ellos indistintamente, todavía se obtienen mejoras a las presentadas en la Fig. 8. De ahí, es posible deducir que añadir muestras de diferentes unidades DIGIT mejora los resultados y puede ayuda a generalizar mejor.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha implementado un sistema para detección de agarre basado en imagen táctil, la cual es generada por un novedoso sensor táctil-visual, conocido como DIGIT, de construcción no estandarizada. El método de detección, que está basado en redes neuronales convolucionales, muestra que es posible alcanzar una correcta detección con altas tasas de éxito, por encima del 95 % en la mayoría de los casos. No obstante, se hace difícil lograr una buena generalización entre diferentes unidades de sensor, principalmente como consecuencia de la fabricación artesanal que tienen. En cualquier caso, y a la vista de la experimentación, se cree que sería posible incrementando el número de unidades de fabricación optimizar el software para evitar los reentrenamientos y la dependencia de la unidad de sensor usada.

En la actualidad, se está trabajando en la mejora de la generalización, así como en la implementación de un controlador de agarre que haciendo uso del sistema de detección de agarre presentado, sea capaz de adaptar en tiempo real, la orientación de la pinza y la apertura de ésta durante la manipulación de objetos desconocidos, de los que no se tiene información a priori de éstos. Los resultados de este trabajo se pueden observar en el siguiente vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=TxoR9Xm1pcl>.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con FEDER a través del proyecto europeo COMMANDIA (SOE2/P1/F0638) de la convocatoria Interreg-V Sudoe. Además, se ha hecho uso de instalaciones de computación DGX-A100 adquiridas con una ayuda IDIFEDER/2020/003 del gobierno regional de

la Generalitat Valenciana.

## English summary

### GRASPING DETECTION OF UNKNOWN OBJECTS WITH VISUAL-TACTILE SENSOR)

## Abstract

*Robotic manipulation is still a challenge. It involves many complex aspects such as tactile perception of a wide variety of objects and materials, grip control to plan robotic hand posture, etc. Most of the previous work used expensive sensors for tactile perception tasks. This fact implies difficulty in transferring application results to industry. In this work, a grip detection system is proposed. It uses DIGIT sensors based on low-cost image technology. The method developed, which is based on deep Convolutional Neural Networks (CNN), is capable of detecting contact or non-contact, with success rates greater than 95 %. The system has been trained and tested on our own dataset, composed of more than 16,000 images from different object grasping, also using several DIGIT units. The detection method is part of a grip controller used with a ROBOTIQ 2F-140 gripper.*

**Keywords:** Tactile perception, Robotic grasping, DIGIT sensor, Convolutional Neural Networks.

## Referencias

- [1] Bekiroglu, Y., Laaksonen, J., Jorgensen, J.A., Kyrki, V., Kragic, D., (2018) "Assessing grasp stability based on learning and haptic data", *IEEE Trans.on Robotics* 27(3), pp. 616-629. Doi: 10.1109/TRO.2011.2132870
- [2] Calandra, R., Owens, A., Jayaraman, D., Lin, J., Yuan, W., Malik, J., Adelson, E., Levine, S., (2018) "More than a feeling: Learning to grasp and regrasp using vision and touch", *IEEE Robotics and Automation Letters* 3(4), pp. 3300-3307. Doi: 10.1109/LRA.2018.285277
- [3] Cockbum, D., Roberge, J., Le, T., Masluczyk, A., Duchaine, V. (2017), "Grasp stability assessment through unsupervised feature learning of tactile images", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2238-2244. Doi: 10.1109/ICRA.2017.7989257
- [4] Delgado, A., Jara, C., Torres, F. (2017), "In-hand recognition and manipulation of

- elastic objects using servo-tactile control strategy", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 48, pp. 102-112. Doi: 10.1016/j.rcim.2017.03.002
- [5] Donlon, E., Dong, S., Liu, M., Li, J., Adelson, E., Rodriguez, A. (2018), "Gelslim: A high-resolution, compact, robust, and calibrated tactile-sensing finger", *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1927-1934. Doi: 10.1109/IROS.2018.8593661.
- [6] Kwiatkowski, J., Cockburn, D., Duchaine, V. (2017), "Grasp stability assessment through the fusion of proprioception and tactile signals using convolutional neural networks", *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 286-292. Doi: 10.1109/IROS.2017.8202170
- [7] Lambeta, M., Chou, P-W., Tian, S., Yang, B., Mallon, B., Most V.R., Stroud, D., Santos, R., Byagowi, A., Kammerer, G., Jayaraman, D., Calandra, R. (2020), "DIGIT: A Novel Design for a Low-Cost Compact High-Resolution Tactile Sensor With Application to In-Hand Manipulation", *IEEE Robotics and Automation Letters* 5(3), pp. 3838-3845. Doi: 10.1109/LRA.2020.2977257
- [8] Li, Q., Kroemer, O., Su, Z., Veiga, F.F., Kaboli, M., Ritter, H.J. (2020), "A Review of Tactile Information: Perception and Action Through Touch", *IEEE Trans. on Robotics* 36(6), pp. 1619-1634. Doi: 10.1109/TRO.2020.3003230
- [9] Luo, S., Bimbo, J., Dahiya, R., Liu, H. (2017), "Robotic tactile perception of object properties: A review", *Mechatronics* 48, pp. 54-67. Doi: 10.1016/j.mechatronics.2017.11.002
- [10] Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., Huang, Z., Karpathy, A., Khosla, A., Bernstein, M., Berg, C., Fei-Fei, L. (2015), "ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge", *Int. J. of Computer Vision (IJCV)*, pp. 211-252. Doi: 10.1007/s11263-015-0816-y
- [11] Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., Chen, L.C. (2018), "MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks", *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4510-4520. Doi: 10.1109/CVPR.2018.00474
- [12] Simonyan, K., Zisserman, A. (2015), "Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition2", *Int. Conf. on Learning Representations (ICLR)*. <https://arxiv.org/abs/1409.1556>
- [13] Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe S., Shlens J., Wojna, Z. (2015), "Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision", *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* pp. 2818-2826. Doi: 10.1109/CVPR.2016.308
- [14] Velasco, E., Zapata-Impata, B.S., Gil, P., Torres, F. (2020), "Clasificación de objetos usando percepción bimodal de palpación única en acciones de agarre robótico", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 17(1), pp. 44-55. Doi: 10.4995/riai.2019.1092310.3390/robotics8040085
- [15] Yi, Z., Zhang, Y., Peters, J. (2018), "Biomimetic tactile sensors and signal processing with spike trains", *A review. Sensors and Actuators A: Physical* 269, pp. 41-52. Doi: 10.1016/j.sna.2017.09.035
- [16] Yuan, W., Dong, S., Adelson, E. (2017), "Gel-sight: High-resolution robot tactile sensors for estimating geometry and force", *Sensors* 17(12), pp. 2762. Doi: 10.3390/s17122762
- [17] Zapata-Impata, B.S., Gil, P., Torres, F. (2018), "Non-Matrix Tactile Sensors: How Can Be Exploited Their Local Connectivity For Predicting Grasp Stability?", *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots And Systems (IROS). Workshop on Robotac: New Progress in Tactile Perception And Learning in Robotics*. <http://arxiv.org/abs/1809.05551>
- [18] Zapata-Impata, B.S., Gil, P., Torres, F. (2019), "Tactile-Driven Grasp Stability and Slip Prediction", *Robotics* 8(4), pp. 85:1-20. Doi: 10.3390/robotics8040085



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Un exoesqueleto flexible y textil para asistir la flexión del codo

José Luis Samper-Escudero<sup>1,3</sup> (joseluis.samper@upm.es), David Cantalejo-Escobar<sup>1,3</sup>, David Pont-Esteban<sup>1,3</sup>, Aldo-Francisco Contreras-González<sup>1,3</sup>, Ricardo Ruiz<sup>3</sup>, Fernando Blaya<sup>2</sup>, Santiago Tapia<sup>3</sup>, Miguel Ángel Sánchez-Urán<sup>1,2</sup>, Manuel Ferre<sup>1,3</sup> (m.ferre@upm.es)

<sup>1</sup> CAR UPM-CSIC, Universidad Politécnica de Madrid

<sup>2</sup> ETSIDI, Universidad Politécnica de Madrid

<sup>3</sup> ETSII, Universidad Politécnica de Madrid

## Resumen

Los exoesqueletos son robots que circunscriben la anatomía humana para asistir su locomoción. Entre las distintas categorías, los exoesqueletos flexibles o exotrajés (del término anglosajón *exosuit*) se caracterizan por su ligereza y bajas restricciones al movimiento. Los exotrajés emplean principalmente elementos flexibles, como tela, por lo que carecen de una estructura rígida auto-portante. Por el contrario, estos robots se apoyan en el sistema musculoesquelético al que transfieren fuerzas asistenciales. Este artículo describe el sistema para flexar el codo del exoesqueleto LUXBIT. El proyecto LUXBIT busca crear un exoesqueleto portable para asistencia de tareas bimanuales. Para ello emplea un sistema textil de agarre y transferencia de fuerzas al usuario basado en un esquema de polea móvil. El uso de métodos de costura ha proporcionado una solución compacta, fácil de mantener y versátil. Este diseño reduce la presión aplicada sobre la piel. Los últimos apartados muestran los resultados de aplicar el sistema en cuatro sujetos.

**Palabras clave:** exoesqueleto, exotraje, robot, interacción humano-robot.

## 1 Introducción

La irrupción de la robótica en la sociedad contemporánea incluye una amalgama de ejemplos, desde manipuladores robóticos en cadenas de producción a robots sociales, sondas del fondo oceánico o sistemas de entretenimiento. Conforme estos sistemas se integran en la vida cotidiana, el interés por la interacción humano-robot (IHR) se acentúa. Esta excepcional simbiosis ofrece aunar, por una parte, la destreza y capacidad de decisión humana, con la resistencia física, seguridad y precisión de los sistemas robotizados [5, 10, 21].

Los exoesqueletos son un ejemplo peculiar de cooperación humano-robot (CHR) en el que el robot rodea de forma total o parcial la anatomía humana para asistir su movimiento. Existen múltiples tipos de exoesqueletos que pueden catalogarse

siguiendo varios criterios; siendo la distinción estructural entre rígidos y flexibles ampliamente utilizada. Los exoesqueletos rígidos cuentan con una estructura que soporta y dirige el movimiento del usuario. Así, los exoesqueletos rígidos pueden aumentar las capacidades físicas humanas, al elevar grandes cargas [1], por ejemplo, y rehabilitar pacientes con distintos grados de limitación del movimiento [6, 19]. Aunque la voluminosidad y peso de estos sistemas se ha ido reduciendo a lo largo de su desarrollo, aún existen restricciones al movimiento del usuario [2]. Para prevenir las desalineaciones que provoca la rigidez estructural de estos dispositivos con la anatomía humana, se están investigando nuevas soluciones de actuación y transmisión [20]. Un ejemplo son los mecanismos de rigidez variable (*variable stiffness mechanisms*) que aproximan de forma aceptable la dinámica articular durante la locomoción [9].

Por otra parte se encuentran los exoesqueletos flexibles, los cuales carecen de una estructura rígida auto-portante. Estos exoesqueletos son livianos y suelen presentarse embebidos en prendas. Los mecanismos de actuación blanda que emplean, como actuadores fluidicos o transmisión por cable, favorecen la compatibilidad con los movimientos humanos [22]. El principio de funcionamiento de estos exotrajés se apoya en la estructura anatómica del usuario a la que transfieren fuerzas que facilitan el movimiento. Así, estos exoesqueletos se destinan principalmente a la reducción del coste metabólico y fatiga asociados a una tarea [13]. Uno de los campos de aplicación más investigados es la asistencia a la marcha. Aunque también existen ejemplos para el tren superior, principalmente focalizados en la muñeca y las manos [7].

La reducción de los problemas musculoesqueléticos se encuentra entre los principales beneficios potenciales de los exotrajés. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha alertado en sucesivas ocasiones del preocupante incremento y falta de soluciones para prevenir y paliar estas afecciones del sistema locomotor [26]. Los distintos organismos de salud erigen las malas posturas y fatiga física como principales causantes o agra-

vantes del problema, promoviendo así un conjunto de medidas ergonómicas y guías de salud postural [27, 28, 29]. Los exotrajes plantean convertirse en una nueva herramienta con la que afrontar este gran reto social al tener un impacto directo en la fatiga, postura y coste metabólico. A diferencia de los exoesqueletos rígidos que permiten mover cargas medias y grandes, los exoesqueletos flexibles mejoran la postura al reducir ligeramente la fatiga. Aunque sus tasas asistenciales son menores, ofrecen mayor maniobrabilidad y facilitan su uso durante toda la jornada laboral. El objetivo no es por tanto eliminar toda la carga portada, sino aliviar o relajar el estrés muscular evitando una pérdida de tono que pueda derivar en otros problemas musculoesqueléticos. Así, su moderada asistencia y necesidad de cooperar con el usuario permite que se sigan activando y usando los mecanismos de sostén y estabilización del cuerpo. Su compacto y ligero diseño es, a su vez, fácilmente integrable en el equipo y ropa de trabajo [3]. Existen varios ejemplos que prueban los beneficios de estos sistemas al asistir la carga lumbar y posturas incómodas de los trabajadores en distintos sectores industriales [24, 25].

Sin embargo, la estrecha cooperación entre humano y robot de los exotrajes plantea una serie de retos en materia de actuación y sensado. La transferencia de fuerzas requiere del estudio de nuevos sistemas de actuación blanda que permitan imitar la respuesta muscular, como músculos McKibben, SMA o arreglos con cámaras de fluidos, entre otros [7, 23]. La colocación y adhesión de estos sistemas a la anatomía para asistir el movimiento es otro de los grandes retos para el desarrollo de exoesqueletos flexibles. Al depender del sistema musculo-esquelético del usuario, los sistemas de actuación deben adaptarse y ser compatibles con el espacio de trabajo del cuerpo humano. En sistemas cableados, por ejemplo, el recorrido de los tendones puede ser alterado por ciertos gestos lo que provoca fallas asistenciales. De forma parecida, los sistemas de sensado también requieren nuevas estrategias con las que monitorizar el estado del robot y del usuario. En este sentido, es de gran interés avanzar en la predicción de la intención de movimiento del usuario y el desarrollo de controladores inteligentes [8, 12].

Este artículo describe el sistema de asistencia a la flexión de codo empleado en el exoesqueleto del proyecto LUXBIT. El mecanismo propone un guiado del tendón que recuerda a un sistema de polea móvil y es compatible con la libre pronosupinación del antebrazo y la rotación glenohumeral. Este sistema, descrito en la sección 2, evita el empleo de correas y cinchas que presionen la piel. Las costuras y tramas del tejido de este

método de acoplamiento favorecen la transferencia de fuerzas y adaptación anatómica del diseño. Además, los distintos componentes de la actuación se han integrado en botones para facilitar la puesta en marcha y mantenimiento del dispositivo. El exoesqueleto usa una mochila textil para transportar la electrónica y motores. El diseño ha sido evaluado con cuatro sujetos siguiendo los procedimientos descritos en el apartado 3. Según los resultados del apartado 4, el exoesqueleto reduce la actividad muscular y mejora la trayectoria de tareas repetitivas, independientemente de la carga transportada. Por último, el apartado 5 recoge las principales conclusiones, limitaciones y propuestas a futuro del estudio.

## 2 Descripción del exoesqueleto

El exoesqueleto del proyecto LUXBIT, en la Fig.1, es capaz de asistir el codo y el hombro en rangos articulares hasta 120 grados. Este modelo usa una mochila textil para facilitar su transporte y uso en distintos entornos, interiores y exteriores. Los tendones usan cables metálicos trenzados con construcciones de 7x7 y 1x19 que ofrecen alta flexibilidad y resistencia a la rotura de hasta 400N para el codo. Además, disponen de un recubrimiento de nailon para evitar abrasión y mejorar la durabilidad del sistema. Los motores son actuadores paso a paso Nema-14 de Dings con ensamble lineal. El husillo es de 140mm y la tuerca de nailon integra un retén antideslizante. En artículos previos se describe el sistema de control y las distintas estrategias de sensado blando [4, 14, 15, 18].

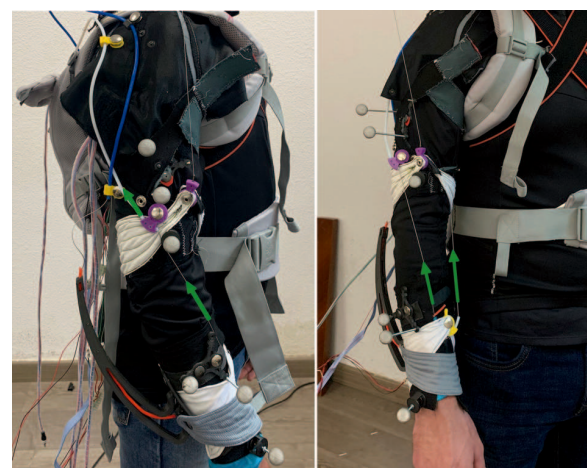


Figura 1: Exoesqueleto flexible LUXBIT. Las flechas verdes indican la fuerza ejercida por el tendón para elevar el codo.

El exotraje usa una chaqueta elástica de ciclismo como tejido base para unificar y estandarizar el diseño. Sobre esta prenda se han cosido los

parches y componentes textiles que constituyen el exoesqueleto. La trama, forma y composición de estas adiciones ha sido estudiada para absorber las fuerzas de reacción y propagar aquellas que favorecen la adaptación al usuario y el funcionamiento del exoesqueleto. Además, el sistema cableado es desmontable y ajustable a distintas complejidades anatómicas mediante el uso de botones.

La mochila es un producto comercial con certificación ergonómica para transportar cargas de hasta 20 kg. El diseño original se ha modificado mediante la incorporación de una capa en la espalda de espuma mallada, dos bandas elásticas que sujetan la mochila al tronco y la reubicación del relleno en las asas. Los componentes de la actuación se fijan en la mochila con botones perforados en los que se aprieta un perno. El peso total de la mochila para asistir sendos codos en flexión es de 700 gramos, mientras que en los brazos recaen 265 gr.

En cuanto a la asistencia, el motor es capaz de proporcionar fuerzas de 40 N a 110 N, dependiendo de la velocidad. En este caso se ha seleccionado una velocidad media-lenta que permite flexar el codo en 4 segundos. Esta limitación previene sobrecargas de los tendones y es suficiente para evaluar gestos de la jornada laboral. Además, el diseño se ha calculado para que las piezas de la actuación y el anclaje de los cables se suelten en caso de superar fuerzas superiores a 200N.

## 2.1 Interfaz de acoplamiento textil

Para un sistema cableado vestible, el método con que se transfiere la fuerza de movilización al usuario determina la comodidad y viabilidad del exoesqueleto. En lugar de usar cinchas o telas compresivas de alta resistencia a la fatiga, como el neopreno, se propone un diseño transpirable y autoajutable que sólo aplica presión a la piel durante la asistencia. El método propuesto, en la Fig. [?], está completamente basado en textiles. La abrazadera textil diseñada tiene forma de *v* y está constituida por dos capas de tela ProCool® Athletic Interlock Silver. Las capas están rotadas entre sí para conseguir que la urdimbre, la dirección que aporta rigidez, vaya del eje de simetría de la abrazadera a uno de los extremos.

En cada extremo o punta de la abrazadera se ha colocado la cara de un botón, de forma que puedan abotonarse entre sí formando un brazaletes. Las costuras en la abrazadera textil se han realizado para que éstas transfieran el tirón que ejerce el cable sobre el botón al eje de simetría de la misma. De esta forma, todas las costuras parten del centro del botón y se dirigen a puntos del eje de simetría equidistantes entre sí. Así, el principio de fun-

cionamiento de esta propuesta de acoplamiento consiste transferir la tensión del tendón a un botón que a su vez distribuye la fuerza entre varias costuras planas. Estas costuras propagan la fuerza desde la parte anterior del antebrazo, donde está el botón, al eje de simetría que genera una fuerza efectiva distribuida por la parte posterior del antebrazo, la cual fuerza la flexión del codo. Dos aspectos destacan del diseño: por un lado se tiene que el tirón puntual del tendón se transforma en una fuerza distribuida sobre un área; por otro, el tejido sólo aplica presión cuando el cable está en tensión (ver Fig. 2). Por lo tanto, el diseño reduce la compresión de la piel al quedar holgado cuando el cable no está tenso. Esta solución pretende favorecer la comodidad y usabilidad del dispositivo, especialmente en jornadas largas.



Figura 2: La imagen de la izquierda muestra la propagación de fuerzas por las costuras al tensar el cable. Los componentes de la derecha son la guía curva integrada en un botón que une los dos extremos de la abrazadera textil.

La curvatura de las costuras y la forma del acople textil se han obtenido siguiendo un procedimiento en software 3D-CAD ya descrito en otras publicaciones [16, 17]. Finalmente, el acople textil se une con una costura recta en su eje de simetría a un brazaletes elástico de ProCool® Stretch-FIT Dri-QWick™ que tiene cierre con velcro. Nótese que todos los tejidos son transpirables, antibacterianos y finos.

### 2.1.1 Mecanismo para flexar el codo

El exoesqueleto asiste la flexión del codo al colocar un punto de pivote o apoyo en el brazo y la abrazadera textil en el antebrazo. Una explicación simplificada es que el tendón tira del acople textil apoyándose para ello en el pivote del brazo, lo que genera un par de giro en el codo. El sistema propuesto, no obstante, plantea dos modificaciones en el recorrido del cable para mejorar la compatibilidad anatómica de la asistencia.

En la Fig. 3, el cable está anclado a una hebilla sobre el tríceps. De ahí, pasa por un punto de pivote en la cara interna del bíceps y va a la abrazadera textil del antebrazo. En el botón de



esta abrazadera se ha integrado una guía circular con una funda de bajo rozamiento que favorece el deslizamiento del cable en ella, como muestra la Fig. 2. El cable es así redirigido por la guía a la parte externa del brazo donde interactúa con un segundo punto de pivote, simétrico al de la cara interna, que inserta el tendón en una funda que lo guía hasta el motor en la mochila.

El guiado del cable a través de las caras laterales del brazo reduce las perturbaciones por las contracciones del bíceps. Además, la simetría del montaje y la guía circular permiten que las longitudes se reajusten para balancear las fuerzas a cada lado del botón. Así, el usuario puede pronosupinar el antebrazo y realizar rotaciones gleno-humerales a voluntad sin alterar el funcionamiento del mecanismo de flexión del codo.

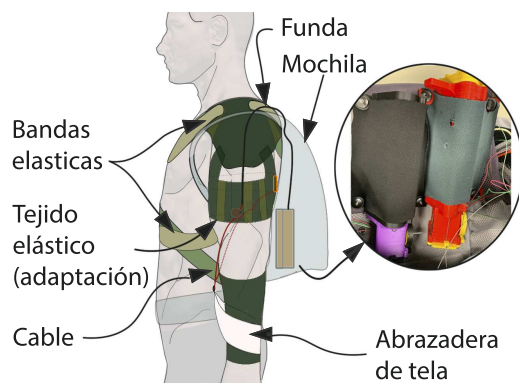


Figura 3: Esquema del cableado para el codo con vista ampliada de la fijación de los motores lineales que actúan cada brazo.

La integración de los componentes de actuación en botones, como las guías y los pivotes, facilita el montaje y reduce la voluminosidad del exoesqueleto. Las guías de las fundas y los pivotes pueden además anclarse en distintos puntos para adaptar el diseño a la constitución anatómica de cada usuario. Para la colocación de los elementos se ha establecido un acuerdo entre el par de giro generado en el codo, las fuerzas de reacción sobre los botones y la composición anatómica del brazo [17]. Sin ahondar en los detalles, las zonas próximas a las articulaciones tienen mayor concentración de tejidos densos o duros (tendones, hueso, cartílago, etc); mientras que las zonas centrales concentran mayormente tejidos blandos como músculos. Además, hay una correlación entre la altura del usuario y el grosor medio del brazo. De este modo, la abrazadera se coloca entre la muñeca y la zona media de los flexores del antebrazo; y el brazal con los pivotes bajo la línea media del bíceps.

### 3 Métodos experimentales

El exoesqueleto se ha evaluado en cuatro sujetos sanos, debidamente informado según las normas de la Universidad Politécnica de Madrid. En ellos, los sujetos, con edades comprendidas entre los 22 y 32 años, tenían que ponerse el exoesqueleto y realizar cinco repeticiones de flexión de codo. La actividad muscular del bíceps y la trayectoria del brazo fueron monitorizadas durante todo el experimento con Optitrack y un sensor electromiográfico MyoWare. Nueve marcadores de Optitrack se pusieron sobre el usuario según el protocolo Biomech [11], aunque fueron necesarias algunas modificaciones para prevenir oclusiones con las cámaras y espacio de experimentación disponible. Las guías para selección y uso de electrodos SENIAM fueron aplicadas para la electromiografía superficial (sEMG).

Los ejercicios realizados consistían en repetir cinco flexiones de codo hasta noventa grados. El número de repeticiones se ha seleccionado evaluando el número de repeticiones con peso a partir del cual los sujetos mostraban fatiga muscular y saturación del sensor. Se decidió que evitar la saturación muscular durante las pruebas favorecía la evaluación, especialmente en la trayectoria. El patrón de movimiento durante las pruebas era: flexar el codo en cuatro segundos, mantener la flexión de 90 grados durante dos segundos, bajar el brazo en cuatro segundos y, finalmente, mantener la posición inicial durante dos segundos. Los participantes hicieron el experimento primero sin asistencia y después con ayuda del exoesqueleto; descansado hasta cinco minutos entre ejercicios para prevenir fatiga previa. Después, se les entregó una pesa de un kilogramo y tuvieron que repetir el experimento, sin y con asistencia.

Para la adquisición y procesamiento de los datos se usó una tarjeta NVidia Jetson Nano y una placa de Texas Instrument LaunchXL F28379D. La señal sEMG adquirida en el Bíceps con el sensor sEMG MyoWare fue normalizada para cada sujeto usando los resultados de una prueba de esfuerzo máximo realizada al finalizar los experimentos. De forma similar, Optitrack entrega la posición y orientación de cada marcador en cuaternios, debiendo aplicándose posteriormente una relación de cuerpos rígidos a los marcadores sobre el mismo hueso o segmento corporal con interpoladores cúbicos. El procesamiento se llevó a cabo en Matlab y Motive. El software Motive se empleó para revisar y corregir manualmente las etiquetas de los marcadores no anotados correctamente durante las pruebas y aplicar un interpolador cúbico. Además, éste software integra una herramienta con la que establecer y generar las



trayectorias de los cuerpos rígidos a partir de los marcadores colocados sobre él. Para ello, se han de asignar manualmente los marcadores al cuerpo rígido una vez corregidas todas las etiquetas y resueltas las oclusiones.

## 4 Resultados

Para analizar los resultados se ha obtenido la asistencia y mejora relativa cuando se usa el exoesqueleto, respecto al caso no asistido para cada usuario. La tabla 1 recoge la tendencia central de la asistencia relativa obtenida para cada sujeto. Así, las dos primeras columnas denotan la magnitud relativa en que la actividad muscular ha mejorado, esto es, el exoesqueleto reduce la actividad muscular (valor positivo); o empeorado (valor negativo). Seguidamente, las columnas 3 y 4 indican si el exoesqueleto mejora o empeora el ángulo máximo alcanzado así como la variabilidad entre los picos de las cinco repeticiones. Por último, las dos últimas columnas da una medida de el tiempo que duró el ejercicio y que los sujetos permanecieron en la postura de máxima fatiga (flexión a 90 grados). Para el cálculo de estos valores, se emplean las relaciones  $(v_{noAsistido} - v_{Asistido})/v_{noAsistido}$  y  $(v_{Asistido} - v_{noAsistido})/v_{noAsistido}$ , de forma que un valor positivo indique un beneficio positivo al usar el exoesqueleto.

Los resultados muestran que el exoesqueleto reduce la actividad muscular en una actividad repetitiva de corta duración (un minuto) en una media de 6.25% y 5.86% para los cuatro sujetos. Este beneficio es significativo cuando se valora el incremento de tiempo que los sujetos han permanecido manteniendo una posición de alto estrés muscular. Según la tabla 1, el brazo se mantuvo flexionado en la posición máxima un 57.40% y 57.45% más cuando el exoesqueleto estaba activo. Es así llamativo que el exotraje reduzca la señal electromiográfica a pesar del inherente incremento del estrés muscular que ello conlleva.

Hay indicios además que apuntan que el exoesqueleto es capaz de proporcionar una tasa asistencial mayor, tal y como ilustra la imagen 4. Estas gráficas muestran los resultados para un sujeto mientras realizada los ejercicios, con y sin peso. Los dos observaciones más llamativas son el ángulo máximo alcanzado y la mejora de la trayectoria. Durante las pruebas, el sujeto sobrepasó la flexión de noventa grados; por lo que el exoesqueleto dejó de asistirle en las bandas sombreadas en rojo. Esto conllevó un incremento de la actividad muscular, como muestran los picos marcados en morado. Es interesante observar que estos picos tienen menor magnitud en la situación con carga ya que el par-

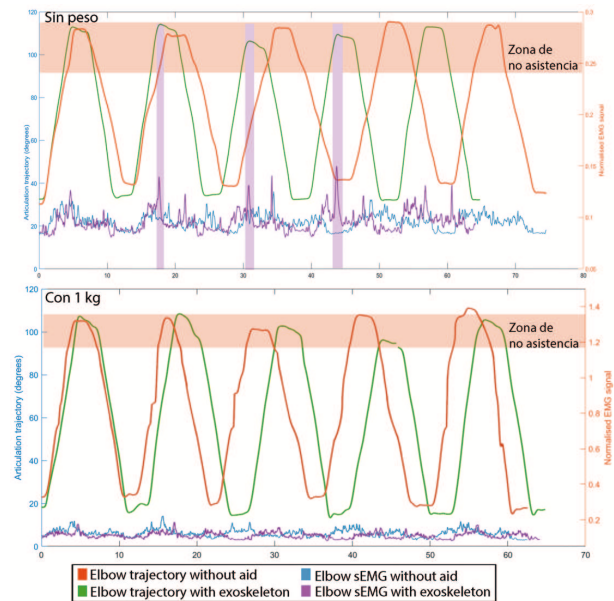


Figura 4: Resultados de trayectoria y actividad muscular para un sujeto. La banda roja muestra la zona que no era asistida por el exoesqueleto. Los picos se correspondan con la máxima flexión alcanza como ilustran las bandas púrpura.

ticipante redujo la banda no asistida. El caso con peso evidencia también que el exoesqueleto puede reducir significativamente la actividad muscular.

Las gráficas también muestran el beneficio del exoesqueleto para la ejecución de un gesto. Específicamente, el sujeto mejora la linealidad del movimiento, el ángulo máximo alcanzado, el tiempo que mantuvo la flexión máxima y el rango articular. No obstante también demuestra que al entrar en un banda no asistida, el usuario tiende a reducir progresivamente el ángulo de flexión que mantiene en el tope del gesto. La entrada en la banda sin asistencia también provoca una mayor variabilidad en el ángulo pico. En ambos casos, con y sin carga, la respuesta del sujeto es parecida: en las primeras repeticiones alcanza un ángulo de flexión sobre los cien grados; después, el cansancio provoca una reducción de éste aproximándose al límite de asistencia programando en el exoesqueleto, noventa grados; finalmente, al ser las últimas repeticiones, el participante trata de recobrar el ángulo inicial. Este patrón de movimiento se observa también en los casos no asistidos, especialmente en el que se porta la carga.

En términos genéricos, el dispositivo reduce la variabilidad del gesto notablemente, en un 69.84% y 23.37%. La mayor reducción del caso sin peso puede achacarse al impacto de la carga en la propiocepción humana al realizar el gesto. Por otra

Tabla 1: Resultados de asistencia relativa, en porcentaje.

Prueba	sEMG medio	sEMG max.	Ang. max.	Std. Ang. max.	Duración	Tiempo flex.
Codo	6.25	-2.94	4.27	69.84	18.66	57.40
Codo 1 kg	5.86	2.01	-3.81	23.37	13.77	57.45

Todos los valores son relativos al valor del usuario sin asistencia de cada caso. Las abreviaciones son: Max., máximo; Std., desviación típica; Ang., ángulo de trayectoria; Flex., flexión; Duración, es la duración de la prueba, y Tiempo flex., el porcentaje de tiempo que los sujetos aguantaron la flexión de 90 grados. Un resultado positivo indica el beneficio del exoesqueleto para ese parámetro en cuestión.

parte, el exoesqueleto ha beneficiado el ángulo máximo medio alcanzado por los individuos en el caso sin peso; por el contrario, éste se ha reducido en un 3.81% al portar una carga. Al revisar los datos, se observa que sin el exoesqueleto los sujetos alcanzaron un ángulo medio máximo de 86.76° al portar la mancuerna de un kilogramo. Con el exoesqueleto, sin embargo, el ángulo fue de 83.32°. Esto denota una falta en el funcionamiento del exoesqueleto siendo dos explicaciones las de mayor probabilidad: por un lado, se tiene que el exoesqueleto no mide directamente la presión o fuerza aplicada por la abrazadera textil. Por lo tanto, el incremento de cualquier coeficiente de fricción puede inducir a una falta de asistencia. La fijación de los marcadores de Optitrack requirió colocar tornillos de cinco centímetros cerca de algunos tendones, haciendo que éstos rozasen entre sí durante el movimiento. Por otro lado, se tiene que la altura de los sujetos seleccionados, de  $1.81 \text{ m} \pm 0.082 \text{ m}$ , requirió en algunos casos emplear el máximo recorrido del motor lineal pudiendo quedar los últimos grados sin asistencia por el volumen de la tuerca y factor de seguridad del control que reduce el largo efectivo del husillo.

Resumiendo, el exoesqueleto demuestra capacidad para mejorar la ejecución de gestos repetitivos y mantener posturas incómodas. Un resultado interesante es el incremento del tiempo que el usuario puede permanecer en una postura de alto estrés muscular sin afectar la actividad muscular. Los resultados han probado que los sujetos mantuvieron el peso durante dos segundos mostrando una actividad muscular inferior a la que corresponde a un gesto que dure un 57.40% menos (0.86 segundos). Se ha demostrado además que el usuario puede realizar movimientos libremente y sobrepasar la posición asistida por el exoesqueleto. Al descansar también puede reacomodar la articulación o modificar el ángulo articular libremente. Por último, se ha detectado un punto de mejora que puede deberse a fricciones parásitas o limitaciones del motor. En cualquier caso, son de menor importancia y serán resueltas en trabajos futuros.

## 5 Conclusiones

El exoesqueleto descrito en este artículo es un diseño basado en textiles para asistir la flexión de codo. El sistema es portátil mediante el uso de una mochila textil ergonómica para la espalda que ha sido modificada en el laboratorio para mejorar algunos aspectos como la sujeción al tronco o un acolchado en la espalda. La abrazadera textil para transferencia de fuerzas ha demostrado su funcionalidad y aplicabilidad dado su reducido peso, transpirabilidad y comodidad. El sistema de guiado simétrico del cable es capaz de reducir la actividad muscular asociada a una tarea y mejorar la trayectoria del usuario. La solución presentada no es restrictiva y permite al usuario combinar el resto de movimientos del brazo que no son asistidos, lo que favorece la aplicación del sistema a entornos laborales y de la vida cotidiana. La integración de la actuación en botones y el estudio de la composición textil ha demostrado favorecer la compactación y ligereza del dispositivo. Además, el diseño es higiénico y puede lavarse y desinfectarse cómodamente. Se debe notar que el diseño ha sido puesto durante más de treinta horas y no ha requerido mantenimiento o reparación de ningún componente.

En términos asistenciales, el exoesqueleto ha demostrado mejorar el tiempo que un usuario puede mantener una carga en una postura incómoda. Sorprendentemente, el dispositivo ha conseguido que este incremento no conlleve una mayor fatiga muscular. El sistema también mejora la repetibilidad y linealidad del gesto. No obstante, la evaluación tiene dos limitaciones: el tamaño de la muestra y duración. Al contar con sujetos sanos y focalizar aplicaciones a la vida cotidiana es conveniente realizar próximas evaluaciones con un mayor tamaño muestral con potencia estadística significativa. Además, se debe notar que el experimento ha permitido evaluar los beneficios del dispositivo en una situación específica y poco favorable en la que el sujeto no alcanza la fatiga muscular. Así, sería interesante aumentar las repeti-

ciones y duración del ejercicio a fin de evaluar la hipótesis de mejora del beneficio con el tiempo. En este mismo contexto, convendría incluir ejercicios multitareas que requieran al usuario realizar distintas poses y gestos individuales ya que es en estos ejercicios de escasa repetibilidad donde los exoesqueletos flexibles como el presentado destacan frente a otras tendencias más restrictivas y rígidas. Por último, entre los trabajos futuros destaca la mejora de la realimentación de fuerzas, el alto-nivel del sistema de control y el aumento del husillo efectivo o ratio cable desplazado - husillo recorrido.

### Agradecimientos

Los trabajos de este artículo han sido parcialmente financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación, bajo el proyecto LUXBIT (RTI2018-094346-BI00).

### English summary

#### A portable flexible exoskeleton to assist elbow flexion

### Abstract

*Exoskeletons are robots that surround the human anatomy to assist locomotion. Flexible exoskeletons, so-called exosuits, use soft materials and actuation methods to deliver a lightweight and unobstrusive construction. Their lack of a rigid self-supportive structure requires them to support their functioning on the users' anatomy. This paper covers the mechanism to flex the elbow used by the flexible exoskeleton LUXBIT. The LUXBIT project aims to attain a flexible portable exoskeleton to assist the arms in bimanual tasks. The exoskeleton has a textile coupling that combines fabrics' stacking and sewing patterns to transfer mobilising forces to the user. The actuation's compactness has been achieved by applying tailoring methods. The resulting design is versatile, easy to maintain, and does not apply pressure to the skin constantly. The last sections evaluate the exoskeleton in four healthy subjects.*

**Keywords:** Exoskeleton, exosuit, robot, human-robot interaction.

### Referencias

- [1] Babic, Jan, et al. Power-augmentation control approach for arm exoskeleton based on human muscular manipulability. En 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2017. p. 5929-5934.
- [2] Chen, Bing, et al. Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons. Journal of Orthopaedic Translation, 2016, vol. 5, p. 26-37.
- [3] Colombini, Daniela; OCCHIPINTI, Enrico. Preventing upper limb work-related musculoskeletal disorders (UL-WMSDs): New approaches in job (re) design and current trends in standardization. Applied ergonomics, 2006, vol. 37, no 4, p. 441-450.
- [4] Contreras-González, Aldo F., et al. Soft-Wearable Device for the Estimation of Shoulder Orientation and Gesture. En International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications. Springer, Cham, 2020. p. 371-379.
- [5] Dahmen, Christian, et al. Approach of optimized planning process for exoskeleton centered workplace design. Procedia CIRP, 2018, vol. 72, p. 1277-1282.
- [6] Ganguly, Amartya, et al. Wearable pediatric gait exoskeleton-a feasibility study. En 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018. p. 4667-4672.
- [7] Hope, James; MCDAID, Andrew. Development of wearable wrist and forearm exoskeleton with shape memory alloy actuators. Journal of Intelligent Robotic Systems, 2017, vol. 86, no 3-4, p. 397.
- [8] Lanotte, Francesco, et al. A low-back exoskeleton can reduce the erector spinae muscles activity during freestyle symmetrical load lifting tasks. En 2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob). IEEE, 2018. p. 701-706.
- [9] Li, Zhongyi, et al. Design, modeling and testing of a compact variable stiffness mechanism for exoskeletons. Mechanism and Machine Theory, 2020, vol. 151, p. 103905.

- [10] Michalos, George, et al. Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 37, p. 248-253.
- [11] [Online] Optitrack: Biomech." [https://v20.wiki.optitrack.com/index.php?title=Biomech\\_\(57\)](https://v20.wiki.optitrack.com/index.php?title=Biomech_(57))". Accedido: 18.06.2021.
- [12] Pacifico, Ilaria, et al. An experimental evaluation of the proto-mate: a novel ergonomic upper-limb exoskeleton to reduce workers' physical strain. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 2020, vol. 27, no 1, p. 54-65.
- [13] Panizzolo, Fausto A., et al. A biologically-inspired multi-joint soft exosuit that can reduce the energy cost of loaded walking. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 2016, vol. 13, no 1, p. 1-14.
- [14] Pont, David, et al. Exoflex: An upper-limb cable-driven exosuit. En *Iberian Robotics conference*. Springer, Cham, 2019. p. 417-428.
- [15] Pont-Esteban, D., et al. Validation of An Elbow Position Super-Twisting Sliding-Mode Controller for Upper-Limb Exosuit Using A Soft Position Sensor. En *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021. p. 012074.
- [16] Samper-Escudero, José Luis, et al. A Cable-Driven Exosuit for Upper Limb Flexion Based on Fibres Compliance. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, p. 153297-153310.
- [17] Samper-Escudero, José Luis, et al. Assessment of an upper limb exosuit with textile coupling. En *2020 IEEE International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS)*. IEEE, 2020. p. 1-6.
- [18] Samper-Escudero, J. Luis, et al. Efficient multiaxial shoulder-motion tracking based on flexible resistive sensors applied to exosuits. *Soft robotics*, 2020, vol. 7, no 3, p. 370-385.
- [19] Sanz-Merodio, Daniel, et al. EXOtrainer project clinical evaluation of gait training with exoskeleton in children with spinal muscular atrophy. En *Advances in Robotics Research: From Lab to Market*. Springer, Cham, 2020. p. 211-227.
- [20] Rathore, Ashish, et al. Quantifying the human-robot interaction forces between a lower limb exoskeleton and healthy users. En *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. IEEE, 2016. p. 586-589.
- [21] Rupal, Baltej Singh, et al. Lower-limb exoskeletons: Research trends and regulatory guidelines in medical and non-medical applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017, vol. 14, no 6, p. 1729881417743554.
- [22] Thalman, Carly M., et al. A novel soft elbow exosuit to supplement bicep lifting capacity. En *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2018. p. 6965-6971.
- [23] Tiseni, Luca, et al. On the edge between soft and rigid: an assistive shoulder exoskeleton with hyper-redundant kinematics. En *2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. IEEE, 2019. p. 618-624.
- [24] [Online] Verve Motion. "https://vervemotion.com/technology". Accedido: 08.07.2021.
- [25] Wolff, Jamie, et al. A survey of stakeholder perspectives on exoskeleton technology. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 2014, vol. 11, no 1, p. 1-10.
- [26] [Online] World Health Organization. "https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions". Accedido: 18.06.2021.
- [27] World Health Organization (WHO) et al. "International minimum requirements for health protection in the workplace". World Health Organization 2017.
- [28] World Health Organization (WHO) et al. "Occupational safety and health in public health emergencies: a manual for protecting health workers and responders". World Health Organization 2018.
- [29] WHO Scientific Group on the Burden of Musculoskeletal Conditions at the Start of the New Millennium. "The burden of musculoskeletal conditions at the start of the new millenium : report of a WHO scientific groups". WHO technical report series; 919. 2003, pp 218.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# ROBOT SOCIAL COMO ASISTENTE DE COCINA

Jaime Gómez-Jiménez, Sara Carrasco-Martínez, M. A. Quispe-Flores, Javier Sevilla-Salcedo,  
Fernando Alonso-Martín, Miguel A. Salichs

RoboticsLab, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,  
Universidad Carlos III de Madrid

100383149@alumnos.uc3m.es, {sacarras, mquispe, jasevill}@pa.uc3m.es, {famartin, salichs}@ing.uc3m.es

## Resumen

*En el presente trabajo se describe una aplicación real para los robots sociales del departamento de automática en la Universidad Carlos III, para dotar a los robots Mini y Milow de la capacidad de convertirse en asistentes de cocina. La asistencia consiste en una interacción multimodal mediante una interfaz gráfica y diálogos, ofreciendo las indicaciones al usuario de los pasos a realizar en el momento de elaborar un plato culinario. De tal manera, este trabajo mejora la capacidad de los robots añadiendo otra funcionalidad.*

**Palabras clave:** Robótica social; Accesibilidad; Android; Cocina; Recetas.

## 1. INTRODUCCIÓN

La evolución tecnológica que está ocurriendo actualmente ha dado lugar a un gran impulso para la robótica en diversos ámbitos, siendo uno de ellos la robótica social. Esta disciplina permite una interacción fluida con el usuario mediante el uso de diferentes medios de comunicación como los gestos, diálogos entre ambos y expresiones propias del robot [1]. De esta manera, la robótica social se estima que sea un recurso clave para todas aquellas personas que necesiten compañía y así mantener una conversación o entretenerse con robots sociales. Asimismo, a medida que las personas llegan a cierta edad, es más frecuente que haya problemas al realizar las tareas básicas mientras están cocinando, debido al deterioro cognitivo y la pérdida de memoria. Por ejemplo, pueden olvidarse de realizar un paso, o bien no añadir todos los ingredientes necesarios [2].

En el presente artículo se describe el desarrollo de una aplicación, también llamada habilidad, con el objetivo de asistir al usuario durante la elaboración de platos culinarios, estando implementada en los robots sociales *Mini* y *Milow*. Se pretende crear una aplicación que cubra todas las necesidades de accesibilidad que permita su uso a las personas mayores en el momento de cocinar. Varios estudios han demostrado que la preparación de recetas culinarias favorece a una mejora de la salud tanto mental como física y, por tanto, es una

tarea fundamental para hacer en el día a día [3].

El artículo tiene la siguiente estructura. La Sección 2 investiga los trabajos relacionados con este artículo desde tres perspectivas diferentes: los robots sociales, los robots de cocina y las aplicaciones para móviles de recetas. Más adelante, en la Sección 3 se muestran los robots donde se implementa el trabajo desarrollado y, posteriormente, la Sección 4 describe la propuesta realizada. Finalmente, la Sección 5 recoge los datos obtenidos en las pruebas realizadas a usuarios y en la Sección 6 se concluyen los resultados.

## 2. ESTADO DEL ARTE

El campo de la robótica ha ido mejorando a lo largo de los años, incorporando nuevas habilidades a los robots. Esas habilidades pueden variar desde la construcción de vehículos en un nivel industrial hasta la asistencia en hospitales o en tareas del hogar, como es el caso de los robots sociales. En esta Sección se estudiará los trabajos relacionados tanto con la robótica social como con la preparación de recetas desde tres perspectivas diferentes: los robots sociales, robots de cocina y aplicaciones para móvil de recetas.

### 2.1. ROBOTS SOCIALES

Aquellos robots destinados a la asistencia de personas o a la terapia, son los robots sociales, y suelen tener apariencias amigables similares a los animales. Estos robots incluyen una gran variedad de habilidades, que abarcan desde aplicaciones de entretenimiento como es el caso de los juegos, pasando por habilidades para ver fotos y escuchar música, hasta aquellas destinadas a realizar ejercicios de estimulación cognitiva. Este conjunto de habilidades permiten al usuario interactuar con el robot para entretenerse en el día a día. Ejemplos de este tipo de robots pueden ser *Milow* [4], *Mini* [5] o *Pepper* [6] entre otros.

### 2.2. ROBOTS DE COCINA

Comer es una actividad esencial para las personas y un robot capaz de elaborar cualquier plato

de cocina podría aportar valor al usuario, a pesar del reto que supone para el campo de la robótica. Dependiendo del grado implicación en la cocina, se pueden separar en tres categorías. Por una parte, se encuentran los robots que vienen integrados en la propia cocina, como es el caso de la Cocina Moley, capaz de cocinar platos completos sin ayuda del usuario ya que puede acceder a todas las secciones de la cocina [7].



Figura 1: Robot de Cocina Moley [7].

Por otra parte, están los robots que requieren la ayuda del usuario para introducir los ingredientes y seleccionar las acciones que el robot debe realizar, siendo el caso de la Thermomix [8]. Por último, cabe destacar aquellos robots que son únicamente informativos, como Alexa, que contiene la habilidad de cocina<sup>1</sup> y le permite indicar todos los ingredientes y los pasos necesarios que debe seguir el usuario para la elaboración de las recetas [9].

### 2.3. APLICACIONES DE RECETAS

Actualmente, en el mercado de aplicaciones para dispositivos móviles, existe una gran variedad destinadas al uso y creación de recetas, siguiendo todas el mismo patrón: contienen una lista de recetas organizadas por categorías e incluso algunas tienen la posibilidad de filtrar dichas recetas según los ingredientes que desee el usuario o bien según la dieta que esté siguiendo el mismo.

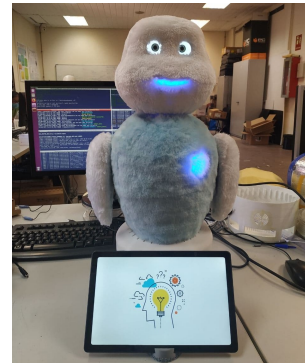
Ejemplos de aplicaciones de recetas cabe destacar la app Oui Chef, desarrollada con la opción de sugerir los menús de acuerdo a las preferencias del usuario, además de contener una calculadora de calorías para todas sus recetas [10]. Otra aplicación sobresaliente es la de Inverse Cooking, capaz de recrear los ingredientes y los pasos de un plato culinario atendiendo a una foto del mismo. Gracias a su amplia base de datos es posible predecir

<sup>1</sup>Sitio Web de la habilidad: <https://www.amazon.es/Weblogs-SL-Directo-al-Paladar/dp/B07JVD1297>

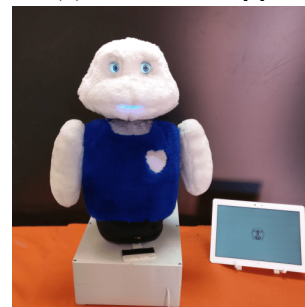
los ingredientes disponibles en la foto y generar instrucciones de manera automática [11].

## 3. METODOLOGÍA

Este artículo se centra en la implementación de la habilidad de recetas en los robots *Mini* y *Milow*, desarrollados por el Laboratorio de Robótica Social de la Universidad Carlos III de Madrid. Ambos robots contienen los mismos módulos principales de Software, siendo la diferencia más notable entre ambos los cambios en el diseño estético.



(a) Robot Milow [4].



(b) Robot Mini [12].

Figura 2: Robots desarrollados por el RoboticsLab.

### 3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ROBOTS SOCIALES UTILIZADOS

Estos robots están destinados al entretenimiento de los usuarios mediante el uso de habilidades o juegos como el ahorcado, el bingo o bien reproduciendo música y fotos según los gustos del usuario [12]. Asimismo, también contienen ejercicios de estimulación cognitiva para asistir a aquellos que lo necesiten. Para conseguir la interacción entre el usuario y el robot social, dispone de una tableta vinculada que muestra el contenido multimedia [13], además de poder pronunciar frases y reconocer lo que el usuario quiere decir para una comunicación más natural entre ambos.

Los módulos presentes en estos robots y que han



sido utilizados en el presente proyecto se pueden observar en la Figura 3.

- **Sistema de Toma de Decisiones (DMS):** permite el control de todas las habilidades por parte del robot de forma autónoma sin necesidad de un “operador”, dando lugar a que pueda tomar sus propias decisiones [14].
- **Gestor de interacción Humano-Robot (HRI Manager):** se encarga de controlar las órdenes recibidas por las habilidades mediante el uso de Acciones Comunicativas, activando los módulos pertinentes. Además, procesa la información procedente de los actuadores y sensores del robot [15].
- **Reconocimiento automático de voz (ASR):** tiene como objetivo el procesamiento de las indicaciones realizadas por el usuario a través de la voz, enviando el resultado al HRI Manager [16].
- **Reproductor de voz (TTS):** se encarga de sintetizar el texto enviado por el HRI Manager y reproducirlo en los altavoces, informando al usuario cuando interactúa con el robot [17].
- **Gestor de expresividad:** aporta mayor vivacidad al robot mediante el movimiento de los motores, el control de los ojos y la activación de luces presentes en el corazón y mejillas [18].

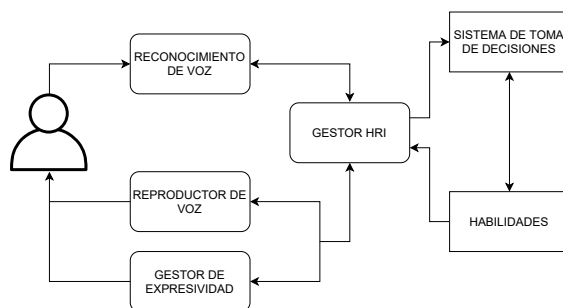


Figura 3: Diagrama de software del robot Milow.

## 4. NUESTRA PROPUESTA

La habilidad de recetas expuesta en este artículo, tiene como objetivo la asistencia de personas mayores a la hora de cocinar, permitiendo la búsqueda y creación de recetas culinarias a través de los robots sociales, utilizando las funcionalidades principales del robot para mantener una comunicación natural con el usuario.

### 4.1. PROPIEDADES GENERALES

El proyecto se divide en tres módulos principales: el robot social, la aplicación de Android [19] y el paquete de ROS (Robot Operating System) [20] llamado *recipes\_skill*.

Para el segundo módulo se ha utilizado el ejemplo de *android\_tutorial\_pubsub* procedente del proyecto *android\_core*<sup>2</sup>. Este ejemplo proporciona los recursos necesarios para conseguir una conexión de Android con ROS, utilizando una comunicación bidireccional de publicador-suscriptor. De esta manera, es posible el paso de información entre la aplicación de Android y el paquete de ROS, siendo este último el encargado de comunicarse con los módulos presentes en el robot social.

De forma paralela a la ejecución de la aplicación, la habilidad utiliza los *actionlibs*, un tipo de mensajes de ROS que permite al robot iniciar o parar la habilidad cuando sea necesario a través del DMS.

### 4.2. REQUISITOS PREVIOS

Es necesario tener presentes todos los archivos necesarios en la tableta que poseen los robots, siendo estos la aplicación general, la aplicación de Recetas y el archivo XML para su correcta conexión con el robot que se desee.

Asimismo, es imprescindible que ambas aplicaciones tengan permisos para acceder al almacenamiento del dispositivo y para poder mostrarse sobre otras aplicaciones.

Finalmente, es necesario tener el paquete *recipes\_skill* en el entorno de trabajo del robot a utilizar.

### 4.3. DISEÑO ESTÉTICO

La aplicación muestra la información tanto de forma visual a través de la tableta como por los altavoces del robot indicando las acciones que el usuario puede realizar. En cuanto a la tableta, dispone de tres opciones dentro del menú principal, como se puede ver en la Figura 4.

La opción principal y más útil es la de “Explorar”, permitiendo a los usuarios buscar nuevas recetas en una lista e incluso filtrarlas según el nombre o el ingrediente que desee utilizar (ver Fig. 5). Una vez elegida la receta deseada, se muestra un resumen de la receta, incluyendo los ingredientes, los pasos y el tiempo que requiere para su elaboración. En esta pantalla, se puede añadir la receta a favoritos, o bien, empezar a cocinar directamente.

<sup>2</sup>Proyecto *android\_tutorial\_pubsub*: [https://github.com/rosjava/android\\_core/tree/kinetic/android\\_tutorial\\_pubsub](https://github.com/rosjava/android_core/tree/kinetic/android_tutorial_pubsub)



Figura 4: Diseño gráfico de la pantalla principal.

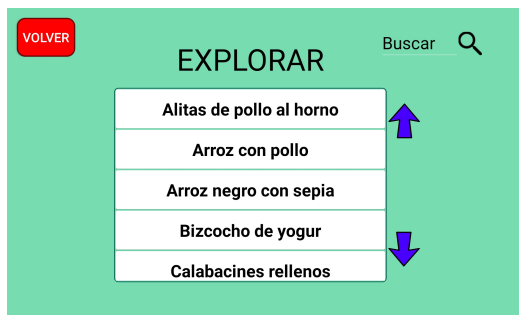


Figura 5: Diseño gráfico del menú de exploración.

Si la elección del usuario es empezar la receta, la aplicación muestra primeramente la lista de los ingredientes que son necesarios junto a las cantidades de cada uno y, cuando el usuario los tiene preparados, el robot va indicando cada paso que se debe realizar para poder cocinar el plato elegido. Esta parte puede incluir un temporizador ajustado a cada paso como se puede observar en la Figura 6, donde el círculo va disminuyendo a medida que pasa el tiempo.

En cuanto a la opción de “Nueva receta”, la aplicación ofrece la posibilidad de crear una receta totalmente personalizada, empezando por añadir el título, seguido por incluir todos los ingredientes uno a uno y terminando por la parte de los pasos. Esta pantalla permite añadir acciones junto a sus ingredientes además de especificar la temperatura o un temporizador si es necesario.

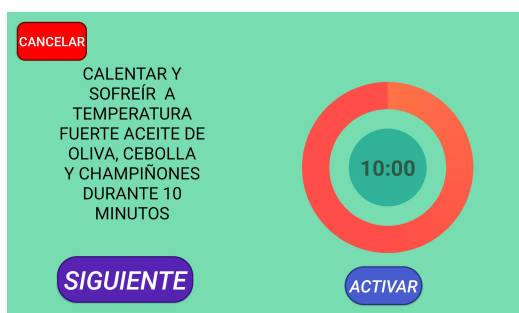


Figura 6: Diseño gráfico del menú de cada paso.

Finalmente, la opción de “Mis recetas” dispone de dos listas de recetas, las cuales contienen las recetas creadas por el usuario y aquellas añadidas por favoritos desde la sección de “Explorar”. La única diferencia entre estas dos listas es que la primera posibilita la edición de recetas, ya sea añadiendo o eliminando pasos e ingredientes.

Adicionalmente, se han incorporado varios accesorios para mejorar el diseño estético del robot. Como se puede apreciar en la Figura 7, Milow está agarrando una cuchara de madera y tiene puesto un gorro de chef. Para conseguir lo primero, se ha diseñado una pieza de sujeción para el brazo, acompañada de otra parte para la cuchara, permitiendo que se puedan diseñar más piezas distintas y así poder personalizar el robot con otros accesorios como un micrófono. Estas implementaciones permiten al usuario personalizar el robot según lo que vaya a hacer con él, aportando mayor interacción con el mismo.



Figura 7: Accesorios añadidos al robot Milow.

#### 4.4. IMPLEMENTACIÓN

Para la correcta implementación y funcionamiento de la habilidad de recetas en los robots sociales, todos los módulos deben comunicarse entre sí manteniendo la prioridad de los mismos. Dentro del proyecto, la aplicación en Android se encarga de manejar toda la lógica de los menús que se muestran en la tableta, enviando la información mediante mensajes de ROS a la habilidad (*recipes-skill*) presente en el robot. De tal forma, cada vez que el usuario realiza una opción en la tableta, envía la información al robot, que a su vez se comunica con el HRI Manager según lo que desee hacer. Una vez se comunica con el HRI Manager, este activa el ASR, TTS o los Gestos dependiendo del contenido del mensaje y, cuando termina de

pronunciar una frase o de escuchar al usuario, la habilidad recibe el resultado.

Por tanto, existe una comunicación bidireccional entre los módulos, mientras que en paralelo el DMS puede parar o cancelar la actividad cuando el usuario toque el brazo del robot o cuando este lo estime oportuno.

## 5. EVALUACIÓN

Para comprobar el uso de la aplicación en usuarios, se ha realizado una encuesta a personas de todas las edades acerca del estilo y la accesibilidad de la habilidad de recetas. Los usuarios indican que prefieren un estilo con botones, evitando el uso de elementos como barras para deslizar a los cuales no están tan acostumbrados. Asimismo, el hecho de que se pueda navegar tanto por voz como por la pantalla de la tableta, aporta a los usuarios una sensación de comodidad a la hora de moverse por la aplicación. Además, se ha preguntado a los encuestados acerca de las recetas que les gustaría incluir en el robot, permitiendo que las recetas predefinidas mostradas en el menú de “Explorar” sean aquellas que prefieren la mayoría de personas.

Como conclusión a las pruebas realizadas en usuarios, el resultado ha sido razonablemente positivo, con una puntuación de **4.34 sobre 5** (ver Fig. 8).

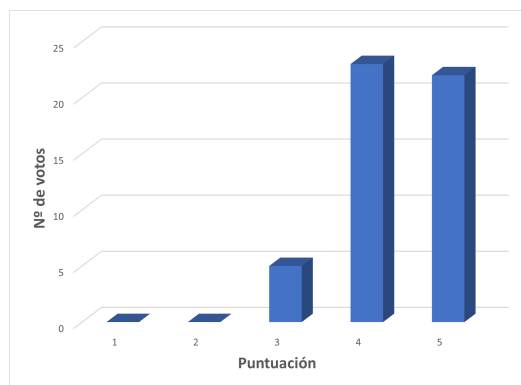


Figura 8: Puntuación obtenida en la encuesta a los usuarios.

## 6. CONCLUSIONES

Este artículo se centra en el desarrollo de una habilidad de recetas para poder convertir a los robots sociales *Mini* y *Milow* en asistentes de cocina. Gracias al desarrollo tanto de una interfaz gráfica como de una navegación por voz, los usuarios han mencionado que el robot aporta mayor facilidad a la hora de utilizar la aplicación. Por otro lado, se puede concluir que las encuestas realizadas han

sido de mucha utilidad, ayudando a mejorar aspectos de diseño para así evitar confusión durante su uso y también proporcionando una lista de recetas que prefieren la mayoría de usuarios para poder incluirla en la aplicación por defecto.

Asimismo, debido a la creación de la aplicación a través del entorno de Android, se ha conseguido crear una interfaz con mejoras visuales respecto a otras habilidades de los robots, además de poder incluir más información en cada menú.

## English summary

### SOCIAL ROBOT AS COOKING ASSISTANT

#### Abstract

*In this paper, it is described a real application for the social robots developed in the automation department of the University Carlos III, to endow the robots Milow and Mini with the capacity of becoming cooking assistants. The assistance consists of a multimodal interaction through a graphic interface and dialogues, offering indications to the user of the cooking steps when it comes to preparing a culinary dish. In this way, this project improves the capacity of the robot adding another functionality.*

**Keywords:** Social robotics; Accessibility; Android ; Cooking; Recipes.

## Referencias

- [1] Brian R. Duffy and Colm Rooney and G. M. P. (Greg M. P.) O'Hare and Ruadhan O'Donoghue, «What is a social robot?» en, sep. de 1999.
- [2] D. Dawson, G. Hendershot y J. Fulton, «Aging in the Eighties: Functional Limitations of Individuals Age 65 Years and Over: (605432007-001),» en, American Psychological Association, inf. téc., 1987, Type: dataset. [En línea]. Disponible en: <http://doi.apa.org/get-pe-doi.cfm?doi=10.1037/e605432007-001> (Acceso: 22-06-2021).

- [3] N. Farmer, K. Touchton-Leonard y A. Ross, «Psychosocial Benefits of Cooking Interventions: A Systematic Review,» en, *Health Education & Behavior*, vol. 45, n.º 2, pp. 167-180, abr. de 2018, Publisher: SAGE Publications Inc. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/1090198117736352> (Acceso: 22-06-2021).
- [4] C. Gómez, C. Ursúa, J. Montoya, Castro-González, F. Alonso Martín, M. Malfaz, M. Maroto Gómez y M. Salichs, «Desarrollo de una versión de bajo coste del robot social Mini,» ago. de 2019, pp. 718-725.
- [5] E. Salichs, E. Fernández-Rodicio, J. Castillo, Castro-González, M. Malfaz y M. Salichs, «A Social Robot Assisting in Cognitive Stimulation Therapy,» en, jun. de 2018, pp. 344-347.
- [6] Z. A. barakeh, S. alkork, A. S. Karar, S. Said y T. Beyrouthy, «Pepper Humanoid Robot as a Service Robot: a Customer Approach,» en *2019 3rd International Conference on Bio-engineering for Smart Technologies (BioSMART)*, abr. de 2019, pp. 1-4.
- [7] M. Bollini, S. Tellex, T. Thompson, N. Roy y D. Rus, «Interpreting and Executing Recipes with a Cooking Robot,» en *Experimental Robotics: The 13th International Symposium on Experimental Robotics*, ép. Springer Tracts in Advanced Robotics, J. P. Desai, G. Dudek, O. Khatib y V. Kumar, eds., Heidelberg: Springer International Publishing, 2013, pp. 481-495. [En línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-00065-7\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00065-7_33) (Acceso: 28-03-2021).
- [8] A. Fries, A.-W. Bergmeister y M. Spindler, «Thermomix by Vorwerk – A New Way of Cooking,» en *Fallstudienkompendium Hidden Champions: Innovationen für den Weltmarkt*, J.-P. Büchler, ed., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018, pp. 73-90. [En línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-658-17829-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-658-17829-1_5) (Acceso: 17-05-2021).
- [9] E. Lee, G. Vesonder y E. Wendel, «Elder-care Robotics - Alexa,» en *2020 11th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference (UEMCON)*, oct. de 2020, pp. 0820-0825.
- [10] E. Darwish y M. A. Aziz, «Android Cooking Application,» 2018, Accepted: 2020-02-16T09:54:37Z. [En línea]. Disponible en: <https://repository.najah.edu/handle/20.500.11888/14792> (Acceso: 19-05-2021).
- [11] A. Salvador, M. Drozdal, X. Giro-i Nieto y A. Romero, «Inverse Cooking: Recipe Generation from Food Images,» *arXiv:1812.06164 [cs]*, jun. de 2019, arXiv: 1812.06164 version: 2. [En línea]. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/1812.06164> (Acceso: 19-05-2021).
- [12] E. Velazquez-Navarro, S. Gonzalez-Díaz, F. Alonso-Martín, J. C. Castillo, M. Malfaz y M. A. Salichs, «El robot social Mini como plataforma para el desarrollo de juegos de interacción multimodales,» 2019.

- [13] S. Marques, J. Castillo, F. Alonso Martín, M. Maroto Gómez, J. J. Gamboa y M. Salichs, «Interfaces táctiles para Interacción Humano-Robot,» sep. de 2017.
- [14] M. Maroto Gómez, Castro González, J. C. Castillo Montoya, M. Malfaz Vázquez y M. Salichs Sánchez-Caballero, «A Bio-inspired Motivational Decision Making System for Social Robots Based on the Perception of the User,» ago. de 2018, Accepted: 2019-02-08T09:26:21Z Publisher: MDPI. [En línea]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/28021> (Acceso: 21-06-2021).
- [15] E. Fernández-Rodicio, Castro-González, F. Alonso-Martín, M. Maroto-Gómez y M. Salichs, «Modelling Multimodal Dialogues for Social Robots Using Communicative Acts,» eng, *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 20, n.º 12, E3440, jun. de 2020.
- [16] F. Alonso Martín y M. Salichs, «Integration of a Voice Recognition System in a Social Robot,» *Cybernetics and Systems*, vol. 42, pp. 215-245, mayo de 2011.
- [17] F. Alonso-Martín, M. Malfaz, Castro-González, J. Castillo y M. Salichs, «Online Evaluation of Text to Speech Systems for Three Social Robots,» en, nov. de 2019, pp. 155-164.
- [18] E. Fernández-Rodicio, S. Marques y M. Salichs, «Gesture Management in the Robot Mini,» mar. de 2019.
- [19] A. Kharisma, «What is Android?» *http://developer.android.com/guide...*, [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/2537177/What\\_is\\_Android](https://www.academia.edu/2537177/What_is_Android) (Acceso: 21-05-2021).
- [20] M. Quigley, B. Gerkey y W. D. Smart, *Programming Robots with ROS: A Practical Introduction to the Robot Operating System*. O'Reilly Media, Inc., nov. de 2015, Google-Books-ID: Hnz5CgAAQBAJ.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# DYNAMIC SEMANTIC ONTOLOGY GENERATION: A PROPOSAL FOR SOCIAL ROBOTS

Javier Sevilla-Salcedo, M. A. Quispe-Flores, Sara Carrasco-Martínez, Jaime Gómez-Jiménez

J. C. Castillo, Á. Castro-González, M. Malfaz, Miguel A. Salichs  
RoboticsLab, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,  
Universidad Carlos III de Madrid

{jasevill, mquispe, sacarras}@pa.uc3m.es, 100383149@alumnos.uc3m.es  
{jocastil, acgonzal, mmalfaz, salichs}@ing.uc3m.es

## Abstract

*During a human-robot interaction by dialogue/voice, the robot cannot extract semantic meaning from the words used, limiting the intervention itself. Semantic knowledge could be a solution by structuring information according to its meaning and its semantic associations. Applied to social robotics, it could lead to a natural and fluid human-robot interaction. Ontologies are useful representations of semantic knowledge, as they capture the relationships between objects and entities. This paper presents new ideas for ontology generation using already generated ontologies as feedback in an iterative way to do it dynamically. This paper also collects and describes the concepts applied in the proposed methodology and discusses the challenges to be overcome.*

**Keywords:** Ontology Generation, Semantic Knowledge, Hierarchical Clustering, Social Robots, Decision-Making System, Human-Robot Interaction, Cognitive Stimulation

## 1 INTRODUCTION

Throughout the paper, *semantic knowledge* is defined as a domain that includes everything known about a subject or object, including language semantics (the meaning of words, objects and entities) [10]. In recent years there has been a trend towards integrating high-level information in various computer applications, which, in turn, improves the adaptability to more real-life situations.

In *semantic knowledge*, one of the biggest problems over the years has been the correct approach to its representation because of the abstract nature of *concepts* [15]. In this context is where ontologies come in. Ontologies are representation tools for defining and describing objects, properties and relationships in a knowledge domain. Once solved the problem of representation, a new paradigm emerges in the generation of a semantic database that brings together these concepts.

Many fields of knowledge have included ontologies

in their development, such as the IoT, where we find the ROCAS project (Reasoning in the Cloud Applying Semantics), which aims to provide a distributed semantic reasoning system based on cloud computing [6]. RoboEarth is another example, this time focused on robotics, of the use of semantic knowledge. *RoboEarth is a worldwide web for robots: a giant network and database repository where robots can share information and learn from each other* [29]. Another application is semantic navigation, where a mobile robot can move around a house, taking into account the use of each room. In a practical case, given the command “I would like to have a cold drink”, the robot would move to the kitchen by reasoning that the cold drink is in the fridge, which is in the kitchen [5].

One of the problems encountered in this specific application is the user’s manual input of the ontology, which implies a meticulous and tedious procedure of defining a specific ontology for each environment or topic [4]. In this context, a further stage is to establish a methodology for gathering this knowledge and adapting it to the representation system, such as ontologies.

Therefore, the main goal of this paper is to present our first ideas of a new ontology generation model inspired by the breakthroughs in machine learning to make the process more dynamic and applicable on a larger scale for generating semantic knowledge.

The rest of the paper is structured as follows: A brief overview of the main key concepts underlying the methodology is presented in section 2, followed by our approach and the challenges to be faced in section 3. Section 4 includes a discussion about possible applications in social robotics. Finally, section 5 comments on the conclusions drawn from this article.

## 2 STATE OF THE ART

This section gathers previous knowledge related to the generation of ontologies. Therefore, predefined concepts and methodologies that facilitate the procedure and understanding of semantic



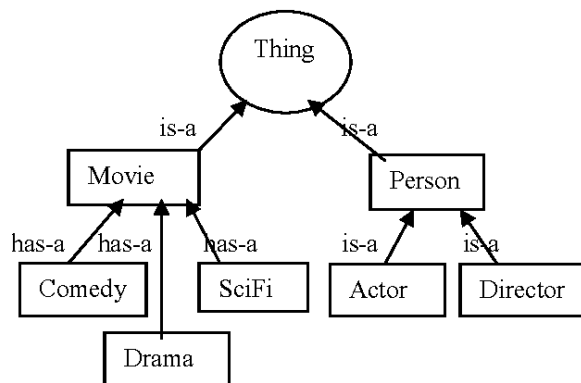


Figure 1: Simple movie ontology [22]

knowledge generation are discussed in this section.

The first matter to deal with is the representation of semantic knowledge. In this sense, ontology is one of the best tools to obtain representations of knowledge through hierarchies of concepts [8]. In many fields, they are used to frame theories, research and implementations.

In addition, to generate ontologies, we will need a tool that, from diverse literature, can classify and group the existing terms, objects and relations and thus create the ontology from it. Clustering has this purpose; this technique generates groupings (clusters) from unstructured data.

However, before clustering, it is advisable to preprocess the text to remove words that lack semantic information, such as articles. It is also helpful to make a primary distinction between verbs, adjectives, nouns or adverbs. *Natural Language Processing Tools* allow the user to perform these and other functionalities.

## 2.1 ONTOLOGIES

In knowledge engineering, ontologies collect and define the relations, rules and hierarchies in our language and the conceptualisation of an environment [7]. Its main characteristic is the establishment of properties and relationships between entities or concepts [30]. Its use limits complexity and organises information in a solution-oriented way [9]. Figure 1 shows an simple example of movie ontology. The figure depicts the relationships between the different classifications and attributes.

Due to the enhanced performance obtained using ontologies reported on different applications discussed below, its use becomes essential since it deals with the uncertainty and heterogeneity of unstructured data. Numerous developments and applications focus on the treatment and management of ontologies. For example, semantic integration has been studied, looking at the possible

combination between ontologies and the representation of concept maps based on ontologies [19].

## 2.2 CLUSTERING

Once the system of semantic knowledge representation well defined and established, the next step is to explore the possible methodology to perform this hierarchical categorisation of conceptualisations in an automated manner to produce ontologies.

For this purpose, clustering appears, a technique commonly used in the analysis of statistical data and, in this case, widely used in the field of machine learning and data mining. Clustering is typically an unsupervised learning method whose main objective is defining and establishing new categories or groups (clusters) in a dataset based on recognising patterns. This concept goes hand in hand with ontologies, as Tyron and Bailey stated in 1970, *understanding our world requires conceptualising the similarities and differences between the entities that compose it* [1][24].

Within clustering, we can find different approaches and methodologies. Going into its taxonomy, included in Figure 2, the first distinction occurs between hierarchical and partitional algorithms. The first algorithms define nested clusters and subclusters within the sets at each level, typically represented by a dendrogram, a graphical representation in the form of a tree that organises data into subcategories. Partitionals, on the other hand, obtain a classification or grouping at a single hierarchy level rather than a clustering structure, which sometimes has drawbacks such as the number of clusters. Though dealing with vast amounts of data is computationally more feasible than acquiring a hierarchical structure [14].

## 2.3 ONTOLOGY-BASED CLUSTERING

In 2001, Maedche and Staab presented an ontology learning framework using different semi-automatic ontology building tools [17]. The framework includes several practical applications such as structure combination, model extraction, pruning and refinement. In addition, a graphical user interface collects all the development while allowed the visualisation of the generated structures and the manual modification at any level if necessary. A year later, together with A. Hotho, they redefined the model extraction step and focused on ontology-based document clustering, introducing a new development in text pre-processing be-

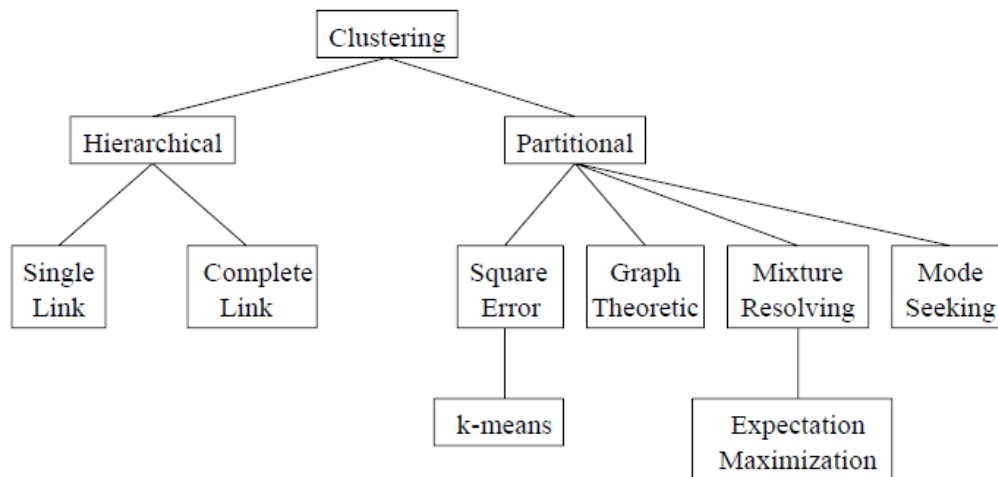


Figure 2: A taxonomy of clustering approaches [14]

fore the primary analysis [12]. The *Concept Selection and Aggregation* (COSA) strategy consisted of pre-mapping concepts using a natural language processing system before heterarchy usage to provide suitable aggregations for further clustering [13].

Breaux et al. proposed in 2005 a different approach to the problem based on the developments and advances made by Hotho et al. [13], in which they demonstrated the positive impact of the use of ontologies for text filtering. In this case, they used *VIPAR*, an automatic hierarchical clustering system previously tested for the use of texts to obtain dendrograms [21]. The developed system used the ontology during the filtering phase of the acquisition process in order to reduce and adjust in a controlled way the matching relations between the ontology employed and the documents [2].

In order to systematically identify clusters of developmental disorders in children and to be able to represent them through ontologies, Peleg et al. proposed the Onto-clust methodology in 2009 [20]. This approach focused on combining clustering with ontological methods, using the ontology as a refinement or adjustment of the clustering results by adding labels and improving the classification found in the clusters obtained. It is a matter of providing human feedback (ontological evidence) to the output, making it a semi-supervised process where the desired large-scale classification results are known in prior knowledge.

In 2013, Ravishankar et al. worked on a new approach to extracting information from text. The development uses two different methods to reshape the information in such a way as to facilitate the retrieval of information. First of all, it pre-processes the text, then a first categorisa-

tion based on ontology-based decision trees is performed so that the document gets represented as a hierarchy of terms and concepts. Once obtained the representation, goes through a second clustering process, based on the k-means algorithm, which, being fed with a previous hierarchy, offers better classification results compared to a process without ontologies [23].

## 2.4 NATURAL LANGUAGE PROCESSING TOOLS

In the Natural Language Processing (NLP) field, we find several tools to develop the text pre-processing and make it suitable for further processing. The *Natural Language Toolkit* (NLTK) library allows the user to process texts, division, conversion, lexical treatment, as well as classification by keywords [18]. Additionally, one of the databases on which this library relies is *WordNet*, an English lexical database created by George Armitage Miller, which groups English words into sets of synsets, *a set of synonyms that share a common meaning*. The most significant property of *WordNet* is the storage of semantic relations between synsets [31].

Within the development of tools focused on NLP and treatment appears the proposal adopted by Google with its Cloud Natural Language, a product that allows the extraction of semantic text information without initial structuring based on its machine learning models. The firm offers in its catalogue both a Natural Language API, which provides previously trained models that allow the analysis and classification of entities or syntactic analysis and the AutoML Natural Language technology, which provides the training of its personalised models, characterising and optimising the

results according to the user's needs [3].

### 3 OUR APPROACH

The approach proposed in this work aims to generate ontologies dynamically with the primary goal of creating models about general knowledge to be applied later to a social robot. We intend to develop a framework based on semantic knowledge capable of generating its representation from numerous texts. Its implementation implies self-growth, as each result feeds the following iterations, thereby extending its scope.

Inspired by the meta-learning philosophy and taking advantage of current breakthroughs in artificial intelligence, the purpose is that the proposed approach is capable of *learning to learn* knowledge and hence become flexible when it comes to improving and optimising its performance iteratively [11].

Our proposal presents a semi-supervised automatic model that updates its input by filtering it with the ontologies previously generated in the preprocessing stage, based on the developments made by Hotho et al. [13]. In this way, the previously generated categories are searched, thus alleviating the processing and generation of new categorisations. The initial idea is to focus on texts from a previously known and mastered field of knowledge to check the relevance and performance of the text. The ontological filtering of the first iterations will be almost non-existent as it does not feed on ontologies manually. However, with the passage of several iterations and document classifications, the filtering will gain weight and relevance, thus optimising its performance and the ontology itself that feeds the preprocessing phase.

Figure 3 includes a block diagram describing the different steps followed by the model. The input to the system is the text documents from which the knowledge gets extracted. The first block represents the NLP pre-processing, where the text is prepared by synthesising the content and analysing it word by word. Subsequently, we find the ontological filtering, which filters and prepares hierarchically the rest of the information found in the text. Finally, we have the ontology-based clustering, which generates the relevant classifications resulting in the final ontology, which will feed the filtering in the following iterations.

#### 3.1 CHALLENGES

In order to achieve our goal, there are several challenges we have to face. Starting with ontologies,

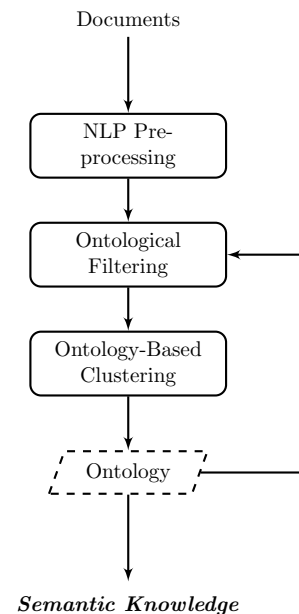


Figure 3: Dynamic Semantic Ontology Generation block diagram

today, there are many *languages* for their construction. Due to future application, this coding must be suitable for easy transferability. The ideal solution would be to stick to an already defined and widely used language, thus ensuring its robustness and facilitating the possible scalability of ontologies to other general-purpose applications.

Within NLP, we have to take into account certain adverse factors. We need a processing method that we can easily integrate into our system. Furthermore, we need to ensure optimal and robust processing of the texts. To this end, the use of the *NLP tools* discussed above is under consideration. Additionally, we should consider the language since most of the NLP tools get developed only in English.

To properly design the clustering phase of our system, we need a model that fits our needs. In order to build the ontologies, we need clustering to obtain *relevant results*, including the hierarchical relationships between the elements found. In this way, it will be possible to build an ontology faithful to the semantics.

One of the main issues encountered in applications created from a meta-learning approach is *generalisation*. Since the system is building its knowledge from the ground up and feeding it back each iteration, there may come a time when the system is compromised, and a self-suggestion appears that hinders the ability to build and identify new categorisations in its semantic structure.

This problem is nothing new for machine learning

classification applications, where once the model has a certain number of classes defined, it will value and weight the percentages of belonging to each of the classes but does not consider that one sample might not belong to any predefined class. One approach nowadays is Active Learning, where the algorithm can choose the training data from which it learns. The model can interact with the user to introduce new labels to unidentified outputs [26][27].

Within generalisation, the model training data is crucial for its task. Depending on the topic to be categorised, the texts must be strictly related to that specific topic to extract the appropriate semantic structures. However, there risk within carefully choosing the texts to be fed to the model, as it might overfit. The correct approach is to use texts related to the topic but not previously reviewed to obtain a categorisation naturally and hierarchically. Besides, throughout the learning process, the model needs some randomness.

This randomisation benefits the system in selecting the texts to feed the system and possibly in the previously mentioned ontological filtering phase. Such filtering should contain a weighting that allows generalising the relations found in its structures while not negatively biasing the pre-processing with the ontologies.

Moving on to the challenges to be faced, one of the main challenges from an engineering point of view is the high *computational cost* of training a system that increases its size with each iteration due to the integration of the feedback of new ontologies for filtering, which will exponentially increase the expenditure of resources. Fortunately, high-performance GPUs are now publicly available thanks to technological advances that can significantly alleviate the computational cost.

## 4 APPLICATION TO SOCIAL ROBOTICS

Combining low-level data with high-level knowledge in a framework would optimise the robot's decision-making process [16]. In robotic navigation, semantic navigation has been studied for some time with promising results. A mobile robot with integrated semantic knowledge offers the user a higher level of understanding and reasoning without working with position targets typically used in the past. Instead, it is possible to express the request for an object or action, at which moment the system will associate that request with the location associated with it through the semantics [5]. For example, as mentioned in the introduction, we could ask the robot for "something

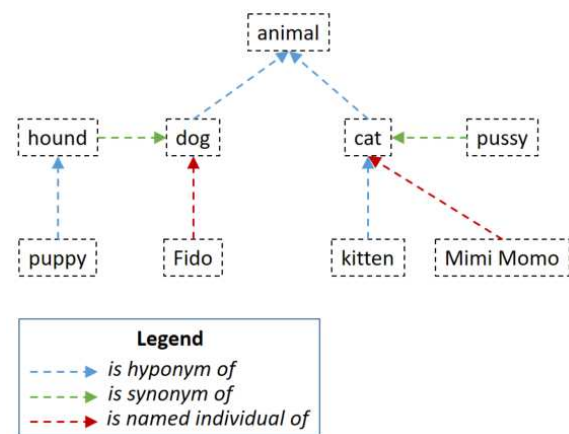


Figure 4: An animal ontology example [28]

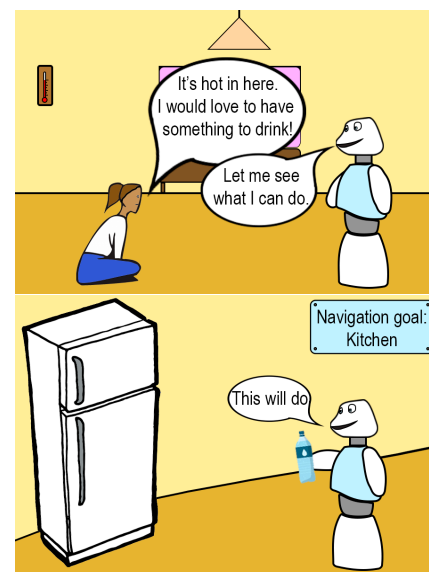


Figure 5: Semantic Navigation example

cold to drink", and the mobile robot, through semantics, would make the cold drink connection, which is in the fridge, and therefore in the kitchen, as represented in figure 5.

We intend to extrapolate it to social robotics, where HRI is the device's primary goal. Providing a new layer of reasoning through semantics would allow the system to manage high-level information more efficiently and flexibly. It is worth noting the significance of the social robot being conversational since the potential of using semantic knowledge lies in the communicative interaction with the user. For example, in a conversation with a user, the robot could use different synonyms or even expressions to refer to the same term if the user does not understand it in the first instance. Although this process can be bidirectional, the robot's oral comprehension can also be made more flexible.

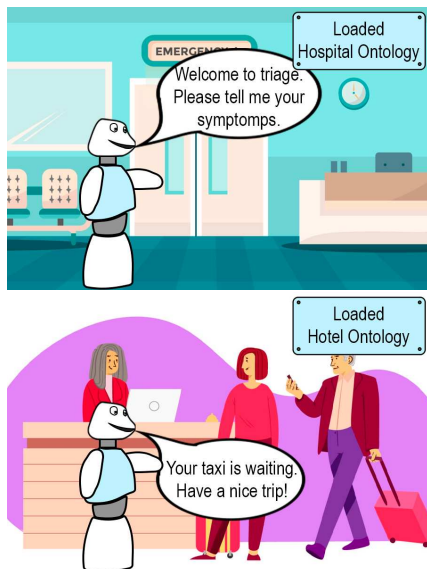


Figure 6: Environment Adaptation example

For example, following the ontology shown in figure 4, the user could use *hound*, and the robot would still understand that the user is referring to a *dog*. Using *Fido*, the robot would understand that the user is referring to a specific *dog*, an *animal*.

Using the same ontology example presented in the figure, we can refer to cognitive stimulation with people with neurodegenerative diseases. For example, the patient has to distinguish dogs and cats in a group of animal pictures. We could add new attributes for more intense stimulation to make new classifications such as the type of food (carnivores, herbivores, omnivores) or their natural habitat (seabed, savanna, desert, among others).

Additionally, with semantic knowledge, distinctions could be made in the grammar used depending on the robot's environment. For example, if we were in a hospital, we could load a specific ontology about medicine and assistance to the robot. On the other hand, if we were in a hotel, we could load the ontology specific to the hotel, including information about reservations, rooms or tourist information about the city, as shown in figure 6.

Based on and inspired by these advantages, we intend to frame this approach in our research group, focusing on the research and development of social robots. The extrapolation and incorporation of semantic knowledge in social robots, such as Mini, shown in Figure 7, can be a substantial step forward in terms of smooth and natural HRI [25].



Figure 7: The robot Mini during an interaction with an elderly person [25]

## 5 CONCLUSIONS

Following our line of research, this paper presents the first ideas of a new dynamic approach to semantic knowledge generation through ontology clustering and NLP. With the focus on applying semantic knowledge generated with social robots, as previously mentioned. The proposed methodology offers a semi-supervised model capable of feeding back the previously generated knowledge, thus dynamically building ontologies that can capture the conceptualisation of our environment.

We intend to develop the described model and generate general-purpose ontologies from the literature on different topics in future work. Hence, we may obtain specific ontologies for different topics, applications and environments. Therefore, the robot could selectively use the generated semantic knowledge.

## Acknowledgement

This work was supported by project Robots sociales para estimulación física, cognitiva y afectiva de mayores (ROSES) RTI2018-096338-B-I00 funded by Agencia Estatal de Investigación (AEI), Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

## References

- [1] K. D. Bailey, "Cluster Analysis," *Sociological Methodology*, vol. 6, pp. 59–128, 1975. (visited on 06/05/2021).
- [2] T. D. Breaux and J. W. Reed, "Using Ontology in Hierarchical Information Clustering,"

- en, *th Hawaii International Conference on System Sciences*, p. 7, 2005.
- [3] *Cloud Natural Language | Cloud Natural Language*, es. [Online]. Available: <https://cloud.google.com/natural-language> (visited on 04/26/2021).
  - [4] J. Crespo, R. Barber, and O. M. Mozos, "Relational Model for Robotic Semantic Navigation in Indoor Environments," en, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 86, no. 3-4, pp. 617–639, Jun. 2017. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s10846-017-0469-x> (visited on 06/21/2021).
  - [5] J. Crespo, J. C. Castillo, O. M. Mozos, and R. Barber, "Semantic Information for Robot Navigation: A Survey," en, *Applied Sciences*, vol. 10, no. 2, p. 497, Jan. 2020, Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (visited on 02/15/2021).
  - [6] D. Gayo-Avello, D. Álvarez Gutiérrez, A. Cernuda-del Río, J. Gayo-Avello, L. Vinuesa-Martínez, and N. García-Fernández, "The Cooperative Web: A Step towards Web Intelligence," in *Web Engineering*, G. Goos, J. Hartmanis, J. van Leeuwen, J. M. C. Lovelle, B. M. G. Rodríguez, J. E. L. Gayo, M. del Puerto Paule Ruiz, and L. J. Aguilar, Eds., vol. 2722, Series Title: Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003, pp. 441–444. (visited on 06/21/2021).
  - [7] T. R. Gruber, "A translation approach to portable ontology specifications," en, *Knowledge Acquisition*, vol. 5, no. 2, pp. 199–220, Jun. 1993. (visited on 06/02/2021).
  - [8] —, "Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing?" en, *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 43, no. 5, pp. 907–928, Nov. 1995. (visited on 06/21/2021).
  - [9] N. Guarino, D. Oberle, and S. Staab, "What Is an Ontology?" en, in *Handbook on Ontologies*, S. Staab and R. Studer, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 1–17. (visited on 05/27/2021).
  - [10] P. Gärdenfors, "Semantic Knowledge, Domains of Meaning and Conceptual Spaces," en, in *Knowledge and Action*, ser. Knowledge and Space, P. Meusburger, B. Werlen, and L. Suarsana, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 203–219. (visited on 06/17/2021).
  - [11] T. Hospedales, A. Antoniou, P. Micaelli, and A. Storkey, "Meta-Learning in Neural Networks: A Survey," *arXiv:2004.05439 [cs, stat]*, Nov. 2020, arXiv: 2004.05439. (visited on 06/05/2021).
  - [12] A. Hotho, A. Maedche, and S. Staab, "Ontology-based Text Document Clustering," en, p. 13, 2002.
  - [13] A. Hotho, S. Staab, and G. Stumme, "Ontologies Improve Text Document Clustering," Oct. 2003.
  - [14] A. K. Jain, M. N. Murty, and P. J. Flynn, "Data clustering: A review," *ACM Computing Surveys*, vol. 31, no. 3, pp. 264–323, Sep. 1999. (visited on 06/02/2021).
  - [15] M. Kaufmann and J. F. Sowa, *Principles of Semantic Networks - 1st Edition*, 1991. (visited on 06/02/2021).
  - [16] G. H. Lim, I. H. Suh, and H. Suh, "Ontology-Based Unified Robot Knowledge for Service Robots in Indoor Environments," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 41, no. 3, pp. 492–509, May 2011, Conference Name: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans.
  - [17] A. Maedche and S. Staab, "Ontology learning for the Semantic Web," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 72–79, Mar.



- 2001, Conference Name: IEEE Intelligent Systems.
- [18] *Natural Language Toolkit - NLTK 3.6.2 documentation*. [Online]. Available: <https://www.nltk.org> (visited on 04/26/2021).
- [19] N. F. Noy, "Semantic integration: A survey of ontology-based approaches," en, *ACM SIGMOD Record*, vol. 33, no. 4, pp. 65–70, Dec. 2004. (visited on 05/27/2021).
- [20] M. Peleg, N. Asbeh, T. Kuflik, and M. Schertz, "Onto-clust - A methodology for combining clustering analysis and ontological methods for identifying groups of comorbidities for developmental disorders," en, *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 42, no. 1, pp. 165–175, Feb. 2009. (visited on 04/19/2021).
- [21] T. E. Potok, "VIPAR: Advanced Information Agents discovering knowledge in an open and changing environment," en, p. 7,
- [22] P. Priya and R. Rajalaxmi, "Ontology based semantic query suggestion for movie search," en, *undefined*, 2013. (visited on 06/21/2021).
- [23] N. Ravishankar and S. Raghunathan, *Ontology based clustering algorithm for information retrieval*. Jul. 2013, Journal Abbreviation: 2013 4th International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies, ICCCNT 2013 Pages: 4 Publication Title: 2013 4th International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies, ICCCNT 2013.
- [24] L. Rokach and O. Maimon, "Clustering Methods," en, in *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*, O. Maimon and L. Rokach, Eds., Boston, MA: Springer US, 2005, pp. 321–352. (visited on 06/01/2021).
- [25] M. A. Salichs, A. Castro, E. Salichs, E. Fernandez, M. Maroto, J. J. Gamboa, S. Marques, J. C. Castillo, F. Alonso, and M. Malfaz, "Mini: A New Social Robot for the Elderly," en, *International Journal of Social Robotics*, vol. 12, no. 6, pp. 1231–1249, Dec. 2020. (visited on 06/10/2021).
- [26] B. Settles, "Active Learning Literature Survey," en, University of Wisconsin-Madison Department of Computer Sciences, Technical Report, 2009, Accepted: 2012-03-15T17:23:56Z. (visited on 06/06/2021).
- [27] —, "Active Learning," *Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning*, vol. 6, no. 1, pp. 1–114, Jun. 2012, Publisher: Morgan & Claypool Publishers. (visited on 06/06/2021).
- [28] P. Tiwari, *ONTOLOGY*, en, Dec. 2019. [Online]. Available: <https://medium.com/@prince.alobha/ontology-4924049bc21c> (visited on 06/22/2021).
- [29] M. Waibel, M. Beetz, J. Civera, R. D'Andrea, J. Elfring, D. Gálvez-López, K. Häussermann, R. Janssen, J. Montiel, A. Perzylo, B. Schießle, M. Tenorth, O. Zweigle, and R. V. De Molengraft, "RoboEarth," *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 18, no. 2, pp. 69–82, Jun. 2011, Conference Name: IEEE Robotics Automation Magazine.
- [30] C. Welty, "Ontology Research," en, *AI Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 11–11, Sep. 2003, Number: 3. (visited on 06/02/2021).
- [31] *WordNet | A Lexical Database for English*. [Online]. Available: <https://wordnet.princeton.edu> (visited on 04/19/2021).



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# COMUNICACIÓN REMOTA ENTRE FAMILIARES A TRAVÉS DE LA ROBÓTICA SOCIAL

Sara Carrasco-Martínez, M. A. Quispe-Flores, Javier Sevilla-Salcedo, Jaime Gómez-Jiménez,  
Fernando Alonso-Martín, Miguel A. Salichs

RoboticsLab, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,  
Universidad Carlos III de Madrid

{sacarras, mquispe, jasevill}@pa.uc3m.es, 100383149@alumnos.uc3m.es, {famartin, salichs}@ing.uc3m.es

## Resumen

*En la actualidad una gran parte de las personas de avanzada edad no hacen uso frecuente de las Nuevas Tecnologías de la Información. En este trabajo tratamos de eliminar la fricción que tienen este tipo de personas para comunicarse con sus seres queridos de manera natural a través de los medios tecnológicos. Proponemos una aplicación de comunicación accesible e intuitiva implementada con el robot social Mini. Desarrollamos una interfaz gráfica que permite a los usuarios mantener conversaciones, llamadas y videollamadas mediante una aplicación sencilla y de forma guiada a través del robot Mini. Se utiliza como plataforma de comunicación WhatsApp, una de las aplicaciones más utilizadas, a día de hoy, en el mercado de los dispositivos inteligentes. Se pretende contribuir al cuidado y bienestar de la tercera edad.*

**Palabras clave:** Robótica social; Interacción humano-robot; Comunicación a través de la robótica social; Inclusión digital; Redes sociales inclusivas.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la sociedad actual está ocurriendo una brecha digital producida por el constante avance de las Nuevas Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) frente al creciente envejecimiento de la población [5]. Según los datos ofrecidos por el Instituto Nacional de Estadística [7], como se puede apreciar en la gráfica representada en la Fig. 1, al aumentar la edad descende el uso de los dispositivos inteligentes e Internet produciendo un aislamiento tecnológico de este colectivo.

Según un estudio realizado [9] la utilización de las TIC en las personas de avanzada edad proporciona mayor conexión con la actualidad, fomenta su inclusión social y enriquecimiento personal mejorando su calidad de vida y desarrollando sus habilidades sociales. Este colectivo no hace un uso frecuente de las tecnologías actuales debido a los problemas relacionados con la accesibilidad, uso y adopción. En los últimos años, se ha incrementado el desarrollo de dispositivos accesibles e intuitivos

con el objetivo de fomentar la *e-inclusión* en las personas de la tercera edad, concepto entendido como la capacidad de acceder de forma habitual y sencilla a diferentes programas y realizar aprovechamiento de sus utilidades teniendo en cuenta las necesidades específicas de cada usuario [2].

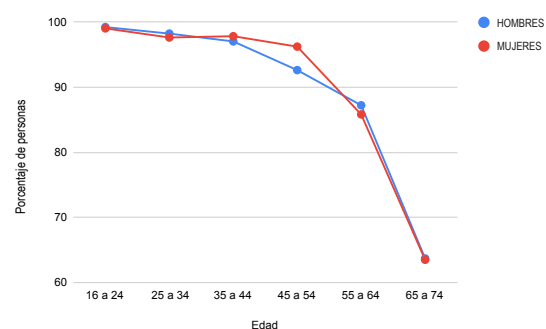


Figura 1: Datos del Instituto Nacional de Estadística sobre el uso de Internet en el cuarto trimestre del año 2019 en España [7].

En el presente artículo se describe el desarrollo de una funcionalidad destinada al robot social Mini que ofrecerá una aplicación accesible con el fin de ayudar a las personas mayores a ser más independientes y fortalecer sus habilidades con las nuevas tecnologías. Se pretende ofrecer al usuario una aplicación de alta funcionalidad que permita su uso de manera sencilla. Tras investigar que uno de los principales atractivos de las personas mayores en el uso de los dispositivos es la capacidad de comunicarse con sus seres queridos [1] (ver Fig. 2), se decide implementar una interfaz sencilla que facilite las comunicaciones con sus familiares de manera natural utilizando como plataforma WhatsApp, una de las aplicaciones más usadas en el mercado de los dispositivos [17]. El desarrollo de esta aplicación junto al robot social Mini proporciona que las personas de avanzada edad se encuentren incluidas en la sociedad actual y tengan la posibilidad de establecer lazos sociales y emocionales con sus seres queridos.

El artículo se estructura de la siguiente manera. En la Sección 2 se realiza una revisión del estado del arte donde se exponen los trabajos rela-

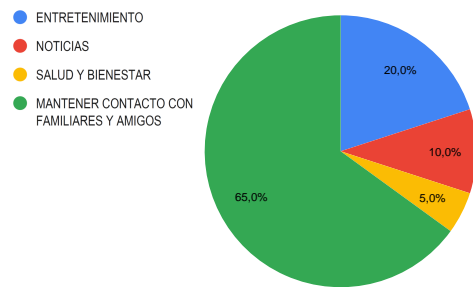


Figura 2: Estudio realizado a personas de avanzada edad sobre la utilidad de las aplicaciones móviles [1].

cionados con este artículo. Posteriormente, en la Sección 3 se expone la plataforma donde se implementa el trabajo desarrollado. A continuación, en la Sección 4 se describe nuestra propuesta, la Sección 5 recoge los resultados obtenidos a partir de las opiniones de los usuarios y para finalizar, se realiza una conclusión final en la Sección 6.

## 2. ESTADO DEL ARTE

Las familias en las sociedades modernas están separadas en espacio y tiempo. Actualmente, los familiares jóvenes viven en un mundo conectado mediante los dispositivos tecnológicos y las redes sociales. Sin embargo, los miembros mayores poseen menor inclusión social lo que conduce a un aumento de aislamiento y depresión, poniendo en riesgo su integridad física y mental [16]. Una inclusión participativa en las nuevas tecnologías puede mejorar la calidad de vida de estas personas. Para paliar esta situación, existen diversas soluciones tecnológicas, tales como robots sociales o aplicaciones accesibles.

### 2.1. APLICACIONES ACCESIBLES

La industria tecnológica está empezando a incluir entre sus productos y servicios una oferta adaptada a los perfiles de las personas de avanzada edad permitiendo su fácil asimilación, uso y aplicación. Actualmente, aparte de la funcionalidad de accesibilidad que poseen los teléfonos inteligentes y las tabletas digitales desde su fabricación, existe una creciente oferta de aplicaciones que simplifican el uso de los dispositivos haciéndolos más accesibles y sencillos mediante la disminución de funciones y la aparición de iconos y letras de mayor tamaño [18]. Estas aplicaciones se pueden clasificar en relación al tema al que se dedican:

- **Relacionadas con la salud:** se centran en dar diferentes servicios relacionados con la salud como pueden ser: AlzNav (aplicación

que indica el camino a casa), Glucose Buddy<sup>1</sup> (registra los datos relacionados con la glucosa), Yana (asistente psicológica, realiza diversas pautas para la disminución de ansiedad o estrés) o MediSafe (gestiona los medicamentos), entre otras [14].

- **Relacionadas con el ocio:** proporcionan una variedad de actividades o juegos. Como puede ser: Luminosity (plataforma multijuegos) o MemoryTrainer (actividades para la mente) [1].
- **Relacionadas con la accesibilidad:** se encargan de establecer un tema de dispositivo más sencillo (Wiser O BigLauncher<sup>2</sup>) o recondicionan los dispositivos para personas con problemas auditivos (Booster) o visuales (DragonDicatacion) [1].

### 2.2. ROBOTS SOCIALES

La robótica social está introduciéndose a un ritmo moderado en la sociedad permitiendo la Interacción Humano-Robot (HRI) a mayor escala [11]. Está diseñada para interactuar con las personas de manera natural e interpersonal logrando resultados positivos en ámbitos de entretenimiento, ocio o educación. En términos básicos, se puede definir como: “*el robot que interactúa y se comunica con las personas (de forma sencilla y agradable) siguiendo comportamientos, patrones y normas sociales*” [11]. Para ello, se dotan de capacidades similares a las que utilizan las personas para poder relacionarse utilizando una amplia gama de habilidades cognitivas [4]. De esta manera, pueden conseguir captar la atención de las personas y ser percibidos como “compañeros” que emplean el habla y acciones no verbales para expresar una idea y conseguir que el receptor interactúe de manera amigable.

En la actualidad, existen gran variedad de robots asistenciales que apoyan a las personas mayores a realizar sus actividades básicas diarias. Brindan actividades de atención como ayudar a recordar la medicación, de entretenimiento, de seguridad y de compañía. Además, algunos incorporan plataformas de comunicación propias que permiten al usuario contactar con sus seres queridos. Por último, tienen el objetivo de mejorar la calidad de vida de las personas mayores monitorizando su deterioro físico y cognitivo. Como pueden ser: MoveCare [3], Care-O-Bot<sup>3</sup> o Mylo<sup>4</sup>.

<sup>1</sup><https://www.glucosebuddy.com/>

<sup>2</sup><https://biglauncher.com/>

<sup>3</sup><https://www.care-o-bot.de>

<sup>4</sup><https://www.heymylo.ie/>

### 2.3. APLICACIÓN WHATSAPP

Actualmente, WhatsApp es la aplicación de mensajería instantánea más utilizada en el mundo, posee 2000 millones de usuarios [17]. Proporciona, sin ningún coste, enviar o recibir mensajes y realizar videollamadas o llamadas entre sus usuarios. A lo largo de su historia se han desarrollado diferentes aplicaciones basadas en su interfaz [10], como pueden ser: WhatsApp Tally<sup>5</sup> o KyteApp<sup>6</sup> (envían facturas, tickets o promociones de las empresas a clientes) o TwiLio<sup>7</sup> (permite realizar chats programados para responder a preguntas de clientes).

## 3. DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA

La aplicación se ha implementado en el robot social Mini (ver Fig. 3), proyecto desarrollado por el departamento de robots sociales de la Universidad Carlos III de Madrid cuyo propósito principal es ayudar y entretener a las personas de avanzada edad [13].



Figura 3: Robot social Mini [8].

Se trata de un robot de sobremesa amigable que cuenta con una serie de componentes que facilitan la interacción humano-robot. Posee una tableta digital donde muestra el contenido multimedia al usuario. Se encuentra recubierto de un material suave para establecer un aspecto amigable. Puede moverse y realizar gestos expresivos gracias a sus cinco grados de libertad proporcionados por los servomotores ubicados en sus articulaciones. Está equipado con un micrófono y varios altavoces que establecen la comunicación mediante la voz e incluye sensores táctiles en los hombros y vientre que permiten la interacción física por parte del usuario. Para extraer información visual y de profundidad del entorno cuenta con una serie de cámaras. Además, para representar emociones

y rasgos incorpora LEDS en la boca, mejillas y corazón. Por último, en los ojos contiene pantallas uOLED que muestran GIF, permitiendo al robot mirar en diferentes direcciones y cambiar de expresión para transmitir diversos estados de ánimo [12]. Todo este hardware dota a Mini de la capacidad de interacción multimodal para establecer la comunicación de forma natural con el usuario. Su estructura software se compone de diferentes sistemas representados en la Fig. 4.

- **Sistema de toma de decisión (DMS):** encargado de ejecutar y controlar cada aplicación. Selecciona la más adecuada dependiendo del usuario [8].
- **Sistema de interacción robot - usuario (HRI):** administra los mensajes procedentes del DMS y de las aplicaciones para enviar la información necesaria a los paquetes que intervienen en la interacción con el usuario mediante la generación de audio (TTS) y reconocimiento de voz (ASR)[6].
- **Servidor de parámetros:** obtiene la información del usuario de un servidor remoto.
- **Aplicaciones:** diferentes habilidades que dotan al robot de la posibilidad de ofrecer ocio, entretenimiento [15], terapias o contenido multimedia.

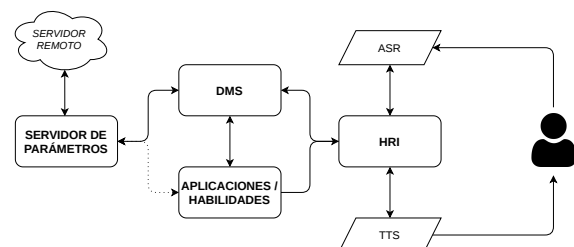


Figura 4: Diagrama de la estructura software robot Mini.

## 4. NUESTRA PROPUESTA

El presente artículo elimina la fricción que poseen las personas mayores a la hora de utilizar las redes sociales para comunicarse con sus seres queridos. Brinda la oportunidad de emplear WhatsApp de manera sencilla e intuitiva con el robot social Mini manteniendo una comunicación natural. Corresponde con una serie de módulos que permiten la conexión con la plataforma para conseguir el uso más frecuente de esta tecnología.

Además con esta aplicación, se pretende iniciar una nueva línea de desarrollo (Android-ROS<sup>8</sup>) pa-

<sup>5</sup><https://tally2whatsapp.in>

<sup>6</sup><https://www.kyteapp.com>

<sup>7</sup><https://www.twilio.com/whatsapp>

<sup>8</sup><http://wiki.ros.org/android>

ra el robot social Mini que permita una mejora en las interfaces con el usuario prestando distintos servicios. De esta manera, se busca desarrollar diversas aplicaciones más accesibles e intuitivas ofreciendo al usuario una aplicación más dinámica guiada por el robot social Mini. Por tanto, se brinda la ventaja de utilizar el robot Mini como un robot social de servicios frente a las aplicaciones convencionales que se encuentran en los dispositivos móviles.

#### 4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

En esta sección se define el marco de desarrollo software utilizado. El programa se desarrolla bajo el subproyecto `android.tutorial.pubsub` procedente del proyecto *android-core*, oficial de Android-ROS. Este repositorio proporciona las librerías y bibliotecas necesarias para realizar las conexiones bidireccionales entre el robot y la aplicación.

La aplicación se estructura a partir de dos módulos: Módulo de Android y Módulo de ROS (Robot Operating System). La comunicación entre ambos se efectúa mediante el paso de mensajes que permite realizar suscripciones y publicaciones a diferentes topics desde los nodos creados, esto proporciona la conexión con los módulos del robot. La plataforma de Android ofrece el desarrollo de la interfaz gráfica de la aplicación para proporcionar al usuario la conexión con WhatsApp de manera sencilla e intuitiva.

En líneas paralelas al hilo principal, se encuentran los servicios, activos durante todo el ciclo de ejecución. Los implementados en la aplicación sirven para: recoger información fuera del entorno de la aplicación, crear un sistema de comunicación con ROS durante todo el ciclo de ejecución y acceder a la aplicación WhatsApp con la accesibilidad que aporta Android en sus dispositivos.

#### 4.2. REQUISITOS PREVIOS

Es necesario realizar una configuración previa en la tableta digital que posee Mini. Para que la aplicación desarrollada funcione de manera correcta y obtenga todas las funcionalidades.

Es imprescindible la presencia de la aplicación en el dispositivo Android. No disponer de ella impedirá el uso de la aplicación desarrollada. Asimismo, se requiere una cuenta con un número de teléfono no utilizado en otro dispositivo, debido a que WhatsApp no permite el registro de un mismo número en diferentes dispositivos electrónicos.

Asimismo, es necesario establecer los permisos de acceso a los contactos del dispositivo para poder

realizar llamadas y videollamadas. De igual manera, hay que otorgar el permiso de acceso de las notificaciones para la posterior lectura de los mensajes entrantes. Por último, se debe permitir el servicio de accesibilidad proporcionado por Android para poder enviar los mensajes automáticamente (ver Sección 4.4).

#### 4.3. DISEÑO DE LA INTERFAZ DEL USUARIO

La aplicación, como se ha comentado en la sección 4.1, está formada por diversos módulos que permiten tanto la conexión con el robot como con la aplicación de WhatsApp. Brinda la capacidad de recibir y contestar a los mensajes entrantes, realizar llamadas o videollamadas y enviar mensajes. La interfaz ofrece al usuario tres tipos de pantalla intuitivas y accesibles.

La pantalla principal (ver Fig. 5) consta de cuatro botones cuyo objetivo es redirigir al usuario a la actividad deseada. Cada botón se diseña con un color que contiene el nombre e icono representativo de cada actividad. El funcionamiento del menú se detalla en la Sección 4.4.

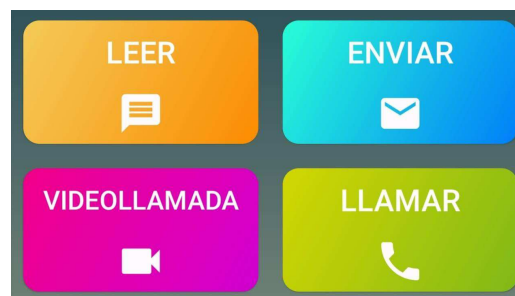


Figura 5: Diseño gráfico de la pantalla principal.

La pantalla de contactos (ver Fig. 6) recoge una matriz 3x2 donde cada posición corresponde a un contacto. A lo largo de la realización del proyecto se han llevado a cabo varias encuestas a personas de avanzada edad para determinar un número aproximado de contactos favoritos. Asimismo, se ha observado que la aparición en pantalla de muchos contactos en vista de lista es peor que una selección de varios contactos agrupados en una matriz. Además, para proporcionar al usuario una visión intuitiva de sus contactos favoritos a cada botón se le establece un color. Esta pantalla aparece cuando el usuario decide realizar una videollamada, llamada o enviar mensajes, su funcionamiento se detalla en la Sección 4.4.

Muchas de las personas mayores sienten dificultad a la hora de leer texto en las pantallas de los dispositivos electrónicos. Por ello, la pantalla de lectura de mensajes (ver Fig. 8) representa los mensajes





Figura 6: Diseño gráfico del fragmento contactos.

entrantes de manera separada en una lista con un tamaño de letra mayor y sin entrar directamente a la pantalla principal de la conversación de WhatsApp. Asimismo, si el usuario lo desea el robot puede efectuar la lectura en alto de los mensajes entrantes. El funcionamiento de esta pantalla se detalla en la siguiente Sección.

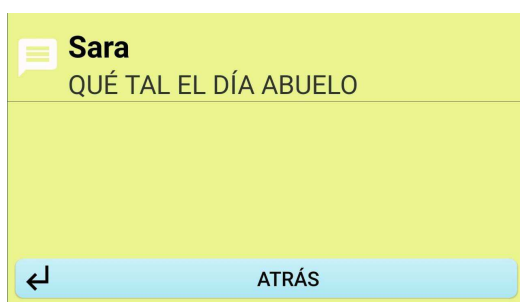


Figura 7: Diseño gráfico del fragmento leer.

#### 4.4. FUNCIONALIDAD

La funcionalidad de la aplicación desarrollada se divide en distintas partes que necesitan de su interrelación para el correcto funcionamiento.



Figura 8: Esquema de los principales módulos de la aplicación y sus relaciones.

■ **Módulo de comunicación:** se realiza a través de ROS, permite la comunicación bidireccional entre el robot y la aplicación. Es el encargado de conectarse a los diferentes módulos del robot, comentados en el Capítulo 3. Está relacionado con el módulo de interacción con el usuario, permite al robot controlar las acciones de la aplicación según la necesidad determinada. Por tanto, facilita al usuario el uso de la aplicación realizando la mínima interacción con la pantalla de la tableta digital.

■ **Funcionalidad de interacción:** por un lado, se encarga de recoger la participación del usuario tanto por voz o por toques de pantalla. Se utiliza el ASR del robot para brindar mayor accesibilidad al usuario, esta interacción se denomina humano-robot. Por otro lado, se presenta la interacción robot-humano donde el robot es capaz de guiar mediante el ETTS al usuario dependiendo de la actividad.

■ **Módulo de permisos:** con el objetivo de cumplir las leyes de Protección de Datos y facilitar la configuración de la aplicación. En el primer uso cuenta con un módulo de permisos donde aparecen diferentes ventanas emergentes que permiten al usuario activarlos de manera sencilla y con una breve explicación.

■ **Funcionalidad de leer mensajes:** se encuentra ligado con la pantalla de la Fig. 8. En primer lugar, mediante una ventana emergente permite al usuario decidir si desea la lectura del mensaje en voz alta. Este fragmento está compuesto de una lista que ofrece una visión simplificada de los mensajes entrantes del WhatsApp. Para ello, es necesario suscribirse a las notificaciones mediante un servicio de acceso. Una vez leídos los mensajes, se proporciona al usuario la oportunidad de contestarlos mediante la transcripción de voz a texto, ver Funcionalidad de enviar mensajes. Es importante mencionar que la entrada de mensajes se realiza de todos los contactos para sacar máxima rentabilidad de manera sencilla a la presente aplicación.

■ **Funcionalidad de enviar mensajes:** la pantalla correspondiente a este módulo es la representada en la Fig. 6. Permite escribir mensajes a los contactos favoritos mediante la transcripción de voz a texto. Una vez recogido el mensaje lo envía de manera automática a la conversación correspondiente.

■ **Funcionalidad de realizar llamadas y videollamadas:** ambos módulos contienen el



mismo funcionamiento excepto la petición final donde se decide si se realiza una llamada o videollamada. Están ligados a la Fig. 6 donde permite al usuario escoger el contacto, posteriormente se busca el contacto en la agenda del dispositivo y se realiza la acción correspondiente.

- **Funcionalidad salir:** permite al usuario finalizar la aplicación. Para ello, debe encontrarse en el menú principal e indicar mediante voz al robot que desea salir de la aplicación.

## 5. RESULTADOS

Para verificar el uso de la aplicación se proporciona la aplicación desarrollada a un grupo de residentes de la residencia Virgen de la Nueva. Los usuarios indican que a pesar de poseer un teléfono inteligente no utilizan de manera habitual WhatsApp debido a su dificultad a la hora de buscar a los contactos, de escribir por el teclado y/o de leer los mensajes entrantes. Además, muestran su agradecimiento debido al acercamiento de las Nuevas Tecnologías e indican que la experiencia ha sido agradable al ser ellos mismos los que manejan la aplicación, con ayuda del robot, para poder conectarse con sus familiares de manera autónoma (ver Fig. 9).

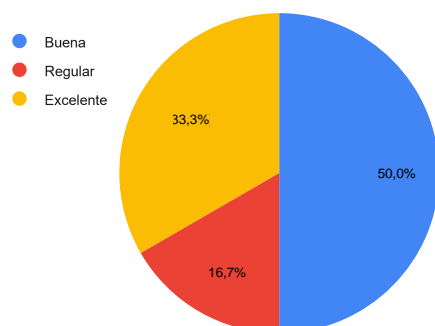


Figura 9: Experiencia de los usuarios encuestados a la hora de utilizar el robot social Mini con la aplicación desarrollada.

## 6. CONCLUSIONES

Este artículo se enfoca en el desarrollo de aplicaciones con alta funcionalidad que permitan a las personas de edad avanzada reforzar el uso de las TIC. En concreto, acerca las redes sociales a este colectivo. Gracias al robot social Mini se consigue eliminar las fricciones que sufren estas personas a la hora de utilizar los dispositivos electrónicos. El robot social Mini en este desarrollo utiliza sus habilidades de interacción humano-robot para guiar

al usuario y utilizar la plataforma WhatsApp de manera sencilla y natural. Se proporciona al usuario la capacidad de interactuar de dos maneras diferentes, mediante la tableta digital o por voz, para facilitar el uso de la aplicación.

Teniendo en cuenta la satisfacción de los usuarios de la residencia Virgen de la Nueva se puede concluir que se ha conseguido un desarrollo software adecuado y accesible para personas mayores. Es importante mencionar que los usuarios se han sentido agradecidos por la facilidad que brinda el robot social Mini para incluirlos en las Nuevas Tecnologías de la Información proporcionándoles la capacidad de comunicarse con sus seres queridos de manera autónoma sin necesidad de terceras personas. Además, han contemplado a esta plataforma como un “compañero/amigo” que ofrece diversas actividades, como pueden ser: contenido multimedia o sesiones de tratamiento específicas.

Asimismo, esta aplicación se propone como base para futuros desarrollos en el robot Mini, debido a su capacidad de diseño que permite la creación de aplicaciones de alta funcionalidad con estilo sencillo e intuitivo para reforzar el uso de las TIC en las personas de avanzada edad.

### Agradecimientos

La investigación desarrollada ha recibido financiación de dos proyectos: “Development of social robots to help seniors with cognitive impairment” (ROBSEN), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad; y “RoboCity2030-IIICM”, financiado por la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea.

### English summary

## REMOTE COMMUNICATION BETWEEN FAMILY MEMBERS THROUGH SOCIAL ROBOTICS

### Abstract

*Nowadays, a large number of senior people do not make frequent use of new information technologies. In this work, we try to eliminate the friction that they have to communicate with their family and friends naturally through technological means. We propose an accessible and intuitive communication application implemented with the Mini social robot. We developed a graphical interface that allows users to have conversations, calls, and video calls through a*

*simple interface via Mini robot. The communication platform used is WhatsApp, one of the most widely used applications on the smart device market today. The aim is to contribute to the care and well-being of the elderly.'*

**Keywords:** Social robotics; Human-robot interaction; Communication through social robotics; Digital inclusion; Inclusive social networks.

## Referencias

- [1] L. Abad, «Media literacy for older people facing the digital divide: The e-inclusion programmes design,» *Revista científica iberoamericana de comunicación y educación*, vol. 21, n.º 42, pp. 173-180, 2014.
- [2] L. Abad y A. P. Agregado, «La alfabetización digital como instrumento de e-inclusión de las personas mayores,» *Prisma Social*, vol. 16, pp. 156-204, junio-noviembre 2016.
- [3] N. Alberto Borghese y C. Galán de Isla, «Cuidador virtual inteligente MoveCare — Paraninfo Digital,» vol. XIII, n.º 30, 2019.
- [4] C. Breazeal, K. Dautenhahn y T. Kanda, «Social robotics,» en *Springer Handbook of Robotics*, Springer International Publishing, 2016, pp. 1935-1971.
- [5] R. Casado-Muñoz, F. Lezcano y M. J. Rodríguez-Conde, «Active ageing and access to technology: An evolving empirical study,» *Revista Científica de Educomunicación*, vol. XXIII, n.º 45, pp. 37-46, 2015.
- [6] E. Fernández-Rodicio, Á. Castro-González, F. Alonso-Martín, M. Maroto-Gómez y M. Salichs, «Modelling multimodal dialogues for social robots using communicative acts,» *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, n.º 12, pp. 1-30, 2020.
- [7] Instituto Nacional de Estadística, *Instituto Nacional de Estadística. Productos y Servicios*, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2ZffBBk> (Acceso: 15-06-2021).
- [8] M. Maroto-Gómez, Á. Castro-González, J. C. Castillo, M. Malfaz y M. A. Salichs, «A bio-inspired motivational decision making system for social robots based on the perception of the user,» *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, n.º 8, 2018.
- [9] X. Martínez-Rolán y T. Piñero-Otero, «Tipología y funcionalidades de las aplicaciones móviles para mayores. A un tap del envejecimiento activo,» *Ámbitos. Revista Internacional de Comunicación*, vol. 0, n.º 29, 2015.
- [10] P. Mehta y R. Sandhu, «Whatsapp Web Reverse Engineering,» pp. 1-41, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://172.16.73.104:8080/jspui/handle/123456789/22743>.
- [11] A. J. Pérez Vidal, Castro-González, F. Alonso Martín, J. C. Castillo y M. Salichs, «Evolución de la robótica social y nuevas tendencias,» en *Actas de las XXXVIII Jornadas de Automática, Gijón*, 2017, pp. 836-843. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497749.0836>.
- [12] E. Salichs, E. Fernández-Rodicio, J. C. Castillo, Á. Castro-González, M. Malfaz y M. A. Salichs, «A social robot assisting in cognitive stimulation therapy,» en *Advances in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Complexity: The PAAMS Collection. PAAMS 2018. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10978, Springer, Cham, 2018, pp. 344-347. [En línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94580-4\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94580-4_35).
- [13] M. A. Salichs, Á. Castro-González, E. Salichs, E. Fernández-Rodicio, M. Maroto-Gómez, J. J. Gamboa-Montero, S. Marques-Villarroya, J. C. Castillo, F. Alonso-Martín y M. Malfaz, «Mini: A New Social Robot for the Elderly,» *International Journal of Social Robotics*, vol. 12, n.º 6, pp. 1231-1249, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12369-020-00687-0>.
- [14] M. Sánchez López, J. Fernández Alemán, A. Toval y J. Carrillo De Gea, «Teléfonos inteligentes para Smart Phones for the elderly: la tercera edad: una revisión de a review of mobile aplicaciones móviles de salud health applications,» *Rev Costarr Salud Pública*, vol. 24, pp. 30-42, 2014.
- [15] E. Velázquez Navarro, S. González-Díaz, F. Alonso-Martín, J. Castillo, Castro-González, M. Malfaz y M. Salichs, «El robot social Mini como plataforma para el desarrollo de juegos de interacción multimodales,» jun. de 2019.
- [16] J. Waterworth, «Diseño de Sistemas y Herramientas TIC Orientados a las Necesidades Psicológicas y Sociales de las Personas Mayores que Viven de Forma Independiente,» *RevistaeSalud.com*, vol. 7, n.º 26, pp. 43-9, 2011.

- [17] WhatsApp, *Acerca de WhatsApp*, 2020. [En línea]. Disponible en: [https : / / www . whatsapp . com / about/](https://www.whatsapp.com/about/) (Acceso: 19-06-2021).
- [18] L. A. Álvarez Álvarez, «Mayores en la era internet. Nuevos sistemas y aplicaciones prácticas,» *XVIII Jornadas sobre Asociacionismo en los Programas Universitarios de Mayores*, 2019.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# APLICACIÓN ACCESIBLE DE REPRODUCCIÓN DE MÚSICA VÍA STREAMING PARA ROBOT SOCIAL

M. A. Quispe-Flores, Sara Carrasco-Martínez, Javier Sevilla-Salcedo, Jaime Gómez-Jiménez  
Fernando Alonso-Martín, Miguel A. Salichs

RoboticsLab, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,  
Universidad Carlos III de Madrid

{mquispe, sacarras, jasevill}@pa.uc3m.es, 100383149@alumnos.uc3m.es, {famartin, salichs}@ing.uc3m.es

## Resumen

*La robótica social continúa adaptándose a los cambios que se están produciendo en el mundo y la sociedad a día de hoy. La aparición del COVID-19 ha supuesto un escenario de distanciamiento social que ha afectado en gran medida a poblaciones de riesgo como el de las personas mayores.*

*No obstante, las diversas intervenciones por parte de la robótica social, han demostrado su capacidad de combatir una pandemia, ofreciendo servicios en hospitales, hogares de ancianos y brindando compañía a personas mayores que viven solas. Dando como resultado la idea de impulsar el valor del robot social como plataforma de servicios.*

*Por este motivo, el presente trabajo propone el diseño e implementación de una aplicación de reproducción de música y podcasts enfocada en los gustos de las personas mayores. Nuestro desarrollo busca promover la accesibilidad y el uso de servicios de streaming de contenido multimedia en personas de edad avanzada. En paralelo, la aplicación desarrollada apunta a la creación de nuevas aplicaciones Android que apoyen a los robots sociales de la Universidad Carlos III de Madrid e incrementen sus competencias en materia de servicios.*

**Palabras clave:** Robótica social; Servicios de streaming; Aplicaciones accesibles; Reproducción de música; Inclusión digital.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el rápido desarrollo de la tecnología y la ciencia impulsa a la robótica en campos como la medicina, la industria o los servicios. Al mismo tiempo, la robótica social, rama más estrecha con la interacción humana, utiliza robots que se comunican mediante diversos canales como el uso de interfaces gráficas, gestos o diálogos. De cara a la interacción, estos recursos consiguen que el usuario sienta una sensación más cercana y amigable.

Sin embargo, el papel que desempeña la robótica social dentro del sector servicios todavía se encuentra en sus comienzos [4]. En estos últimos

años, la robótica social se ha ido acercando a los hogares gracias a la continua integración de nuevas habilidades y aplicaciones con el objetivo de ser más atractivos hacia los nuevos usuarios.

Por otro lado, la situación actual del COVID-19 ha provocado que la sociedad enfrente un escenario perjudicial. Uno de las medidas tomadas para evitar su contagio fue el del aislamiento social, lo que supuso fuertes repercusiones en la salud a nivel mental [16], afectando en mayor medida a la población de las personas mayores, población de más alto riesgo. Con este antecedente, nace un nuevo enfoque de desarrollo de robots sociales centrado en servicios que apoyen a poblaciones de riesgo ante el escenario del COVID-19 [7].

Siguiendo esta línea, los robots sociales siguen adaptándose a los cambios que van surgiendo en el mundo y en la sociedad. Enfocándonos en las dificultades que encuentran las personas mayores a la hora de desenvolverse con la tecnología, nace la idea de desarrollar aplicaciones fáciles de utilizar y que ofrezcan contenido pensado para ellos. La accesibilidad de dichas aplicaciones se implementa en paralelo con el desarrollo de robots más accesibles de cara a la comunicación.

El trabajo que se presenta en este artículo consiste en el diseño e implementación de una aplicación de reproducción de música y podcast en el robot social Mini [19], robot creado por la Universidad Carlos III de Madrid con la finalidad de ayudar a personas con deficiencia neurodegenerativa de cara a realizar actividades de estimulación cognitiva [18]. La evolución de dicho robot ha permitido integrar aplicaciones como juegos, agendas personales o reproductores de contenido multimedia. Por lo tanto, se pretende desarrollar un servicio que brinde la oportunidad a las personas mayores de poder reproducir y tener a su disposición una amplia librería de su música favorita.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: La sección 2 ofrece una revisión del estado del arte relacionado con la robótica social y las aplicaciones accesibles. La sección 3 ofrece las principales características que podría implementar la aplicación propuesta. La sección 4 presenta



Figura 1: Robot social Mini [12]

la aplicación desarrollada, la cual incluye su diseño de manera más detallada. Por último en la sección 5 se presentan las conclusiones obtenidas tras la realización de este trabajo.

## 2. ESTADO DEL ARTE

La historia de la robótica nos demuestra que los robots que inicialmente fueron creados como productos de investigación han ido evolucionando al punto de convertirse en robots comerciales [15]. Estos han conseguido desenvolverse fuera del entorno del laboratorio al que principalmente fueron destinados, para poder integrarse en el entorno doméstico.

### 2.1. ROBOTS CON REPRODUCTOR MULTIMEDIA

Paralelo al desarrollo de los robots sociales, aparecen los altavoces inteligentes, capaces de ofrecer un rango más amplio de servicios y contenido multimedia. Además, cuentan con sofisticados sistemas ASR (Automatic Speech Recognition) y módulos de síntesis de voz. Analizando el mercado actual sobresalen los sistemas de diálogo como Cortana de Microsoft, Siri de Apple, Amazon Alexa o Google Assistant [8].

Por su parte, la robótica social ha conseguido integrar pantallas y altavoces inteligentes, creando autómatas capaz de proporcionar al usuario la capacidad de escuchar música, información de actualidad, pronóstico del tiempo o reproducción de juegos. Estas habilidades que inicialmente encontramos en altavoces inteligentes, han ido evolucionando a los robots sociales hasta el punto de ser considerados asistentes personales. Alguno de los ejemplos son robots como Pepper[14], SARA<sup>1</sup> o Care-O-bot 4 [10], los cuales comparten carac-

<sup>1</sup><https://sara-robotics.com/>

terísticas humanoides y disponen de una pantalla como interfaz gráfica. También existen robots de mesa o escritorio que integran una tablet o un dispositivo móvil. Es el caso de Jibo[6], ElliQ<sup>2</sup> o Mabu<sup>3</sup>.

Finalmente, lo que se busca con estos nuevos diseños es abrir un abanico amplio de servicios para que el usuario pueda entretenerse y le resulte sencillo utilizar dichas aplicaciones.

### 2.2. APLICACIONES PARA PERSONAS MAYORES

En pleno siglo XXI, estamos viviendo un rápido incremento del envejecimiento de la población, en paralelo a un desarrollo veloz de las TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación) [5].

Abordando este último punto, existen sectores de población que no participa de las TIC, lo que da lugar a que se incremente una brecha digital entre generaciones. Una de las poblaciones más afectadas es el de las personas mayores.

Para minimizar dicha brecha se recurren a proyectos y programas que ayuden a mejorar su grado de manejo de dispositivos como teléfonos inteligentes y tabletas digitales [21]. Por otro lado, la creación de aplicaciones más intuitivas, accesibles y centrados en usuarios mayores ayuda en su conjunto a minimizar dicha brecha.

A continuación, se presenta una clasificación de aplicaciones desarrolladas para personas mayores [13], en relación al tema al que se dedican:

- **Aplicaciones relacionadas con la salud y el ejercicio físico:** como son las aplicaciones Podómetro, Medisafe<sup>4</sup> y Medicamento Accesible Plus. Este último te permite consultar qué medicamentos debes tomar.
- **Aplicaciones relacionadas con el ocio y el entretenimiento:** como puede ser la aplicación Fit Brains Trainer, basada en juegos que entrenan la mente del usuario.
- **Aplicaciones relacionadas con la accesibilidad:** las cuales facilitan el manejo del dispositivo agrandando el teclado, los botones y la interfaz o transcribiendo la voz a la hora de enviar mensajes. Encontramos aplicaciones como Big Launcher<sup>5</sup>, Wiser y Dragon Anywhere.

<sup>2</sup><https://elliq.com>

<sup>3</sup><http://www.cataliahealth.com/>

<sup>4</sup><https://www.medisafe.com>

<sup>5</sup><http://biglauncher.com/es/>

### 3. PROPUESTA

La aplicación que se propone en este trabajo busca desarrollar un servicio de reproducción de música y podcasts vía streaming para el robot social Mini.

A la hora de realizar el diseño de la aplicación se deben tener en cuenta aspectos funcionales como la correcta ejecución y conexión al servicio vía streaming. Además, debe existir un correcto enlace entre la aplicación y el robot de cara al uso de sus módulos. Este último aspecto permite que la aplicación desarrollada utilice directamente los módulos ASR [2] y ETTS [3] (Emotional-Text-To-Speech) del robot, mejorando la accesibilidad y experiencia del usuario.

De esta manera, se pretende iniciar una nueva línea de creación de nuevas aplicaciones que puedan ofrecer servicios como la reproducción de música, mensajería instantánea o cualquier recurso de internet, sin olvidar el aspecto de apoyo e integración digital de usuarios mayores.

Siguiendo las consideraciones precedentes, la aplicación propuesta está pensada para implementar un amplio catálogo de listas de música y programas de podcasts centrado en los gustos musicales de la población mayor. Ciertamente las preferencias musicales dependen de cada usuario, no obstante, nuestra propuesta pretende implementar una biblioteca que abarque numerosos géneros musicales basado en las preferencias más frecuentes de dichos usuarios.

El objetivo final persigue desarrollar al robot Mini como un robot social de servicios apoyado en múltiples aplicaciones más intuitivas, dinámicas y accesibles, aplicaciones que podríamos encontrar fácilmente en cualquier dispositivo móvil.

#### 3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

A continuación, se describen las características generales que debe presentar la aplicación propuesta.

##### 3.1.1. Sistema operativo

La aplicación debe ser desarrollada en el lenguaje nativo de Android [11]. Dicho sistema se encuentra actualmente presente en la gran mayoría de dispositivos tabletas digitales y móviles.

Las herramientas de desarrollo oficiales, como Android Studio [1], nos permiten crear aplicaciones con diseños más personalizados. El soporte directo de Google nos permite utilizar distintos servicios y enfocar su implementación a una amplia gama de dispositivos. Además, las aplicaciones se basan en Java, un lenguaje global bastante sencillo de

entender e implementar.

##### 3.1.2. Servicio streaming

De cara a la elección del servicio de streaming se propone usar Spotify [9]. En la actualidad existen numerosas plataformas de streaming, las cuales son competencia directa de Spotify por la calidad de su contenido y número de usuarios [17].

Sin embargo, Spotify es el único servicio que además de liderar su mercado [20], cuenta con una gran comunidad y soporte para los desarrolladores de aplicaciones. Ofrece un SDK (Software Development Kit) para Android el cual se basa en un conjunto de librerías que proporcionan un control remoto sobre la propia aplicación de Spotify. De esta forma, se puede llegar a reproducir cualquier contenido guardado en su base de datos.

##### 3.1.3. Modos de conexión

Otra de las características principales de la aplicación debe ser la capacidad de ofrecer al usuario dos tipos de uso basados en su conexión con el robot.

El sistema debe permitir los siguientes dos modos:

- **Modo de conexión con el robot:** permitiría a la aplicación hacer uso de los módulos ASR y ETTS del robot. De esta forma, el usuario podría controlar la aplicación mientras interactúa directamente con el robot, facilitando su accesibilidad y experiencia de uso. Sería el modo de conexión principal.
- **Modo de conexión sin el robot:** iniciaría la aplicación independiente al robot. Se trataría de un modo de conexión secundario o alternativo que permitiría al usuario, más familiarizado con la aplicación, controlarla libremente.

Sin embargo, ambos modos de conexión deben compartir el mismo sistema de menús y las mismas librerías de contenido.

### 4. EJEMPLO PRÁCTICO

En la actualidad, se ha desarrollado una aplicación que cumple con todas las características descritas en el apartado anterior. Esta aplicación se ha desarrollado principalmente como nuevo servicio para el robot social Mini.

Para el desarrollo de la aplicación se han usado las librerías del proyecto *android-core*, proyecto oficial del entorno Android-ROS<sup>6</sup>. El programa

<sup>6</sup><http://wiki.ros.org/android>



ma se ha desarrollado bajo el subproyecto `android_tutorial_pubsub`, un programa simple que se conecta al entorno de ROS (Robot Operating System). Por lo tanto, la aplicación se ha desarrollado partiendo de este subproyecto, el cual cuenta con las funcionalidades básicas para implementar una correcta comunicación con los módulos del robot.

El sistema implementa el SDK de Spotify<sup>7</sup>, el cual permite conectarse remotamente a la aplicación de Spotify del dispositivo y controlarla. De esta forma, Spotify se encarga directamente de la reproducción y la conexión a la red. Mientras que nuestra aplicación se encarga de ofrecer al usuario una experiencia más accesible de reproducción del contenido.

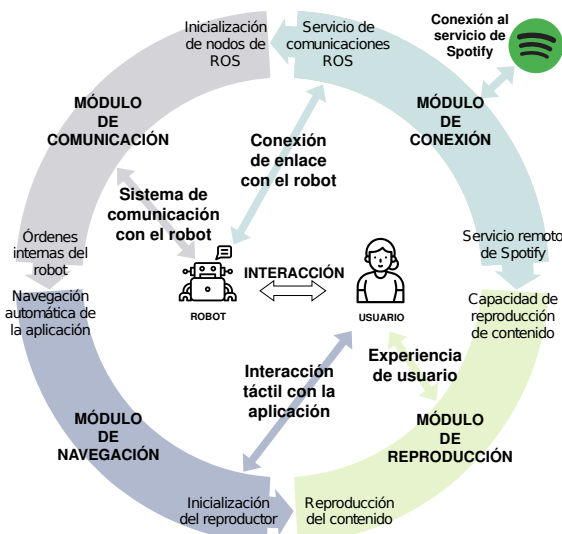


Figura 2: Esquema de los principales módulos de la aplicación y sus correspondientes relaciones

El diseño de la arquitectura de la aplicación se divide en cuatro partes principales: comunicación, conexión, navegación y reproducción de contenidos. La interrelación entre dichos módulos implementa la funcionalidad total del programa. Por lo tanto, cada parte es imprescindible de cara a desarrollar una correcta experiencia de usuario.

## 4.1. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La arquitectura de la aplicación se divide en cuatro módulos principales:

### 4.1.1. Módulo de comunicación

El módulo de comunicación permite al robot enviar mensajes con información relevante durante el ciclo de ejecución de la aplicación. Por lo tanto, permite a la aplicación utilizar el ASR y ETTS del robot, paralelo al control directo del robot sobre la

<sup>7</sup><https://developer.spotify.com>

aplicación. Esto facilita que el usuario pueda manejar el programa con la mínima interacción sobre la pantalla de la tableta digital.

El resultado final permite que la aplicación se pueda controlar mediante órdenes preestablecidas en los mensajes. La estructura del módulo (ver Fig. 3a) consta de dos partes principales: un conjunto de mensajes compuestos y una estructura de nodos de ROS.

### 4.1.2. Módulo de conexión

El módulo de conexiones permite a la aplicación establecer los servicios necesarios para el funcionamiento del módulo de comunicación y los servicios remotos de Spotify. Se trata del módulo más importante dentro del sistema, debido a que enlaza la aplicación al robot y le proporciona la capacidad de reproducir música sin limitaciones.

El módulo de conexiones está formado por una conjunto de etapas ordenadas según su ciclo de ejecución (ver diagrama de la Fig. 3b).

Las tres etapas principales que lo forman son:

- **Etapas de Pre-selección:** es la primera etapa del módulo y se inicia a la vez que la aplicación. En ella se configura e inician las actividades y servicios necesarios para la ejecución de la etapa de Selección.
- **Etapas de Selección:** tras la finalización de la etapa de Pre-selección, se muestra al usuario una interfaz gráfica con los dos posibles modos de conexión de la aplicación. Según el resultado de la elección, variarán en consecuencia el flujo de funcionamiento de la etapa y las conexiones a establecer.
- **Etapas de Post-selección:** última etapa del módulo donde se establecen las conexiones determinadas en la etapa anterior. Una vez las conexiones se hayan establecido correctamente, la etapa finaliza con la interfaz gráfica del menú principal.

### 4.1.3. Módulo de navegación

El módulo de navegación permite atender a las acciones por pantalla del usuario, y navegar entre los diferentes menús que componen la aplicación. Además se encarga de ejecutar las órdenes del robot, trabajando en conjunto con el módulo de comunicaciones.

Por otro lado, el programa sigue una estructura de menús ordenada por niveles, que permite al módulo moverse entre las diferentes opciones hasta llegar a los menús de selección. Éstos últimos inician el reproductor de música de la aplicación.

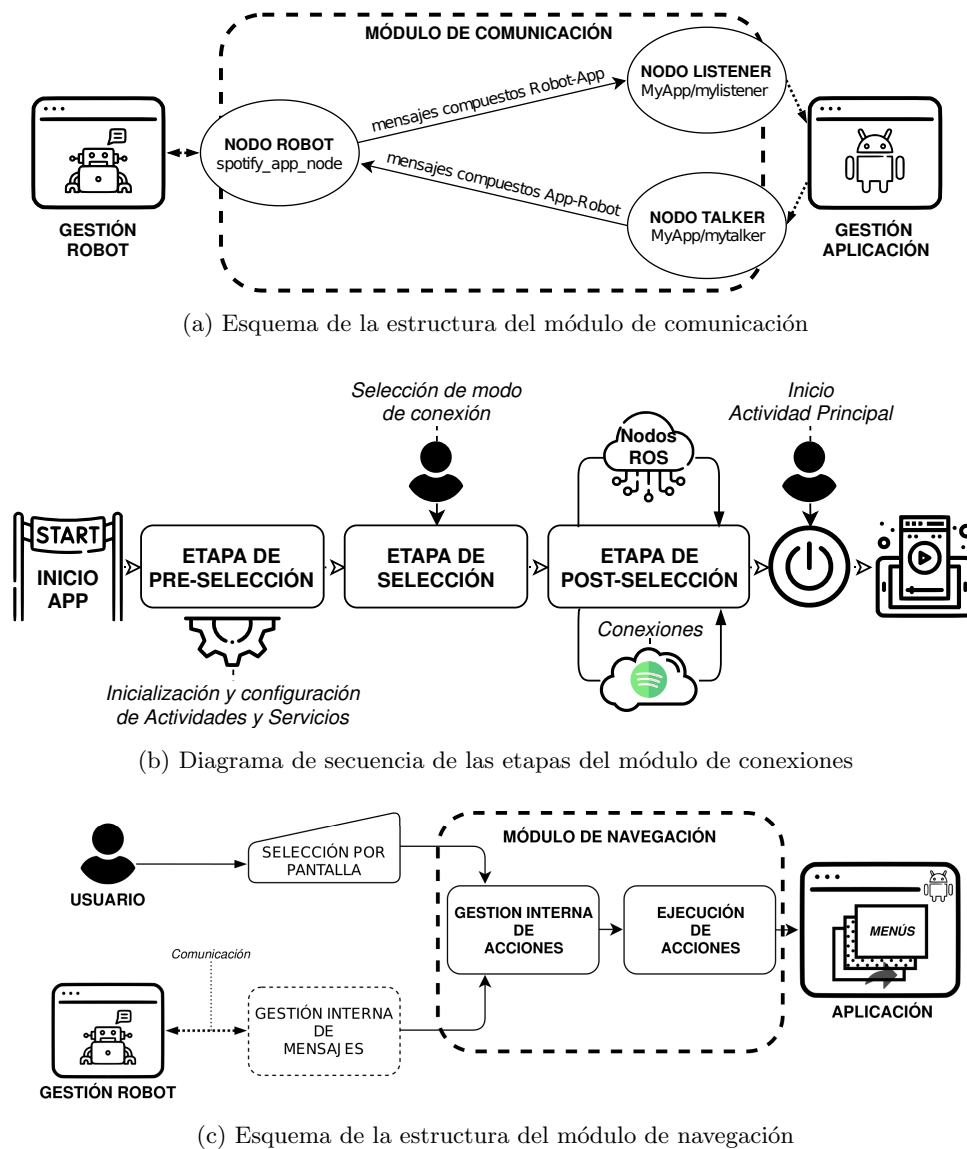


Figura 3: Diagramas de los módulos de la aplicación

En la Fig. 3c se representa el esquema general de la estructura del módulo de navegación.

#### 4.1.4. Módulo reproductor de música

Actividad que proporciona al usuario la experiencia de escuchar música o programas de podcasts. Se trata de una interfaz gráfica con las funcionalidades de pausar, reanudar, avanzar o retroceder en la lista de música seleccionada.

Finalmente, el módulo se apoya en una librería interna de listas de contenido detallados en la siguiente sección.

#### 4.2. BIBLIOTECA BASADA EN LAS PREFERENCIAS MUSICALES DE LAS PERSONAS MAYORES

De cara a la construcción de una librería predefinida de contenido musical y programas de podcasts, se ha realizado un estudio previo con el fin de atender las preferencias de las personas mayores. Analizando los resultados de los géneros musicales más votados, se han construido menús de selección e interfaces gráficas específicos para cada uno.

Los resultados obtenidos de las encuestas se encuentran representados en la Figura 5.

La creación de dichas listas se ha realizado directamente sobre la base de datos de Spotify. De esta manera la aplicación desarrollada accede remotamente a cualquiera de las listas de música creadas.

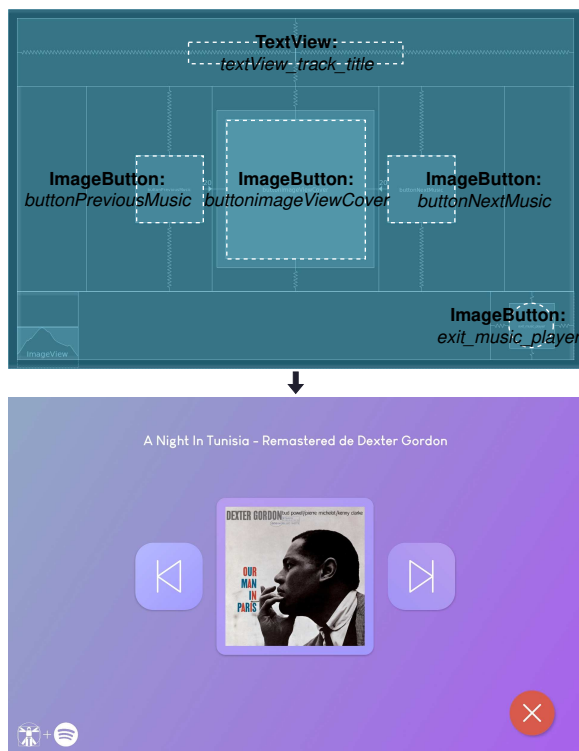


Figura 4: Diseño de la interfaz gráfica del módulo de reproducción

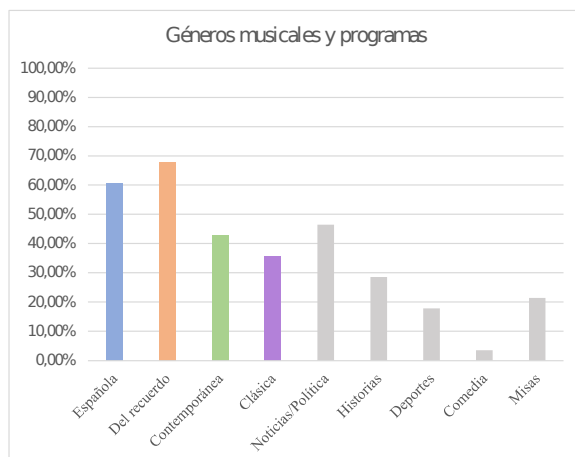


Figura 5: Gráfica de barras porcentual de contenido escuchado por las personas mayores encuestadas

## 5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha realizado un repaso acerca de la robótica social e inclusión digital de la población mayor, haciendo especial mención a las aplicaciones accesibles que encontramos para usuarios mayores. Se han descrito las características principales que debería incorporar la aplicación propuesta y se ha presentado una aplicación, estructurada en cuatro módulos funcionales, que ofrece un servicio de reproducción de música vía stream-

ing para el robot social Mini.

Referente al diseño de la aplicación desarrollada, se ha conseguido integrar el entorno de Android con módulos de comunicación con ROS. Estos módulos han permitido al programa usar el ASR y ETTS del robot Mini, cumpliendo el objetivo de desarrollar una aplicación más accesible.

Además, se ha conseguido construir una librería predeterminada de contenido musical basada en las encuestas realizadas a personas mayores. Esto ha permitido a la aplicación contar con un total de 20 listas de música y 21 programas de podcasts. Contenido razonable para el programa, con la posibilidad de mejorar o aumentar dichos contenidos en el futuro.

Finalmente, se concluye presentando la aplicación como base para encaminar el desarrollo de nuevas aplicaciones en el robot social Mini. La aplicación ha demostrado poder comunicarse sin problemas con el entorno del robot (ROS) llegando a mejorar aspectos tanto visuales y funcionales, como aspectos relacionados con accesibilidad y la experiencia de usuario.

## Agradecimientos

La investigación desarrollada ha recibido financiación de dos proyectos: “Development of social robots to help seniors with cognitive impairment” (ROBSEN), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad; y “RoboCity2030-IIICM”, financiado por la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea.

## English summary

## ACCESSIBLE MUSIC STREAMING APPLICATION FOR SOCIAL ROBOT

## Abstract

*Social robotics continues to adapt to the changes taking place in the world and society today. The emergence of COVID-19 has led to a scenario of social distancing that has greatly affected at-risk populations such as the elderly.*

*However, the various interventions by social robotics have demonstrated their ability to combat a pandemic, offering services in hospitals, nursing homes and providing companionship to elderly people living alone. As a result, the idea of boosting the va-*

lue of the social robot as a service platform has emerged.

For this reason, the present work proposes the design and implementation of a music and podcast playback application focused on the preferences of the elderly. Our development aims to promote accessibility and the use of multimedia content streaming services for the elderly. In parallel, the developed application aims to create new Android applications that support the social robots of the University Carlos III of Madrid and increase their competences in terms of services.

**Keywords:** Social robotics; Streaming services; Accessible applications; Music playback; Digital inclusion.

## Referencias

- [1] A. D. M. Africa, G. Ching, K. Go, R. Evidente y J. Uy, «A comprehensive study on application development software systems,» *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, vol. 7, n.º 8, pp. 99-103, 2019.
- [2] F. Alonso-Martín y M. A. Salichs, «Integration of a voice recognition system in a social robot,» *Cybernetics and Systems*, vol. 42, n.º 4, pp. 215-245, 2011.
- [3] F. Alonso-Martín, A. Ramey y M. A. Salichs, «Maggie : el robot traductor,» en *9 Workshop RoboCity2030-II*, Breazeal 2003, 2011, pp. 57-73.
- [4] M. Čaić, D. Mahr y G. Oderkerken-Schröder, «Value of social robots in services: social cognition perspective,» *Journal of Services Marketing*, vol. 33, n.º 4, pp. 463-478, 2019.
- [5] J. C. Cobo Romani, «El concepto de tecnologías de la información. Benchmarking sobre las definiciones de las TIC en la sociedad del conocimiento,» vol. 14, 2009.
- [6] P. Farhadi, «The Social Presence of Jibo,» Tesis doct., 2019, pp. 1-61.
- [7] A. P. Henkel, M. Čaić, M. Blaurock y M. Okan, «Robotic transformative service research: deploying social robots for consumer well-being during COVID-19 and beyond,» *Journal of Service Management*, vol. ahead-of-p, n.º ahead-of-print, 2020.
- [8] M. B. Hoy, «Alexa, Siri, Cortana, and More: An Introduction to Voice Assistants,» *Medical Reference Services Quarterly*, vol. 37, n.º 1, pp. 81-88, 2018.
- [9] K. Jacobson, V. Murali, E. Newett, B. Whitman y R. Yon, «Music Personalization at Spotify,» Association for Computing Machinery (ACM), 2016, pp. 373-373.
- [10] «Let me Introduce Myself: I am Care-O-bot 4, a Gentleman Robot,» en *Mensch und Computer 2015 – Tagungsband*, 2015, pp. 223-232.
- [11] J. Liu y J. Yu, «Research on development of android applications,» en *Proceedings - 2011 4th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, ICINIS 2011*, 2011, pp. 69-72.
- [12] M. Maroto-Gómez, Á. Castro-González, J. C. Castillo, M. Malfaz y M. A. Salichs, «A bio-inspired motivational decision making system for social robots based on the perception of the user,» *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, n.º 8, p. 2691, 2018.
- [13] X. Martínez-Rolán y T. Piñero-Otero, «Tipología y funcionalidades de las aplicaciones móviles para mayores. A un tap del envejecimiento activo,» *Ámbitos. Revista Internacional de Comunicación*, n.º 29, 2015.
- [14] A. K. Pandey y R. Gelin, «A Mass-Produced Sociable Humanoid Robot: Pepper: the First Machine of Its Kind,» *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 25, n.º 3, pp. 40-48, 2018.
- [15] A. J. Pérez Vidal, Á. Castro-González, F. Alonso Martín, J. C. Castillo y M. A. Salichs, «Evolución de la robótica social y nuevas tendencias,» Universidade da Coruna, 2020, pp. 836-843.
- [16] J. Ramírez-Ortiz, D. Castro-Quintero, C. Lerma-Córdoba, F. Yela-Ceballos y F. Escobar-Córdoba, «Consequences of the COVID-19 pandemic in mental health associated with social isolation - Consecuencias de la pandemia COVID-19 en la salud mental asociadas al aislamiento social,» 2020.
- [17] A. Rebollo Ena, «SPOTIFY / NETFLIX Nuevos modelos de negocio,» *Bit*, n.º 210, pp. 41-43, 2018.
- [18] E. Salichs, E. Fernández-Rodicio, J. C. Castillo, Á. Castro-González, M. Malfaz y M. A. Salichs, «A social robot assisting in cognitive stimulation therapy,» en *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 10978 LNAI, Springer Verlag, 2018, pp. 344-347.

- [19] M. A. Salichs, Á. Castro-González, E. Salichs, E. Fernández-Rodicio, M. Maroto-Gómez, J. J. Gamboa-Montero, S. Marques-Villarroya, J. C. Castillo, F. Alonso-Martín y M. Malfaz, «Mini: A New Social Robot for the Elderly,» *International Journal of Social Robotics*, vol. 12, n.º 6, pp. 1231-1249, 2020.
- [20] D. Skog, H. Wimelius y J. Sandberg, «Digital Service Platform Evolution: How Spotify Leveraged Boundary Resources to Become a Global Leader in Music Streaming,» en *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii International Conference on System Sciences, 2018.
- [21] TvUS, *Brecha Digital y e-inclusión de las personas mayores: grandes desafíos de la sociedad actual*.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE RESPALDO MEDIANTE TECNOLOGÍA LORA CON HARDWARE Y SOFTWARE ABIERTO PARA APLICACIONES DE ROBÓTICA DE EMERGENCIAS

R.F. Manrique Balmaceda, R. Vázquez Martín, J. Bravo Arrabal, J.J. Fernández Lozano, A. García Cerezo  
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Málaga.

C/ Dr. Ortiz Ramos, s/n, 29071, Málaga.

[jfl@uma.es](mailto:jfl@uma.es)

## Resumen

*Los sistemas de comunicación entre nodos sensores y los equipos de búsqueda y rescate presentan posibles vulnerabilidades ante emergencias o catástrofes, como el fallo de la infraestructura del sistema o la saturación de la red. Por ello, es necesario evaluar alternativas para garantizar la disponibilidad del sistema y los datos necesarios para la estrategia del equipo. Los requerimientos de una red de largo alcance y bajo consumo apuntan a evaluar las distintas tecnologías que engloban las redes LPWAN (Low Power, Wide Area Network). Entre ellas, destaca el protocolo LoRaWAN (Long Range, Wide Area Network) por ofrecer una flexibilidad operativa que no tienen los demás. De lado del hardware, se realizó una selección de componentes abiertos para los nodos sensores y el gateway. Para conseguir una red ad-hoc se ha usado el proyecto ChirpStack como servidor de red y de aplicación. Finalmente, se ha integrado el software de aplicación QGIS con la base de datos PostgreSQL que almacena los datos en la misma tarjeta host del gateway. El sistema fue probado en las XV Jornadas Internacionales de la Universidad de Málaga sobre Seguridad, Emergencias y Catástrofes. El código y la documentación del sistema presentado en este artículo está disponible en <https://github.com/jfflozano/BackUpCommLoRa>.*

**Palabras clave:** redes de sensores inalámbricas, robots móviles, LoRaWAN, SAR, sistema de comunicación de respaldo, red ad-hoc, Chirpstack

## 1 INTRODUCCIÓN

El uso de robots como parte de los equipos de búsqueda y rescate (*Search and Rescue*, SAR) en emergencias y catástrofes es relativamente reciente. El primer caso importante fue su participación en el atentado del *World Trade Center* (WTC) de Nueva York (2001), en el cual sirvieron principalmente como transmisores de imágenes para reconocimiento de víctimas. Desde ahí, la tecnología ha seguido progresando y los robots han incorporado nuevas funciones que han hecho que la labor de rescate sea cada vez más eficaz y eficiente [1].

La Universidad de Málaga (UMA) cuenta con un área de investigación en robótica de rescate, haciendo uso de robots terrestres y aéreos como parte de los equipos de emergencias en eventos catastróficos. Las actividades de primer contacto del equipo de respuesta con la zona de emergencia se denominan “primera intervención” e incluyen la recopilación de información relevante para el planteamiento de las estrategias de rescate. Una de las líneas de investigación son los sistemas de comunicación entre robots, nodos sensores y equipos SAR [2].

Otro elemento relevante de los equipos de rescate son los perros. Su capacidad para localizar víctimas, y para llegar a áreas de difícil acceso para humanos los hacen elementos muy valiosos de las operaciones de búsqueda y rescate. Asimismo, pueden portar, como los robots, sensores que complementen la información sobre la zona de operaciones. Por ejemplo, en 2018 se integraron nodos sensores de gases (O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub> y VOC), humedad, presión atmosférica y temperatura, así como un GPS, en un perro de rescate [3]. El estándar de comunicación utilizado fue ZigBee con un alcance máximo de 700 m (con línea de vista directa). Los nodos se comunican con una puerta de enlace, y desde ahí se enviaba la información integrada a un servidor mediante comunicación celular (3G).

Otro proyecto más reciente (2020) ha sido la implementación de un sistema de comunicación híbrido usando *gateways* de tecnología LoRa estáticos y móviles. En este trabajo se evaluaron distintas configuraciones del protocolo LoRaWAN para los nodos y *gateways* instalados por la ciudad de Málaga (incluyendo los componentes móviles instalados en un automóvil eléctrico) [4].

Hoy en día la oferta de tecnologías de comunicaciones se ha incrementado con protocolos que tienen como característica principal un largo alcance directo como las redes LPWAN y las redes móviles 5G que logran una gran capacidad de transmisión de datos, en comparación con sus predecesoras.

Este trabajo presenta la implementación de un sistema de comunicación, desarrollado con el objetivo de servir como red de respaldo a los sistemas de



comunicación principales, particularmente en cuanto a la transmisión de datos de sensores desde el campo de operaciones hasta los centros de coordinación, debido a que en las misiones de búsqueda y rescate con frecuencia la infraestructura está afectada.

Además, el sistema está basado en elementos de hardware y software abierto por su flexibilidad y modularidad, así como por el reducido coste, que facilita replicar los elementos básicos de la red para poder contar con un elevado número de nodos.

## 2 SISTEMA DE COMUNICACIONES

### 2.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

En relación a la aplicación, la comunicación entre los nodos sensores y el equipo SAR requiere las siguientes características [5]:

- ✓ Redes Ad-hoc: al ser un sistema de respaldo, la comunicación debe ser independiente de sistemas existentes. Este requisito es específico de este trabajo.
- ✓ Largo alcance: por la posible extensión del área impactada (sobre todo en desastres naturales, como terremotos).
- ✓ Buena capacidad de penetración: los despojos y restos típicos de catástrofes pueden atenuar considerablemente la señal.
- ✓ Bajo consumo energético: una red de sensores móviles requiere de un uso eficiente de la energía, puesto que de este recurso dependerá el tiempo de autonomía de las unidades.

### 2.2 SELECCIÓN DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

Para seleccionar el protocolo en el que se basa el sistema propuesto se ha realizado un análisis de las tecnologías LPWAN más relevantes. Entre ellas destaca: LoRa, Sigfox, Ingenu RPMA, Weightless, NB-IoT, Dash7, EC-GSM-IoT y LTE-M.

A igualdad de potencia de transmisión, la tecnología LoRa (*Long Range*) e Ingenu RPMA (*Random Phase Multiple Access*) tienen muy buen alcance porque usan técnicas de modulación de espectro ensanchado. LoRa utiliza la técnica *Chirp Spread Spectrum* (CSS) mientras que Ingenu usa la técnica *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). La ventaja de este tipo de tecnología es su baja afectación a interferencias o ruido, así el dispositivo receptor puede captar la señal incluso con niveles muy bajos de sensibilidad (~-148 dB).

Los estándares Weightless y NB-IoT (*Narrow Band, Internet of Things*) usan canales con ancho de banda

estrecho (*Narrow Band*, NB) y Sigfox, ancho de banda ultra-estrecho (*Ultra Narrow Band*, UNB). Esta característica también permite al receptor recibir mensajes con muy baja potencia de transmisión (buena sensibilidad), pues el nivel de ruido en un canal muy estrecho es más fácil de filtrar y el manejo del ancho de banda total se hace más eficiente (más canales por ancho de banda) [6].

La transmisión con una frecuencia portadora en la banda sub-GHz favorece la penetración de la señal a través de obstáculos físicos. Este rango de frecuencias pertenece a las comunicaciones móviles (700, 800 y 900 MHz), a la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 433 MHz y a la banda de baja frecuencia de 868 MHz [7]. En comparación con la banda ISM de 2.4 GHz (WiFi, ZigBee, Bluetooth), las frecuencias sub-GHz tienen menos interferencia porque las tecnologías móviles asignan canales específicos de su ancho de banda contratado, y también porque las bandas ISM y de baja potencia tienen restricciones de uso que limitan la contaminación del espectro (baja velocidad de transmisión y potencia de emisión) [8].

El estándar Ingenu RPMA transmite a una frecuencia de 2.4 GHz por las menores limitaciones en el uso del espectro (*duty cycle*) en comparación con la franja ISM y de baja potencia. La contrapartida es el mayor nivel de interferencia en el espectro. Aunque pueda mantener enlaces de hasta 15 km en un área urbana [4], [8], la baja penetrabilidad por la frecuencia portadora afectaría la potencia de transmisión disponible del enlace en esta aplicación.

En relación al protocolo Dash7, su punto débil principal es su bajo alcance frente a otros protocolos. El alcance entre nodo y gateway es de 1 km, y puede extenderse hasta 2 km con el uso de un sub-controlador [9].

Como se ha mencionado, la red de comunicación es ad-hoc, por lo que no se utilizará estándares que requieran de compañías prestadoras de servicio, tal como las compañías de comunicaciones móviles (EC-GSM-IoT, LTE-M, NB-IoT) o compañías que operen en las bandas ISM y de baja potencia pero que requieran un pago por su servicio (Sigfox e Ingenu RPMA). Solo las tecnologías Weightless, LoRa y Dash7 cumplen con la característica de red ad-hoc.

En relación a la modularidad, la tecnología LoRa lleva más de cinco años en desarrollo y cuenta con módulos compatibles que pueden ser conectados directamente con la tarjeta principal tarjeta host del nodo y del gateway. Además, el estándar LoRaWAN es de licencia abierta, por lo que no requiere pago alguno por su uso y tiene un soporte técnico que se encarga de su actualización y mejora [10].

Por las razones analizadas, el protocolo LoRaWAN es el elegido para este trabajo.

### 2.3 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN LORAWAN

El protocolo de comunicación LoRaWAN determina las reglas y la arquitectura de la red (estándares de acceso al medio) para su comunicación usando la tecnología LoRa, la cual determina los parámetros técnicos y metodologías requeridas por la capa física del sistema. La técnica de modulación de la tecnología LoRa es la clave de las particulares prestaciones técnicas del protocolo LoRaWAN: comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo de energía para una aplicación de baja velocidad de transmisión. se denomina Chirp Spread Spectrum (CSS).

La topología más amplia del protocolo LoRaWAN es Estrella de Estrellas (Figura 1: Topología del protocolo LoRaWAN). Varios nodos finales o nodos sensores envían la información a todos los gateways que se encuentren a su alcance: ésta es la primera estrella. La segunda está compuesta por todos los gateways conectados por internet a un mismo servidor. En este trabajo solo hace falta una estrella debido a la restricción de uso de internet (red ad-hoc). Por lo tanto, el alcance de la red estará supeditado al alcance de los transceptores LoRa.

Los gateways sirven de “túneles” por donde los nodos sensores pasan la información al servidor de red [11], pudiendo operar en local (LAN), o a través de Internet (WAN). En ambos casos, se hace uso de un servidor MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*) que, para este trabajo, ha estado alojado en el propio host del gateway. La identificación y gestión de los nodos sensores, así como de los procesos de enlace, son realizados por los servidores de red y aplicación.

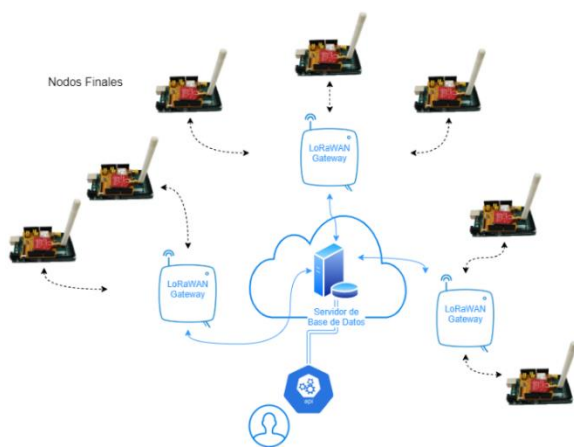


Figura 1: Topología del protocolo LoRaWAN

Cuando la información está disponible en el servidor, éste la enviará al servidor de aplicación y desde aquí el usuario podrá acceder a la información que necesite a través de la aplicación (una aplicación móvil, una interfaz web, un software, etc.).

El servidor de red autentica los mensajes recibidos y los retransmite al servidor de aplicación. Por ejemplo, si un nodo sensor envía un mensaje a dos gateways, el servidor de red se encarga de eliminar los mensajes duplicados.

Finalmente, el servidor de aplicación se encarga de recibir los mensajes del servidor de red para encriptar o desencriptar el mensaje generado en el nodo sensor.

## 3 DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

### 3.1 SELECCIÓN DEL HARDWARE

El nodo sensor tiene características especiales que lo diferencian de los otros componentes. Pertenecer a una unidad móvil, lo que condiciona que su diseño debe optimizar el consumo energético, el peso y volumen (sobre todo, al ir montado en unidades aéreas) y que las aplicaciones típicas suelen contar con más de un nodo sensor [12]. A medida que el número de nodos aumenta, el coste del equipo se vuelve más relevante. A continuación, se listan cuatro características usadas para la selección de las componentes del nodo sensor [13]:

- ✓ Utilización de microcontroladores de tecnología abierta.
- ✓ Flexibilidad y modularidad de las tarjetas.
- ✓ Bajo consumo energético.
- ✓ Bajo coste del hardware.

El nodo o dispositivo final está compuesto por los siguientes bloques (en la Figura 2: Diagrama de bloques del nodo sensor

se muestra un diagrama de bloques típico de un nodo sensor con una arquitectura modular) [13]:

- ✓ Bloque de procesamiento (host).
- ✓ Bloque de sensores
- ✓ Bloque de comunicaciones.
- ✓ Bloque de alimentación.

El prototipo del nodo sensor está formado por una tarjeta principal (host), cuyo microcontrolador se comunica con las tarjetas secundarias o *shields*. La modularidad permite una conexión segura y una unidad compacta.

La tarjeta host debe contar con múltiples interfaces de comunicación para la conexión con el módulo LoRa y con los módulos de sensores. Las interfaces más utilizadas son UART, SPI e I2C.

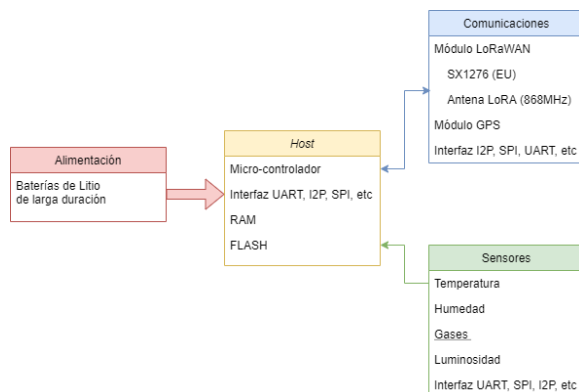


Figura 2: Diagrama de bloques del nodo sensor

El código utilizado para los nodos sensores es corto y sencillo, por lo que no hay inconvenientes con los requerimientos para la velocidad de procesamiento del microcontrolador, y cubre la mayoría de estos sin problema. Lo mismo sucede con los requisitos de hardware, pues para este tipo de aplicación no se requiere memoria RAM de gran capacidad.

La tarjeta host seleccionada es la Arduino UNO, que cuenta con una CPU AVR de tecnología CMOS (bajo consumo) y con arquitectura RISC (no requiere mayor complejidad para su aplicación). La tarjeta Arduino UNO es un módulo comercial y compatible con módulos de comunicación y de sensores, con lo que se garantiza la compacidad de la unidad. Otra alternativa es la tarjeta Arduino MEGA2560 (usada de hecho en varios experimentos), más grande en tamaño y con mejores prestaciones, pero que cumple con las mismas características de robustez y modularidad (existen módulos sensoriales LoRa que se conectan directamente), por la facilidad para su abastecimiento y flexibilidad de uso. Respecto a la evaluación económica, Arduino UNO es una de las tarjetas más baratas del mercado.

Dado que el criterio prevalente es la flexibilidad y modularidad, se ha elegido el módulo LoRa/GPS Shield v1.3 de Dragino para Arduino Uno, Leonardo y Mega2650. Junto con el módulo LoRa BEE v1.1 forman la unidad de comunicación LoRa y GPS. La tarjeta LoRa Bee tiene una arquitectura similar al módulo RFM95 de HopeRF. En la Figura 3 se muestra la tarjeta host y la tarjeta de comunicación acopladas.

Para la tarjeta *host* del *gateway* se eligió una Raspberry Pi 3B ya que requiere recursos informáticos superiores para la comunicación (niveles de Red y Transporte) difíciles de solventar con

microcontroladores [13]. Un requerimiento más es la capacidad de almacenamiento de datos, teniendo en cuenta que la cantidad de mensajes de distintos nodos y por un periodo prolongado (días). También se ha considerado su disponibilidad comercial, modularidad con las tarjetas de comunicación LoRaWAN y coste.



Figura 3: Prototipo del nodo sensor

El gateway está constituido por un host Raspberry Pi 3B que puede funcionar directamente conectado con el *shield* RAK2245 RPi HAT o con el módulo iC880A-SPI LoRa, en adelante iC880A, el cual se conecta mediante cables con la placa principal Raspberry Pi 3B. Para este trabajo se ha utilizado la tarjeta iC880A.

Para el bloque de sensores se ha empleado una tarjeta Proto Shield en la que se soldó el sensor LM35 y posteriormente se conectó en la parte superior de la tarjeta de comunicación LoRa.

### 3.2 PROGRAMACIÓN

El código del nodo sensor está escrito en C e incluye la librería Arduino-LMI que contiene las funciones asociadas al transceptor LoRa SX1276. Mediante el puerto serie y analógico recibe los datos del GPS y de los sensores respectivamente, y los transmite por el puerto ICSP hacia el módulo LoRa.

El código usado para el *gateway* está basado en el original de la compañía Semtech Corporation adaptado para la tarjeta iC880A (<https://github.com/ttn-zh/ic880a-gateway.git>). Estos ficheros están configurados para trabajar con el servidor TTN. Sin embargo, modificando la dirección IP del fichero de configuración también puede enlazarse con un servidor local.

Para crear una red Ad-Hoc se ha decidido disponer localmente del servidor de red y de aplicación. El

servidor LoRa utilizado ha sido desarrollado por ChirpStack (<https://www.chirpstack.io/>), el cual es un servidor de red open-source con licencia MIT. El servidor ChirpStack está compuesto por los siguientes componentes:

- ✓ Puente (Bridge): servicio que convierte los paquetes UDP en el formato común JSON.
- ✓ Servidor LoRa: gestiona la recepción de los mensajes de subida (uplink) y la duplicación de paquetes provenientes del gateway, administra la capa MAC y programa los mensajes de bajada (downlink).
- ✓ Servidor de Aplicación LoRa: gestiona la solicitud de admisión (join request), encriptación de la información enviada por los clientes y ofrece la información solicitada por los clientes a través de una interfaz web.

Después de que un nodo sensor envíe un paquete de datos al gateway, este lo envía al servidor en formato UDP. El paquete ingresa por el puente, el cual publica la información en el bróker MQTT, el servidor de base de datos recibe la información del bróker MQTT y lo almacena. Cuando un usuario final solicita información a través de una API, el servidor de aplicación pide la información al servidor de base de datos y la retransmite al usuario final. En la Figura 4 se muestran las componentes del servidor ChirpStack y el flujo de información.

Finalmente, el software de aplicación usado es QGIS para la representación geoespacial de los datos medidos por el sensor y pgAdmin como gestor de la base de datos PostgreSQL (Figura 5). El servidor de aplicación de ChirpStack tiene una integración PostgreSQL lo que permite la conexión con el software QGIS y la visualización georreferenciada de la información de los nodos sensores. El software pgAdmin es un gestor de PostgreSQL para visualizar los datos de manera más amigable. El servidor

ChirpStack también cuenta con una interfaz web para visualizar los datos recibidos.

## 4 PRUEBAS DE CAMPO

El 18 de junio de 2021 se celebraron las XV Jornadas Internacionales de la Universidad de Málaga sobre Seguridad, Emergencias y Catástrofes. Dentro de las actividades se incluyeron las pruebas del sistema de comunicaciones LoRa con un nodo sensor.

El gateway iC880A se instaló en el Puesto de Control Avanzado (PCA, Figura 6), en un área cercana a la zona afectada. El nodo sensor se montó sobre el dron DJI Matrice 600 que realizó un barrido de un área determinada (Figura 7). El nodo envió la temperatura en un intervalo de 10 segundos y con *spread factor* igual a 7. Para una segunda prueba, el nodo sensor se montó en el robot terrestre Cuadriga II y el *spread factor* se cambió a 12 para un mayor alcance, a costa de un mayor consumo energético.

En la Figura 8 se muestran los puntos medidos por el nodo sensor, la interfaz gráfica es el software QGIS. Cada vez que la base de datos registra un nuevo dato, QGIS actualiza la capa vectorial que contiene cada uno de los puntos georreferenciados, su temperatura y también se añadió el dato de sensibilidad de la señal (RSSI).

La máxima sensibilidad registrada con un *Spread Factor* de 7 es de -121 dB, pudiendo alcanzar incluso más sensibilidad si es que el *Spread Factor* se incrementa. La razón por la que se inició con este valor fue para asegurar que se cumplieran los intervalos de tiempo establecidos en el código del nodo sensor (10 segundos). Se comprobó que cuando se varió a 12, el intervalo de tiempo creció considerablemente a aproximadamente 2 minutos, debido a la limitación de uso de los canales, impuesta por la banda ISM (1 % del duty cycle).

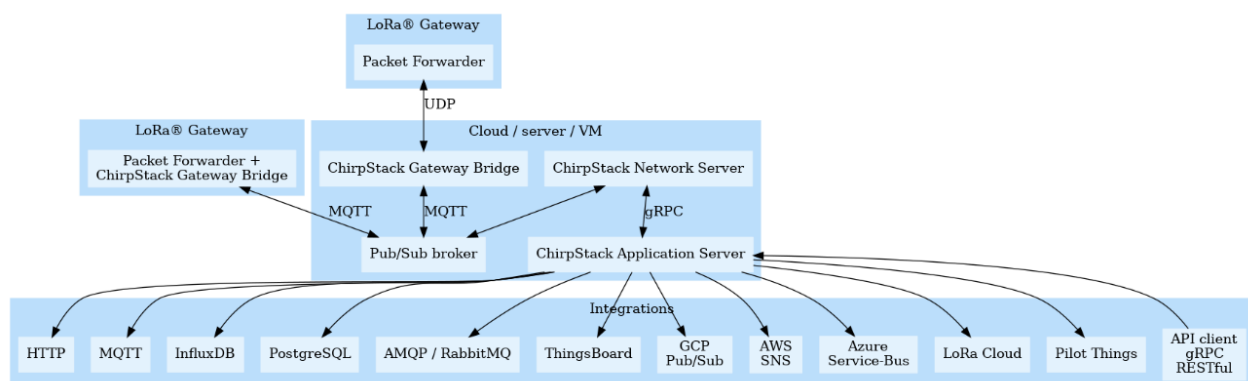
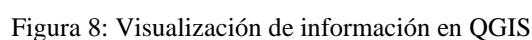
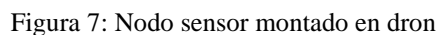
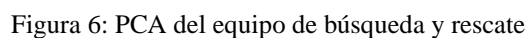
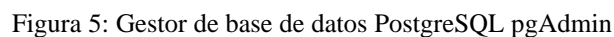


Figura 4: Estructura interna del Servidor ChirpStack Fuente: <https://www.chirpstack.io/project/architecture/>





Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos RTI2018-093421-B-I00, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, Programa Estatal de I+D+i 2018, y UMA18-FEDERJA-090, Programa operativo FEDER Andalucía 2014-2020, Convocatoria 2018, Junta de Andalucía.

## English summary

### BACKUP COMMUNICATION SYSTEM USING LORA TECHNOLOGY WITH HARDWARE AND OPEN SOFTWARE FOR EMERGENCY ROBOTICS APPLICATIONS

#### Abstract

*The communication systems between sensor nodes and the rescue teams present potential vulnerabilities in emergencies or disasters such as infrastructure failure or network saturation. Therefore, it is necessary to evaluate alternatives to guarantee the availability of the system and the data necessary for the rescue team's strategy. The requirements of the long-range and low-consumption network aim to evaluate the different technologies within LPWAN (Low Power, Wide Area Network). Among them, the LoRaWAN (Long Range, Wide Area Network) protocol offers operational flexibility that others do not have. On the hardware side, a selection of open components was made for the sensor nodes and the gateway. To achieve an Ad-hoc network, the ChirpStack project has been evaluated as a network and application server. Finally, the QGIS application software was integrated with the PostgreSQL database that stores the data in the same gateway host card. The system was tested at the XV International Conference of the University of Malaga on Security, Emergencies and Catastrophes. The system code and documentation presented in this article is available at <https://github.com/jjflozano/BackUpCommLoRa>.*

**Keywords:** sensor node networks, mobile robots, LoRaWAN, SAR, backup communication system, ad-hoc network, Chirpstack.

#### Referencias

- [1] R. R. Murphy, S. Tadokoro and A. Kleiner, "60. Disaster Robotics," in *Handbook of Robotics*, Berlin, Springer, 2016, pp. 1577-1604.
- [2] F. Lara Hurtado, J. Lozano and R. Martín, "Una red de sensores inalámbrica basada en hardware y software abierto para colaboración con aplicaciones de robótica a misiones de búsqueda y rescate," in *XL Jornadas de Automática*, 2019.
- [3] J. Fernandez-Lozano, A. Mandow, M. Martín-Guzman, J. Martín-Ávila and J. Serón, "Integration of a Canine Agent in a Wireless Sensor Network for Information Gathering in Search and Rescue Missions," in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, 2018.
- [4] J. Bravo-Arrabal, J. J. Fernandez-Lozano, J. Serón, J. A. Gómez-Ruiz and A. García-Cerezo, "Development and Implementation of a Hybrid Wireless Sensor Network of Low Power and Long Range for Urban Environments," *Sensors*, vol. 21, no. 567, p. 27, 2021.
- [5] R. Quinnell, "Low power wide-area networking alternatives," *EDN Network*, p. 14, 2015.
- [6] Y. Song, J. Lin, M. Tang and S. Dong, "An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN," *Engineering*, no. 3, p. 7, 2017.
- [7] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, BOE-A-2017-12318, Madrid: Gobierno Español, 2020.
- [8] U. Raza, P. Kulkarni and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," IEEE, UK, 2016.
- [9] W. Ayoub, F. Nouvel, A. Ellatif Samhat, J.-C. Prévotet and M. Mroue, "Overview and Measurement of Mobility in DASH7," 25th International Conference on Telecommunications (ICT), St. Malo, 2018.
- [10] LoRa Alliance, "LoRaWAN What is it? A technical overview of LoRa and LoRaWAN," LoRa Alliance, San Ramon, CA, 2015.
- [11] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen and W. M. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things," *Sensors*, p. 18, 9 Septiembre 2016.
- [12] G. Strazdins, A. Elsts, K. Nesenbergs and L. Selavo, "Wireless Sensor Network Operating System Design Rules Based on Real-World Deployment Survey," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, pp. 509-556, 2013.
- [13] A. Kifouche, G. Baudoin, R. Hamouche and R. Kocik, "Generic Sensor Network for Building Monitoring: Design, Issues, and Methodology," *IEEE Conference on Wireless Sensors*, pp. 34-39, 2017.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>)



# IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA MULTI-GNSS EN UN VEHÍCULO TERRESTRE NO TRIPULADO

Edison P. Velasco<sup>1</sup>, Miguel Á. Muñoz-Bañón<sup>2</sup>, Francisco A. Candelas<sup>3</sup>, Santiago T. Puente<sup>4</sup>

Grupo AUROVA, Universidad de Alicante, San Vicente del Raspeig, Alicante, España.

<sup>1</sup>evs25@alu.ua.es, <sup>2</sup>miguelangel.munoz, <sup>3</sup>francisco.candelas, <sup>4</sup>santiago.puente}@ua.es

## Resumen

*En este trabajo se presenta un sistema Multi-GNSS de bajo coste conformado por 3 módulos UbloxNeo-m8n que ha sido implementado sobre un vehículo terrestre no tripulado, y se compara con un sistema GNSS-RTK (u-blox C94-M8P). La redundancia de datos del sistema multi-GNSS permite un mayor número de muestras y un mejor filtrado de datos. Mediante experimentos en distintos circuitos, se han obtenido resultados donde el sistema puede llegar a una frecuencia de muestreo de 3 Hz. Además, el sistema Multi-GNSS presenta un menor error que en un sistema GNSS-RTK (u-blox C94-M8P) cuando éste último no tiene línea de vista directa hacia su antena base RTK.*

**Palabras clave:** Multi-GNSS, robótica móvil, GNSS-RTK, u-blox.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de localización basados en GNSS son muy utilizados en robótica móvil para entornos exteriores no estructurados; debido a su tiempo de muestreo lento, no pueden trabajar por si solos para ofrecer un sistema de referencia de localización. Es por ello que se suelen fusionar varios sensores como *encoders*, IMU, LiDAR o cámaras. Esto permite corregir errores de posicionamiento a lo largo de un trayecto [4] [6].

Los sistemas basados en GNSS-RTK permiten obtener un posicionamiento de gran precisión mediante el uso de correcciones diferenciales teniendo en cuenta las distintas fuentes de incertidumbre [5]. Para esto es necesario tener un par de receptores GNSS, uno de ellos trabajando como estación base RTK y un segundo receptor denominado como rover, el cual está montado sobre el vehículo que deseamos conocer su posición [1]. Mediante el uso de una comunicación UHF, estos receptores corrigen los errores de posicionamiento hasta el rango de los centímetros, presentando la dependencia de una estación base para una correcta geolocalización. Esto puede provocar incertidumbre en las medidas cuando ambos

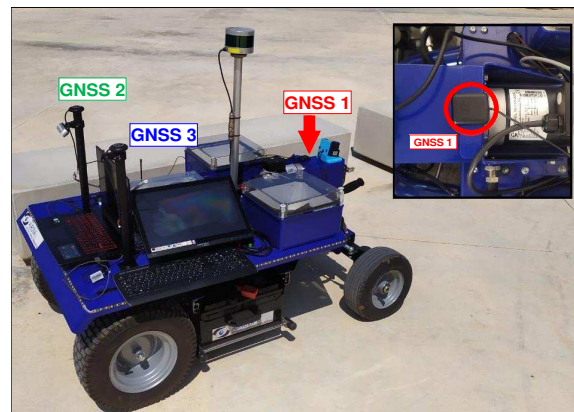


Figura 1: Distribución de módulos UbloxNeo-m8n sobre vehículo terrestre BLUE.

receptores GNSS no tienen una línea de vista directa entre ellos, generando posibles errores de multipath [3].

La ventaja de tener un sistema de múltiples receptores GNSS sobre la misma plataforma es disponer de varias medidas de la posición del robot, y de esta manera, si alguno llegase a fallar, los otros receptores pueden corregir la incertidumbre de la señal. Los autores en [8] aumentan la precisión de posición mediante tres receptores GNSS de bajo coste que tienen un alto error instantáneo, y lo combinan con un sensor IMU a través de un filtro de Kalman. Además, eliminan los valores de datos incorrectos utilizando la distancia de Mahalanobis, una distancia euclidiana entre puntos junto con una matriz de covarianzas.

En este trabajo presentamos un sistema multi-GNSS de bajo coste basado en tres módulos UbloxNeo-m8n distribuidos de manera triangular (Fig.1), el cual permite obtener el posicionamiento del vehículo móvil terrestre BLUE [2] mediante el filtrado de las señales de cada módulo con el dato de distancia euclidiana promedio y la varianza instantánea de longitud y latitud. Además, como datos adicionales para el filtrado, cada módulo tiene un peso de ganancia que es directamente proporcional a la cantidad de satélites que tiene en línea de vista en cada instante de tiempo.

## 2. SISTEMA MULTI-GNSS

### 2.1. DISPOSITIVOS UBLOXNEO-m8n

La familia de equipos NEO-M8 de la marca Ublox, utilizan la recepción simultánea de hasta tres sistemas GNSS, permitiéndoles reconocer múltiples constelaciones simultáneamente, brindando una excelente precisión de posicionamiento. Considerando sus prestaciones, hemos utilizado módulos modelo UbloxNeo-m8n, los cuales han sido configurados con la ayuda del software del fabricante y mediante la hoja de datos proporcionada en su página web[7]. En esta documentación se detalla que estos módulos pueden tener un tiempo de muestreo mínimo de 100 ms, sin embargo, esta configuración solo puede enlazarse con satélites GPS, obteniendo errores de posicionamiento de hasta 2.5 m. Es posible aprovechar la ventaja de enlazar con GPS/Galileo junto con BeiDou o GLONASS, disminuyendo el error de posición, con el inconveniente de aumentar el tiempo de muestreo a 200 ms. La interfaz de comunicación de estos equipos es UART y utiliza los comandos NMEA(National Marine Electronics Association). Debido a su tasa de muestreo, se debe trabajar a velocidades de transmisión de datos de 115200 baudios. Es recomendable que cada módulo UbloxNeo-m8n tenga su última actualización, ya que en ella se guardan las constelaciones a las que se enlazará para el cálculo de posicionamiento.

### 2.2. RECOPIACIÓN DE DATOS

Cada módulo UbloxNeo-m8n está conectado a un puerto serie de un Arduino Mega (Fig.2), aprovechando que esta placa posee un microcontrolador Atmega 2560 que tiene disponible 3 canales de comunicación serie UART. Cada canal está configurado a una velocidad de 115200 baudios con la configuración 8N1 (8 bits de datos, sin paridad y un bit de parada). Para el desentramado de datos NMEA se utiliza la librería de TinyGPS++ disponible de manera gratuita en el administrador de biblioteca del IDE de Arduino.

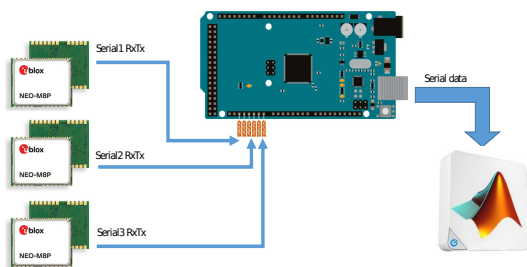


Figura 2: Diagrama de conexión de los módulos UbloxNeo-m8n hacia Arduino Mega y un ordenador.

Todo el procesamiento de filtrado se realiza sobre el mismo microcontrolador Atmega 2560, siguiendo el Algoritmo 1, para después analizar y visualizar los datos resultantes en el software MATLAB. El proceso llevado a cabo por este algoritmo se explica en el siguiente apartado.

#### Algoritmo 1 Filtrado de latitud y longitud

```

1:  $filter_{prev} = 0, 0$ 
2: while True do
3:    $date_{1,2,3} = gnss_{1,2,3}$ 
4:   if Isvalid( $date_{1,2,3}$ ) then
5:      $valid_{1,2,3} \leftarrow 1$ 
6:   else
7:      $valid_{1,2,3} \leftarrow 0$ 
8:   end if
9:    $sat_{1,2,3} = \text{getSatellite}()$ 
10:   $valid_{1,2,3} * = sat_{1,2,3}$ 
11:   $lat_{mean} = \text{mean}[(lat_{1,2,3}) * valid_{1,2,3}]$ 
12:   $long_{mean} = \text{mean}[(lon_{1,2,3}) * valid_{1,2,3}]$ 
13:   $filter_{out} = lat_{mean}, lon_{mean}$ 
14:   $\sigma_{lat,lon} = \text{var}(filter_{out} filter_{prev})$ 
15:  if  $\sigma_{lat,lon} > 2,5e^{-9}$  then
16:     $filter_{out} = filter_{prev}$ 
17:  else
18:     $filter_{prev} = filter_{out}$ 
19:  end if
20:   $filter_{out} \rightarrow \text{sendData}()$ 
21: end while

```

### 2.3. FILTRADO DE DATOS

El resultado de la posición actual del vehículo terrestre se obtiene al filtrar el promedio de las señales válidas de cada UbloxNeo-m8n (eq. 1) y el cálculo de la varianza que posee con su promedio en un muestreo anterior de datos (eq. 2).

$$(\bar{x}_i, \bar{y}_i) = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^3 (x_i, y_i) \right) \quad (1)$$

$$(\sigma_{x_i}^2, \sigma_{y_i}^2) = ((x_i, y_i) - (\bar{x}_{i-1}, \bar{y}_{i-1}))^2 \quad (2)$$

Un dato de geolocalización de cada UbloxNeo-m8n es válido al cumplir los siguientes parámetros:

- Fecha correcta. Debido a la lectura de 200ms, en ocasiones puede existir un error en los datos de posición que se puede descartar al verificar la fecha leída.
- Desviación estándar. Debe ser menor a  $2,5e^{-9}$ , lo que equivale a la varianza permitida en la experimentación.

- **Cantidad de Satélites.** El número de satélites debe ser mayor a 3.

La señal ya filtrada se multiplica por la ganancia de cada módulo, que depende de la cantidad de satélites en cada muestreo (eq. 3).

$$(\hat{x}_i, \hat{y}_i) = \left( \frac{\sum_i Sat_i(\bar{x}_i, \bar{y}_i)}{\sum_i (Sat_i)} \right) \quad (3)$$

### 3. EXPERIMENTOS

La dispersión de cada geolocalización y la señal de salida en latitud y longitud se obtienen con mediciones en un punto fijo (Fig.3). En la experimentación, cada módulo UbloxNeo-m8n se denomina como  $m8n-i$ , siendo  $i$  el número de dispositivo acorde a la distribución de los mismos como se muestra en la Fig.1.

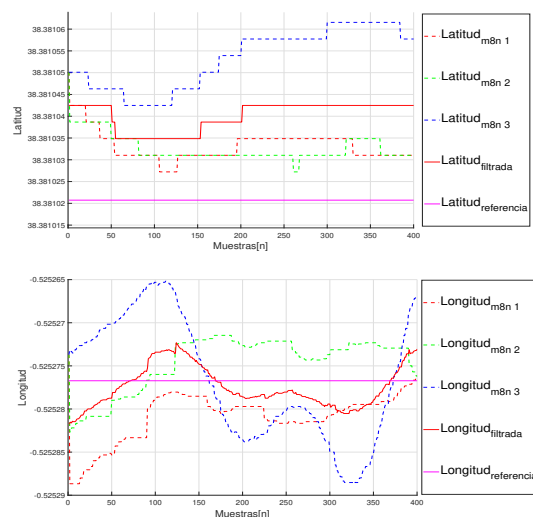


Figura 3: Comparación de latitud y longitud de cada módulo UbloxNeo-m8n, y señal de salida filtrada con un punto fijo de referencia.

El módulo con mayor desviación es el m8n-1, que presenta un error de 3 metros a la posición real. Con la ayuda del promedio y el filtrado por desviación se tiene una señal de salida más ajustada a los puntos de referencia.

En (Fig.4) se observa que la señal resultante del filtrado pasa por los puntos de referencia con menor error que los valores de cada módulo por sí solo. Cabe mencionar que para poder apreciar este experimento se han eliminado los datos basura que cada módulo entregaba, ya que estos se posicionaban en sitios muy alejados al lugar de experimentación. En (Fig.5) se recorre un circuito de 960 metros pasando en su gran mayoría por los puntos de referencia.

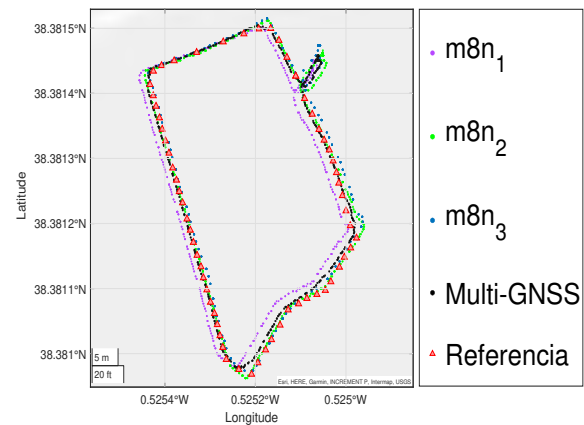


Figura 4: Geolocalización de cada módulo UbloxNeo-m8n y señal de salida filtrada en un circuito cerrado de 150 metros.

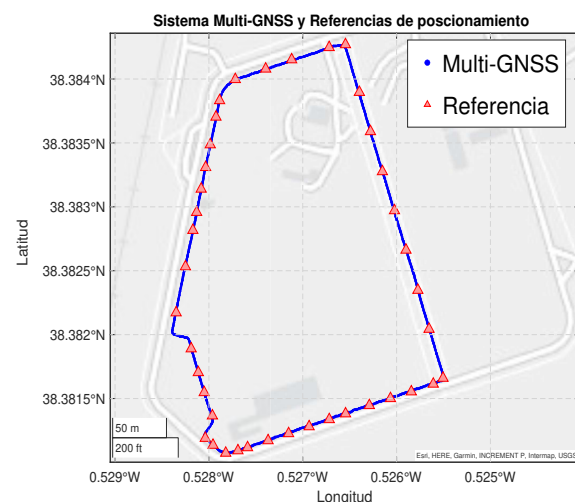


Figura 5: Sistema de geolocalización Multi-GNSS implementado sobre un vehículo terrestre móvil recorriendo y cerrando un circuito de 960 metros.

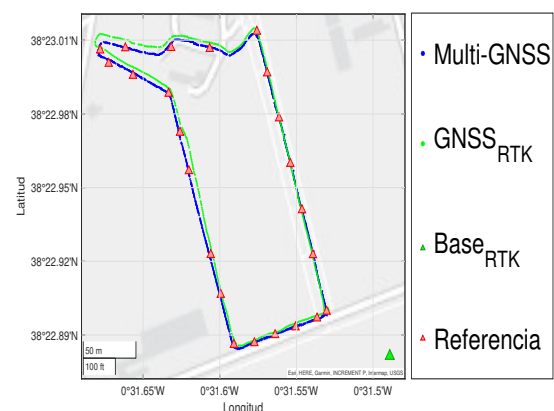


Figura 6: Comparación del Sistema Multi-GNSS propuesto y el Sistema GNSS-RTK.

### 3.1. SISTEMA MULTI-GNSS y GNSS-RTK

En la literatura los sistemas GNSS-RTK tienen errores en el rango de los centímetros, pero esto se logra en condiciones específicas, una de ellas es tener una línea de vista sin interferencias entre el receptor GNSS-RTK y su estación base. Además, estos sistemas suelen tener tiempos de muestreo altos en lo que concierne a la navegación autónoma. Por ello se aplican métodos de fusión de sensores para tener una localización en tiempo real [6].

Para verificar si los errores de un sistema GNSS-RTK pueden disminuir al implementar un sistema Multi-GNSS, ambos sistemas se montaron en el vehículo móvil BLUE y se probaron en un circuito cerrado de 760 metros.

Como se puede observar en la Fig.6, el sistema GNSS-RTK tiene un mayor error de geolocalización cuando se aleja el rover de su estación base, esto puede darse por problemas de multipath o por interferencias con la comunicación UHF de las correcciones de posicionamiento, llegando a perder el enlace entre base y rover. El sistema multi-receptor disminuye este problema al no depender de una estación base corrigiendo el posible error de multipath con el filtrado de datos.

## 4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Al usar varios UbloxNeo-m8n y filtrar sus medidas de posición mediante el método mostrado, se ha logrado una posición del robot con un error menor y un tiempo de muestreo de 3Hz, en comparación al tiempo de 1Hz que posee el sistema GNSS-RTK (u-blox C94-M8P). Además, el uso de una estación base-RTK en cierto modo hace que se dependa del entorno. Esto puede dificultar o limitar ciertas experimentaciones en robótica móvil de exteriores, ya que solo se lograría un buen posicionamiento cuando la estación base-RTK tienen una vista despejada al cielo y también cuando no existen interferencias para la comunicación UHF con el receptor GNSS que está ubicado en el rover. Otro inconveniente del sistema GNSS-RTK (u-blox C94-M8P) es que debe llevar algún tiempo encendido, alrededor de 15 a 20 minutos, para tener datos actualizados de los satélites y poder obtener una geolocalización adecuada para la navegación del vehículo robótico BLUE. Esto no se da con los modelos UbloxNeo-m8n, donde en sus especificaciones se detalla que tienen un tiempo *Cloud star* de hasta 45 segundos que en nuestra experimentación tomó de 1 a 2 minutos. Otra ventaja del sistema de múltiples receptores experimen-

tado es su reducido costo económico en comparación al conjunto de receptores GNSS-RTK (u-blox C94-M8P).

La configuración actual de los módulos UbloxNeo-m8n (Fig.1) genera un punto de referencia de posición en el centro geométrico determinado por dichos módulos. Este punto se debe tomar en cuenta al momento de implementar sistemas de navegación y localización.

Uno de los datos que entrega cada UbloxNeo-m8n es la dirección o curso del mismo, éste no ha sido utilizado en las pruebas, ya que el vehículo BLUE no lo obtiene solamente de la geolocalización, sino de la IMU que está montada. Se podría obtener el curso de cada módulo para hacer más robusto este parámetro en su implementación. También se dispone del dato de compás que entregan los módulos 2 y 3 mediante I2C; estos pueden ser recibidos por el mismo Arduino Mega y al ser tratados se podría conocer la orientación del robot, siendo este dato un parámetro para saber el estado inicial del vehículo BLUE. En esto último se deben hacer experimentos para conocer si la orientación del compás presenta ruido producido por interferencias electromagnéticas.

Actualmente el sistema utiliza el número de satélites para el cálculo de geolocalización, pero también existe el parámetro HDOP (desviación horizontal de la medida de posicionamiento) que puede ser utilizado en lugar del contador de satélites, ya que es un parámetro con mayor resolución (2 dígitos decimales). Esta observación se puede tomar en cuenta en los experimentos futuros siendo una posible mejora al sistema. También, mediante las mediciones realizadas, se observó que cada módulo tiene un error de medición diferente, a pesar de ser sensores del mismo modelo. Esto se podrá compensar dando una ganancia diferente a cada uno de ellos al momento de realizar el promedio de medición, y de esta manera se enfocaría la posición con los datos con menor error. Finalmente se pretende realizar en el Arduino Mega un nodo basado en *rosterial* para que éste envíe el dato de posición directamente al sistema ROS y así poder implementar al actual sistema de localización.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado como parte del proyecto RTI2018-094279-B-I00, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, por la Generalitat Valenciana y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través de las becas PRE2019-088069 y ACIF/2019/088 respectivamente.

## English summary

# INTEGRATION AND EVALUATION OF A MULTI-GNSS SYSTEM IN AN UNMANNED GROUND VEHICLE

## Abstract

*In this work, we present a low cost Multi-GNSS system that has 3 UbloxNeo-M8N modules in an Unmanned Ground Vehicle and this is compared with a GNSS-RTK system (u-blox C94-M8P). Data redundancy of the Multi-GNSS system allows a greater number of samples and better filtering data. Through experiments on different circuits, we obtained sample rates of 3 Hz. In addition, the Multi-GNSS system has a smaller error compared to a GNSS-RTK system (u-blox C94-M8P) when it doesn't have a direct line view of the RTK base station.*

**Keywords:** Multi-GNSS, Mobile robotics, GNSS-RTK, u-blox.

## Referencias

- [1] Iván del Pino, Miguel Á. Muñoz-Bañón, (5-7 de Septiembre de 2018). Integración y evaluación de un sistema RTK de bajo coste en un vehículo terrestre no tripulado, *Jornadas de Automática*, pp 349-355.
- [2] Iván del Pino, Saúl Cova, (2018). Presenting BLUE: A robot for localization in unstructured environments. *IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, pp 130-135. doi:10.1109/ICARSC.2018.8374172
- [3] J. Chen, Jun. Wang. (2021). Performance Analysis of a GNSS Multipath Detection and Mitigation Method with Two Low-cost Antennas in RTK Positioning. *IEEE Sensors Journal*. doi:10.1109/JSEN.2021.3068767.
- [4] Li Tuan, Hongping Zhang, (2021). Tight Fusion of a Monocular Camera, MEMS-IMU, and Single-Frequency Multi-GNSS RTK for Precise Navigation in GNSS-Challenged Environments. *Remote Sensing*, 11(6). url: www.mdpi.com/2072-4292/11/6/610.
- [5] María S. Garrido-Carretero, (2019). Low-cost GNSS receiver in RTK positioning under the standard ISO-17123-8: A feasible option in geomatics. *Measurement*, 137, pp 168-178. doi.org/10.1016/j.measurement.2019. 01.045
- [6] Miguel Á. Muñoz-Bañón, Iván del Pino (2019). Framework for Fast Experimental Testing of Autonomous Navigation Algorithms. *Applied Sciences*, 9(10). url: www.mdpi.com/2076-3417/9/10/1997
- [7] U-BLOX. NEO-M8-Datasheet. Recuperado el 15 de junio de 2021, de [https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3\\_DataSheet\\_UBX-15031086.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_UBX-15031086.pdf)
- [8] Yun-Ki Kim, Seung-Hwan Choi (31 de octubre - 2 de noviembre de 2013). Enhanced Outdoor Localization of Multi-GPS/INS Fusion System Using Mahalanobis Distance. *10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, pp 488-492



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# DESIGN OF A DYNAMIC MOCK-UP BENCH FOR TESTING ROBOTIC INTERVENTIONS

Luana Barbosa Pina Pereira  
luana.barbosa.pina.pereira@cern.ch

Carlos Veiga Almagro, Luca Rosario Buonocore, Raul Marin Prades, Mario Di Castro and Alessandro Masi  
carlos.veiga.almagro, luca.rosario.buonocore, raul.marin.prades, mario.di.castro, alessandro.masi @cern.ch

## Abstract

*When a robotic intervention is required in hazardous facilities (e.g. particle accelerators or nuclear plants), it is commonly not possible to test the operation on-site in advance - a considerable challenge since robotic interventions usually require specific tasks for each location -, precluding the team from demonstrating the feasibility of the operation. It becomes mandatory to develop a particular mock-up for each operation, unsuitable for reusing it in future missions. To solve this problem, a general dynamic mock-up bench was designed, allowing to centre the testing of all remote handled tasks and to choose the best set of robots to perform them.*

**Keywords:** Mock-ups, Robotic interventions, Telerobotics, Hazardous environments.

Physical tests are usually performed in MRO laboratory, allowing the team to demonstrate the feasibility of the operation, to perceive and solve design-related problems, to figure out the best position for environmental cameras, to test different hypotheses (e.g. the defect of a component), among other possibilities.

To assist this process, a general mock-up bench was conceived. The bench contains several modules that allow MRO robots to test all its features (e.g. cutting materials, plugging/unplugging connectors, fasten bolts, sense external impulses), allowing tests for several operations in the same intervention, reducing time for preparing a specific mock-up area for each test.

This work presents the process of general conception, consideration of restrictions, conceptual and detailed design of all subcomponents of the mock-up bench.

## 1 INTRODUCTION

In hostile environments, to decrease human exposure to hazards, Remote Handling (RH) tasks - the action of using a mechatronic device to execute remote-controlled operations - are often needed. At the European Organisation for Nuclear Research (CERN) [1], the Mechatronics, Robotics & Operation (MRO) section is responsible for planning and safely performing RH operations.

MRO section maintains a pool of robots able to perform various tasks, e.g. disposing of dangerous items, doing reconnaissance and monitoring, transporting/positioning components and using sensors for several purposes (radiation and temperature mapping, etc). When a CERN's section requires a robotic intervention, MRO and the requesting section work together to design RH-friendly systems to be handled by MRO robots.

After the mechanical design process, it is essential to test the operation before performing on-site interventions. These tests are performed first virtually (CAD and CAE software and Virtual Reality simulation) and afterwards physically (mock-up tests).

## 2 POOL OF ROBOTIC SYSTEMS

CERN has a considerable and expanding pool of robots that can be divided in two groups according to their specifications:

- *CERN-designed robots:* CERN counts with several self-designed robots, mainly focused on modularity and adaptability: using a lifting stage to comply with a range of work heights, integrating several kind of tools, etc. Some of the most important CERN-designed robots are CERNBot 1.0 [2] and 2.0 (wheeled modular robots), CRANEBot (non-wheeled robot that performs upside-down tasks carried by an overhead crane - see Figure 1) and TIM [3] (Train Inspection Monorail - see Figure 2 -, a robot designed for providing remote-controlled actions in the Large Hadron Collider tunnel). The communication operator/robots is established via WiFi and 4G adapters, allowing, from the surface, to teleoperate them at the required scientific facilities/tunnels at CERN.
- *Commercial robots:* Telex and Teodor are tele-operated robots designed by Telerob



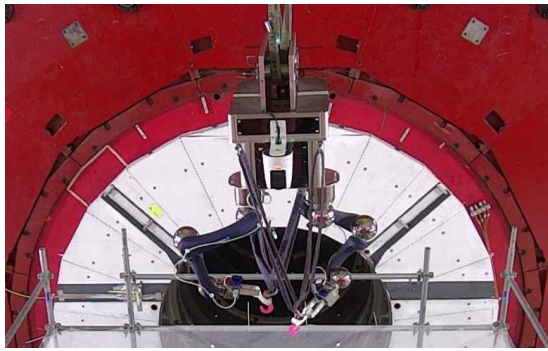


Figure 1: CRANEBot with dual arm configuration during an intervention at CMS experiment

GmbH [4]. Since Telexmax is a highly accurate but light-weighted robot, and Teodor is a heavy robot with a high payload and low level of accuracy, they compensate each other disadvantages. Besides, for having tracked wheels, both robots are capable of climbing stairs and pass through obstacles of up to 50 cm of height. At last, the two robots require the presence of the operator close to the intervention area.



Figure 2: The Train Inspection Monorail hanging from the LHC's roof rail

### 3 MECHANICAL DESIGN

With the presented information on MRO robots, the design process of the bench was started. Its stages are detailed in the next subsections.

#### 3.1 REQUIREMENTS

Based on the technical specifications of the robots and on MRO RH operations expertise, the scope of the design was set as following:

- The bench must bear several modules that allow MRO robots to test all its features, e.g. cutting materials, plugging/unplugging con-

nectors, fasten bolts, sense external impulses (temperature, radiation, etc).

- These modules must be able to be operated from all work height levels of MRO robots, namely from 600 to 2000 mm from ground level.
- The bench must support a mass of approximately 100 kg (estimated overall mass of the modules attached to it), and its structure must withstand the maximum force exerted by Teodor, MRO's strongest robot (approximately 1000 N), and its correspondent torque (dependent on the dimensions of the bench).
- The bench must be attached to the existing infrastructure on MRO laboratory (portrayed in Figure 3 alongside with the position chosen for the bench). To allow the operation of robots from the upper side (e.g. CRANEBot) and from the down side (e.g. CERNBot), no component can be placed above or under it.

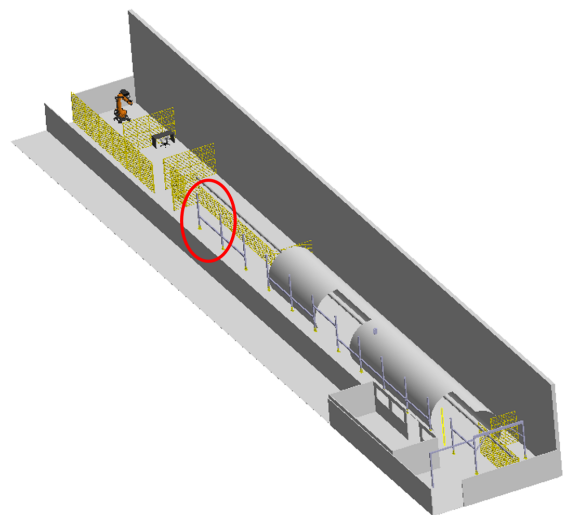


Figure 3: LHC mock-up at MRO laboratory

- At last, all modules must be accessed by both sides of the bench, allowing to test robots with a fix position, e.g. TIM.

#### 3.2 CONCEPTUAL DESIGN

To fit the requirements set, possible concepts for the bench were conceived and analysed.

##### 3.2.1 Independent linear actuators

Firstly, to comply with the requirement of having a work height range from 600 mm to 2000 mm, a lifting mechanism is necessary.

The first concept considered was linear actuators, lifting systems with integrated motor and linear driving mechanism. Commercial actuators as described can be seen in Figure 4.



Figure 4: Commercial linear actuators [5]

One actuator attached to each side column would be necessary. Since they act independently, there would be no need for a mid-placed motor, abiding by the requirement of not placing any components below or above the bench. However, a control unit to coordinate the movement of the actuators would be necessary, increasing the complexity of the system.

### 3.2.2 Screw jacks

The second lifting concept analysed was screw jacks - rotating screws and linear guides positioned on each side of the bench. The system can be seen in Figure 5.

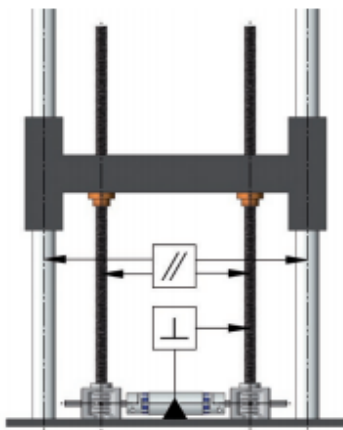


Figure 5: Screw jacks and guides layout [6]

This system supports the load and height range required. However, it depends on a single motor to actuate both screws - and the motor must be placed either under the bench, above it or on it. The first and second options do not comply with the requirement of not using the space directly under or above the bench.

The third option, placing the lifting motor on the bench, is at first possible: placed on the center of

the bench, a motor is attached to two shafts that connect it to worm wheel gearboxes. However, by requirement, the table must also rotate to allow access to all modules from both sides. The tilt of the bench would make it impractical to connect the motor to the gearboxes by shafts - it would require an extra mechanism to prevent the motor from turning, once again increasing the complexity of the system.

### 3.2.3 Steel cable

To solve the problem of needing only one lifting motor but not placed either above, under or on the bench, a third concept was conceived.

It counts with a steel cable attached to one column, passing through the bench and ending on a hoist reel on the second column. In this way, only one lifting motor is necessary and it is placed outside of the upper or down operation space.

Pulleys are used to redirect the cable. Also, to keep the orientation of the bench, the laboratory columns were chosen as guides.

Since this solution solves the main requirements for the design and is less expensive than the previous analysed systems, it was selected as the lifting system concept.

### 3.2.4 Harmonic drive

Having decided on the steel cable concept for the lifting system, it is necessary to choose a rotary mechanism that does not interfere with it - a system with a hollow shaft, so the cable passes through the rotation axis of the bench.

The first concept considered was a harmonic drive, consisting of a synchronous servomotor and a gear unit. A commercial system as described can be seen in Figure 6.

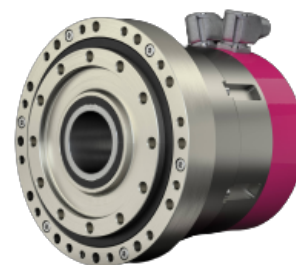


Figure 6: Commercial harmonic drive [7]

This concept delivers suitable power, although its price is elevated compared to more simple assemblies. More crucial to the project, however, is its capability of handling the torque generated by Teodor. The critical case would be Teodor ap-

plying 1000N on the edge of the bench. Based on the size of the modules to be attached to the bench, an estimation of its dimensions would be 600 mm x 1800 mm, resulting in a torque of 300 N/m. Therefore, the harmonic drive brake must be able to handle this load.

The torque to be handled by the brake motor is considerably large compared to the torque actually required to turn the bench, meaning the harmonic drive would be overdimensioned.

### 3.2.5 Manual rotary system

To be able to handle the critical case analysed previously without overdimensioning the design, a manual rotating system was conceived.

It is composed by fixed parts (a frame with holes spaced circularly), movable parts (perforated supports attached to the bench) and pins to connect both, allowing the bench to be tilted and locked.

Despite not being motorised and having only a finite number of angular positions, this solution does not rely on a motor brake to support external efforts, is more cost-effective and does not depend on a control unit. For these reasons, this concept was chosen as the rotary system of the bench.

## 3.3 DETAILED DESIGN

Having chosen the general concept of the bench, the detailed design of each subsystem was developed as following:

### 3.3.1 Bench frame

To allow attaching and repositioning the test modules, the bench is composed of standard aluminium profiles. As previously discussed, its general dimensions were set as 600 mm x 1800 mm. In addition, the bench features horizontal and vertical-oriented profiles to facilitate the positioning of the modules, as shown in Figure 7.

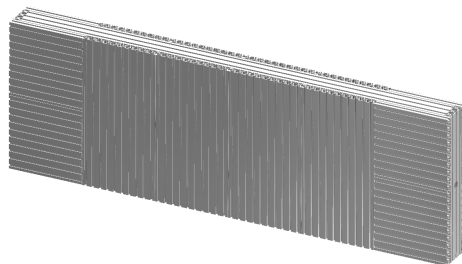


Figure 7: Bench frame

### 3.3.2 Lifting mechanism

Following the choice of a steel cable concept, instead of separately choosing a cable, a motor and a gearbox, it was opted for a commercial electric hoist commonly used for lifting goods. The system is composed of a reel for the cable, an electric motor and a control panel for operating the system. A commercial hoist as described can be seen in Figure 8.



Figure 8: Commercial electric hoist [8]

The electric hoist will be rigidly fixed on the top part of the right column. The cable will be passed through the bench and fixed on the top of the left column. To change the orientation of the cable, two commercial pulleys were chosen. In addition, side supports were designed to hold the pulleys, with linear guides connecting them to the columns. Both the hoist and the linear guides were dimensioned to fit the design height and load range. The lifting system can be seen in Figure 9.

It is noted that with heavy objects attached to the bench, the cable will expand elastically due to the load - therefore, the bench will have its position lowered. Nevertheless, since the bench will be operated statically, its height can be corrected using its remote control on the right side.

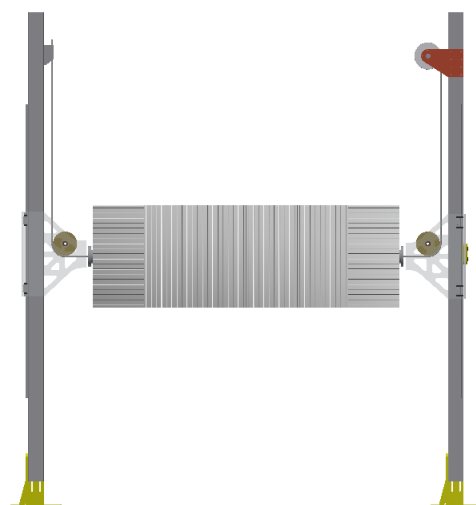


Figure 9: Lifting mechanism

### 3.3.3 Rotating mechanism

To make sure the test modules can be accessed by all positions needed, the circular frame was set to have twenty equally spaced holes, as seen in Figure 10. It will be attached to the side supports of the lifting system.

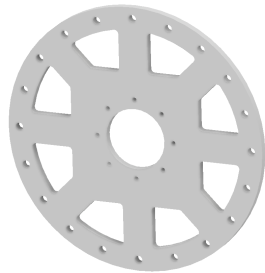


Figure 10: Circular frame

Linked to this frame there is a crossed roller bearing. This type of bearing is designed to support high loads, being suitable to handle Teodor's strength. The inner part of the bearing, on its turn, is connected to the aluminium profile of the bench frame.

At last, two perforated supports are attached to each side of the bench, allowing four fixation points. The supports, as well as the positioning of the bench, can be seen in Figure 11.

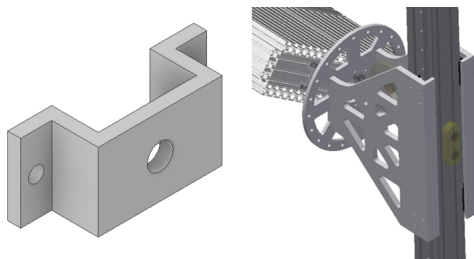


Figure 11: Rotating mechanism

Pins must be used to position and lock the bench. These pins and the side supports will handle the efforts the bench is submitted to, avoiding the need for a motor brake.

The final layout of the test bench can be seen in Figure 12.

## 4 SIMULATION EXPERIMENTS

The bench has been validated conceptually by integrating it into a realistic simulation server to test the way the robots can interact with it. In Figure 13, TIM robot can be seen facing the bench in order to perform a test with a robotic arm. Also, CERNBot mobile robotic platform is facing the

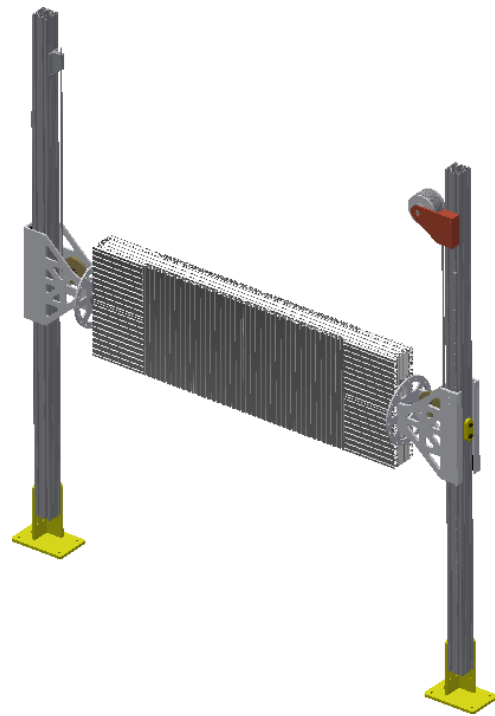


Figure 12: Final layout of the test bench

other side of the bench. By simulating interventions, it was proved that all robots can properly operate the bench within the height and rotational range set. The simulation experiments have been performed by using a simulation server which enables operators to get trained before facing a real intervention, as explained in [9].

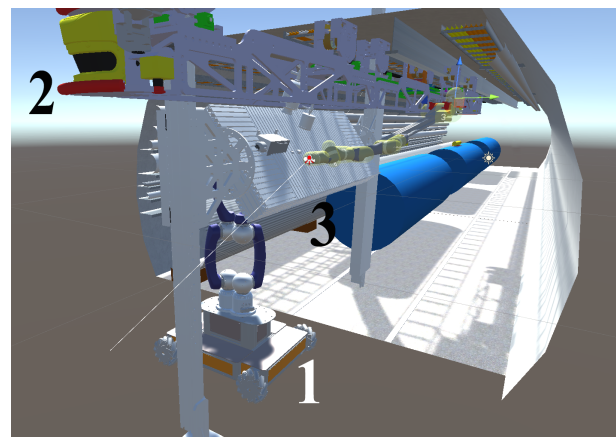


Figure 13: Bench simulation. The TIM (2) acts on the test bench (3) upstream side, which is installed next to the LHC mock-up, meanwhile CERNBot (1) acts on the its downstream side

## 5 CONCLUSIONS AND FURTHER WORK

This paper has presented the current state of the design of a dynamic mock-up bench for testing robotic interventions. The bench offers a modular solution, enabling a realistic validation of heterogeneous operations.

Further steps will focus on the design of sensorized robotic tools and bench appliances (e.g. screws and connectors), which will allow the robots to perform repetitive tasks in a safe and autonomous manner. The sensors installed on the bench appliances will enable the use of machine learning algorithms to train the robots for autonomous operations.

## References

- [1] Lefevre, C. (2008). The CERN accelerator complex (No. CERN-DI-0812015).
- [2] Di Castro, M., Buonocore, L. R., Ferre, M., Gilardoni, S., Losito, R., Lunghi, G., & Masi, A. (2017, October). A dual arms robotic platform control for navigation, inspection and telemanipulation. In Proceedings of the 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems (ICALPCS 2017), Barcelona, Spain (pp. 8-13).
- [3] Di Castro, M., Tambutti, M. B., Ferre, M., Losito, R., Lunghi, G., & Masi, A. (2018, August). i-TIM: A robotic system for safety, measurements, inspection and maintenance in harsh environments. In 2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR) (pp. 1-6). IEEE.
- [4] <https://www.telerob.com/en/>
- [5] <https://www.boschrexroth.com/en/us/products/product-groups/linear-motion-technology/topics/linear-motion-systems/index>
- [6] <https://www.tea-hamburg.de/katalog/img/cms/Datenbl%C3%A4tter/Spindelhubgetriebe%20mit%20rotierender%20Spindel%20-%20Screw%20Jacks%20with%20Rotating%20Screw.pdf>
- [7] <https://harmonicdrive.de/de/produkt/antriebe-mit-hohlwelle/canisdrive>
- [8] <http://www.pandahoist.com/product/pa-mini-electric-hoist/>
- [9] Lunghi, G., Marin, R., Di Castro, M., Masi, A., & Sanz, P. J. (2019). Multimodal

human-robot interface for accessible remote robotic interventions in hazardous environments. IEEE Access, 7, 127290-127319.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



# EXOESQUELETO HÍBRIDO PARA REHABILITACIÓN DE LAS EXTREMIDADES SUPERIORES

Aldo-Francisco Contreras-González, David Pont-Esteban, José Luis Samper-Escudero, David Cantalejo-Escobar, Miguel-Ángel Sánchez-Urán, Manuel Ferre (m.ferre@upm.es)

CAR UPM-CSIC, Universidad Politécnica de Madrid

## Resumen

*Las últimas décadas han sido testigos de un rápido y vasto desarrollo de robots para la rehabilitación física que permiten una planificación eficiente del proceso de rehabilitación en términos de costo, duración de sesiones y disponibilidad del terapeuta. Este proyecto tiene como objetivo evaluar cualitativamente un exoesqueleto para la rehabilitación del tren superior. El dispositivo expone un acercamiento al desarrollo de un dispositivo con el efector final anclado a tierra que realiza la actuación sobre un exoesqueleto acoplado al cuerpo del sujeto mediante cables. Se documenta la experimentación con pacientes que padecen del tendón supraespinoso realizando una serie de movimientos dictados por un médico.*

**Palabras clave:** exoesqueleto, rehabilitación robótica, miembros superiores.

## 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad se está observando un auge en la incorporación de robots en el sistema de salud, principalmente en aplicaciones de rehabilitación y cirugía [1]–[3]. La rehabilitación se define como un conjunto de intervenciones encaminadas a optimizar el funcionamiento y reducir la discapacidad en personas con afecciones de salud en la interacción con su entorno [4]. La rehabilitación física es el tipo de rehabilitación más popular y se puede lograr de manera convencional a través de la interacción física entre los pacientes y los terapeutas. Sin embargo, es un proceso costoso y requiere el trabajo a tiempo completo de un fisioterapeuta sobre el paciente.

Por otro lado, la incorporación de sistemas automáticos ha creado un cambio de paradigma en la rehabilitación médica en la última década, debido al crucial papel que juegan estos en la restauración total o parcial de las funciones motoras. El uso de robots de rehabilitación permite la planificación eficiente del proceso de rehabilitación en términos de costo, duración de las sesiones, las herramientas necesarias y la disponibilidad de un

terapeuta [5], [6]. Según la clasificación de Gassert [7] para robots de rehabilitación, ésta abarca tres diferentes ramas: exoesqueletos fijos, robots con el efector final fijo y Exoesqueletos Adaptables al Cuerpo (EAC) (del inglés, *Wearable Exoskeleton*), siendo esta última una tecnología emergente. Los dispositivos con efectores finales anclados a tierra ó con efector final fijo, son aquellos que su estructura está anclada al suelo y únicamente el efector final interactúa sobre el usuario. Generalmente lograrán una mayor dinámica de movimiento y permitirán la representación de una gama más amplia de impedancias que los dispositivos de exoesqueleto fijos donde las articulaciones proximales necesitan mover las articulaciones distales. Actualmente existen desarrollos de dispositivos como [8]–[11] que actúan mediante cables para realizar movimientos sobre las extremidades superiores.



Figura 1: Exoesqueleto híbrido para rehabilitación

Este documento propone un acercamiento al desarrollo de un dispositivo con el efector final fijo que realiza la actuación sobre un EAC mediante cables y acoplamiento semi rígidos (Fig. 1), utilizando algoritmos de control personalizados y dispositivos electrónicos desarrollados específicamente para realizar movimientos del hombro. En la Sección 2 se abordan diferentes propuestas por los autores que dan pauta al desarrollo del estudio presentado en la Sección 3, donde se abordan el desarrollo mecánico, electrónico y el de



control. En la Sección 4 se explican las pruebas realizadas y las características de los sujetos de la validación experimental y finalmente en la Sección 5 se exponen a detalle las conclusiones.

## 2 ANTECEDENTES

El equipo de investigación ha propuesto anteriormente un diseño textil adaptable al cuerpo que ayuda a la actuación para los movimientos de hombro combinando capas textiles con costuras que se ajustan a la fuerza. Este diseño también incluye piezas para guiado, anclaje y soporte de cables. Estas piezas emplean diferentes métodos de confección para facilitar la fabricación, el uso y la limpieza [12]. Por otro lado, el equipo ha desarrollado un exoesqueleto con cable y textil que se puede llevar puesto para ayudar a flexionar el codo y el hombro. En esta interfaz de acoplamiento se combinan diferentes tejidos y patrones de costura para promover la distribución de la fuerza y la adaptación a la anatomía del usuario [13]. Además, se ha desarrollado un exoesqueleto flexible que está equipado con una transmisión por cable en la que el par es generado por dos motores de corriente continua. Se ha simulado e implementado un controlador de modo de deslizante *super twisting* [14] para los movimientos de flexión y extensión de codos y hombros [15]. Finalmente, se han estudiado métodos para estimar la orientación y posición del hombro utilizando diferentes tipos de sensores y algoritmos [16][17].

## 3 DISEÑO DEL EXOESQUELETO

Este artículo presenta el exoesqueleto ExoFlex. Este exoesqueleto tiene como objetivo ser una herramienta útil en terapias de rehabilitación pasiva para el hombro. De acuerdo al estudio desarrollado en [18] las terapias de rehabilitación se pueden dividir en dos grandes grupos. Por un lado, la rehabilitación pasiva, en la que el usuario deja su extremidad inerte y el exoesqueleto la moviliza. Se utiliza comúnmente en etapas iniciales de la rehabilitación para prevenir la atrofia muscular. Por otro lado, se encuentra la rehabilitación activa, que engloba las terapias en las que el usuario realiza una movilización de la articulación en cuestión y el robot la asiste o la frena, según el objetivo de la terapia.

El rango de movimiento del hombro alcanzable por el exoesqueleto (Fig.2) está comprendido entre los 0° y los 160° para cualquier movimiento del hombro comprendido entre la flexión-extensión pura y la abducción-aducción pura [19].

### 3.1 MECANISMOS DE ACTUACIÓN

El objetivo de la estructura fija, es colocar una polea como efector final en una posición calculada, realizando la actuación en forma de trayectorias que moverá a través de un cable de acero inoxidable con recubrimiento de nylon de alto rendimiento, el textil que se acopla en el brazo del usuario, generando movimientos en forma de rehabilitación.



(a) Diseño CAD que muestra los movimientos de los actuadores



(b) Modelo real que muestra el efector final (naranja) y telas de acoplamiento (azul)

Figura 2: Diseño del exoesqueleto

#### 3.1.1 Diseño mecánico

Utilizando perfiles de aluminio ligero de 45mm x 45mm con ranura de 10mm, se ha construido de forma modular una estructura fija que compone al exoesqueleto (Fig. 2a). En todas las uniones se han utilizado tornillos M8.

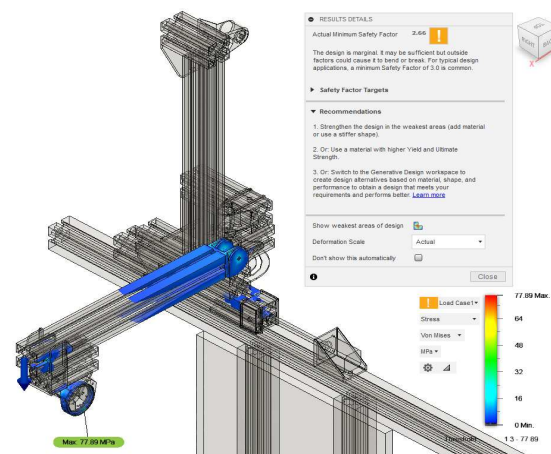


Figura 3: Estrés en la estructura y factor de seguridad de 2.66 para 100 N en el punto más alejado del centro de rotación

Se han incorporado elementos de desplazamiento que con la ayuda de los actuadores se realizan

los movimientos lineales entre los perfiles. El mecanismo también cuenta con dos elementos de juntas angulares para los movimientos rotacionales. En la Figura 2a se muestran los desplazamientos de cada uno de los actuadores. En el plano anatómico, el desplazamiento lineal del exoesqueleto marcado en rojo, equivalente al eje del pano transversal y en verde una rotación sobre este mismo plano. En negro se representa a una rotación del perfil saliente en el plano sagital o coronal, dependiendo del ángulo de rotación verde. Finalmente, en azul, una traslación lineal sobre el perfil. Es posible realizar una elevación de forma manual a toda la estructura para dar ajuste a la altura. En la Figura 2b se denota en color naranja el efector final del exoesqueleto, y unido por un cable de acero con cobertura de nylon está la tela de acople para el brazo, como se muestra en la Figura 1.

Se ha simulado un estudio de estrés estático para los elementos que conforman la estructura utilizando una fuerza de 100N a 0.4 metros, que equivale al largo del brazo saliente de la estructura, obteniendo un factor de seguridad de 2.66 (Fig. 3). Cabe mencionar que el peso promedio de un brazo de adulto mayor es de aproximadamente 6 kg. Las piezas de la actuación final son las que mayor esfuerzo sufren, siendo el pasador del elemento de unión rotacional el que alberga mayor concentración de estrés.

### 3.1.2 Actuadores

Como sistemas de actuación se ha utilizado un motor lineal paso a paso Longrunner Nema-17 LD08, con un recorrido de 0.8m, tres motores de rotación de corriente continua Maxon DCX22S GB KL 48V con reductor planetario GPX26HP 794:1 y encoder ENX16 EASY 1024IMP, uno para el sistema de elevación y otro para la actuación de la polea que mueve a la tela del hombro y además, un actuador lineal Justech DC 12V Motor con 0.15m de recorrido para la rotación sobre el plano transversal. A cada actuador se le ha añadido un sensor de límite óptico EE-SX3009-P1/-SX4009-P1 para identificar los límites de inicio o fin de carrera.

## 3.2 ELECTRÓNICA Y CONTROL

En la presente sección se abordan el diseño del sistema electrónico del exoesqueleto junto con la arquitectura de control propuesta.

### 3.2.1 Sistema electrónico

El sistema electrónico del exoesqueleto se muestra en la figura 4. Se ha utilizado el microcontrolador de 32 bits y doble núcleo LAUNCHXL-F28379D

de Texas Instruments como interfaz con el sistema de actuación y para implementar el control de bajo nivel. El sistema de actuación está conformado por los propios actuadores (4 motores de corriente continua y un motor paso a paso), un encoder y un sensor de corriente para cada uno de los motores DC, y un driver para cada motor. Se ha diseñado una PCB llamada ALICE (*Assistive Limb Control Electronics*) que contiene todo el hardware necesario (sensores de corriente, ADCs, interfaces de comunicación y drivers para motores) en una forma modular y compacta. Esta placa de estilo *shield* se ensambla sobre la placa del microcontrolador.

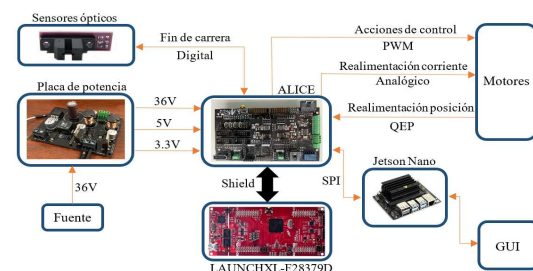


Figura 4: Sistema electrónico

Los encoders utilizados son de cuadratura y alta resolución. El conteo de los pulsos debe realizarse mediante un contador hardware, dado que la elevada frecuencia de recepción de pulsos no permite hacer un conteo mediante interrupciones. La placa LAUNCHXL-F28379D lleva embebidos tres módulos de conteo hardware para encoders, por lo que adicionalmente se ha añadido un módulo externo de conteo de pulsos que se comunica con el microcontrolador mediante SPI y aligera en gran medida la carga software del microcontrolador.

Se ha desarrollado una aplicación de tiempo real multi-hilo para controlar el exoesqueleto. De esta forma se tiene un control preciso sobre la frecuencia con la que se obtienen los datos provenientes de los distintos sensores, el periodo de control y la velocidad de las comunicaciones. El diseño de la aplicación es modular, lo que facilita adaptar el sistema ante nuevas necesidades que pueden ir surgiendo durante el desarrollo del dispositivo.

Una Jetson Nano se comunica con el microcontrolador vía SPI para transmitirle las referencias de movimiento y almacenar los datos obtenidos durante las sesiones de trabajo para su posterior análisis. Sobre la Jetson Nano se ha implementado una interfaz gráfica de usuario (GUI) para poder interactuar de forma sencilla y amigable con el exoesqueleto y monitorizar los datos en tiempo real. El hecho de que la electrónica y el software sean diseños propios permite obtener una arquitectura altamente adaptada a las necesidades del

exoesqueleto.

### 3.2.2 Control

A la hora de diseñar la arquitectura de control del sistema, se observan tres dificultades fundamentales. La primera de ellas es que algunos parámetros del modelo dependen de las características físicas del sujeto que vaya a utilizar el exoesqueleto. Ya que el brazo del sujeto es parte del modelo, parámetros como la masa (y su distribución) así como sus dimensiones, que pueden ser considerablemente variables entre sujetos, lo cual genera incertidumbre en la descripción matemática del sistema. Por otro lado, la parte flexible del sistema (el acople textil entre la estructura rígida y el brazo del usuario) es difícilmente situable sobre un sujeto en una posición exacta de forma sistemática. Adicionalmente, el acople textil resulta ser una fuente de no-linealidades, como holguras e histéresis. En último lugar, dado que el exoesqueleto es un sistema en el que existe interacción con el humano, es posible que éste, ya sea voluntaria o involuntariamente, genere perturbaciones sobre el sistema. El controlador debe ser robusto a estas posibles perturbaciones para garantizar un comportamiento estable y seguro durante las sesiones de rehabilitación.

Tal y como se ha mencionado en la sección 3, el exoesqueleto está concebido actualmente para terapias de rehabilitación pasiva, en las que las articulaciones de los sujetos se movilizan por parte del exoesqueleto acorde a trayectorias programadas. Esto conlleva ineludiblemente el diseño de un controlador de posición para controlar las rotaciones de las articulaciones. En terapias de rehabilitación activa, suele ser también necesario un controlador de posición para implementar controladores de admitancia/impedancia [20] [21], por lo que el control de posición se erige como un elemento fundamental en el control de exoesqueletos.

Por todos los motivos anteriores, se propone el uso de un controlador en modo deslizante (SMC) para el control de la orientación del hombro, similar al control utilizado en trabajos anteriores [14][15], dadas sus buenas propiedades de robustez ante perturbaciones e incertidumbre en el sistema. Concretamente, se propone el uso de un controlador *supertwisting*, que destaca frente a otros controladores en modo deslizante por su atenuación del *chattering*, ruido de alta frecuencia acoplado a las señales de control debido a la naturaleza discontinua de los controladores deslizantes. Este controlador se aplica sobre los cuatro motores de corriente continua del sistema. La ley de control para el motor  $i$  viene dada por (1) a 4

$$u_i = c_i |\sigma_i|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\sigma_i) + w_i \quad (1)$$

$$\dot{w}_i = b_i \text{sign}(\sigma_i) \quad (2)$$

$$c_i = 1.5\sqrt{C_i}; b_i = 1.1C_i \quad (3)$$

$$\sigma_i = \sigma_{i1}e_{i1} + \sigma_{i2}e_{i2} + \sigma_{i3}e_{i3} \quad (4)$$

donde, para el motor  $i$ ,  $u_i$  es la acción de control,  $\sigma_i$  es su superficie de deslizamiento (dada por los coeficientes  $\sigma_{ik}$ ),  $w_i$  es el término para la atenuación del *chattering*,  $C_i$  es un parámetro de control y los  $e_{ij}$  son los errores asociados a la referencia de estado del motor  $i$ , constituido por la posición, velocidad y corriente del mismo.

El motor paso a paso de posicionamiento horizontal de la estructura se controla en bucle abierto, lo cual es perfectamente factible puesto que, tanto la velocidad como el par a aplicar por el motor son lo suficientemente bajos como para que no se pierda ningún paso.

### 3.3 CONTROL DE ALTO NIVEL

Como se menciona anteriormente, se ha utilizando una computadora Jetson Nano de Nvidia, que dispone de diferentes puertos de comunicación. Se ha elegido el protocolo SPI para realizar la comunicación entre ambas placas. La interfaz gráfica (5) ha sido desarrollada utilizando Glade y con lenguaje C se han implementado todas las funcionalidades. La interfaz es capaz de almacenar toda la información recibida de los motores a una velocidad de  $\sim 500$  Hz. Además es posible visualizar todos los estados y controlar cada motor por separado o en su modo de rehabilitación.

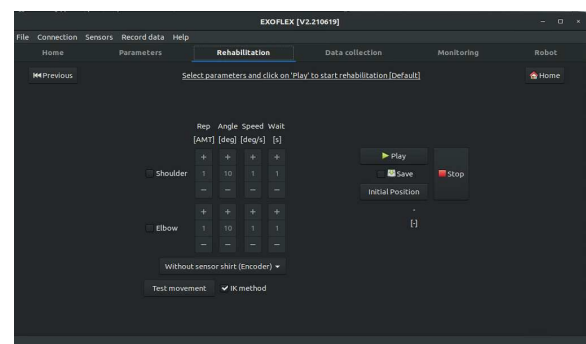


Figura 5: GUI: Modo rehabilitación

## 4 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Se han realizado pruebas con dos pacientes que se encontraban actualmente en fase de rehabilitación. El primero de ellos es un varón de 78 años con cirugía de sutura del tendón supraespinoso. El

segundo sujeto es una mujer de 60 años con tendinitis del tendón supraespinoso. El objetivo de estas pruebas es tener una primera toma de contacto con pacientes de hombro para evaluar las impresiones y sensaciones que éstos tienen al realizar una serie de movimientos.

Dado que los pacientes no se encontraban en fases avanzadas de su tratamiento, la referencia angular de elevación del hombro siempre se mantuvo por debajo de los 90°. Durante las pruebas, siempre hubo un profesional sanitario para guiar el proceso. Se han realizado movimientos de flexión-extensión pura, abducción-aducción pura y un movimiento intermedio con el hombro girado 45° sobre el plano transversal.

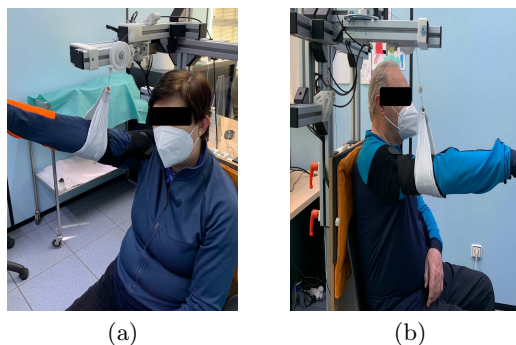


Figura 6: Pacientes utilizando el ExoFlex

Cada serie de movimientos se realizó de la siguiente manera. En primer lugar, el paciente se sentó en el espacio de trabajo. A continuación se configuró la estructura en la forma adecuada para realizar la elevación del hombro en el plano deseado (flexión, abducción o el plano intermedio). Posteriormente, se fue recogiendo cable poco a poco para ir elevando gradualmente el brazo en ese plano, según las indicaciones del terapeuta. Cuando el ángulo alcanzado por el brazo era del agrado del terapeuta (según las necesidades del paciente) se guardó dicha posición, se bajó el brazo a la posición de reposo y se comenzó con la realización de repeticiones en el plano deseado de movimiento, entre la posición de reposo y la de referencia.

Ninguno de los dos sujetos reportó haber sufrido incomodidad, tirantez o compresión por parte del acople textil. Uno de ellos, sin embargo, recomendó colocar éste justo en el codo, ya que al dejar el brazo inerte, le resultaba poco natural dejar que el codo sustentase el antebrazo en el movimiento de elevación. Las velocidades de elevación propuestas (nunca superiores a 5°/s) resultaron ser agradables para ambos sujetos, ya que en ningún momento reportaron sentirse asustados ni encerrados por el exoesqueleto.

## 5 CONCLUSIONES

Los desafíos de proporcionar una rehabilitación de movimiento asistido para las extremidades superiores con los muchos grados de libertad del hombro se están resolviendo mediante una amplia variedad de dispositivos robóticos. En este documento se ha presentado un exoesqueleto híbrido para rehabilitación de extremidades superiores con un enfoque robótico. Tanto el diseño mecánico como electrónico son de desarrollo propio, lo cual permite obtener un dispositivo con funcionalidades muy específicas.

Se ha realizado una primera toma de contacto con dos pacientes. Aunque el número de sujetos es reducido y los resultados son sumamente cualitativos, en este primer acercamiento, se ha buscado evaluar que los pacientes se sientan cómodos con el exoesqueleto, que no tengan miedo de utilizarlo y que lo vean como una herramienta más para su rehabilitación. Los resultados cualitativos han sido satisfactorios, obteniendo una buena aceptación por parte de los usuarios y sin que ninguno de ellos haya sentido que el exoesqueleto le ha generado dolor, más allá del habitual debido a su lesión. Los comentarios referentes a sensaciones personales con las velocidades de movimiento y el acople textil han sido valiosos, y serán tenidos en cuenta en próximas iteraciones del diseño.

Los próximos trabajos se van a centrar en evaluar la precisión con la que el ángulo de elevación deseado es alcanzado y se pretenden realizar pruebas con pacientes con mayor rango articular, para evaluar el funcionamiento del exoesqueleto en todo su rango de trabajo.

### Agradecimientos

Los trabajos de este artículo han sido parcialmente financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación, bajo el proyecto LUXBIT (RTI2018-094346-B-100) y por el Programa Propio de I+D+i de la Universidad Politécnica de Madrid.

### English summary

## HYBRID EXOSKELETON FOR UPPER LIMB REHABILITATION

### Abstract

*The last decades have witnessed a rapid and vast development of robots for physical rehabilitation that allow efficient planning of the rehabilitation process in terms of cost, duration of sessions and availability of the therapist. This project aims to qual-*



*itatively evaluate an exoskeleton for upper body rehabilitation. The device presents an approach to the development of a device with the end-effector anchored to the ground that performs the actuation on an exoskeleton coupled to the body of the subject by cables. Experimentation with patients suffering from the supraspinatus tendon is documented by performing a series of movements dictated by a doctor.*

**Keywords:** exoskeleton, robotic rehabilitation, upper limbs, human-robot interaction.

## References

- [1] K. Makino, T. Ogura, M. Nakamura, and H. Terada, "Development of a switchable wearable robot for rehabilitation after surgery of knee," in *Symposium on Robot Design, Dynamics and Control*, Springer, 2020, pp. 60–67.
- [2] K. Yang, Q. F. Jiang, X. L. Wang, Y. W. Chen, and X. Y. Ma, "Structural design and modal analysis of exoskeleton robot for rehabilitation of lower limb," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, vol. 1087, 2018, p. 062004.
- [3] J. B. Rowe, V. Chan, M. L. Ingeman, S. C. Cramer, E. T. Wolbrecht, and D. J. Reinkensmeyer, "Robotic assistance for training finger movement using a hebbian model: A randomized controlled trial," *Neurorehabilitation and neural repair*, vol. 31, no. 8, pp. 769–780, 2017.
- [4] *Rehabilitación, Organización Mundial de la Salud*. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/rehabilitation>.
- [5] H. M. Qassim and W. Wan Hasan, "A review on upper limb rehabilitation robots," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 19, p. 6976, 2020.
- [6] A. S. Gorgey, "Robotic exoskeletons: The current pros and cons," *World journal of orthopedics*, vol. 9, no. 9, p. 112, 2018.
- [7] R. Gassert and V. Dietz, "Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: A neurophysiological perspective," *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 15, no. 1, pp. 1–15, 2018.
- [8] I. Ben Hamida, M. A. Laribi, A. Mlika, L. Romdhane, S. Zeghloul, and G. Carbone, "Multi-objective optimal design of a cable driven parallel robot for rehabilitation tasks," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 156, p. 104141, 2021, ISSN: 0094-114X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104141>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X2030358X>.
- [9] G. Rosati, S. Masiero, and A. Rossi, "On the use of cable-driven robots in early inpatient stroke rehabilitation," in *Advances in Italian Mechanism Science*, Springer, 2017, pp. 551–558.
- [10] P. Feys, K. Coninx, L. Kerkhofs, T. De Weyer, V. Truyens, A. Maris, and I. Lamers, "Robot-supported upper limb training in a virtual learning environment: A pilot randomized controlled trial in persons with ms," *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 12, no. 1, pp. 1–12, 2015.
- [11] I. Lamers, J. Raats, J. Spaas, M. Meuleman, L. Kerkhofs, S. Schouteden, and P. Feys, "Intensity-dependent clinical effects of an individualized technology-supported task-oriented upper limb training program in multiple sclerosis: A pilot randomized controlled trial," *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, vol. 34, pp. 119–127, 2019, ISSN: 2211-0348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msard.2019.06.014>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211034819302585>.
- [12] J. L. Samper-Escudero, A. Giménez-Fernandez, M. Á. Sánchez-Urán, and M. Ferre, "A cable-driven exosuit for upper limb flexion based on fibres compliance," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 153 297–153 310, 2020.
- [13] J. L. Samper-Escudero, A. F. Contreras-González, D. Pont-Esteban, F. J. Sáez-Sáez, M. Á. Sanchez-Urán, and M. Ferre, "Assessment of an upper limb exosuit with textile coupling," in *2020 IEEE International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS)*, 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICHMS49158.2020.9209462.
- [14] D. Pont-Esteban, A. F. Contreras-González, J. L. Samper-Escudero, F. J. Sáez-Sáez, M. Ferre, and M. á. Sánchez-Urán, "Validation of an elbow position super-twisting sliding-mode controller for upper-limb exosuit using a soft position sensor," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1828, no. 1,

- p. 012074, Feb. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1828/1/012074. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1828/1/012074>.
- [15] D. Pont, A. F. Contreras, J. L. Samper, F. J. Sáez, M. Ferre, M. Á. Sánchez, R. Ruiz, and Á. García, “Exoflex: An upper-limb cable-driven exosuit,” in *Robot 2019: Fourth Iberian Robotics Conference*, M. F. Silva, J. Luís Lima, L. P. Reis, A. Sanfeliu, and D. Tardioli, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 417–428, ISBN: 978-3-030-36150-1.
  - [16] A.-F. Contreras-González, M. Ferre, M. Á. Sánchez-Urán, F. J. Sáez-Sáez, and F. Blaya Haro, “Efficient upper limb position estimation based on angular displacement sensors for wearable devices,” *Sensors*, vol. 20, no. 22, 2020, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20226452. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/22/6452>.
  - [17] J. L. Samper-Escudero, A. F. Contreras-González, M. Ferre, M. A. Sánchez-Urán, and D. Pont-Esteban, “Efficient multiaxial shoulder-motion tracking based on flexible resistive sensors applied to exosuits,” *Soft Robotics*, vol. 7, no. 3, pp. 370–385, 2020, PMID: 31905105. DOI: 10.1089/soro.2019.0040. eprint: <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0040>. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1089/soro.2019.0040>.
  - [18] P. Maciejasz, J. Eschweiler, K. Gerlach-Hahn, A. Jansen-Troy, and S. Leonhardt, “A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation,” *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 11, no. 1, pp. 1–29, 2014.
  - [19] R. F. Escamilla, K. Yamashiro, L. Paulos, and J. R. Andrews, “Shoulder muscle activity and function in common shoulder rehabilitation exercises,” *Sports medicine*, vol. 39, no. 8, pp. 663–685, 2009.
  - [20] B. K. Dinh, M. Xiloyannis, C. W. Antuvan, L. Cappello, and L. Masia, “Hierarchical cascade controller for assistance modulation in a soft wearable arm exoskeleton,” *IEEE robotics and automation letters*, vol. 2, no. 3, pp. 1786–1793, 2017.
  - [21] C. Jarrett and A. McDaid, “Robust control of a cable-driven soft exoskeleton joint for intrinsic human-robot interaction,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 25, no. 7, pp. 976–986, 2017.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



# ROBÓTICA COLABORATIVA EN APLICACIONES DE ASISTENCIA EN MÁQUINAS DE ELECTROEROSIÓN

Román Abad<sup>2</sup>, Asier Muñoz<sup>1</sup>, Olatz Flaño<sup>2</sup>, Jose Mari Ramos<sup>2</sup>, Aitziber Mancisidor<sup>1</sup>, Itziar Cabanes<sup>1</sup>

[roman.abad@ehu.eus](mailto:roman.abad@ehu.eus), [asier.munoz@ehu.eus](mailto:asier.munoz@ehu.eus), [aitziber.mancisidor@ehu.eus](mailto:aitziber.mancisidor@ehu.eus), [itziar.cabanes@ehu.eus](mailto:itziar.cabanes@ehu.eus)

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU

[oflano@onaedm.com](mailto:oflano@onaedm.com), [jramos@onaedm.com](mailto:jramos@onaedm.com)

<sup>2</sup> Ona Electroerosión S.A.

## Resumen

*Los robots colaborativos, también denominados cobots, son robots industriales diseñados para dar respuesta a procesos de producción de alta variabilidad y mayor flexibilidad. Estos robots son muy adecuados para tareas de Machine Tending, permitiendo la automatización de los procesos de producción mediante tareas de asistencia a distintos tipos de máquina herramienta. En este trabajo se presenta el diseño de una célula robotizada donde se integra un robot colaborativo para dar respuesta a la necesidad de alimentación de electrodos en diferentes máquinas de electroerosión, sin parar el proceso de mecanizado y colaborando con las tareas a realizar por el usuario. Para la ejecución en simulación se ha implementado dicho escenario en la herramienta RoboDK.*

**Palabras clave:** Robótica colaborativa, cobot, automatización, electroerosión, EDM, RoboDK.

## 1 INTRODUCCIÓN

La electroerosión es un proceso termoelectrónico en el que se elimina material de una pieza mediante una serie de descargas eléctricas generadas a alta frecuencia entre un electrodo y la pieza, encontrándose ambos sumergidos en un medio dieléctrico.

La principal ventaja de la electroerosión frente a otros procesos de fabricación es que la dureza del material no es una limitación. A su vez, al no haber contacto entre electrodo y pieza, se evitan problemas de *chatter* y vibraciones. La electroerosión es un proceso de fabricación en constante desarrollo, que permite producir piezas con geometrías muy variadas y complejas, destinadas a distintos sectores como el sector del molde o aeronáutica, entre otros [1].

Dentro de la electroerosión, se diferencian dos principales procesos: i) electroerosión por hilo o *Wire*

*Electrical Discharge Machining (WEDM)*, proceso que permite el corte de geometrías complejas mediante un hilo conductor. ii) electroerosión por penetración o *Sinking Electrical Discharge Machining (SEDM)*, proceso con el que mediante un electrodo (generalmente de grafito o cobre) se da a la pieza la forma deseada. Permite replicar la geometría del electrodo o generar una forma 3D mediante la programación de movimientos sincronizados.

En los últimos años, con la intención de dotar a las máquinas de WEDM y SEDM de mayor autonomía, a la vez de aumentar la productividad y el rendimiento, se ha empezado a utilizar robots para asistir en diferentes tareas de la electroerosión [8]. Este concepto de tareas de asistencia en máquina herramienta se unen bajo el concepto de “*machine tending*”, que se define como la supervisión del trabajo de una máquina mientras realiza una tarea, incluyendo la alimentación de piezas [5]. Estas tareas, se pueden agrupar en dos bloques o categorías: por un lado, asistencia al proceso de fabricación; por otro lado, supervisión y mantenimiento [4].

Las *tareas de asistencia* al proceso de fabricación son tareas que participan activamente en el proceso, como por ejemplo la alimentación de piezas a la máquina. Normalmente, en el proceso de electroerosión cada pieza requiere de un tiempo de fabricación considerablemente alto. Esto implica que limitar las tareas de un robot únicamente a la alimentación de piezas supondría un tiempo de desaprovechamiento del mismo elevado. En cambio, la instalación de un robot colaborativo o cobot permitiría compartir el espacio de trabajo con otras personas y acercarse a ellas o a otras máquinas sin peligro de colisiones [2], [3], [7]. Además, la flexibilidad y facilidad de programación de un cobot permitiría automatizar diversas tareas con mayor aprovechamiento del mismo.

Unos de los primeros avances en máquinas *SEDM* fue la aparición de un intercambiador de electrodos incorporado en la máquina, capaz de retirar un electrodo de la máquina y sustituirlo por uno diferente

desde un pequeño almacén [6]. Este avance ya podía dotar a las máquinas de una autonomía de hasta 24 horas. Sin embargo, esta autonomía podría verse incrementada si se automatiza también la alimentación de electrodos al intercambiador mediante un robot colaborativo.

Las *tareas de supervisión* y mantenimiento, son las encargadas de comprobar que el proceso de fabricación se realiza correctamente y, en caso de ocurrir una parada, detectarla para solucionar el problema. Las tareas de mantenimiento también incluyen modelos predictivos para anticiparse a posibles errores. Actualmente no se encuentran aplicaciones de estas características en la industria de la electroerosión, por lo que este es sin duda uno de los focos de interés en los que se centrarán los trabajos de investigación en el futuro.

Tras analizar las posibles tareas que podría realizar un cobot como asistente a máquinas de electroerosión, en el presente trabajo se plantea la simulación de tareas de alimentación de electrodos a diferentes máquinas de SEDM del fabricante ONA Electroerosión S. L.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta el diseño de la célula robotizada de machine tending en SEDM. En la sección 3, se detalla la implementación en simulación de la aplicación robotizada en un escenario compuesto por cuatro máquinas de electroerosión. En la sección 4, se realizará una discusión y análisis de los resultados, concluyendo en el apartado 5 con los aspectos más relevantes y trabajos futuros de esta aplicación.

## 2 DISEÑO DE LA CÉLULA ROBOTIZADA

La aplicación de la alimentación de electrodos en máquinas EDM incluye diversas tareas que el cobot debe realizar. Es habitual que las máquinas dispongan de un pequeño almacén o intercambiador de electrodos situado junto a la misma (ver Figura 1). Desde este intercambiador la máquina es capaz de elegir el electrodo que sustentará su cabezal, y que será clave en la fabricación de la pieza. En función del tipo de máquina y de la complejidad de la pieza a mecanizar, los electrodos pueden ser iguales o tener formas y tamaños diferentes. Estos electrodos se van desgastando durante el proceso de electroerosión, por lo que necesitan ser reemplazados cada cierto tiempo. Una vez que los electrodos disponibles en el intercambiador han sido utilizados, deben ser reemplazados por electrodos nuevos para que la máquina pueda seguir funcionando, sin que se vea obligada a parar en ningún momento el proceso.

Con este propósito, se definen las siguientes tareas a realizar por el cobot:

- Recoger los electrodos desgastados del intercambiador de electrodos de la máquina.
- Llevar los electrodos utilizados a un depósito para su reparación o reciclaje.
- Coger electrodos nuevos, ya sea desde una mesa, un armario, una cinta transfer, etc.
- Colocar los electrodos nuevos en el intercambiador.



Figura 1: Máquina QX4 de ONA Electroerosión.

En cuanto a los requerimientos de carga y alcance del cobot, por un lado, se especifican electrodos de peso de hasta 10 kg, y la ubicación del carrusel exige un alcance horizontal de un metro aproximadamente. El cobot modelo *UR10e* de Universal Robots, cumple con dichas especificaciones [9].

Para la realización de las diferentes tareas por parte del cobot, es necesario adaptar el escenario y dotarlo de elementos con los que el cobot pueda interactuar. Por un lado, es necesario añadir elementos a la máquina SEDM para que el cobot pueda controlar y asistir al carrusel de electrodos. Los elementos añadidos son una compuerta deslizante para permitir el acceso al carrusel, el giro de éste último y los botones de control que permiten su giro (ver Figura 2).

Además, se deben diseñar una serie de armarios desde los cuales el cobot sea capaz de coger electrodos nuevos y depositar los electrodos desgastados no útiles para el proceso. Para ello se utilizan métodos de agarre de tipo pinza en el armario.

Con la idea de que el cobot sea capaz de asistir a un mayor número de máquinas, se va a integrar sobre un robot móvil (AMR) que permite desplazar el cobot libremente por la planta [10].

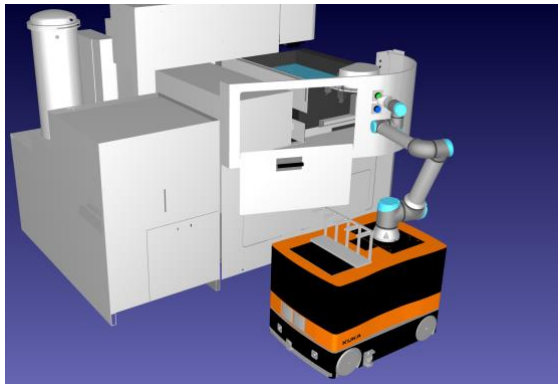


Figura 2: Robot colaborativo controlando el carrusel de una máquina de electroerosión QX4

### 3 IMPLEMENTACIÓN

#### 3.1. Caso de estudio 1

Tras definir los elementos necesarios, se lleva a cabo la implementación de una planta de producción que contiene una máquina QX4 de ONA Electroerosión, un cobot UR10e de Universal Robots sobre un AMR, y dos armarios almacenes de electrodos, uno para recogida de electrodos nuevos y otro para depósito de electrodos desgastados (ver Figura 3).

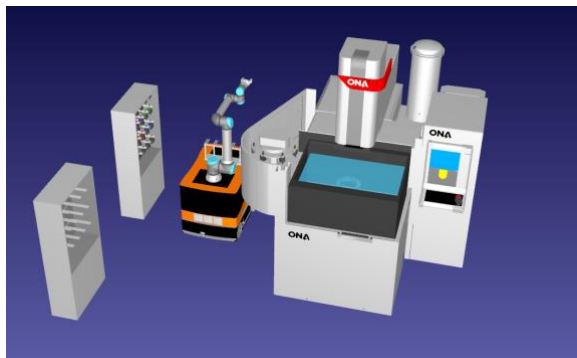


Figura 3: Escenario con una máquina SEDM

Una vez definido el escenario, se lleva a cabo la programación de la simulación en la herramienta RoboDK. Para ello se intercalan varias secuencias de carga y descarga de electrodos durante el proceso de mecanizado en la máquina. Cuando ésta detecta que es necesario un reemplazo en los electrodos del carrusel, el sistema envía una señal al cobot con los electrodos que es necesario sustituir y la posición en la que debe colocar cada uno. Como el ciclo de trabajo de la máquina con un mismo electrodo puede durar varias horas, el cobot tiene tiempo suficiente para realizar sus tareas sin interrumpir el trabajo de la máquina, demostrando que la tarea de *asistencia en la alimentación de electrodos* es una aplicación viable y adecuada para un robot colaborativo.

#### 3.2. Caso de estudio 2

Dado que los electrodos, dependiendo de las condiciones, material y forma pueden tener una duración entre 10-90 minutos aproximadamente, se observa una gran diferencia con los tiempos invertidos para realizar los cambios de electrodos mediante el cobot, que es de unos minutos. Esto se traduce en que el cobot no es utilizado durante largos periodos de tiempo ya que no es requerido por la máquina. Por ello, se decide ampliar el escenario y se propone una planta más exigente, con cuatro máquinas EDM (ver Figura 4), en la que el cobot es capaz de asistir a todas ellas mediante un sistema de tipo semáforo basado en prioridades en el que varias máquinas solicitan acceso a la utilización de un recurso compartido (cobot). El semáforo gestiona las distintas solicitudes y concede permiso de uso del cobot a la máquina más prioritaria.

El semáforo implementado es una herramienta que tiene dos ventajas principales. Por un lado, el semáforo tiene una cola en la que las tareas que están esperando acceden al recurso en función de la prioridad que se les haya asignado, y no por orden de petición de acceso al recurso. Por otro lado, una vez una máquina haya accedido al recurso, no puede ser desalojada hasta que finalice sus tareas, aunque una de mayor prioridad haya hecho una petición durante el tiempo de utilización. De esta manera, se consigue atender a las tareas más prioritarias primero, pero no se abortan las mismas mientras se están ejecutando. Con este sistema se reducen los trayectos del AMR en los que realmente no está realizando una tarea útil y se optimiza el uso del cobot.

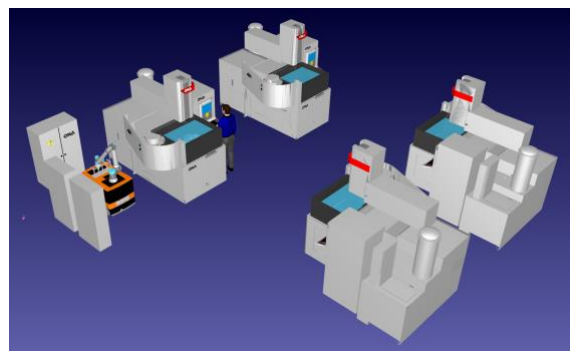


Figura 4: Escenario con diversas máquinas SEDM

### 4 DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Para implementar el sistema basado en herencia de prioridades, cada máquina (i) dispone de tres tipos de señales booleanas: la primera tiene como objetivo mostrar cuándo una máquina está ejecutando código propio ( $M_i$ ), la segunda es una señal de petición de acceso al recurso compartido ( $P_i$ ), y la última muestra si la máquina está haciendo uso del recurso

compartido ( $U_i$ ). Además de estas señales que tiene cada una de las máquinas, el cobot tiene una señal que refleja si está ejecutando alguna tarea ( $C=TRUE$ ) o si está disponible para realizar una nueva ( $C=FALSE$ ). Las señales utilizadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Señales utilizadas

DESCRIPCIÓN	NOMBRE SEÑAL
Código propio	$M_1, M_2, M_3, M_4$
Petición acceso cobot	$P_1, P_2, P_3, P_4$
Uso del cobot	$U_1, U_2, U_3, U_4$
Semáforo cobot	$C$

Una vez definidas las señales, se asignan diferentes prioridades a cada una de las máquinas, dependiendo del tipo de pieza que se esté mecanizando y de los intereses del usuario. Por tanto, la asignación de prioridades es dinámica. Como ejemplo, existe una tarea que lleva una pieza de una máquina a otra y pone una pieza nueva en la primera de ellas (ver Figura 5). Esta tarea sería la de mayor prioridad puesto que supone que dos máquinas van a estar paradas mientras se realiza. Asimismo, se ha diseñado un soporte que va incorporado en el AMR para colocar la pieza mientras se mueve de una posición a otra.

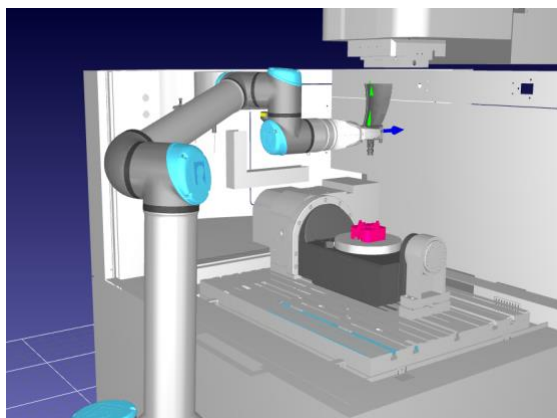


Figura 5: Cambio de pieza por el robot colaborativo

Tras definir las diferentes tareas y las prioridades de éstas, se realiza el programa que va a funcionar como semáforo de herencia de prioridades y va a dar paso a que las diferentes máquinas hagan uso del recurso compartido. Este programa será ejecutado cada vez que una de las máquinas active la señal de petición de acceso al recurso compartido. En caso de que este recurso esté liberado se dará paso a la tarea más prioritaria, y en caso de estar ocupado, la tarea queda bloqueada en la cola.

Debido a esto, se puede presentar un problema de optimización de uso de las máquinas, que sucede al producirse el bloqueo de las tareas que quieren acceder a un recurso que está ocupado. Para solucionar esto, en cada una de las máquinas, la tarea que accede al recurso compartido se ejecuta en un hilo de

ejecución paralelo al del código propio de la máquina (que realiza el proceso de electroerosión). Este hilo paralelo es llamado desde el mismo programa de código propio, pero permite que la máquina siga mecanizando la pieza mientras espera a que el recurso compartido se libere. Es decir, la máquina solicita uso del recurso compartido, pero sigue ejecutando su propio código mientras espera a que el recurso se libere.

Por último, cuando una tarea va a liberar el recurso compartido, se comprueba qué máquinas están esperando para acceder al recurso y se da paso a la más prioritaria de ellas.

Este semáforo basado en herencia de prioridades se basa en el *Immediate Ceiling Priority Protocol (ICPP)*, con la única diferencia de que, si una tarea quiere acceder a un recurso compartido que está siendo utilizado, sigue ejecutando su código propio (mecanizado) en lugar de esperar a que el recurso sea liberado.

Para realizar este sistema de semáforo basado en prioridades, cuyo objetivo es que el tiempo que cada una de las máquinas está parada sea el mínimo, es necesario calcular los tiempos de mecanizado de las máquinas, el tiempo de acceso al recurso compartido y el tiempo máximo de espera para acceder al recurso. Este cálculo determinaría el mejor momento para hacer la petición de acceso al recurso compartido con suficiente antelación como para que las máquinas no se queden sin electrodos nuevos dentro de los armarios y se tenga que detener el proceso de fabricación.

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el desarrollo de una aplicación de machine tending en máquinas de electroerosión mediante un robot colaborativo.

Para ello, se realiza un estudio de las diferentes tareas en las que el cobot puede asistir a la máquina. Tras diseñar los diversos elementos que ayudan al robot a realizar estas tareas, se programa en RoboDK la simulación de las mismas en un escenario con una máquina *SEDM*.

Una vez terminado esto, se hace una comparativa entre la vida útil de los electrodos y el tiempo necesario para que el AMR reponga los electrodos de los armarios de las *SEDM*. Al ver que el cobot tiene tiempos muertos muy grandes, se llega a la conclusión de que el cobot tiene capacidad suficiente para asistir a más máquinas. Por ello, se construye un escenario con 4 máquinas en el que se implementa un semáforo basado en herencia de prioridades para el acceso al recurso compartido (robot colaborativo).



## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto Joint Action towards digital transformation (JANO) Ref. IDI-2019-1028 y parcialmente por el proyecto GUI19/045 de la UPV/EHU.

## English summary

### COLLABORATIVE ROBOT (COBOT) APPLICATION AS AN ASSISTANT IN EDM MACHINES

#### Abstract

*Collaborative robots, also known as cobots, are industrial robots designed to respond to high variability and more flexible production processes. This kind of robots are very suitable for Machine Tending tasks, assisting different types of machine tool applications and allowing automation in production processes. This paper presents the design of a robotic cell where collaborative robots are integrated in order to respond to the assistance of electrodes in different EDM machines without stopping the machining process and collaborating on the user's tasks. RoboDK has been the programming tool chosen to implement the simulation.*

**Keywords:** Collaborative robotics, cobot, automation, electrical discharge machining, EDM, RoboDK.

#### Referencias

- [1] K. Ho and S. Newman, "State of the art electrical discharge machining (EDM)", International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 43, pp. 1287-1300, 2003.
- [2] J. Krüger, T. Lien and A. Verl, "Cooperation of human and machines in assembly lines", CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 58, pp. 628-646, 2009.
- [3] E. Matheson, R. Minto, E. G. G. Zampieri, M. Faccio and G. Rosati, "Human-Robot

Collaboration in Manufacturing Applications: A Review", Robotics, vol. 8, no. 100, 2019.

- [4] I. Maurtua, A. Ibarguren, J. Kildal, L. Susperregi and B. Sierra, "Human-Robot collaboration in industrial applications: Safety, interaction and trust", International Journal of Advanced Robotic Systems, pp. 1-10, 2017.
- [5] B. Rooks, "Machine tending in the modern age", Industrial Robot: An International Journal, vol. 30, no. 4, pp. 313-318, 2003.
- [6] B. Rooks, «Robot Automation in the Mould Shop», Industrial Robot, vol. 25, no 4, pp. 259-261, 1998.
- [7] M. Safeea, P. Neto and R. Bearee, "On-line collision avoidance for collaborative robot manipulators by adjusting off-line generated paths: An industrial use case", Robotics and Autonomous Systems, vol. 119, pp. 278-288, 2019.
- [8] H. Zeng, B. Lim, G. Phua, Z. Ding, L. Aw, T. Tan, X. Li, K. Goh, P. Hee, Y. Gog and K. Yuen, "Electrode Verification and Management System for Automation of EDM Process in Mould Industry", in IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 2005.
- [9] UR10e Collaborative Industrial Robot – Payload up to 12,5 kg. [Link](#)
- [10] AMRs vs. AGVs: The Difference Between a Robot and a Guided Vehicle. [Link](#)



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# APLICACIÓN DE UN ROBOT COLABORATIVO DE DOS BRAZOS PARA RESOLVER EL CUBO DE RUBIK

Garazi Fernández, Asier Herrán, Aitziber Mancisidor, César Pérez, Itziar Cabanes

gfernandez051@ikasle.ehu.eus, aherran014@ikasle.ehu.eus, aitziber.mancisidor@ehu.eus, itziar.cabanes@ehu.eus

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU

## Resumen

*Con objeto de entretener y acercar al usuario al mundo de la robótica, este trabajo presenta una célula robotizada para la resolución de cubos de Rubik. El sistema está formado por el robot colaborativo YuMi de dos brazos y una cámara de visión artificial. Gracias a esta cámara, el sistema es capaz de detectar la posición y la configuración del cubo de Rubik, además de identificar si se trata de un cubo de 2x2 o de 3x3. Una vez detectado el cubo, el robot utiliza los dos brazos para resolver el cubo con el mínimo número de giros y movimientos posibles. Adicionalmente, con el fin de aumentar la comunicación entre el sistema y el usuario, se le ha añadido una pantalla táctil y un módulo de sonido.*

**Palabras clave:** Robótica colaborativa, visión artificial, Matlab, RobotStudio, cubo de Rubik.

## 1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los robots han sido ampliamente utilizados en diferentes ámbitos de la industria, como es en aplicaciones de soldadura, ensamblaje o empaquetamiento. Estos, resultan muy útiles para operaciones repetitivas y producción en grandes lotes. Sin embargo, por motivos de seguridad, no es posible la directa interacción entre el operario y los robots. Este es el motivo por el cual en la cuarta revolución industrial se desarrollan los robots colaborativos o cobots [12].

Los robots colaborativos traen integrados sensores de fuerza, presión o tacto que posibilitan la colaboración entre los robots y sus usuarios, eliminando las barreras físicas que los han separado durante muchos años [6]. Estos sensores permiten medir y controlar la fuerza y la velocidad, lo que garantiza que no superen los umbrales definidos en caso de producirse un contacto, sea intencionado o por accidente, manteniendo en todo momento la seguridad del usuario y de los componentes de su entorno.

Además, los cobots permiten reducir de forma significativa los problemas de espacio en su instalación (por la eliminación de barreras), mejorar la facilidad y rapidez en la programación y agilizar la adaptación ante cambios en la producción [2].

Uno de los sectores que más se beneficia de estos robots es el de la industria. A día de hoy los cobots son ampliamente utilizados en las líneas de producción, realizando diversas tareas desde ensamblado hasta clasificación de objetos, pasando por la fabricación [1, 11], entre otras.

No obstante, uno de los grandes beneficios de la robótica colaborativa ha sido la posibilidad de utilizar los robots fuera de la industria. Hoy en día se pueden encontrar robots colaborativos en el sector sanitario [4], en terapias de rehabilitación [13] o en el ámbito de la enseñanza [10, 7].

Otra de las grandes aplicaciones de estos robots es el entretenimiento. En el mercado existen una gran cantidad de robots destinados al entretenimiento. Entre ellos, los más populares son las mascotas robóticas las cuales poseen un gran rango de funcionalidades; desde las más simples que únicamente se mueven por la casa, hasta las más complejas, dotadas de inteligencia artificial y equipadas con cámaras que les permiten reconocer comandos de voz, esquivar obstáculos y hasta ayudar en las tareas del hogar [5].

En este trabajo, se presenta una aplicación de un robot colaborativo de dos brazos capaz de resolver los cubos de Rubik de 2x2 y 3x3. Con ello se pretende lograr una aplicación llamativa que genere interés, entretenga al usuario y atraiga al usuario al mundo de la robótica.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. En la sección 2 se realiza una descripción del diseño de la aplicación. En la sección 3 se detalla la programación e implementación de la misma, seguida de la sección 4 donde se resumen los resultados. Finalmente, en la sección 5, se resumen las conclusiones y trabajos futuros.



## 2 DISEÑO DE LA APLICACIÓN

### 2.1 ESPECIFICACIÓN Y FUNCIONALIDAD

El cubo de Rubik es un mecanismo de ejes que permite que cada una de sus caras gire independientemente, de manera que los colores se mezclen. Para solucionar el rompecabezas, cada una de sus caras debe estar compuesta por un solo color. Completar dicho rompecabezas 3D requiere de una serie de habilidades tales como concentración, memoria, coordinación óculo-manual, matemáticas, buenas destrezas psicomotoras y agilidad mental, entre otras [3].

Con objeto de entretener y lograr la resolución del cubo de Rubik de forma automática, se plantea el diseño de una aplicación robótica, de manera que permita al usuario interactuar y retar al robot sin peligro alguno.

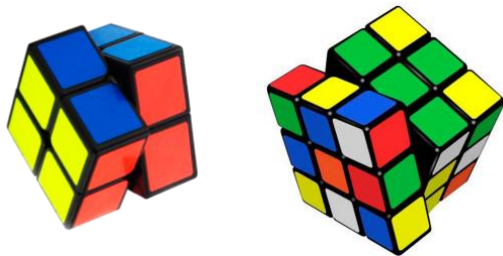


Figura 1: Cubos de Rubik de 2x2 y 3x3

Para ello, se selecciona el robot colaborativo de dos brazos Yumi, del fabricante ABB, con el que los usuarios puedan interactuar, de manera que logre atraer su atención. Una vez que el usuario deposite uno de los cubos de Rubik en cualquier punto arbitrario del escenario, el robot lo recogerá e identificará el tipo de cubo que es, considerando las opciones de 2x2 y de 3x3 (ver Figura 1). Una vez reconocido, realizará fotos de las 6 caras del cubo para conocer la configuración inicial, es decir saber con precisión la ubicación de las piezas de las diferentes caras que componen el cubo. Tras procesar dichas imágenes, el robot conocerá la posición y el color de cada una de las piezas móviles que componen el cubo y será necesario aplicar un algoritmo que calcule la mejor estrategia a seguir. Esto es, el mínimo número de giros y movimientos que se deberán realizar en el cubo para completar las 6 caras del mismo color respectivamente, y cómo debe realizarse (dirección y sentido). Finalmente, con toda la información adquirida, el robot mediante sus dos brazos ejecutará los movimientos calculados para resolver el cubo.

Adicionalmente, con objeto de incrementar la interacción y empatía del robot con el usuario, la aplicación contará con voz y con una pantalla táctil para interactuar de forma sencilla con él.

En la Figura 2 se muestran los componentes hardware para llevar a cabo esta aplicación: 1) el robot colaborativo Yumi de dos brazos, del fabricante ABB, que realizará los movimientos y giros deseados en el cubo como lo haría una persona; 2) una cámara de visión artificial, UI 5584LE-C-HQ de Infaimon, para identificar dónde deposita el usuario el cubo, de qué tipo de cubo se trata (2x2 ó 3x3) y también se encargará de realizar las fotos de las diferentes caras para saber la configuración inicial del cubo; 3) un PC el cual permite procesar las imágenes y desarrollar la algoritmia que minimice los giros para la resolución del cubo de Rubik mediante el entorno Matlab.

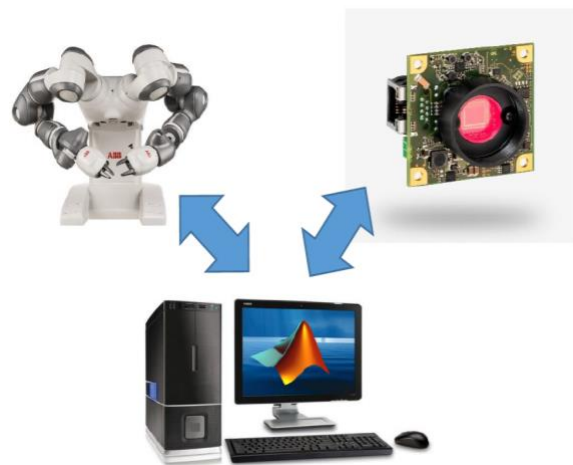


Figura 2: Relación de componentes

### 2.2 DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

Para afrontar las tareas y funciones definidas en el sistema, es necesario realizar el diseño de varios componentes del escenario, los cuales se detallan en este apartado.

#### 2.2.1 Componentes auxiliares

Para que el robot pueda localizar de forma autónoma el cubo, cogerlo, resolverlo, y depositarlo una vez resuelto, hace falta una superficie plana donde hacerlo. Debido a que hay más elementos en el escenario que forman parte de otras células de montaje, se ha optado por diseñar una mesa mediante la herramienta AutoCAD que tenga la facilidad de integrarse cuando se requiera. En dicha mesa el usuario depositará el cubo en un punto arbitrario para que el robot lo recoja y comience con su función.

La ubicación de la cámara es muy importante para esta aplicación. Concretamente, para el sistema de visión (cámara, placa base, lente y un ventilador), se ha realizado el diseño de una carcasa que además de

protegerla ayude a ubicarla en la célula de trabajo, permitiendo la orientación de la cámara en los ángulos que se desee sin que entorpezca el correcto funcionamiento del robot. Esta carcasa consta de dos componentes, tapa y base, las cuales han sido diseñadas mediante AutoCAD. Adicionalmente, también se ha diseñado un soporte que sujete de forma conjunta la pantalla táctil al robot. En la Figura 3 se muestra dicho componente.

Finalmente, puesto que es necesario que el robot sea capaz de recoger, girar y manipular con destreza el cubo de Rubik, se han diseñado unos dedos con mayor capacidad de apertura y mejor adecuación que los que poseía el Yumi (ver Figura 3).

Tras realizar el diseño, se han generado todos los componentes mediante una impresora 3D (Artillery X1 Sidewinder).

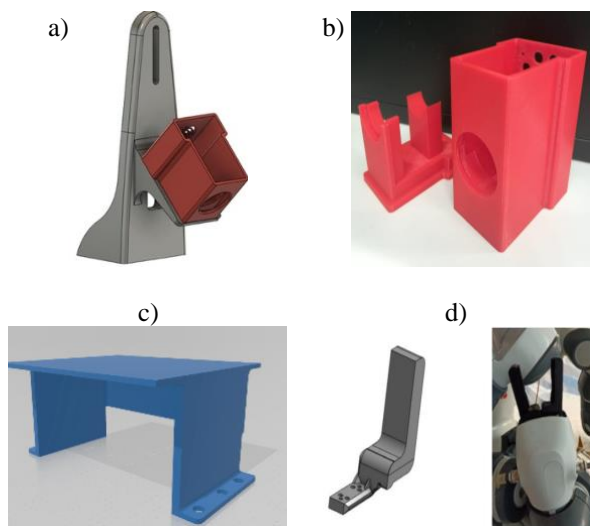


Figura 3: Componentes auxiliares diseñados: a) soporte para la carcasa de la cámara y la pantalla táctil, b) carcasa donde se aloja la cámara, c) mesa donde se recoge y deposita el cubo, d) dedos de la pinza.

### 2.2.2 Componentes interacción

Debido a que uno de los objetivos principales es lograr la interacción usuario-robot, se ha instalado una pantalla táctil, TFT-LCD Monitor, mediante la cual se podrá interactuar con el robot, controlando tanto los movimientos del robot como el procesamiento de las imágenes.

Adicionalmente, para lograr una mayor relación con el robot se han integrado un módulo de sonido, el cual será utilizado por el Yumi para anunciar al usuario sus futuras acciones. El módulo de sonido consta de dos

altavoces, a los cuales se les envían los datos mediante Matlab.

En la Figura 4 se muestra el escenario completo, con todos los componentes detallados en esta sección.

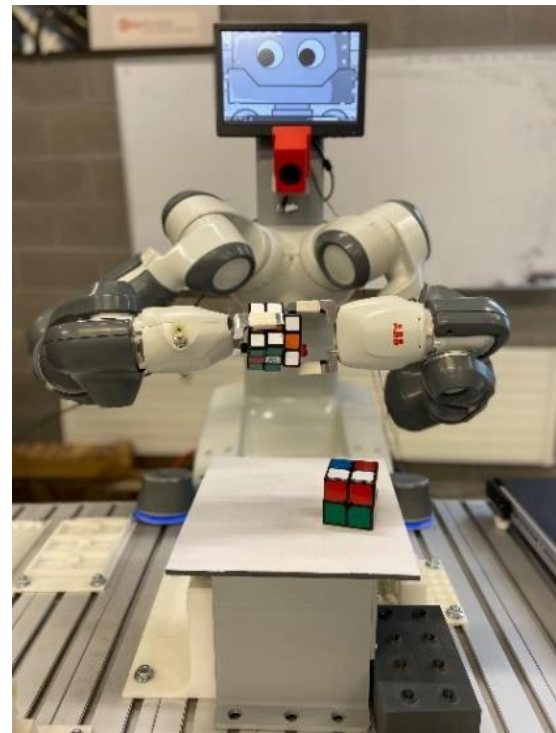


Figura 4. Escenario completo.

## 3 PROGRAMACIÓN

Para llevar a cabo la resolución del cubo de Rubik hace falta realizar una serie de instrucciones y códigos. Estos deben permitir tanto, obtener las imágenes y procesarlas, extrayendo de ellas la información necesaria para trasladarle al robot los giros a realizar.

### 3.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Al detectar un cubo de Rubik en la mesa, el sistema, mediante la cámara de visión artificial y el software Matlab, efectúa la primera fotografía la cual se utiliza para localizar la posición exacta del cubo.

En este primer procesamiento de la imagen, se aplica una máscara de color con objetivo de aislar los colores del cubo y seguido se binariza la imagen. Posteriormente utilizando funciones como *strel*, *cornermetric* e *imregionalmax* se logra filtrar el ruido y obtener el contorno de cada uno de los objetos, para después mediante el código creado con el comando *regionprops* conseguir las posiciones de los puntos (ver Figura 5).

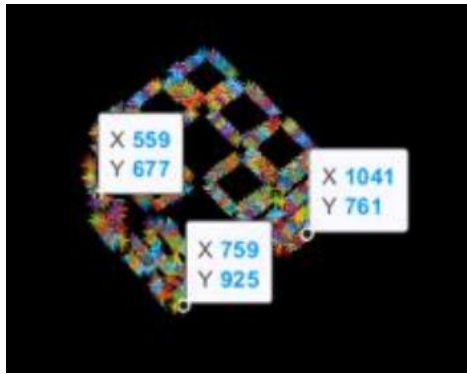


Figura 5: Procesamiento mediante *regionprops*

Por otro lado, una vez que el robot ha recogido el cubo, se realiza la toma de imágenes de las caras del mismo (ver Figura 6), siendo un total de 6 fotos, una por cada cara. Tras esta toma de imágenes del cubo, se realiza un procesamiento de los colores de cada cara que permita conocer la posición de cada una de las nueve piezas que las forman y, por ende, la forma en la que está mezclado el cubo. Para este procesamiento de color se ha utilizado la función *ColorThresholder*, que genera una máscara que muestra solo los colores seleccionados (ver Figura 6).



Figura 6: Procesamiento de imágenes

Una vez procesados todos los colores de la imagen, se genera la matriz Cara donde cada color se representa mediante un número siendo, Rojo = 1; Azul = 2, Naranja = 3; Verde = 4; Blanco = 5 y Amarillo = 6. Por tanto, la fotografía original de la cara se reduce a una matriz de dimensión 3x3. Por último, la información de cada Cara se traslada a un array multidimensional R que contiene toda la información del cubo mezclado. Dicho array está compuesto por seis matrices de 3x3, una por cara. Este array se enviará al algoritmo que se presenta en el siguiente apartado para calcular la resolución del cubo.

### 3.2 ALGORITMO RESOLUCIÓN CUBO DE RUBIK

Una vez identificadas las posiciones de los bloques de colores del cubo, es necesario desarrollar el algoritmo de resolución, con el que se obtienen los giros a realizar.

En este caso, se aborda la resolución del cubo mediante la estrategia de Joren Heit [9]. A partir de imágenes tomadas, se logran los movimientos para resolver el cubo mediante la función *Solve45*, asegurando una media de 31 movimientos para la resolución completa del cubo (siendo 45 su máximo). El algoritmo se basa en unas tablas de poda generadas automáticamente y formadas por más de un millón de entradas que le permiten elegir la mejor solución en función de la forma en la que esté mezclado el cubo.

La implementación y ejecución del algoritmo conlleva cuatro fases:

- 1) Orientación de los bordes.
- 2) Orientación de las esquinas y colocar los bordes de las caras derecha e izquierda.
- 3) Colocar el resto de bordes y esquinas.
- 4) Resolver el cubo.

Para cada una de dichas fases el algoritmo calcula mediante las tablas de poda el número mínimo de movimientos. Este número de movimientos mínimo se denomina *d*, y tras elegir un giro, se comprueba cómo varía. Si *d* disminuye, el movimiento es correcto, ya que se encuentra un movimiento más cerca de la siguiente fase. Cuando *d* sea igual a 0, el algoritmo pasa de fase. Este algoritmo devuelve un array de celdas en las que cada una hace referencia a un movimiento a realizar para resolver el cubo.

### 3.3 MOVIMIENTOS ROBOT

El robot posee dos brazos, que trabajarán de forma sincronizada a la hora de realizar movimientos. El brazo derecho se encarga de coger el cubo de la mesa y llevar el cubo hasta la posición de las 3 primeras fotos. El brazo izquierdo deberá coger el cubo en la posición de la tercera foto, y trasladarlo para realizar las 3 restantes.

Posteriormente, para que los brazos ejecuten los movimientos necesarios para la resolución del cubo, es necesario enviar al robot colaborativo YuMi los movimientos codificados obtenidos. Para ello hace falta realizar la comunicación entre Matlab y el robot de forma que permita el intercambio de datos por ambas partes. En este caso se ha optado por una comunicación mediante protocolo TCP/IP.

Una vez establecida la comunicación, se procede al envío de los datos al robot. En primer lugar, es necesario contar los movimientos a enviar y guardar la información en una variable. El siguiente paso es enviar el número de movimientos al robot de forma que sepa la cantidad de caracteres que tiene que recibir y procesar. En caso de ser menos de 26 movimientos se realiza un único envío, mientras que si son más, se realizarán dos.

## 4 DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Una vez configurado el escenario con la mejor ubicación de los componentes, y realizado el código de programación en el entorno Matlab y RobotStudio, se valida la solución.

Dado que uno de los objetivos principales era retar al robot para lograr que la resolución del cubo sea lo más rápida posible, se han realizado varias pruebas con los cubos de 2x2 y 3x3. De esta manera se han obtenido diferentes resultados de tiempos y cantidad de movimientos que se necesitan para resolver los distintos cubos.

Finalmente, se han realizado las pruebas de resolución del cubo de 2x2 y 3x3, ejecutando un total de 10 pruebas con cada uno de ellos. En la tabla 1 se resume el número de movimientos realizados (Mov) para resolver cada una de las 10 configuraciones de partida con cada cubo y el tiempo que tarda el robot en conseguirlo (T).

Tabla 1: Ensayos con cubos de Rubik de 2x2 y 3x3

Cubo de Rubik 2x2										
Mov	10	12	13	15	11	19	14	12	16	9
T (min)	2,3	3,16	3,4	3,5	2,5	4,4	3,2	3,16	4,1	2
Cubo de Rubik 3x3										
Mov	29	34	35	30	28	33	29	27	32	34
T (min)	7	8,1	8,4	7,2	6,7	8	7	6,5	7,7	8,1

Se puede concluir que el tiempo medio que necesita el robot para resolver el cubo de 2x2 es de 3,17 minutos y la media del número de movimientos es de 13,1. En el caso del cubo 3x3, el tiempo medio es de 7,47 minutos y la media de movimientos es de 31,1.

Como era de esperar, el robot tarda mucho menos tiempo y necesita menos movimientos para resolver el cubo de 2x2, puesto que este posee un menor número de combinaciones posibles.

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha diseñado y construido una célula robótica de entretenimiento que permite resolver cubos de Rubik de 2x2 y 3x3 de forma automática.

El sistema propuesto está compuesto por el robot colaborativo YuMi de dos brazos, una cámara de visión artificial, un ordenador de procesamiento con Matlab y elementos auxiliares como la mesa, el

soporte de la cámara o dedos de la pinza del robot impresos con una impresora 3D.

Adicionalmente, con la intención de atraer a los usuarios, se le ha añadido una pantalla táctil y un sistema de sonido que aumenta la interacción entre el robot y el usuario.

Después de realizar varios ensayos experimentales, se puede concluir que el sistema propuesto es capaz de resolver el cubo de Rubik de 2x2 en un tiempo medio de 3,17 y el de 3x3 en 7,47 minutos.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto GIU19/045 de la UPV/EHU.

### English summary

## APPLICATION OF A TWO-ARMED COLLABORATIVE ROBOT TO SOLVE RUBIK'S CUBE

### Abstract

*In order to entertain and get the robotics closer to the user, this work presents a robotic cell for the resolution of Rubik's cubes. The system consists of the YuMi two-armed collaborative robot and an artificial vision camera. Thanks to this camera, the system is able to detect the position and configuration of the Rubik's cube, in addition to identifying whether it is a 2x2 or 3x3 cube. Once the cube is detected, the robot uses its both arms to solve the cube with the minimum number of turns and movements possible. Additionally, in order to increase communication between the system and the user, a touch screen and a sound module have been added.*

**Keywords:** Collaborative robotics, computer vision, Matlab, RobotStudio, Rubik's cube.

### Referencias

- [1] Gómez, E., & Andrés, D. Diseño e implementación de una celda colaborativa robotizada mediante robots móviles y humanoides para clasificación de objetos. Recuperado el 22 de junio de 2021, de Edu.ec
- [2] G. Du, M. Chen, C. Liu, B. Zhang, and P. Zhang, "Online Robot Teaching With Natural Human-Robot Interaction", IEEE Transactions on Industrial

Electronics, vol. 65, no. 12, pp. 9571–9581, Dec. 2018.

[3] Julita, J. R., & Viejo, V. A. (2015). Cubo de Rubik. XVIII Concurso de Trabajos Estudiantiles (EST 2015) - JAIIO 44.

[4] J.F. Avila-Tomás, M.A. Mayer-Pujadas, & V.J. Quesada-Varela (2020). La inteligencia artificial y sus aplicaciones en medicina I: introducción antecedentes a la IA y robótica. *Atención Primaria*, 52(10), 778-784.

[5] López Rodríguez, R., & Ospina Saldaña, J. (2019). Robot domótico con control remoto y cámaras, para pruebas de Mayordomo y Jardinero: Rob-Erto. *Letras ConCiencia Tecnológica*, (15), 13-17. Recuperado de <https://revistas.itc.edu.co/index.php/letras/article/view/155>

[6] Moctezuma Gutiérrez, S. G., Cruz Pazarán, A., Galicia Mejía, R., & Oliva Moreno, L. N. (2018). Desarrollo de plataforma para implementación de robots colaborativos. *Visión electrónica*, 12(1), 22–31. <https://doi.org/10.14483/22484728.13308>

[7] Moreno, I., Muñoz, L., Serracín, J. R., Quintero, J., Patiño, K. P., & Quiel, J. (2012). La robótica educativa, una herramienta para la enseñanza-aprendizaje de las ciencias y las tecnologías. *Teoría de la Educación. Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, 13(2), 74-90.

[9] Rubik's cube simulator and solver - file exchange - MATLAB central. (2011, octubre 23). Recuperado el 23 de junio de 2021, de Mathworks.com website: <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/31672-rubik-s-cube-simulator-and-solver>

[10] Salamanca, M. L. P., Lombana, N. B., & Holguín, W. J. P. (2010). Uso de la robótica educativa como herramienta en los procesos de enseñanza. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 10(1), 15-23.

[11] Salimbeni, S., & Mamani, D. (2020). Marco de referencia para la incorporación de Cobots en líneas de manufactura. *Podium*, 38(38), 159–180.

[12] Schwab, K. (2016). The fourth industrial revolution. Ed. Crown Business.

[13] Tucan, D. (2021). Ankle Rehabilitation of Stroke Survivors Using Kuka LBR Iiwa. In *New Trends in Medical and Service Robotics* (pp. 29–36). Springer International Publishing.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



# Localizando elementos de interés mediante vehículos operados remotamente para la explotación sostenible de granjas acuícolas.

F. Gómez-Bravo<sup>1</sup>, A. Garrocho-Cruz<sup>1</sup>, J. C. Gutiérrez-Estrada<sup>2</sup>, I. Pulido-Calvo<sup>2</sup>,  
J. Castro-Gutiérrez<sup>2</sup>, A. Peregrín-Rubio<sup>3</sup>, S. López-Domínguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva

<sup>3</sup>Departamento de Tecnologías de la Información, Universidad de Huelva

## Resumen

*Este artículo describe una propuesta para modificar la arquitectura de control de un Vehículo Operado Remotamente (ROV) destinado a la toma de datos e inspección de granjas acuícolas. La propuesta se basa en incluir un nuevo módulo de Localización, encargado de posicionar distintos tipos de elementos que se encuentren alrededor del ROV y puedan ser de interés para la explotación de la instalación. El proceso de localización se basa en el uso de un sensor de ultrasonido en conjunción con un sistema de localización del ROV, cuya combinación posibilita el posicionamiento local y global de los elementos de interés. El artículo describe el método de localización desarrollado y presenta resultados experimentales que validan la propuesta.*

**Palabras clave:** Acuicultura sostenible, Vehículos Operados a Distancia, Arquitectura GNC, Sistemas de Localización Submarina.

## 1 Introducción

De acuerdo con el plan propuesto por la Unión Europea "Blue Growth Plan" [5], la explotación de los recursos pesqueros, basada en una acuicultura inteligente, sostenible y con una producción inclusiva, jugará un papel fundamental en el futuro y constituirá un recurso relevante de alimentos para la población europea. Por tanto, es fundamental utilizar diferentes soluciones tecnológicas que apoyen la explotación sostenible de las granjas acuícolas y garantizar su viabilidad [1].

Durante los últimos años, la modernización de la acuicultura se ha implementado particularmente en la estimación de la biomasa, del crecimiento de la misma [7] y de los parámetros físico-químicos que caracterizan el ecosistema [3]. Sin embargo, aún quedan mejoras por desarrollar. Entre las tecnologías emergentes más prometedoras a aplicar cabe destacar el uso de Vehículos Subacuáticos Autónomos (AUV) y Vehículos Submarinos Operados Remotamente (ROV), gracias a su capacidad para obtener información utilizando técnicas

no destructivas y mínimamente intrusivas [6].

La utilidad de estos vehículos en tareas de mantenimiento y explotación de instalaciones acuícolas es múltiple. Entre sus diferentes aplicaciones cabe destacar la localización de elementos de interés, es decir: peces, cardúmenes (concentraciones grandes de peces) u otro tipo de objetos, de naturaleza variada, cuya presencia en el estanque de la granja pueda condicionar su explotación y cuya localización y visita resulten de interés para la adecuada gestión de la misma.

Cuando se trata de explotar granjas en entornos naturales o al aire libre, es normal que el agua presente un alto grado de turbidez, lo que perjudica la visión submarina e impide, por tanto, que las cámaras, que tradicionalmente portan los ROVs, generen información útil. Por este motivo, la detección de elementos de interés en estas circunstancias requiere el uso de sensores de proximidad, tales como sonares, que proporcionen al operador información sobre el entorno que rodea al ROV.

En particular, este trabajo tiene como objetivo proponer una nueva metodología para identificar y localizar distintos tipos de elementos dentro de estanques donde puede operar un ROV destinado a apoyar las labores de explotación de una estación piscícola, utilizando para ello información proporcionada por un sensor de ultrasonido.

Esta investigación se ha realizado en el marco del Proyecto KTTSeaDrones, financiado por la Unión Europea a través del Programa Interreg V-A España-Portugal, (POCTEP), y liderado por la Universidad de Huelva.

El artículo se estructura de la siguiente forma. Tras la introducción, la sección 2 presenta la modificación propuesta en la arquitectura de control para incorporar en las tareas de operación la información computada. Posteriormente, la sección 3 está dedicada a describir las características del sensor utilizado para localizar elementos. En la sección 4 se detalla la metodología de localización desarrollada, y en la sección 5 se proponen distintas alternativas para que el ROV navegue rumbo a los elementos de interés seleccionados. El artículo



termina con las secciones dedicadas a los resultados experimentales y a las conclusiones.

## 2 Arquitecturas de Control

Las arquitecturas de control tradicionales asociadas con las embarcaciones autónomas están vinculadas a los conceptos GNC (Guiado, Navegación y Control) [8], ver Figura 1. En este ámbito, el módulo de guiado es responsable de proporcionar referencias de posicionamiento al módulo de control, mientras el módulo de navegación proporciona estimaciones del estado y la posición del vehículo. Desde el punto de vista del usuario, estos vehículos presentan un comportamiento autónomo, es decir, una vez que el usuario establece una misión deseada, el sistema evoluciona de forma independiente. Los AUV cuentan con este tipo de arquitectura que ilustra la figura 1.

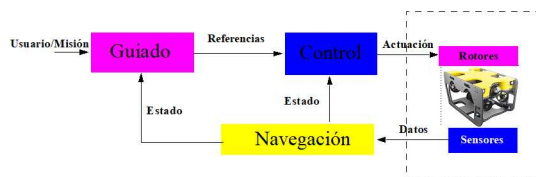


Figura 1: Arquitectura GNC.

Por el contrario, la arquitectura de control de los ROV, figura 2, se caracteriza por reemplazar el módulo de guiado por un dispositivo que sirve de interfaz de usuario. De modo que el vehículo es guiado por un operador mediante realimentación visual directa o mediante cámara. Eventualmente, el controlador puede recibir realimentación de algunos elementos sensoriales para mantener el rumbo o la profundidad.

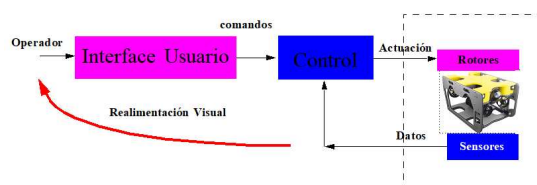


Figura 2: Arquitectura de los ROVs.

Sin embargo, hay situaciones en las que la turbidez del agua impide la realimentación visual. En estos casos es necesario añadir a la arquitectura de control elementos adicionales que auxilien al operador en su actividad o que incluso permitan dar cierto margen de autonomía al ROV.

El objetivo del presente trabajo es modificar la arquitectura para controlar ROVs agregando un

nuevo módulo, (Localización de Elementos), ver figura 3. Este módulo está orientado a dar información al usuario sobre los elementos que se encuentran alrededor del ROV proporcionando su localización dentro de la instalación explotada y marcando el rumbo necesario para visitar las proximidades del elemento. El módulo, también puede proporcionar información al controlador de manera que este pueda programarse para dirigirse al objetivo de interés seleccionado por el operador del ROV.

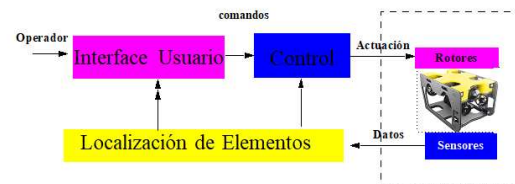


Figura 3: Arquitectura propuesta.

La metodología propuesta en este artículo se está implantando en dos ROV comerciales, figura 4. Ambos vehículos han sido equipados con sensores que permiten la ejecución de tareas en un estanque piscícola, estando preparados para tomar valores físico-químicos del ecosistema, adquirir valores telemétricos (controlador de vuelo), percibir información del entorno (sonar Ping360) y establecer la pose del vehículo mediante un sistema de posicionamiento submarino (WaterLinked). El análisis de los datos adquiridos mejorará la explotación de la piscifactoría.



Figura 4: BlueROV2 y SibiuPro.

## 3 Sonar Ping360

Los sensores SONAR (SOund Navigation And Ranging) son un tipo de sonar activo que funciona transmitiendo pulsos de sonido al agua y registrando la intensidad de los ecos que se devuelven a medida que cada pulso de sonido se refleja en los objetos frente a él. La intensidad de pulso reflejado dependerá de la densidad del material reflectante.

Los sonares de barrido se definen por tener un haz acústico en forma de “abanico” con un haz vertical ancho y un haz horizontal estrecho para obtener secciones transversales acústicas del entorno, figura 5, para luego mostrar las secciones transversales como una sola imagen [4].

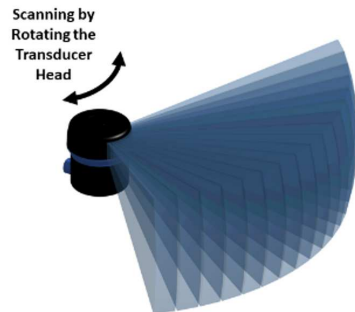


Figura 5: Escaneo del sonar Ping360 [4].

Al combinar la velocidad conocida del sonido en el agua (SSW) con el tiempo en que se recibieron los ecos (TTR), el sonar puede calcular la distancia (D) que ha viajado el sonido. La ecuación (1) determina la distancia recorrida por el sonido:

$$D = SSW \left( \frac{TTR}{2} \right) \quad (1)$$

Por lo general, la velocidad del sonido en agua salada es de aproximadamente 1500 m/s, pero esto puede variar según la temperatura del agua, la salinidad y la profundidad de funcionamiento del sonar.

Ese transductor se encuentra fijado en la parte superior del ROV (ver figura 6) y está montado en un motor que lo gira en incrementos de 0.9 grados y, mientras lo hace, permite generar una imagen circular de los alrededores con un alcance máximo de 50 metros.



Figura 6: Ping360 sobre el ROV.

La representación de estos datos proporciona un resultado similar al que se podría ver en un radar

meteorológico o al representar los datos de un Lidar sobre un robot autónomo, ver figura 7.

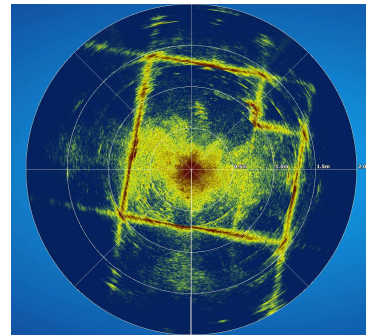


Figura 7: Representación datos Ping360 en PingViewer.

Los obstáculos con densidades de material muy diferentes a las del agua (como gas, roca, hormigón o metal) serán muy reflectantes y tendrán fuertes ecos. Los ecos de materiales como barro, limo, arena y plantas tendrán ecos más débiles, ya que tienen una densidad similar a la del agua o absorben energía acústica. Para cada ángulo, se obtienen 1200 valores con la fuerza del eco recibida desde distintas distancias. Estos valores se encuentran entre 0 y 255 (sin rebote e intensidad máxima, respectivamente), los cuales se muestran en el interfaz a través de una paleta de colores, teniendo un color diferente dependiendo de la fuerza del rebote. En la figura 7 se muestra la representación típica de los datos proporcionados por este sensor utilizando el programa comercial PingViewer.

Para comunicarnos con el Ping360, es necesario establecer un mensaje con una configuración determinada, de forma que estén incluidos, por un lado, los valores de las variables modificables: la ganancia (baja, normal o alta), el ángulo del rotor deseado, la duración de la transmisión acústica y el periodo de cada muestra. Y por otro lado las variables fijas: la frecuencia, el número de muestras (1200 datos para cada ángulo) y la transmisión automática de los datos tras cada toma.

Se ha implementado esta comunicación utilizando Matlab. Para ello se ha realizado un estudio previo (byte a byte) del funcionamiento del protocolo de comunicación PingProtocol que usa el sonar Ping360. Gracias a esto, se ha podido generar un array de valores que se envían al dispositivo a través de una comunicación Ethernet, utilizando particularmente el protocolo UDP.

Mediante la modificación de las variables habilitadas para ello, podemos optimizar la forma de obtener los datos para cada situación en la que se encuentre el ROV. Siendo posible restringir la

toma de datos a un sector angular concreto si fuese de interés para la tarea de exploración.

La utilización del sonar Ping360 para la localización de objetivos requiere tener en cuenta varias cuestiones. En primer lugar es necesario adecuar la velocidad de barrido con el fin de procesar adecuadamente los datos, caracterizando la naturaleza de los objetos reflectantes e identificando los posibles elementos de interés. Por último es necesario vincular las medidas de distancia y ángulo con la posición de los elementos en los sistemas de referencia donde se haya definido la tarea. Este aspecto se aborda en la siguiente sección.

## 4 Localización de elementos de interés

### 4.1 Localización del ROV: WaterLinked

Para la localización del vehículo, se hace uso del sistema de localización WaterLinked Underwater GPS Explorer Kit WL-11001, el cual está formado por una maleta de superficie, cuatro receptores, que se distribuyen en el entorno a explorar, y el localizador que se encuentra en la parte superior del ROV. A su vez, la maleta de superficie, está compuesta por varios elementos, como son un receptor GPS y una unidad de medición inercial (IMU). En ella, reside el sistema que permite estimar la posición del ROV y establecer la configuración del sistema de referencia local de la instalación a explorar.

El sistema de localización submarino se basa en la técnica de posicionamiento acústico Short Baseline (SBL) [2]. El localizador colocado en el ROV funciona como una baliza que envía un pulso acústico que reciben los cuatro receptores sumergidos en el agua. El tiempo de llegada a cada receptor se utiliza para calcular la posición del localizador. Los sistemas SBL, en comparación con los sistemas Ultra-Short BaseLine (USBL), tienen la ventaja de funcionar bien en aguas poco profundas y en entornos acústicos reflectantes, como en jaulas para peces, cerca de instalaciones portuarias, cerca de cascos de barcos, dentro de tanques de agua, etc.

A partir del posicionamiento local, y teniendo en cuenta el posicionamiento global de la estación, proporcionado por el receptor GPS, el sistema WaterLinked estima el posicionamiento global del ROV. Este dato se puede obtener al abrir una comunicación a través del protocolo MavLink con la controladora de vuelo del ROV (Pixhawk), mediante el cual podemos solicitar toda la información disponible en él.

Con esta información y junto con los datos de

la orientación del vehículo proporcionados por la IMU que incorpora la controladora de vuelo, es posible determinar la pose global del ROV y la matriz de transformación del sistemas de referencia local del ROV al sistema de referencia global ( ${}^G T_R$ ).

Para obtener el posicionamiento relativo del sistema local (WaterLinked) respecto del sistema global (visión satélite), se utiliza un proceso de calibración en el que se tienen en cuenta los datos del receptor GPS, la orientación de la IMU del WaterLinked y el mapa de la instalación. Esta operación permite determinar la matriz de transformación del sistema local al sistema global ( ${}^G T_L$ ).

Estas matrices son fundamentales para obtener la matriz de transformación que nos permite transformar coordenadas desde el sistema de referencia del ROV al sistema local de la instalación ( ${}^L T_R$ ) y, con ello, posicionar los objetivos identificados con los datos del sonar Ping360 en el mapa de la misma.

La relación existente entre estas matrices puede describirse mediante la expresión (2):

$${}^L T_R = ({}^G T_L)^{-1} \cdot {}^G T_R \quad (2)$$

En la figura 8 se puede observar el funcionamiento de este método de forma gráfica.

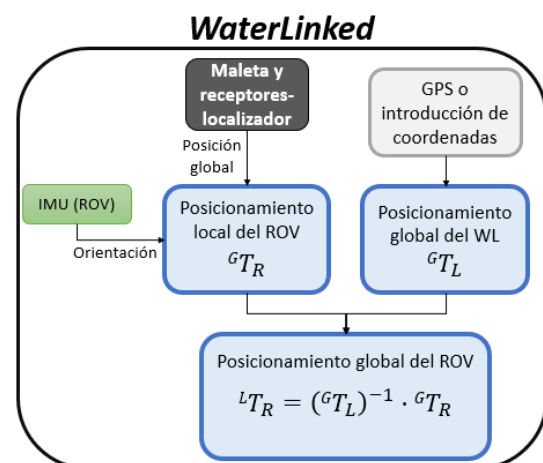


Figura 8: Localización del ROV con WaterLinked.

### 4.2 Posicionamiento de elementos de interés

Los datos adquiridos por el sonar Ping360 proporcionan información del entorno del ROV. Esta información, al incluir datos redundantes y ruido, necesita ser filtradas para identificar los posibles objetivos a seguir. Por este motivo, en primer lu-

gar, se realiza un procesamiento que se compone de una serie de etapas:

- Eliminación de datos inferiores a un límite, despreciando así todos los datos que hacen referencia a rebotes con una intensidad menor, parecida a la que devuelve el agua.
- Eliminación de ruido de proximidad (datos cercanos a la posición del ROV).
- Identificación de elementos tomando como característica la intensidad del eco devuelto (clustering).

Una vez efectuado el procesamiento, conocida la distancia a cada elemento identificado y el sector donde se encuentra, será posible obtener la posición de cualquiera de ellos referida al sistema local del ROV ( $P_{ob|R}$ ). Todo este proceso se resume en la figura 9.

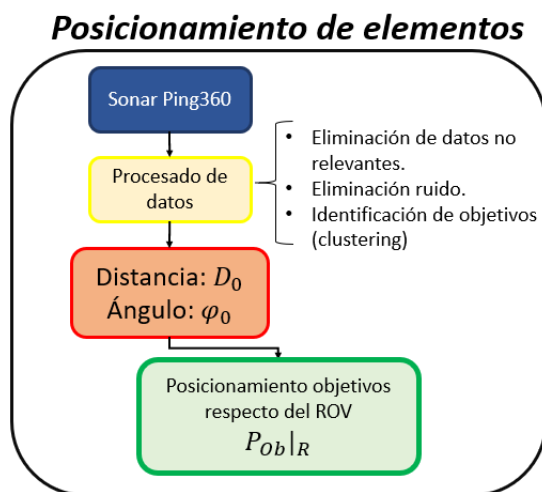


Figura 9: Posicionamiento de elementos.

La finalidad última es encontrar la posición del elemento que se desea localizar respecto a los sistemas de referencia local ( $P_{ob|L}$ ) y global ( $P_{ob|G}$ ). Para ello, se utilizan las matrices cuyo cálculo se describió en el apartado anterior y se utilizan las expresiones (3) y (4):

$$P_{ob|L} = {}^L T_R \cdot P_{ob|R} \quad (3)$$

$$P_{ob|G} = {}^G T_R \cdot P_{ob|R} \quad (4)$$

## 5 Identificación del rumbo de navegación

Una vez determinadas las posiciones de los distintos elementos de interés, es posible que el oper-

ador del ROV esté interesado en visitar las proximidades de uno o varios de ellos. En ese momento, los elementos seleccionados se convierten en objetivos de navegación. Con el fin de identificar el rumbo que ha de seguir la nave para acercarse a esos objetivos, es imprescindible priorizar el orden de visita de los mismos. La priorización puede hacerse atendiendo a diversos criterios, bien pueden establecerse de forma personal por el operador, o de forma automática, atendiendo a los datos registrados anteriormente. En este sentido el criterio más inmediato podría ser la intensidad de la señal devuelta, aunque este aspecto es un campo de investigación aún abierto.

A partir de esta selección, los datos a tener en cuenta para tomar rumbo hacia un objetivo son: el ángulo relativo entre éste y el ROV y la distancia entre el ROV y el objetivo. Ambos están relacionados con la posición del objetivo en el sistema local del ROV. Una vez determinado el rumbo, el vehículo puede ser conducido manualmente, o de forma autónoma. En este último caso esta tarea recaerá en el controlador de vuelo, que para acercar la nave al objetivo deseado modulará las velocidades de avance y de giro en función de estas magnitudes, ver figura 10.

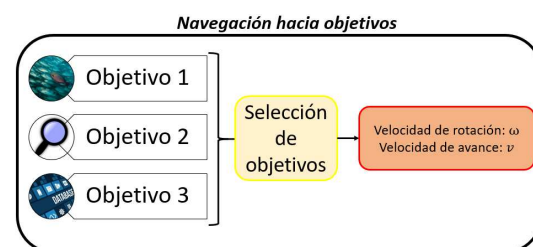


Figura 10: Navegación hacia objetivos.

## 6 Experimentación

La experimentación en interiores se llevó a cabo en la piscina municipal de Isla Cristina (Huelva), ver figura 11, y los experimentos en exteriores se efectuaron en la piscina del Club de golf de Bellavista (Aljaraque, Huelva), ver figura 12.



Figura 11: Experimentos en interior, piscina de Isla Cristina.

En ambos casos el objetivo fue implementar el pro-





Figura 12: Experimentos en exterior, piscina de Bellavista.

cedimiento para la localización de objetos y personas en posiciones estáticas y conocidas, donde se comprobó las diferencias entre la información obtenida a partir del sonar y las medidas realizadas manualmente. A partir de esta identificación se representaron los datos tanto en el sistema de referencia local como, si era posible, en el global (visión satélite).

En la piscina interior no se dispuso de señal GPS por parte del sistema de posicionamiento, por tanto, las pruebas consistieron en identificar localmente la posición de los objetos y personas situados en el interior de la piscina considerando diferentes situaciones y diferentes objetos. En la figura 13 podemos ver una representación de los datos del sensor utilizando el software PingViewer.

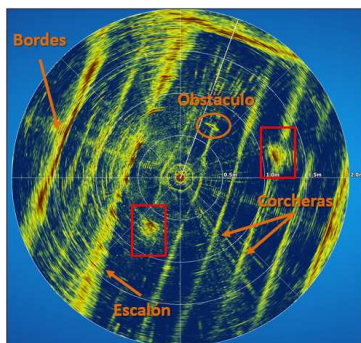


Figura 13: Experimentos en interiores: visualización de datos del Ping360 en PingViewer.

En esta figura, se puede observar la ubicación de las personas que se encontraban alrededor del ROV (recuadros rojos) así como los límites de la piscina, corcheras y un objeto de menor tamaño.

En referencia a los experimentos realizados en la piscina exterior, a partir de la señal GPS y del procedimiento de calibración, fue posible localizar globalmente los objetos y obtener la representación de los mismos en la vista satélite.

En la figura 14 se muestran las posiciones, medidas manualmente, del ROV, la maleta de superficie del WaterLinked, sus receptores, el sistema

de referencia local y los objetos a localizar en los experimentos realizados.

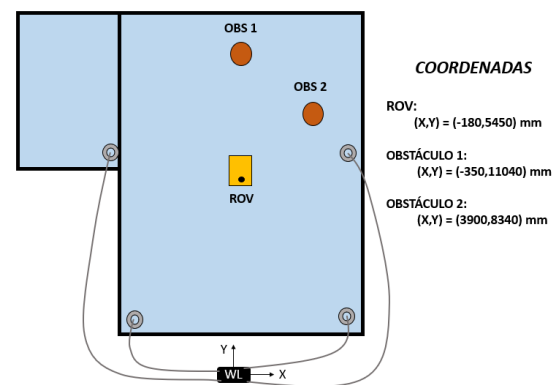


Figura 14: Experimentos en exteriores: disposición de los elementos.

En la figura 15 se muestran los datos capturados por el sensor utilizando una interfaz especialmente diseñada para este proyecto. Los datos son representados una vez han sido procesados. Los elementos identificados están marcados con círculos rojos. Además, en esta interfaz se ha disminuido el rango de la paleta de colores, provocando una mejor diferenciación del color entre valores próximos. Se puede comprobar la mejora del sistema de representación creado comparando las figuras 7 y 15, que se realizaron en la misma piscina y condiciones.

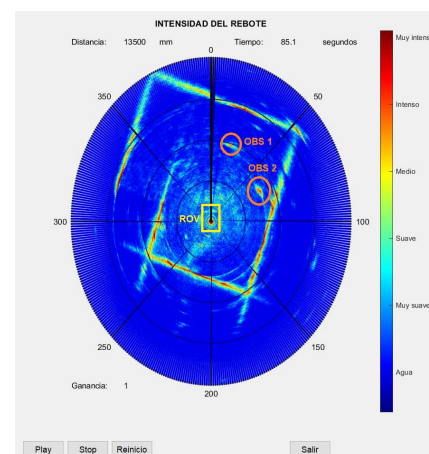


Figura 15: Experimentos en exteriores: representación de datos del Ping360 en el interfaz desarrollado en el proyecto.

En la representación local, que se ilustra en la figura 16, se muestran las coordenadas medidas del perímetro de la piscina (línea roja), los obstáculos y el maletín de superficie (cuadrados negros), mientras que los datos, ya tratados, del sonar han sido especificados con asteriscos.

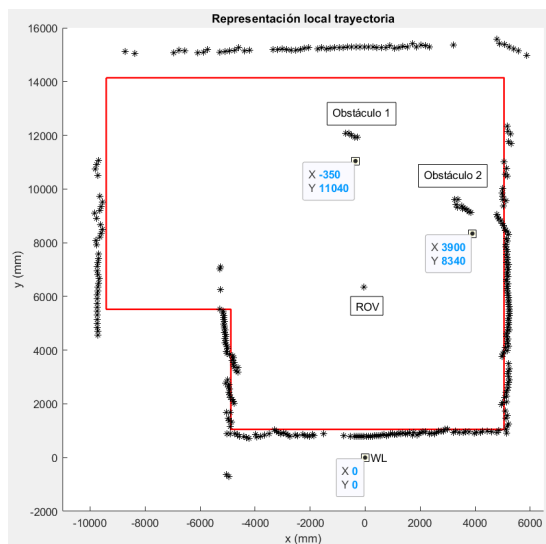


Figura 16: Experimentos en exteriores: representación local.

Por otro lado, en la figura 17, se muestra una visión satélite de la instalación dónde se realizaron los experimentos en exteriores. En esta imagen, pueden observarse las dimensiones reales de la piscina y sobrepuestas a la misma, se han representado las disposiciones de los objetos a localizar. Concretamente, se muestran: en verde los datos filtrados del sonar; en negro las posiciones medidas de los objetos; y con líneas rojas el perímetro con las dimensiones medidas de la piscina.

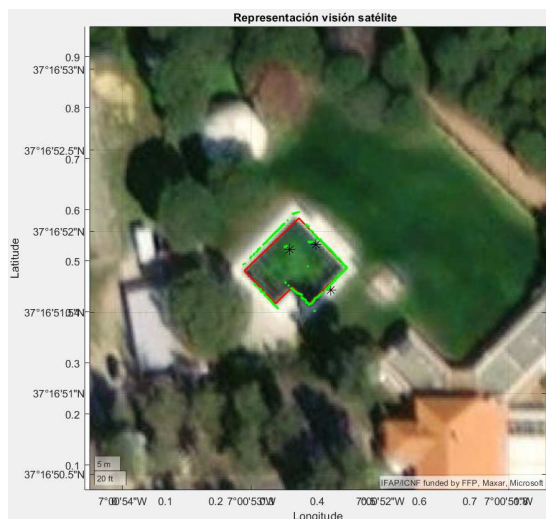


Figura 17: Experimentos en exteriores: visión satélite.

La comparación de los datos obtenidos utilizando el proceso de localización con los valores medidos manualmente, proporciona un error medio  $\bar{E}=0.81$  m, y una desviación estándar  $\sigma=0.15$  m. Lo que indica que la precisión es suficiente para afrontar la tarea de navegar hacia el elemento

identificado o incluirlo en el mapa de la instalación.

## 7 Conclusiones

En este artículo se propone un procedimiento para hacer posible que ROVs comerciales, destinados a la toma de datos e inspección de granja acuícolas, sean capaces de localizar elementos de interés para la explotación de la granja. Para ello se ha desarrollado una metodología de localización de elementos en base a los datos adquiridos por un sensor SONAR de barrido. El método propuesto utiliza un procesamiento previo de los datos y tiene en cuenta la información de la telemetría y el posicionamiento del ROV proporcionado por un sistema de localización subacuática. En condiciones conocidas, se han realizado pruebas para comprobar la precisión de los datos computados, demostrándose la viabilidad de la metodología propuesta.

## Agradecimientos

Esta investigación se ha realizado en el contexto del Proyecto KTTSeaDrones ('Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras 0622-KTTSEADRONES-5-E') financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020. Los autores quieren agradecer al Ayuntamiento de Isla Cristina (Huelva) y al Club de Golf de Bellavista (Aljaraque, Huelva) que hayan permitido utilizar sus instalaciones para realizar la experimentación presentada.

## English summary

**Locating items of interest by using remotely operated vehicles for the sustainable exploitation of fish farms**

## Abstract

*This article describes a new approach to modifying the control architecture of a remotely operated vehicle (ROV) dedicated to data collection and inspection of fish farms. The proposal is based on including a new Identification and Location module, capable of positioning different types of elements around the ROV. The localization process is based on the use of an ultrasonic*



*sensor in conjunction with a localization system. By combining both systems, local and global positioning of different elements of interest is possible. The article describes the localization methodology and presents experimental results that validate the approach.*

**Keywords:** Sustainable Aquaculture, Remotely Operated Vehicles, GNC Architecture, Underwater Location Systems.

remotely operated vehicles to intervention-autonomous underwater vehicles. IEEE Robotics & Automation Magazine, 26(2), 94-101 (2019).



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

## Referencias

- [1] Balaban, M.O., Soriano, M.G., Ruiz, E.G: Using image analysis to predict the weight of Alaskan salmon of different species. Journal of Food Science 75, 157–162 (2010).
- [2] Christ, R. D., & Wernli Sr, R. L. (2011). The ROV manual: a user guide for observation class remotely operated vehicles. Elsevier.
- [3] Gutiérrez-Estrada, J.C., de Pedro, E., López-Luque, R., Pulido-Calvo, I.: Comparison between traditional methods and artificial neural networks for ammonia concentration forecasting in an eel intensive rearing system. Aquacultural Engineering 31: 183-203 (2004).
- [4] Página web de BlueRobotics: <https://bluerobotics.com/learn/understanding-and-using-scanning-sonars/>. Accedida 19/07/2021.
- [5] Página oficial de la Unión Europea: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_12\\_955](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_12_955). Accedida 19/07/2021.
- [6] Huvenne, V.A.I., Robert, K., Marsh, L., Iacono, C.L., Bas, T.L., Wynn, R.B.: ROVs and AUVs. In: Submarine geomorphology, Springer International Publishing, 93-108 (2018).
- [7] Serpa, D., Ferreira, P., Ferreira, H., Fonseca, L.C., Dinis, M.T., Duarte, P.: Modelling the growth of white seabream and gilthead seabream in semi-intensive earth production ponds using the Dynamic Energy Budget approach. Journal of Sea Research 76: 135–145 (2013).
- [8] Petillot, Y. R., Antonelli, G., Casalino, G., & Ferreira, F.: Underwater robots: From

# APLICACIÓN DE MATLAB Y SIMULINK PARA ESTACIONES ROBÓTICAS

Sandra Arévalo Fernández (sandra.arevalo@alumnos.uva.es)

Alberto Herreros López (albher@eis.uva.es)

GIR Tecnologías avanzadas de la producción

EII-Universidad de Valladolid (Spain)

## Resumen

*Se ha diseñado una herramienta de Matlab/Simulink (SimRob) de uso didáctico para diseñar y simular estaciones robóticas. Dicha aplicación se ha realizado usando la herramienta de Matlab Robotic System Toolbox, la herramienta de Simulink SimScape Multi-Body, así como otros paquetes de software libre de Matlab. La mayoría de las aplicaciones de Matlab relacionadas con Robótica no usan el entorno Simulink en el diseño y en las simulaciones de la estación. La aplicación propuesta intenta usar los recursos de Simulink tanto para el diseño de los componentes de la estación como para la simulación de la misma. El control de la simulación, básicamente su cinemática inversa, ha sido desarrollada con las herramientas de Matlab. Con ello se pretende que el alumno disponga de un entorno agradable para diseñar y simular la estación, y unas herramientas en Matlab para su control. Los resultados de la simulación pueden ser exportados a los robot reales usando distintos tipos de comunicación, por ahora, la comunicación OPC.*

**Palabras clave:** Matlab, Simulink, Robótica, Simulación, Comunicación OPC.

## 1 Introducción

La robótica se ha convertido en una de las áreas de docencia emergentes en los últimos años debido a su demanda industrial y social. La mayoría de los robot industriales tienen sus propios software de control y simulación. Esto hace que sea difícil la docencia en este área de una forma universal, ya que, normalmente, hay que usar el software de una determinada marca de robots. Un ejemplo significativo son las unidades usadas para medir traslación y rotación. Es casi imposible encontrar dos robot de distinta marca que usen las mismas unidades.

Un robot manipulador puede ser definido como un conjunto de elementos (brazos) en serie con articulaciones (ejes) entre ellos. Los brazos del robot tienen propiedades dinámicas de masa

y momentos de inercia y los ejes pueden ser normalmente rotacionales (giro) y prismáticos (desplazamiento) [9]. Cada eje de un robot implica normalmente un grado de libertad para poder alcanzar una posición y giro en el espacio cartesiano de su herramienta (posición TCP, *Tool Central Point*). La definición de los ejes de un robot se ha realizado de forma tradicional usando la parametrización de Denavit-Hartenberg (DH) [8]. Las traslaciones y rotaciones de un eje con respecto al anterior son definidas por 4 parámetros  $[\theta, d, a, \alpha]$  que definen la rotación en  $z$ , desplazamiento en  $z$ , desplazamiento en  $x$  y rotación en  $x$ . Un robot con 6 ejes quedaría definido por una matriz de dimensión  $[6 \times 4]$ . Recientemente se ha definido los brazos y ejes de un robot en formato URDF (Unified Robot Description Format). El formato URDF define la cinemática, dinámica, ficheros gráficos asociados y colisiones de un robot en un fichero tipo *xml*. Este formato es ampliamente usado en el entorno para el desarrollo de software para robots llamado ROS (*Robot Operating System*) [6].

Se define como cinemática directa la relación que existe entre las posiciones de los ejes de un robot,  $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_6]$  en el caso de un robot con 6 ejes rotacionales, y la posición y orientación cartesiana de su posición TCP, por ejemplo  $[x, y, z, r_z, r_y, r_x]$  usando ángulos de Cardano [9]. La cinemática inversa puede ser obtenida de forma analítica para un determinado robot, o por optimización local a partir de una posición inicial de ejes  $\theta_0$  [10]. La mayoría de las aplicaciones de software usan este segundo método por ser universal para todo robot manipulador.

Una de las primeras herramientas de Matlab que intentó crear un entorno universal para análisis y control de robots fue la aplicación *Robotic Toolbox* de Coker [1] basado en el libro del mismo autor [2]. Dicho autor tiene un amplio historial en curso MOOC y todo tipo de herramientas didácticas. Este software está basado en la parametrización de Denavit-Hartenberg (DH) [2] para definir los ejes del robot, usa algoritmos de optimización local para obtener la cinemática inversa y usa una representación de los robot basada en sus ejes, di-

agrama de hilos, para acelerar las simulaciones.

A nivel nacional, una herramienta de Matlab muy amplia y muy interesante es la aplicación ARTE [3]. Dicho software define la cinemática directa basada en Denavit-Hartenberg (DH) e inversa basada en cálculos analíticos de muchos robot industriales, así como sus características dinámicas. La representación de los robots se realiza usando ficheros gráficos *stl*. Los resultados son muy interesantes, pero el principal problema de esta herramienta es que las gráficas de Matlab no están pensadas para simulación. Esto hace que las simulaciones sean lentas.

La herramienta oficial de Matlab para robótica *Robotic System Toolbox* es relativamente reciente [4]. Se basa en un objeto llamado *RigidBody* que puede guardar la configuración de un robot en su formato, clásico Denavit-Hartenberg (DH), o leyendo un fichero en formato URDF. La simulación de un objeto *RigidBody* puede ser por hilos o con ayuda de ficheros gráficos *stl*, pero en Matlab. El problema de esta herramienta es el mismo que el de ARTE, las gráficas de Matlab no están pesadas para simulación, y las simulaciones obtenidas son muy lentas.

Simulink tiene una herramienta de simulación llamada *SimScape Multibody* [7], pensada para la simulación de mecanismos mecánicos. Dicha herramienta puede leer ficheros en formato URDF y traducir la información de estos ficheros en iconos de inercia y gráficos para cada brazo e iconos de revolución o traslación para los ejes rotacional o prismático. En los iconos de rotación y traslación se pueden definir actuadores (posición o par) como entradas al sistema. La simulación de dicho sistema con las entradas definidas se representa en un entorno gráfico llamado *Mechanics Explores* con una resolución y velocidad equivalente a un software de robot industrial. El problema de esta herramienta es que solo simula, no controla la cinemática directa e inversa del sistema. Por ello no es posible mover al robot a un punto deseado, solo simular el movimiento del robot ante unas entradas definidas.

Un fichero de Simulink con elementos *SimScape Multibody* puede ser leído como un objeto *RigidBody* de *Robotic System Toolbox*. Esto permite traducir la estación realizada con la primera herramienta en un objeto con el que podemos controlar los movimientos del sistema, cinemática inversa.

El objetivo de la aplicación propuesta *SimRob* es definir una estación robótica con ayuda de la aplicación *SimScape Multibody* de forma sencilla y con ayuda de iconos ya definidos de robots y

herramientas. Tras ello, convertir esta estación a un objeto *RigidBody* para poder controlar la cinemática directa e inversa del mismo. Y por último, simular los movimientos que se deseen en dicha estación representando los resultados en el entorno *Mechanics Explores*.

## 2 Modelado de la estación robótica

Se han diseñado una serie de iconos de robot, herramientas y piezas para facilitar al alumno a que pueda diseñar su propia estación. Sin embargo, el alumno podría, sin mucho esfuerzo, hacer sus propios iconos.

### 2.1 Iconos de robots

En la figura 1 se muestra varios iconos con robots ya traducidos al lenguaje de *SimScape Multibody*. En la figura 2 se muestra un detalle de un robot y la figura 4 el brazo de un robot. Se ve que dispone de iconos para definir las articulaciones y otros para definir los componentes gráficos y dinámicos de cada brazo del robot. La entrada de Simulink es la posición de cada eje, con sus derivadas. En la máscara de los iconos de robots se ha puesto una imagen del robot para facilitar su uso por parte de los alumnos.

Estos iconos han sido obtenidos por dos métodos,

- Importando un fichero de formato URDF del robot. De este fichero se obtiene toda la información del mismo.
- Modelando un robot estándar con el formato de Denavit-Hartenberg (DH) y cambiando sus parámetros. En la máscara de estos iconos están definidas la matriz DH y las propiedades dinámicas del robot, ver figura 4. Solo es preciso cambiar estas variables y los ficheros *stl* de las gráficas para obtener el icono de otro robot.

Normalmente, los robots tienen una entrada de Simulink, la posición de cada eje, y una entrada y salida de *SimScape* para acoplar el icono a otros de la estación. En los robot para problemas de control, la entrada Simulink es el par de cada eje y tiene una salida Simulink que mide su posición.

La máscara de cada icono tiene dos variables que deben ser definidas, la posición de la base del robot y la posición inicial de los ejes del robot.

### 2.2 Iconos de Objetos de trabajo y herramientas

En la figura 5 y 6 se han definido iconos para robot y herramientas. La máscara de estos iconos

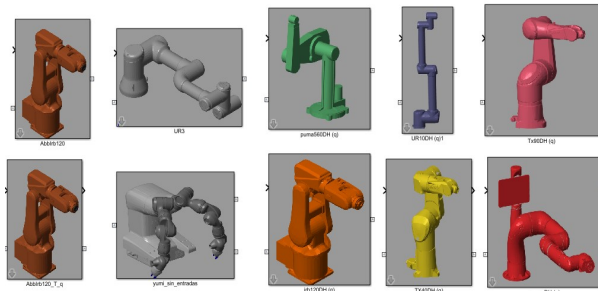


Figura 1: Iconos con diversos robots

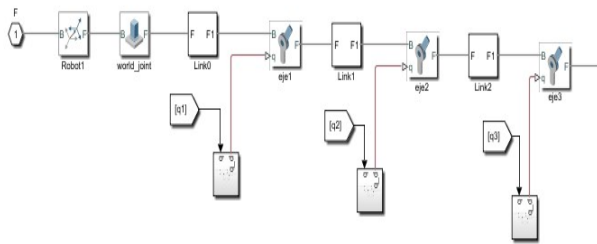


Figura 2: Estructura interna de un robot

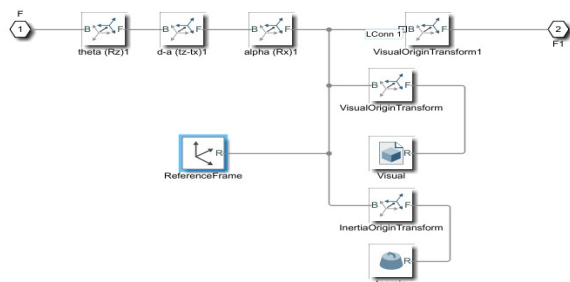


Figura 3: Estructura interna de un brazo del robot

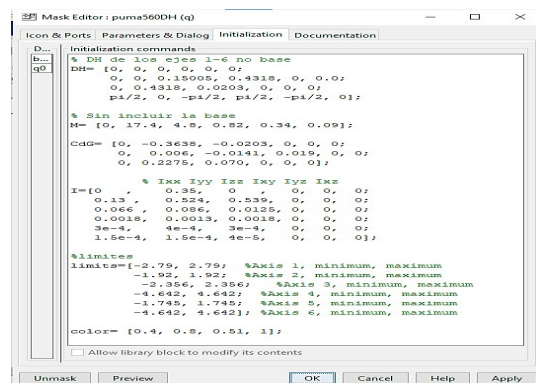


Figura 4: Máscara de un robot con parametrización DH

tiene una variable tipo estructura donde se definen las características principales del icono. Estas son: Posición base, posición TCP, color y características dinámicas. Se dispone de un función *Piezas* para definir esta estructura por defecto.

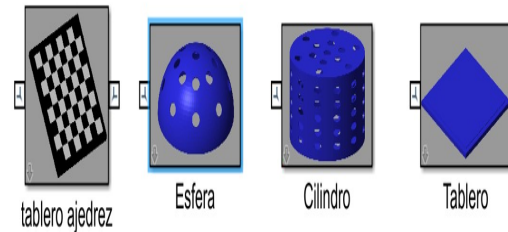


Figura 5: Iconos de piezas

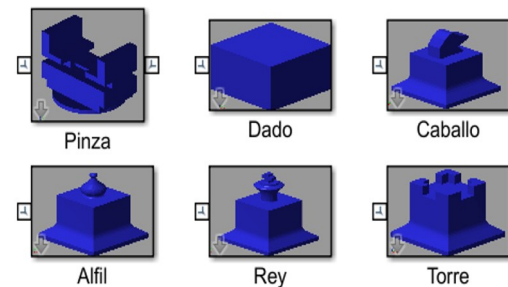


Figura 6: Iconos de herramientas y cargas

## 2.3 Composición de una estación estática

Para modelar la estación se puede acudir a los iconos ya definidos o definir otros similares. Se deben introducir los iconos base de *SimScape*, referencia total, propiedades de gravedad y el *solver* de las ecuaciones diferenciales. Luego se introducen los iconos propios de la estación.

En la figura 7 se ha definido una estación estática compuesta por un tablero, un caballo, un rey, una torre y un alfil. El caballo y el rey tienen como referencia el tablero, mientras que la torre y el alfil tienen como referencia la base. Si modificamos la posición inicial del tablero caballo y rey también se mueven, ver figura 8. Si movemos caballo y rey lo haremos respecto del tablero.

## 2.4 Composición de una estación simple con robot

En la figura 9 se ha definido una estación con un robot ABB irb120, que tiene una pinza como herramienta y un lapiz como carga. La entrada de Simulink son los ejes del robot y el resto de entradas y salidas son conexiones de *SimScape*. La

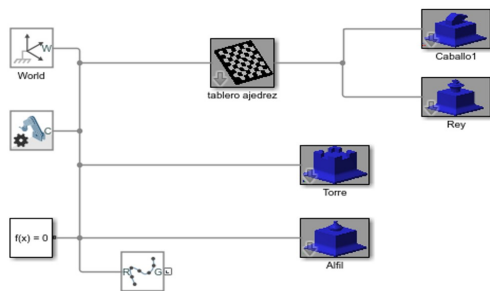


Figura 7: Estación estática de tablero con piezas

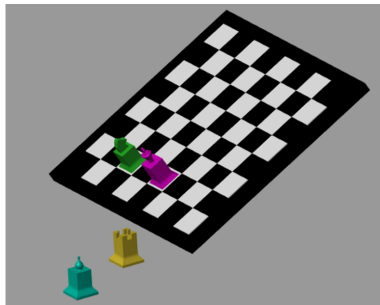


Figura 8: Simulación estación estática de tablero con piezas

figura 10 muestra la posición final de una simulación. La pinza va unida al sexto eje del robot y el lápiz al TCP de la pinza. Se ha girado  $30^\circ$  grados en el eje 1 y  $90^\circ$  grados en el eje 5. En este ejemplo solo se ha simulado los cambios en los ejes del robot, no se ha intentado buscar un punto en el espacio cartesiano.

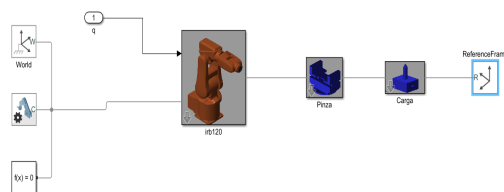


Figura 9: Estación con robot ABB irb120

### 3 Elementos de control de una estación

La estación que hemos modelado con *SimScape* es útil para simulación de cinemática directa, pero no se puede usar para que el robot describa una trayectoria deseada. Para ello se han definido dos objetos *Hmat* y *Kin* que nos ayuden en la cinemática inversa.



Figura 10: Simulación de estación con robot ABB irb120

#### 3.1 Objeto *Hmat*

Se ha definido un objeto matemático para poder hacer transformaciones entre diferentes formatos de definición de traslación y rotación. La propiedad principal del objeto es la matriz homogénea. Los métodos de este objeto han sido obtenidos básicamente de la aplicación de Corke. Se pueden dividir en diferentes apartados,

- Cambios de formato: Se puede pasar de ángulos de Euler, Cardano, cuaternios y vectores.
- Transformación de puntos y posiciones de un eje a otro.
- Tratamiento de la matriz de Denavit-Hartenberg (DH).
- Trayectorias entre posiciones.

#### 3.2 Objeto *Kin*

Para poder usar la aplicación *Robotic System Toolbox* es preciso convertir el modelo de Simulink en un objeto *RigidBody*. Esto es posible con la misma función con la que se importan fichero URDF *importrobot*. Los componentes *body* del objeto obtenido son los iconos de la estación de Simulink, numerados en forma de lista, *body1*, *body1*, ... Es preciso apuntar los componentes interesantes de la estación, por ejemplo, el TCP del robot o de la herramienta y carga.

El objeto *Kin* requiere el nombre de la estación *SimScape*, el objeto *RigidBody* de la estación y el *body* que en ese momento va a ser el TCP del robot. Con ello este objeto va a poder controlar la estación y simularla de la siguiente forma,

- Puede calcular la cinemática inversa de una trayectoria.
- Puede simular esa trayectoria en el modelo Simulink a una velocidad dada.

Los métodos principales del objeto *Kin* son las sentencias de movimiento de todo robot comercial. Los movimientos en coordenadas cartesianas pueden ser respecto de la base (por defecto) o respecto a una referencia dada.

- *MoveAbsJ*: Mueve el robot de su posición actual a otra por coordenadas articulares.
- *MoveJ*: Mueve el robot de su posición actual a otra por coordenadas cartesianas con formato  $[x, y, z, r_z, r_y, r_x]$ . Si solo se introduce la posición, la orientación permanece.
- *MoveL*: Mueve el robot de su posición actual a otra por coordenadas cartesianas con formato  $[x, y, z, r_z, r_y, r_x]$  en línea recta.
- *MoveC*: Mueve el robot de su posición actual, pasando por otro a un tercero en coordenadas cartesianas con formato  $[x, y, z]$  describiendo un arco de semi-circunferencia. La orientación permanece.

Por defecto se trazan 10 puntos en cualquier trayectoria, para ver el movimiento del robot por medio de un rastreador de *SimScape*. Además, el objeto puede guardar las distintas acciones que se han realizado, para luego simularlas a la vez. Es posible cambiar la velocidad de la simulación. Es posible cambiar el TCP respecto del que se quiere trazar la trayectoria.

### 3.3 App de control

Con el fin de ayudar a mover el robot y determinar posiciones dentro del espacio de trabajo, se ha desarrollado una app con *appdesinger* de Matlab, tal y como se muestra en la figura 11. Los componentes de la app son los siguientes,

- Importar y exportar datos: Importa y exporta el objeto *Kin* del robot que se quiere mover y el punto donde está el robot.
- Búsqueda de un puntos  $[x, y, z]$ : Se puede buscar un punto apretando los botones correspondientes, con un determinado paso (variable).
- Cambio de posición del robot: Se puede mover el robot al punto deseado con dos tipos de movimientos *MoveJ* y *MoveL*.

La app es universal porque mueve puntos, no ejes del robot. Dependiendo del robot, el objeto *Kin* correspondiente, mueve el robot de una determinada forma al punto elegido.



Figura 11: App para mover el robot

## 4 Ejemplo de estación Multi-Robot

La estación consta de dos robot con pinzas, ver figura 12. Uno de los robot no tiene carga al inicio, pero va a tomar y dejar piezas de ajedrez. El segundo tiene un lápiz de carga y va a describir trayectorias sobre una mesa inclinada. Al importar con *RigidBody* la estación tenemos en el mismo objeto los dos robots. Es preciso cambiar de TCP dependiendo del robot que queramos mover. No es posible mover ambos robots simultáneamente.

### 4.1 Tomar y dejar piezas

El primer robot tiene una carga nula, en realidad es una esfera de radio mínimo. Cuando el robot quiere tomar una pieza (torre) debe ir a la pieza y en ese momento se intercambia el contenido de la pieza (torre) por el contenido de la carga (nulo). Para ello se usa la función *MoverEn*. Como la pieza (torre) ya está en la carga, los movimientos del robot implican los movimientos de la carga. Lo mismo, pero en sentido inverso, se realizará cuando se quiera dejar una pieza.

### 4.2 Describir trayectorias sobre la mesa inclinada

El segundo robot se mueve respecto a los ejes de la mesa inclinada con movimientos lineales y circulares que va guardando. Al final, muestra la trayectoria completa. Parece que está escribiendo sobre la mesa, ver figura 13.

## 5 Ejemplo de estación con control de sistemas

La figura 14 muestra un ejemplo de control de robot y análisis de la dinámica de una estación. El robot de la estación en este caso tiene como entrada del icono de Simulink, el par de cada eje, y tiene como salida, la posición actual del robot.



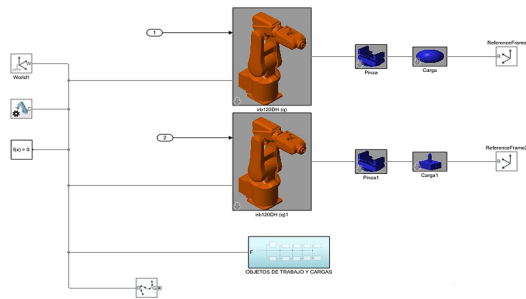


Figura 12: Estación Multi-Robots jugando al ajedrez

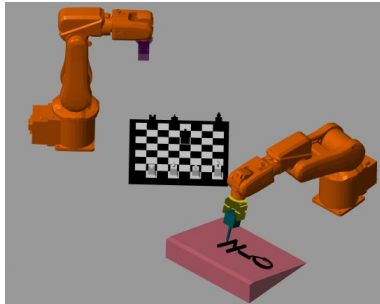


Figura 13: Simulación estación Multi-Robots jugando al ajedrez

Para conseguir que el robot vaya a una posición necesitamos realimentar el sistema e introducir 6 controladores, uno por eje. Los controladores son variables que desde Matlab se van a definir como controladores proporcionales o proporcionales-derivativos.

Los tres cubos de la estación tiene peso muy diferentes, para ver los efectos dinámicos de tomar uno de los cubos.

La estación devuelve el par de cada eje, y la posición de los mismos para poder comprobar el efecto del cambio de controladores y el efecto del cambio en tomar uno u otro cubo con distinto peso. La figura 14 muestra el inicio de la simulación.

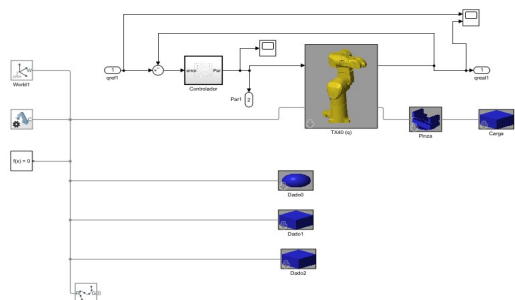


Figura 14: Estación para control de robot

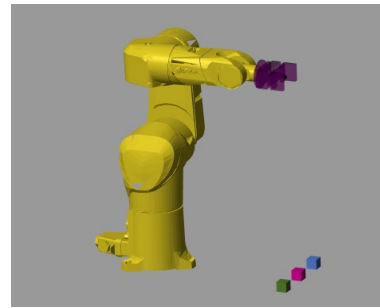


Figura 15: Simulación de estación para control de robot

## 6 Ejemplo de estación con comunicación OPC

La figura 16 muestra un ejemplo de comunicación con un robot real. Se tiene un robot ABB irb120 con pinza y lápiz. Las posiciones del robot son mandadas a un servidor OPC de ABB [12] con los iconos de la aplicación *OPC ToolBox* de Matlab [13]. Esto implica que debemos tener un servidor ABB activo que detecte el robot y en el icono tenemos que definir las variables persistentes de dicho robot que queramos modificar [11]. Todo ello se realiza con un periodo de  $T_s$  s.

El robot de ABB debe tener un programa que mueva el robot a las posiciones cambiadas definidas por las variables persistentes cada  $T_s$  s.

El experimento no se ha hecho con el robot real, si no con un robot de ABB simulado en RobotStudio [11]. La figura 17 muestra el final de la simulación en Simulink y RobotStudio.

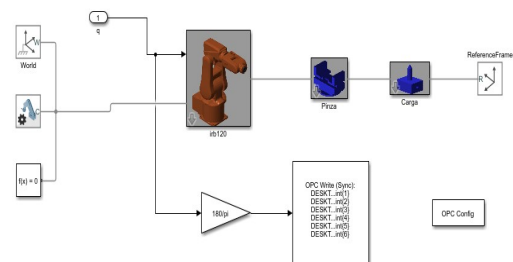


Figura 16: Estación para comunicación OPC

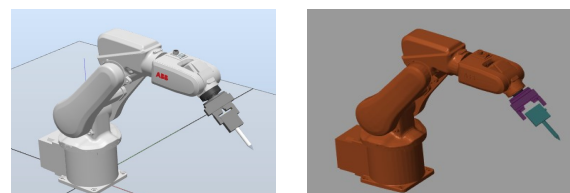


Figura 17: Simulación estación para comunicación OPC

## 7 Conclusiones y líneas futuras

Se ha descrito una aplicación que mezcla la aplicación de Simulink *SimScape Multi-Body* con la de Matlab *Robotic System Toolbox* con el fin de conseguir una herramienta didáctica en el estudio de la robótica.

La aplicación de Simulink permite diseñar una estación a partir de iconos de robot, de herramientas y objetos de trabajo. La aplicación de Matlab consigue definir las trayectorias deseadas para luego ser simuladas en Simulink. Para ello se ha realizado dos objetos, *Hmat* y *Kin*. Se ha diseñado varios ejemplos donde se demuestra la utilidad de la aplicación.

Esta aplicación puede ser usada para mover robot reales por medio de comunicación OPC, o ROS si se tuviera los robots adecuados.

### English summary

### MATLAB AND SIMULINK APPLICATION FOR ROBOTIC STATIONS

#### Abstract

*A Matlab / Simulink ( it SimRob) tool for didactic use has been designed to design and simulate robotic stations. This library has been made using the Matlab tool it Robotic System Toolbox, the Simulink tool it SimScape Multi-Body, as well as other free Matlab software packages. Most Robotics-related Matlab libraries do not use the Simulink environment in station design and simulations. The proposed library tries to use Simulink resources both for the design of the station components and for the simulation of the same. The control of the simulation, basically its inverse kinematics, has been developed with the Matlab libraries. This is intended for the student to have a pleasant environment to design and simulate the station, and some tools in Matlab to control it. Simulation results can be exported to real robots using different types of communication, for now, OPC communication.*

**Keywords:** Matlab, Simulink, Robotics, Simulation, OPC Communication.

## Referencias

- [1] Corke, P., (2014) Robotics Toolbox. <http://petercorke.com/RoboticsToolbox.htm>.
- [2] Corke, P., (2013) Robotics, Vision and Control, Fundamental Algorithms in MATLAB. Springer Tract in Advance Robotic.
- [3] Gil Aparicio, A. (2014) ARTE (A Robotic Toolbox for Education) Universidad Miguel Hernández (Elche, España)
- [4] Robotic System Toolbox (versión 2021a). Software Mathworks.
- [5] Robotics System Toolbox. User Guide. (versión 2021a).
- [6] ROS (Robot Operating System), <http://wiki.ros.org/es>.
- [7] Simscape Multibody (versión 2021a). Software Mathworks.
- [8] Niku, S.. An introduction to robotics: analysis, control, applications. John Wiley Sons (2nd ed.).
- [9] Barrientos A., Peñin L.F., Balaguer C. y Aracil P. (2007) Fundamentos de Robótica (2º edición), MacGraw-Hill.
- [10] Sugihara, T. Solvability-Unconcerned Inverse Kinematics by the Levenberg-Marquardt Method. IEEE Transactions on . Vol. 27, No. 5 (2011): 984–91. doi:10.1109/tro.2011.2148230.
- [11] ROBOTSTUDIO (versión 2020). ABB robotic. Manual del operador RobotStudio 6.01. ID de documento: 3HAC032104-005 Revision:K.
- [12] OPC SERVER ABB. ABB robotic. Manual del operador: IRC5 OPC Server help. ID de documento: 3HAC023113-001 Revision: 9.9.
- [13] OPC Toolbox (versión 2021a). Software Mathworks.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Sistema Heterogéneo para la Monitorización de la Actividad Diaria en el Hogar y el Bienestar de Personas Mayores

Francisco Miguel Calatrava Nicolás

ETSII, Universidad Politécnica de Cartagena. Calle Dr. Fleming, s/n, Cartagena

[francisco.calatrava@edu.upct.es](mailto:francisco.calatrava@edu.upct.es)

Francisco José Ortiz Zaragoza<sup>1</sup>, José Alfonso Vera Repullo<sup>1</sup>, Joaquín Roca González<sup>1</sup>, Manuel Jiménez Buendía<sup>1</sup>, Óscar Martínez Mozos<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>ETSII, Universidad Politécnica de Cartagena. Calle Dr. Fleming, s/n, Cartagena

<sup>2</sup>AASS, Örebro University, Suecia

[francisco.ortiz@upct.es](mailto:francisco.ortiz@upct.es), [jose.vera@upct.es](mailto:jose.vera@upct.es), [jroca.gonzalez@upct.es](mailto:jroca.gonzalez@upct.es), [manuel.jimenez@upct.es](mailto:manuel.jimenez@upct.es), [oscar.mozos@oru.se](mailto:oscar.mozos@oru.se)

## Resumen

*En este artículo se presenta el diseño de un sistema heterogéneo cuya finalidad es la de cuidar la salud y el bienestar de las personas mayores que viven solas en su hogar. Se intenta seguir la iniciativa del programa europeo AAL (Ambient Assisted Living) Dicho sistema se encuentra formado por un dispositivo robótico móvil, un conjunto de sensores domóticos de bajo coste, un dispositivo médico tipo pulsera de actividad y una aplicación de Android para el estudio del estado anímico. El sistema ha sido integrado haciendo uso de ROS (Robot Operating System), de tecnologías IoT (Internet of Things) tales como Node-RED y la plataforma domótica Home-Assistant. Este sistema heterogéneo se desarrolla en la actualidad en un proyecto nacional Retos de la Sociedad.*

**Palabras clave:** Robótica asistencial, envejecimiento, Ambient Assisted Living (AAL), Node-RED, IoT, interoperabilidad, sistemas heterogéneos, ROS, Smart Home.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los avances científicos y tecnológicos han traído consigo mejoras en la forma y calidad de vida de las personas, haciéndose notar en la longevidad. Sin ir más lejos, a pesar del declive de 1.6 años acontecido debido a la pandemia de la COVID 19, España sigue encabezando las listas en cuanto a longevidad en Europa, pasando, en términos totales, de 84 a 82.4 años [1]. Suponiendo el fin de la vida laboral a los 65 años, se pueden contabilizar, aproximadamente, 17.2 años de merecida jubilación. Desgraciadamente, a la par que pasa el tiempo, la salud suele empeorar, dejando, normalmente, lo peor para el final. Por otro

lado, también existe el problema de la inclinación cada vez mayor a vivir esa etapa en soledad.

Tal y como se puede observar en la Figura 1, la tendencia a vivir en soledad para mayores de 65 años sigue siendo ascendente en los últimos diez años. Así pues, y centrándonos en la situación española, se puede concluir que se vive más tiempo, la salud se ve más afectada en los últimos años de vida y, además, se está incrementando la tendencia de vivir en soledad. Estos tres factores (esperanza de vida, deterioro de la salud y soledad) constituyen la motivación del proyecto coordinado HIMTAE (Heterogeneous Intelligent Multi-Robot Team for Assistance of Elderly People), del programa Retos de la Sociedad del Ministerio (2019-2021), en el que colaboran diferentes investigadores de la Universidad Politécnica de Cartagena, la Universidad de Murcia, la Universidad Carlos III de Madrid y la Universidad de Örebro en Suecia.

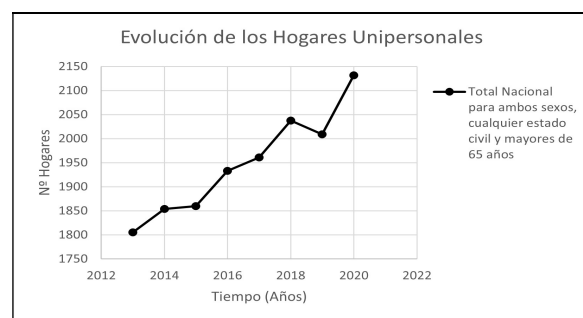


Figura 1: Evolución de los hogares unipersonales en España teniendo en cuenta la población nacional para ambos sexos, cualquier estado civil y mayores de 65 años (Datos obtenido de [2]).

Este artículo se centra en la exposición del sistema que engloba el subproyecto Robwell (Robotic-based Well-Being Monitoring and Coaching for Elderly People during Daily Life Activities) cuya principal

misión es la de obtener información acerca de las rutinas y parámetros fisiológicos del usuario, con la finalidad de realizar una estimación del estado anímico para que el robot móvil ofrezca diferentes actividades con el objetivo de mejorarlo.

Se trata de un sistema heterogéneo que incluye elementos de diferente naturaleza como son la robótica, la domótica y la inteligencia artificial orientada al análisis del estado anímico del usuario. El sistema robótico integrado con inteligencia ambiental se enmarca en el campo de la robótica asistencial, siendo capaz de interactuar con el usuario y de actuar en función de su estado anímico de manera similar al BotCare de Samsung [3] o al robot Rassel de la UPV [4], que, aunque no es un robot móvil, sí que se centra en la interacción y el reconocimiento del estado anímico. El ámbito de domótica y smart home orientado al bienestar y a la salud de las personas mayores ha tenido un creciente interés en los últimos años. Sistemas como los que se muestran en el proyecto PROSAFE [5], TigerPlace [6] o SMARTA [7] muestran la evolución desde el proyecto de 1996 de Alex Pentland [8] que fue de los primeros que se aproximó a la idea de smart home que se tiene hoy en día. Por otro lado, teniendo en cuenta que el sistema presentado en este proyecto se centra, no solo en la parte de domótica, sino también en la integración, conviene mencionar proyectos como SEAL [9] o el presentado en [10], en los que también se usa ROS como middleware. En cuanto al reconocimiento de estado anímico, cabe destacar que este campo ha ganado mucha importancia dentro del mundo de la inteligencia artificial. Estudios de laboratorio como [11] y [12] han mostrado buenos resultados. Sin embargo, llevar este sistema a la vida real se hace complicado por la cantidad de variables del día a día y por la incomodidad de los sensores de laboratorio. El sistema propuesto en este proyecto pretende llevar el estudio al ambiente cotidiano del hogar mediante una aplicación Android usando EMAs (Ecological Momentary Assessments), que permiten la evaluación del estado de ánimo con 2 preguntas acerca del nivel de felicidad y actividad del usuario, tal y como se propone en un trabajo previo del que parte el equipo investigador del proyecto Robwell [13].

## 2 SISTEMA PROPUESTO

El sistema propuesto se engloba dentro de la tipología de sistema heterogéneo debido a su diversidad. A continuación, se nombran y resumen brevemente los componentes del sistema para luego explicarlos en profundidad.

- Plataforma robótica. Deberá navegar de manera autónoma por la casa para atender a

las necesidades del usuario o para sugerirle alguna actividad según su estado anímico.

- Ecosistema de sensores domóticos. Se trata de un conjunto de sensores tanto comerciales como de diseño propio para monitorizar el estilo de vida del usuario.
- Dispositivo médico Empatica E4. Permitirá la monitorización de ciertas variables fisiológicas como son el BVP (Blood Volume Pulse), EDA (Electrodermal Activity), la temperatura cutánea, el HR (Heart Rate), el IBI (Interbeat Interval) y la aceleración tanto en el eje X, como Y como Z.
- Aplicación Android. Para poder hacer un estudio psicológico y poder relacionar las características de la información obtenida de la Empatica E4 con el estado anímico del usuario, se ha desarrollado una aplicación Android en la que se podrá responder a preguntas básicas sobre actividad/bienestar.

En la Figura 2 se pueden observar algunos de los elementos del sistema.

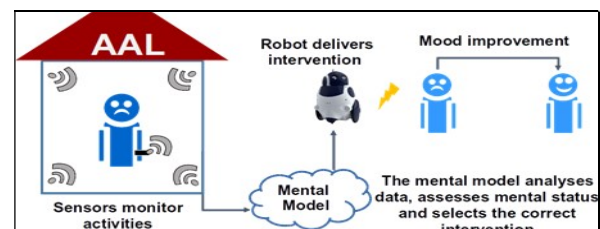


Figura 2: Sistema general del subproyecto Robwell.

Uno de los principales problemas de los sistemas heterogéneos es, precisamente, el reto de integrar los elementos que intervienen en el mismo. El principal problema en este proyecto viene de la mano del sistema domótico. Tal y como se ha mencionado, se pretende ser lo menos intrusivo posible y se buscan, siempre que sea posible, soluciones comerciales de bajo coste. Por ello, uno de los principales retos de este proyecto es diseñar y desarrollar un componente hardware/software intermedio encargado de hacer transparente la información entre los diferentes elementos del sistema. Para llevar a cabo esta idea se ha utilizado ROS y tecnologías de IoT (Internet of Things).

### 2.1 PLATAFORMA ROBÓTICA

Para la plataforma robótica se ha optado por la solución comercial Turtlebot II [14]. Se trata de un robot móvil de tipo diferencial con dos ruedas de apoyo situadas en situación romboidal. La base móvil sobre la que se monta el resto de la plataforma robótica es la IClebo de Kobuki. Dicha base ofrece la posibilidad de montar encima plataformas según una



estructura modular para incorporar el hardware extra necesario como CPU, LIDAR, etc. Para conseguir una interfaz con el usuario que integre lenguaje natural además de la interacción visual, en este proyecto se monta en la última de sus plataformas un altavoz inteligente tipo Alexa 10.

Para llevar a cabo la navegación autónoma del robot dentro del hogar evitando los objetos tanto estáticos como dinámicos, el robot dispone de un sensor LIDAR Hokuyo UST-10LX que le permite obtener información precisa del entorno para el mapeo y navegación. Para este propósito, en una primera aproximación se ha usado el stack de navegación de ROS configurándolo para el uso del Hokuyo UST-10LX. No obstante, se tiene previsto implementar métodos de navegación semántica para mejorar la fiabilidad de esta navegación autónoma.

## 2.2 ECOSISTEMA DE SENSORES

Esta parte del sistema incluye todos los sensores domóticos comerciales y de desarrollo propio que aportarán información acerca del comportamiento y los hábitos del usuario. En la Figura 3 se puede observar el reparto en la casa de los sensores domóticos básicos comerciales a falta del sensor de inundación y la puerta universal de infrarrojos.

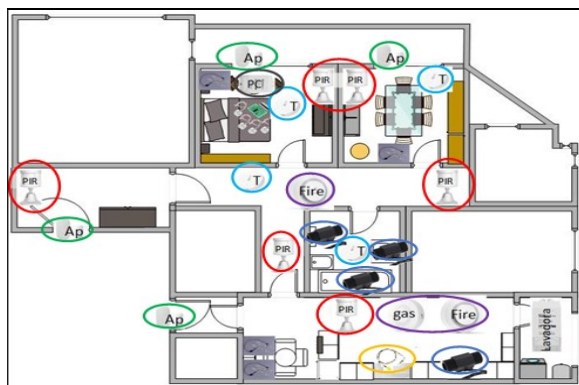


Figura 3: Distribución de los sensores domóticos (AP=Apertura/verde, PIR=Presencia/rojo, T=Temperatura/azul claro, PC=Consumo Eléctrico/negro, gas=gas natural/violeta, fire=fuego/violeta, azul oscuro= sensor de flujo, amarillo=termopar).

Tabla 1: Sensores del sistema.

Nombre Sensor	Modelo	Descripción
Mi Motion Sensor	YTC4041GL	Sensor PIR de Xiaomi (PIR)
Temp/Hum Aqara	WSDCGQ11LM	Sensor de temperatura y humedad de Aqara (T)
Mi Window/Door Sensor	YTC4039GL	Sensor de puerta y ventana de Xiaomi (Ap)

Detector Gas Heiman	HS1CG	Detector de gas natural de Heiman (gas)
Detector de Inundación Aqara	SJCGQ11LM	Detector de inundación de Aqara
Detector de Humo Xiaomi	JTYJ-GD-03MI/BB	Detector de humo y fuego de Xiaomi (fire)
Sonoff POW	IM171130001	Medida de consumos (PC)
Broadlink RM-Mini3	RM-MINI3	Puerta universal para infrarrojos
Sensor de flujo	Desarrollo propio	Sensor para la monitorización del uso de los grifos del aseo y cocina
Sensor de sentado	Desarrollo propio	Sensor para la monitorización del tiempo que pasa el usuario sentado
Sensor de pesado de cama	Desarrollo propio	Sensor para la monitorización del peso del usuario y del tiempo que pasa en cama
Sensor de consumos grandes	Desarrollo propio	Sensor para dispositivos de gran consumo de casa. Se usará el PZEM-004T.
Termopar vitro/fogones	Desarrollo propio	Sensor para monitorizar el uso de la vitro o los fogones
Sensor teléfono fijo	Desarrollo propio	Sensor para monitorizar la interacción social a través del teléfono fijo
Sistema de localización	Desarrollo propio	Sistema de localización en casa con decaWave

Como se puede ver en la Tabla 1, se han propuesto una gran cantidad de elementos para monitorizar la actividad de usuario y el estado de la vivienda. Los 8 primeros de la tabla son dispositivos comerciales y los restantes son de diseño propio. La mayor parte de los sensores comerciales usan el protocolo Zigbee, por tanto, para poder realizar una gestión de los mismos de manera local desde Home Assistant, se están usando 2 puertas de enlace genéricas: cc2531 y Conbee II.

Por otro lado, para los sensores de diseño propio, se utiliza un microcontrolador de bajo coste ESP32 [15] para publicar la información de los mismo mediante el protocolo de comunicación MQTT a un broker Mosquitto montado sobre la misma Raspberry pi que Home Assistant.

## 2.3 EMPATICA E4 Y APLICACIÓN MÓVIL

La Empatica E4 es un dispositivo médico que tiene 2 modos de funcionamiento. El que se va a usar para el estudio es el llamado modo streaming. Haciendo uso de la aplicación oficial de Empatica E4 (E4 RealTime), se establece la conexión entre el dispositivo médico y el smartphone mediante BLE (Bluetooth Low Energy) y se comienza a tomar datos. Una vez se termine dicha toma de datos, ya sea por desconexión no intencionada del dispositivo o por desconexión intencionada, los datos se subirán a

la nube propia de Empatica E4, donde serán accesibles y descargables. En la Tabla 2 se pueden observar las principales características de los sensores de la Empatica E4.

Tabla 2: Frecuencia de muestreo de los sensores de Empatica E4.

Sensor	Frecuencia Muestreo
BVP	64 Hz
Acelerómetro	32 Hz
Temperatura Cutánea	4 Hz
EDA	4 Hz

En cuanto a la aplicación Android desarrollada para el estudio, tiene como principal requisito permitir recoger información de cómo se siente el usuario en cuanto a su nivel de felicidad y actividad de la forma más simple posible. Se hace con el objetivo de poder contrastar sus respuestas con los datos fisiológicos recogidos con la Empatica E4 en los instantes pertinentes y, después de entrenar el algoritmo de machine learning con dichos datos, llegar a poder estimar el estado de ánimo del usuario sin necesidad de tener que responder a los cuestionarios [13]. La imposición de diseño inicial fue la de crear un sistema móvil-Empatica E4 que se pudiera entregar al sujeto de la prueba como si fuera un pack y con todas las configuraciones pertinentes hechas. Se decidió así debido a que la aplicación desarrollada necesita permisos para el acceso a las notificaciones del smartphone y se llegó a la conclusión de que instalar una aplicación de estas características en un móvil personal podría considerarse intrusivo.

La aplicación dispone de 2 modos: un modo usuario y un modo administrador. Dentro del modo usuario solo se permitirá contestar a un cuestionario en el que el sujeto de la prueba deberá responder como de activo y de feliz se siente en una escala de 0 a 4. El modo administrador dispone de un menú principal en el que se puede acceder a la pantalla del cuestionario y a la configuración de la aplicación. Dentro de la configuración se pueden establecer las horas a las que se quiere que se dispare una notificación que avise al sujeto de la prueba de que tiene que realizar el cuestionario. Por otro lado, la aplicación permite inicializar una clave de usuario para cada uno de los sujetos. Así se evita registrar datos personales de los usuarios. Cada una de las claves serán proporcionadas por el investigador.

Como se puede observar en la Figura 4, en el menú se tienen más opciones de las que se han explicado. Esto se debe a que, actualmente, la aplicación sigue en desarrollo.



Figura 4. Opciones del modo administrador.

La idea final es no necesitar la aplicación de Empatica E4 RealTime, sino que desde la aplicación desarrollada se publiquen los datos de los sensores en el broker Mosquitto que va instalado sobre Home Assistant. De esta manera será accesible desde todo el sistema. En cuanto al apartado Fitbit de la aplicación, se ha añadido debido a que se tiene planeado usar una pulsera de actividad Fitbit Sense para en proyecto. El objetivo final es validar los datos de la Fitbit Sense con los datos de la Empatica E4 y, de esta manera, prescindir de la Empatica E4 como componente del sistema final. El principal motivo por el que se tiene previsto prescindir de la Empatica E4 es el precio.

Como se puede observar en la Figura 5, el modo usuario solamente dispone de la posibilidad de realizar el cuestionario. Para la selección del nivel de felicidad y de actividad se dispone de 2 barras discretas con 5 niveles (0-4).



Figura 5: Opción del modo usuario.

La información total que se obtiene de esta aplicación es la siguiente:



- Información actividad/felicidad. Se guarda el resultado del cuestionario junto con el timestamp de la realización del mismo.
- Información de reacción del usuario. Se guarda el timestamp del momento en el que se lanza la notificación correspondiente al cuestionario y el timestamp del momento en el que el usuario pulsa la notificación para acceder a la pantalla del cuestionario.
- Información de las horas programadas de los cuestionarios. Se guardan las horas definidas a las que deben lanzarse las notificaciones de la realización del cuestionario y todas las modificaciones que haga el usuario.

Toda esta información se guardará en archivos locales de la aplicación y en una hoja de cálculo en la nube (Google Sheet).

### 3 INTEGRACIÓN DE ELEMENTOS

Para la integración de todos los elementos del sistema robótico, sensores domóticos e información fisiológica se ha decidido usar como middleware ROS ya que entre sus paquetes ofrecen muchas opciones de conectividad. Por otra parte, el hecho de que permita organizar la arquitectura en nodos siendo multilenguaje y siguiendo la política de publicador/suscriptor aporta flexibilidad y facilidad de entendimiento en el diseño.

Hasta el momento se han diseñado y validado los caminos de integración entre los diferentes elementos del sistema heterogéneo y ROS. Actualmente se está trabajando en la implementación de la arquitectura software que va a ir sobre ROS para aportar al sistema heterogéneo interoperabilidad y transparencia entre los componentes.

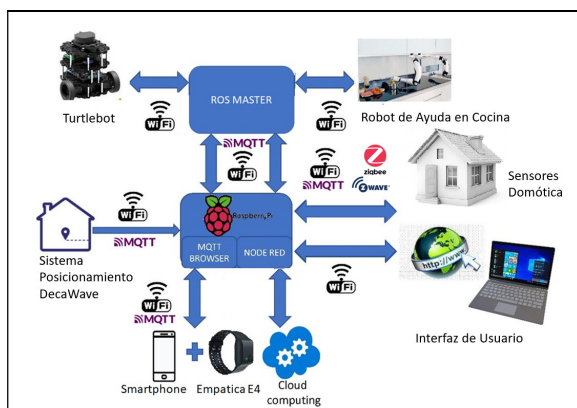


Figura 6: Esquema general de integración.

En la Figura 6 se puede observar un esquema general del sistema. El sistema para identificar la posición del

usuario dentro de la casa está aún en desarrollo. En cuanto al robot de ayuda a la cocina, no se encuentra dentro del subproyecto Robwell, sino que del desarrollo del mismo se encarga la universidad Carlos III de Madrid. No obstante, al estar programado con ROS, su integración con la arquitectura global del sistema heterogéneo es igualmente compatible y ha sido validada.

Por otra parte, en la Figura 6 se pueden destacar dos bloques sobre los que se van a montar la mayoría del sistema. Estos bloques son:

- Raspberry Pi. Se trata de una Raspberry Pi 4 de 8 Gb de memoria RAM a la que se le ha añadido un disco duro SSD de 240 Gb que va a llevar instalado Home Assistant. Sobre la misma se usará una puerta de enlace genérica zigbee cc2531 y Conbee II, un broker Mosquitto MQTT, un servidor Node-RED y un software de Home Assistant llamado Zigbee2MQTT. De esta manera se podrá obtener información de los sensores domóticos. Además, así se tiene preparado el sistema para recibir información del dispositivo Empatica E4 mediante MQTT cuando la extensión de la aplicación Android esté preparada.
- ROS Master. Se trata de un PC tipo Intel-NUC en el que se ha instalado Ubuntu 16.04 con la finalidad de ejecutar sobre el mismo ROS Kinetic. Sobre este PC se ejecutará la lógica y el software que proporcionará interoperabilidad y transparencia entre los diferentes elementos del sistema. Para la integración con Home Assistant se ejecutará el websocket del paquete rosbridge\_server. De esta manera, se podrá publicar y suscribirse a los topics desde Node-RED. Por otro lado, la integración con otros elementos del sistema que lleven implementado ROS Kinetic es directa.

### 4 PRUEBAS, RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Como ya se ha mencionado en el artículo, aunque el sistema se encuentra en una fase avanzada de diseño y desarrollo, todavía no está terminado. La mayoría de las pruebas que se han hecho han sido de integración, de validación individual de los diferentes nodos y de funcionamiento del robot. También se está llevando a cabo en este momento la fase de recogida de datos de diversos usuarios, por eso no se ha incluido en el artículo el procesamiento con machine learning de los mismos.

Un ejemplo de ello puede ser el funcionamiento de la navegación de la plataforma robótica. Se consiguió adaptar con éxito el stack de navegación de ROS para un mapeo teleoperado y una navegación autónoma con el LIDAR Hokuyo UST-10LX en un entorno real de una casa. En la Figura 7 se puede observar un ejemplo de mapeo.



Figura 7: Mapeo con Hokuyo UST-10LX.

Para la prueba de navegación autónoma, se propusieron una serie de puntos de navegación en el entorno hasta los que tendría que navegar en ciertas horas del día. Tras terminar el circuito propuesto, debería volver a la estación de carga ejecutando un algoritmo de autodocking. En la Tabla 3 se pueden observar los puntos de navegación que se propusieron.

Tabla 3: Puntos de navegación (H=Habitación, A=Aseo, S=Salón, C=Cocina, E=Estación).

Desayuno						
H	A	S	C	A	S	E
08:00	08:05	08:15	08:17	08:37	08:45	08:47
Merienda						
S	C	A	S	E		
11:30	11:33	11:47	12:00	12:02		
Comida						
S	C	A	S	E		
13:30	13:33	14:00	14:10	14:12		
Merienda						
S	C	A	S	E		
17:30	17:32	17:47	17:57	18:00		
Cena						
S	C	A	S	E		
20:30	20:33	21:02	21:10	21:12		
Dormir						
S	H	A	H	E		
22:30	22:32	22:35	22:45	22:47		

Para poder realizar un seguimiento de la correcta realización del experimento, se representó el cambio

de voltaje de la batería del Turtlebot que ofrece ROS al inicializar el paquete básico del mismo.

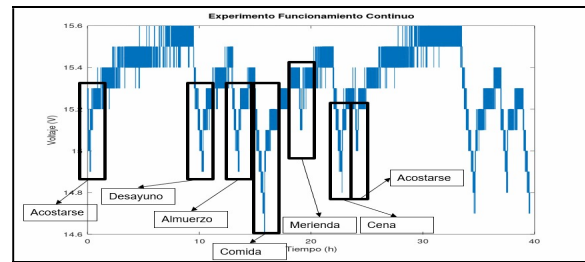


Figura 8: Curva típica de funcionamiento de 1 día (Tabla 3).

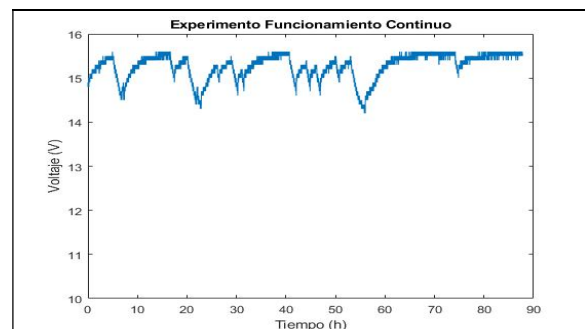


Figura 9: Experimento 1 de funcionamiento continuo según la Tabla 3 (Hora de inicio del experimento 14:30).

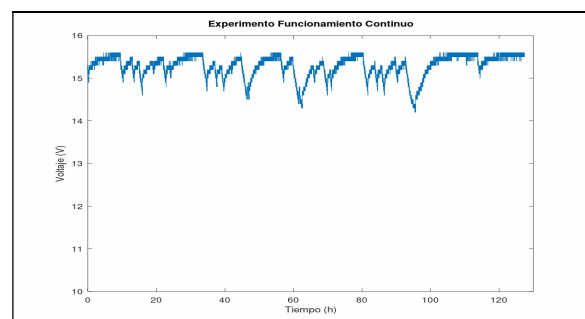


Figura 10: Experimento 1 de funcionamiento continuo según la Tabla 3 (Hora de inicio del experimento 23:12).

Como se puede observar en la Figura 9, se ven picos de carga y descarga de la batería debido a un funcionamiento continuo de 90 horas aproximadamente. Si se compara con la Figura 10, se verá que hay picos extraños que no concuerdan con el ciclo de 1 día. Esto se debía a la estación de carga del Turtlebot y al algoritmo de autodocking. Hay que tener en cuenta que, para llevar a cabo el proceso de autodocking, la estación de carga dispone de unos receptores infrarrojos mientras que la base del Turtlebot dispone de los emisores. Así pues, se llegó a la conclusión de que el sistema fallaba debido a que se encontraba en un sitio excesivamente luminoso y

poco amplio. Para el siguiente experimento, mostrado en la Figura 10, se decidió poner la base en un lugar más oscuro y amplio. De esta manera se logró un funcionamiento más coherente con las especificaciones del dispositivo. Sin embargo, acabó fallando en algunos casos y se requirió de intervención manual.

Por tanto, se llegó a la conclusión de que el algoritmo de autodocking no era lo suficientemente fiable para una aplicación como la que se propone en este sistema. Actualmente se está trabajando en otros métodos alternativos mediante el uso de visión artificial. A pesar de este resultado, se puede concluir que el robot dispone de la suficiente autonomía para esta aplicación.

En cuanto a la parte de la aplicación Android y de la Empatica E4, se está aún en fase de prueba de la aplicación. De momento, se ha trabajado con cuatro sujetos de pruebas totalmente ajenos al proyecto que están ofreciendo realimentaciones de los posibles problemas de la aplicación.

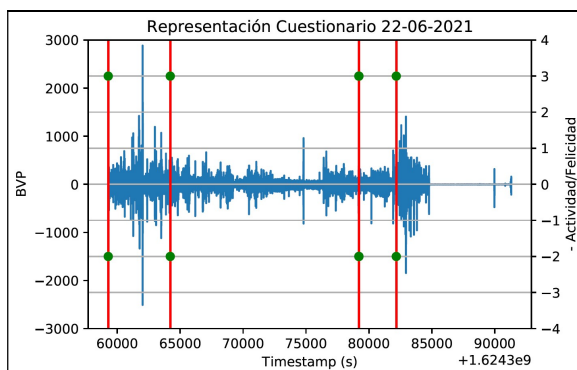


Figura 11: Representación de la señal BVP obtenida el 22-06-2021 con los test felicidad/actividad del día.

La Figura 11 es una representación de una de las variables obtenidas de la Empatica E4 junto con los cuestionarios del día 22-06-2021. De esta manera se pueden encontrar fallos más fácilmente y ver si son fruto de una mala lógica de programación o porque el usuario no ha cumplido con su responsabilidad. La señal azul se corresponde con el BVP, la recta vertical roja marca el timestamp en el que se ha respondido el cuestionario y los puntos verdes marcan la respuesta del usuario. Cabe destacar que para más claridad en los datos se ha decidido representar el valor negativo de la actividad. De esta manera el semieje positivo queda para la felicidad y el negativo para la actividad. Si se tiene en cuenta que debe haber 5 cuestionarios respondidos por cada día, se puede observar fácilmente que falta una línea roja. Tras analizar los datos se observa que el timestamp del tercer y cuarto cuestionario son muy cercanos. Esto quiere decir que el usuario no ha

estado atento a la notificación del tercer cuestionario y lo ha hecho seguido al cuarto cuestionario. Por otra parte, con esta representación es fácil detectar posibles fallos con la Empatica E4. En la Figura 11 se puede ver que el tramo final de la señal de BVP es plano, lo que indica que el usuario, muy posiblemente, se haya quitado el dispositivo durante ese intervalo de tiempo.

En cuanto a la parte del sistema domótico, se ha conseguido montar con éxito un servidor Home Assistant de prueba con la puerta de enlace cc2531. Tras probarlo 15 días con los sensores Zigbee de Xiaomi se ha comprobado que no ha habido desconexiones, lo que permite deducir que el sistema es bastante estable. Cabe destacar que con la otra puerta genérica (Conbee II) no se ha conseguido dicha estabilidad (cada 6 horas había que reconectar manualmente algunos de los sensores, mayoritariamente los PIR).

En cuanto a los futuros trabajos, se centran en seguir desarrollando el sistema. Por la parte de la aplicación queda terminar de validar los datos para comenzar con la fase de entrenamiento del algoritmo de machine learning. En la parte de inteligencia artificial se van a usar algoritmos diferentes a los utilizados en [13] para mejorar la capacidad de predicción del estado de ánimo del sistema. Se continuará con la implementación de la arquitectura software del sistema para conseguir la interoperabilidad de todos los elementos que lo componen. Además, se debe realizar también el cambio de la estrategia de navegación autónoma usando navegación semántica y solucionar el problema del autodocking con otras estrategias como el uso de visión artificial. También se deberá buscar la forma de integrar Alexa 10 con ROS y programar una skill específicamente diseñada para el proyecto.

### Agradecimientos

El proyecto HIMTAE / subproyecto Robwell (referencia RTI2018-095599-A-C22) ha sido financiado por el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016. Tiene una duración de 3 años, prorrogado hasta septiembre de 2022.

Está co-financiado por el programa Knut and Alice Wallenberg foundation WASP-AI de Suecia.

## English summary

### Heterogeneous System for Daily Activity Monitoring at Home and Well-being of Elderly People

#### Abstract

*This paper presents the design of a heterogeneous system for the health care and well-being of elderly people living alone at home. The system consists of a mobile robotic device, a set of low-cost home automation sensors, a medical device such as an activity bracelet and an Android application for the study of user's mood. The system has been integrated using ROS, IoT (Internet of Things) technologies such as Node-RED and home automation technology such as Home-Assistant. This heterogeneous system is currently being developed in a national project RETOS.*

**Keywords:** Assistive robotics, ageing, Ambient Assisted Living (AAL), Node-RED, IoT, interoperability, heterogeneous systems, ROS, Smart Home

#### Referencias

- [1] EUROSTAT, "Mortality and life expectancy statistics," 2021. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Mortality\\_and\\_life\\_expectancy\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Mortality_and_life_expectancy_statistics).
- [2] INE, "Encuesta Continua de Hogares (ECH)," 2021. <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t20/p274/serie/prov/p02/10/&file=02014.px#!tabs-tabla>.
- [3] Samsung, "Samsung Bots, los compañeros del futuro," 2019. <https://news.samsung.com/co/samsung-bots-los-mejores-companeros-roboticos-en-camino-a-enriquecer-la-calidad-de-vida-de-las-personas>.
- [4] E. García, "Rassel, el robot que ayuda a las personas mayores," 2018. [https://cadenaser.com/emisora/2018/12/07/radio\\_valencia/1544174190\\_652009.html](https://cadenaser.com/emisora/2018/12/07/radio_valencia/1544174190_652009.html).
- [5] M. Chan, H. Bocquet, E. Campo, T. Val, and J. Pous, "Alarm communication network to help carers of the elderly for safety purposes: A survey of a project," *Int. J. Rehabil. Res.*, vol. 22, no. 2, 1999, doi: 10.1097/00004356-199906000-00008.
- [6] G. Demiris *et al.*, "Nurse Participation in the design of user interfaces for a smart home system," in *SMART HOMES AND BEYOND*, 2006, vol. 19.
- [7] L. Pigni *et al.*, "Pilot Test of a New Personal Health System Integrating Environmental and Wearable Sensors for Telemonitoring and Care of Elderly People at Home (SMARTA Project)," *Gerontology*, vol. 63, no. 3, 2017, doi: 10.1159/000455168.
- [8] A. P. Pentland, "Smart Rooms," *Sci. Am.*, vol. 274, no. 4, 1996, doi: 10.1038/scientificamerican0496-68.
- [9] E. Bellocchio, G. Costante, S. Cascianelli, P. Valigi, and T. A. Ciarfuglia, "SmartSEAL: A ros based home automation framework for heterogeneous devices interconnection in smart buildings," 2016, doi: 10.1109/ISC2.2016.7580798.
- [10] T. Chakraborti, S. Srivastava, A. Pinto, and S. Kambhampati, "An ROS-based shared communication middleware for plug and play modular intelligent design of smart systems," *arXiv*, 2017.
- [11] O. M. Mozos *et al.*, "Stress detection using wearable physiological and sociometric sensors," *Int. J. Neural Syst.*, vol. 27, no. 2, 2017, doi: 10.1142/S0129065716500416.
- [12] F. T. Sun, C. Kuo, H. T. Cheng, S. Buthpitiya, P. Collins, and M. Griss, "Activity-aware mental stress detection using physiological sensors," in *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*, 2012, vol. 76 LNICST, doi: 10.1007/978-3-642-29336-8\_16.
- [13] D. Bautista-Salinas, J. R. Gonzalez, I. Mendez, and O. M. Mozos, "Monitoring and Prediction of Mood in Elderly People during Daily Life Activities," 2019, doi: 10.1109/EMBC.2019.8857847.
- [14] Turtlebot, "TurtleBot2." <https://www.turtlebot.com/turtlebot2/>.
- [15] Az-Delivery, "ESP32." <https://www.az-delivery.de/es/products/esp32-developmentboard>.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

## Entrenamiento, optimización y validación de una CNN para localización jerárquica mediante imágenes omnidireccionales.

Juan José Cabrera, Sergio Cebollada, Mónica Ballesta, Luis Miguel Jiménez, Luis Payá, Óscar Reinoso

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad s/n 03202 Elche (Alicante), España

{juan.cabreram, sergio.cebollada, m.ballesta, luis.jimenez, lpaya, o.reinoso}@umh.es

### Resumen

*El objetivo del presente trabajo es abordar la localización de un robot móvil mediante el entrenamiento de una Red Neuronal Convolucional (CNN) de manera que se obtengan unos resultados óptimos. El problema de localización se aborda de forma jerárquica empleando un sistema catadióptrico omnidireccional y se trabaja directamente con las imágenes capturadas sin pasar a panorámicas, ahorrando así el tiempo de cálculo asociado a este proceso. La localización se lleva a cabo en dos pasos y en ambos se emplea la arquitectura de la CNN con diferentes objetivos. Primero se lleva a cabo una localización gruesa que consiste en identificar la estancia en la que se encuentra el robot por medio de la CNN. Después se realiza una localización fina en dicha estancia, en la cual la CNN es empleada para la obtención de descriptores holísticos a partir de las capas intermedias de la red. Estos descriptores globales permiten encontrar la posición donde se encuentra el robot de manera más precisa por medio de una búsqueda del vecino más cercano, comparando el descriptor correspondiente de la imagen test con los descriptores de las imágenes capturadas en la estancia seleccionada en el primer paso. Con el fin de mejorar el desempeño de la red se recurre a un aumento de datos y a una optimización bayesiana de hiperparámetros. Estas técnicas demuestran ser una solución eficiente y robusta para afrontar el problema de localización tal y como se muestra en la sección de experimentos.*

**Palabras clave:** Localización jerárquica, imágenes omnidireccionales, aprendizaje profundo, optimización bayesiana.

### 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de cámaras omnidireccionales junto con técnicas de visión por computador ha demostrado ser una alternativa sólida para abordar la tarea de localización en robótica móvil. Este tipo de cámaras tienen un campo de visión de 360 grados y un coste relativamente bajo en comparación con otros tipos de sensores. Asimismo, los métodos de descripción holística constituyen una alternativa eficaz para

extraer información relevante de las escenas, dado que conducen a algoritmos de localización relativamente sencillos, basados en la comparación directa de pares de descriptores.

En cuanto a creación de mapas, el uso de modelos jerárquicos con descriptores holísticos permite resolver la tarea de localización de forma eficiente. Este método consiste en organizar la información visual de forma jerárquica en diferentes capas de forma que la localización pueda resolverse en varios pasos. En este caso, se proponen dos pasos principales: en primer lugar, una localización aproximada para conocer en qué zona del entorno se encuentra el robot, y en segundo lugar, una localización fina, que se aborda en esa zona preseleccionada. Además, en los últimos años han surgido técnicas basadas en inteligencia artificial (IA) para abordar problemas de visión por ordenador y robótica. Las redes neuronales convolucionales (conocidas comúnmente por sus siglas en inglés CNN) permiten reconocer patrones en tipos de datos no estructurados, como imágenes. El proceso de entrenamiento de dichas redes debe ser robusto y variado. De ahí que haya que tener especialmente en cuenta dos cuestiones (a) debe disponerse de un amplio conjunto de datos de entrenamiento y (b) los parámetros de entrenamiento deben seleccionarse con cautela.

La novedad del presente trabajo es un enfoque de localización basado en una CNN que parte de imágenes omnidireccionales. Además, este trabajo presenta un proceso de optimización del entrenamiento de la CNN para llevar a cabo de forma eficiente la tarea de entrenamiento. En general, el objetivo de este trabajo es readaptar y utilizar una CNN con un doble propósito: (1) recuperar en qué habitación se encuentra actualmente el robot (paso de localización gruesa) y (2) refinar esta localización dentro de la habitación seleccionada (paso de localización fina) mediante descriptores de apariencia global obtenidos de capas intermedias de la propia CNN.

El resto del artículo se estructura como se indica a continuación. La sección 2 presenta una revisión de la literatura relacionada. Después, la sección 3 presenta los métodos para entrenar la CNN adaptada. La sección 4 detalla el método de localización, basado en la CNN adaptada. Finalmente, la sección 5 presenta las conclusiones y los trabajos futuros.

## 2. ESTADO DEL ARTE

En la literatura relacionada se pueden encontrar diversos trabajos que han abordado tareas en robótica y procesamiento de imágenes mediante técnicas de aprendizaje automático [4]. En cuanto al uso de las CNNs en el campo de la robótica móvil, son muchos los autores que han demostrado su éxito utilizando esta herramienta. Por ejemplo, Sinha et al. [16] proponen una re-localización del robot en entornos sin GPS utilizando una CNN para procesar los datos de una cámara monocular. Chaves et al. [7] utilizan una CNN para detectar objetos en imágenes y usan esta técnica para construir un mapa semántico.

En cuanto al uso de la información visual, en línea con trabajos anteriores [6], el presente trabajo se centra en abordar la creación de mapas y localización mediante la obtención de un descriptor único por imagen que contiene información global sobre la misma. Este enfoque holístico ha sido usado en diversos trabajos previos. Originalmente, los descriptores holísticos se basan en métodos analíticos, es decir, parten de una imagen y realizan transformaciones matemáticas para obtener un único vector ( $\vec{d} \in \mathbb{R}^{l \times 1}$ ) con información característica de la imagen.

Sin embargo, en trabajos recientes se ha propuesto el uso de descriptores holísticos que se obtienen a partir de diversas capas de las CNN. En este sentido, las capas intermedias proporcionan descriptores que pueden ser utilizados para caracterizar los datos de entrada. Por citar algunos ejemplos, Arroyo et al. [1] utilizan una CNN que aprende a generar descriptores que son robustos frente a los cambios de estación. Más recientemente, Wozniak et al. [18] proponen el uso de la extracción de características a partir de un clasificador SVM (Máquina de Vector Soporte). Cebollada et al. [5] muestran las ventajas de utilizar descriptores obtenidos de las capas intermedias de una CNN reentrenada para resolver la localización como un problema de detección de la imagen más similar de entre un conjunto de imágenes. Sin embargo, este trabajo propone una CNN basada en imágenes panorámicas. Por lo tanto, para trabajar a partir de imágenes omnidireccionales, se debe realizar una transformación previa a panorámica.

En cuanto al proceso de entrenamiento, las herramientas de aprendizaje profundo requieren de un gran conjunto de datos para obtener comportamientos lo suficientemente robustos. Sin embargo, en algunos casos, el conjunto de datos disponible para el entrenamiento es pequeño y, entonces, el modelo no puede ser entrenado correctamente. Entre las técnicas propuestas para abordar este problema, el presente trabajo se centra en el aumento de datos y en la optimización de los hiperparámetros de entrenamiento. En cuanto a la técnica de aumento de datos, ésta mejora el rendimiento del

entrenamiento del modelo aumentando el número de instancias de entrenamiento y evitando el sobreajuste. El aumento de datos consiste básicamente en crear nuevos datos (en este caso, imágenes) aplicando diferentes efectos sobre los originales. Algunos autores han utilizado el aumento de datos para mejorar sus tareas de aprendizaje profundo [8]. Salamon et al. [15] proponen el aumento de datos de audio para superar el problema de la escasez de datos de sonido ambiental. Utilizando esta técnica, son capaces de desarrollar una CNN que es capaz de clasificar este tipo de datos. Sin embargo, estos métodos de aumento de datos no se ajustan a los efectos visuales que pueden producirse cuando el robot se mueve por un entorno de trabajo en condiciones de operación reales.

El correcto entrenamiento de los modelos de aprendizaje automático depende en gran medida de la configuración de los hiperparámetros y, por tanto, del método utilizado para establecerlos. Los métodos de optimización como la búsqueda en rejilla y la búsqueda aleatoria han demostrado superar a otros métodos tradicionales para este problema [2]. Estos métodos han sido capaces de obtener ajustes de hiperparámetros similares o mejores que los establecidos por expertos [3, 11]. Como resultado, la optimización de hiperparámetros se ha convertido en un área de investigación importante [2, 9]. Durante los últimos años, la optimización bayesiana ha surgido como un enfoque eficiente, logrando resultados satisfactorios [17]. A través de la optimización bayesiana, la optimización de la función de pérdida se considera como una “caja negra”, con el objetivo de encontrar  $\operatorname{argmin}_{x \in X} (f(x))$ , donde  $x \in X$  son los hiperparámetros y  $f(x)$  es la función de pérdida del modelo.

Respecto a la tarea de localización desde un punto de vista jerárquico, trabajos previos han demostrado que el uso de estos modelos con descriptores holísticos e imágenes omnidireccionales lleva a una solución eficiente y robusta para abordar la tarea de localización [6, 13]. Estos trabajos previos consisten básicamente en el cálculo del vecino más cercano en dos capas. En primer lugar, para la capa de alto nivel, se agrupan los descriptores visuales según su similitud, mediante algún método de clustering, y se obtiene un descriptor representativo  $R = \{\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_{n_g}\}$  para cada grupo, donde  $n_g$  es el número de grupos. Después, para resolver la tarea de localización, se obtiene una nueva imagen  $im_{test}$  y se calcula su descriptor holístico  $\vec{d}_{test}$ . Este descriptor se compara con todos los representantes  $R$  y se retiene el representante más similar  $\vec{r}_k$  (paso de localización gruesa o aproximada); después, se realiza una nueva comparación entre  $\vec{d}_{test}$  y los descriptores contenidos en el grupo  $k$ ,  $D_k = \{\vec{d}_{k,1}, \vec{d}_{k,2}, \dots, \vec{d}_{k,N_k}\}$ . Por último, la posición de la imagen  $im_{test}$  se estima como la posición en la que se capturó la imagen más similar del grupo  $k$ -ésimo (paso de localización fina).



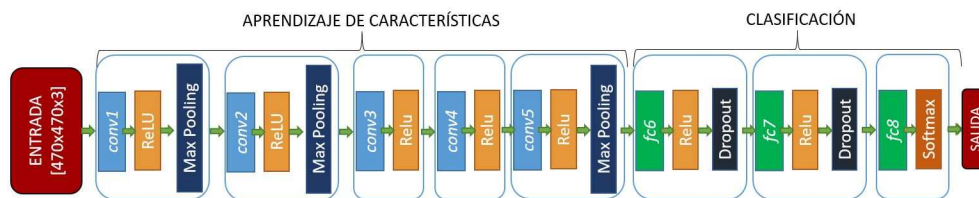


Figura 1: Arquitectura de la CNN. Esta red fue creada a partir de AlexNet, adaptada y reentrenada para clasificar las estancias del dataset de Friburgo.

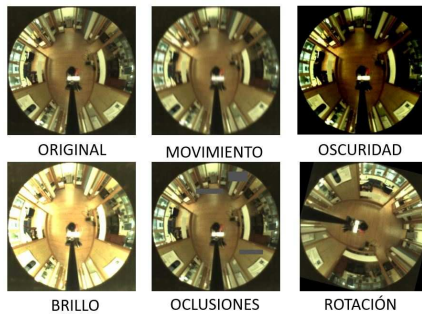


Figura 2: Efectos aplicados a una imagen, ejemplo para aumento de datos.

### 3. PROCESO DE ENTRENAMIENTO

#### 3.1. ADAPTACIÓN DE LA CNN

La construcción y el entrenamiento de una red desde cero requiere experiencia con arquitecturas de redes, una gran cantidad de datos para el entrenamiento y, por tanto, un tiempo de computación importante. Este trabajo continúa la propuesta realizada en trabajos anteriores [5]: adaptar y entrenar redes preexistentes con un objetivo distinto a aquel para el que inicialmente se diseñaron. En este sentido, se propone partir de AlexNet [12], ya que presenta una arquitectura sencilla y ha sido utilizada con éxito en trabajos anteriores para desarrollar nuevas tareas de clasificación mediante *transfer learning* (como en [5, 10]). A diferencia de estos trabajos anteriores, que hacían uso de imágenes convencionales (no panorámicas y panorámicas), el objetivo del presente trabajo es estudiar la viabilidad de esta arquitectura partiendo de imágenes omnidireccionales. Esta propuesta presenta un doble beneficio: (1) el ahorro de tiempo de computación, ya que no es necesaria una transformación de imágenes omnidireccionales a panorámicas y (2) la obtención de descriptores holísticos basados en imágenes omnidireccionales, que han sido escasamente propuestos en el estado del arte actual. Además, el presente trabajo también desarrolla una optimización robusta de los hiperparámetros con el objetivo de abordar un entrenamiento óptimo del modelo de aprendizaje profundo.

Por tanto, en primer lugar, se modifican algunas capas de la arquitectura AlexNet para adaptar la red a la tarea de clasificación de habitaciones propuesta. En este

caso, se redimensiona la capa de entrada, pasando de  $227 \times 227 \times 3$  a  $470 \times 470 \times 3$ , se sustituyen las capas totalmente conectadas ( $fc_6$ ), la capa softmax y la capa de clasificación. La capa  $fc_8$  se readapta para dar salida a un vector de nueve componentes. Las capas softmax y de clasificación se sustituyen para calcular las probabilidades entre las posibles estancias del entorno (en este caso 9 estancias) y para calcular la pérdida de entropía cruzada para la clasificación multiclase. En la fig. 1 se muestra la arquitectura utilizada a lo largo de este trabajo. De este modo, tras estas adaptaciones, se reentrena toda la arquitectura, aprovechando los pesos iniciales de AlexNet.

#### 3.2. AUMENTO DE DATOS

Disponer de un gran conjunto de datos de entrenamiento es crucial para el rendimiento del modelo. Sin embargo, a veces, el conjunto de datos de entrenamiento disponible es más pequeño de lo necesario y entonces, el modelo no puede ser entrenado adecuadamente para alcanzar la solución deseada. Para resolver este problema, se ha propuesto la técnica de *Data Augmentation* como método para mejorar el rendimiento del modelo aumentando el número de instancias de entrenamiento y evitando el sobreajuste. El aumento de datos consiste básicamente en la creación de nuevos datos (imágenes) mediante la aplicación de diferentes efectos sobre las imágenes originales, tal y como se muestra en la fig. 2.

Las transformaciones que se han utilizado son las siguientes. Se han considerado efectos que replican situaciones que pueden ocurrir en entornos reales, cuando el robot debe operar en condiciones desafiantes.

1. **Rotación:** Introducción de rotaciones entre 10 y 350 grados a las imágenes omnidireccionales.
2. **Oscuridad y brillo:** Los valores de baja intensidad son reajustados (incremento) para crear imágenes con más brillo. Por otro lado, para crear un efecto de oscuridad, los valores altos de intensidad son reducidos.
3. **Ruido gaussiano** con varianza de  $1e-06$  a la imagen en escala de grises.
4. **Oclusiones:** Este efecto simula situaciones reales como por ejemplo que alguna persona u objeto se posicione delante de la cámara, ocluyendo parte de la es-

cena. En este trabajo, simulamos dicho efecto introduciendo imágenes geométricas en escala de grises en lugares aleatorios de la imagen.

5. **Reflexión:** Obtener la fotografía espejo.

6. **Blur effect o efecto movimiento.** Este efecto ocurre cuando la imagen se capturó en movimiento.

### 3.3. OPTIMIZACIÓN BAYESIANA

La optimización de hiperparámetros que se propone consiste en variar aquellos valores que pueden ser cruciales para abordar el proceso de entrenamiento y que, al mismo tiempo, pueden ser muy diferentes en función del objetivo de la red. Los hiperparámetros que se consideran para evaluar son los siguientes:

**Initial Learn Rate.** Controla cómo de rápido el modelo se adapta al problema.

**Momentum.** Permite suavizar el progreso de aprendizaje acumulando el gradiente de los pasos anteriores para determinar la dirección a seguir. De este modo, puede mantener la tendencia global de los puntos, evitando que un mal dato desencadene en un mínimo local.

**L2 Regularization o decaimiento de los pesos.** Valor escalar positivo que añade un término de regularización para los pesos de la función de pérdida.

## 4. EXPERIMENTOS

### 4.1. LOCALIZACIÓN

Este trabajo propone utilizar la CNN como modelo jerárquico con el objetivo de: (a) abordar la localización aproximada como problema de búsqueda de habitaciones (capa de alto nivel) partiendo de la imagen de test y (b) obtener descriptores holísticos de las imágenes de entrada. Los descriptores de las imágenes de entrenamiento formarán la capa de bajo nivel, y permiten resolver una localización fina, abordado como un problema de detección de la imagen más similar, con los descriptores holísticos de las imágenes test (también obtenidos mediante la CNN).

En cuanto a la localización jerárquica, las capas de alto nivel permiten una **localización gruesa** y las capas de bajo nivel una **localización fina**. El paso grueso proporciona una localización más rápida y el paso fino considera información más precisa que se utiliza para realizar la localización fina. La localización jerárquica propuesta se lleva a cabo tal y como muestra el diagrama de la fig. 3. En primer lugar (paso de localización gruesa), se introduce una imagen de test  $im_{test}$  en la CNN y se estima la habitación más probable  $c_i$  en la que se capturó la imagen a partir de la información de las capas de salida. Al mismo tiempo, la CNN reentrenada también es capaz de propor-

cionar descriptores holísticos a partir de las capas intermedias. Posteriormente, tras identificar la habitación, se lleva a cabo una localización más precisa (etapa de localización fina). En esta etapa se selecciona uno de los descriptores  $\vec{d}_{test}$  y se compara con los descriptores  $D_{c_i} = \{\vec{d}_{c_i,1}, \vec{d}_{c_i,2}, \dots, \vec{d}_{c_i,N_i}\}$  del conjunto de datos de entrenamiento que pertenecen a la habitación seleccionada  $c_i$  mediante la distancia euclídea y se guarda el descriptor más similar  $\vec{d}_{c_i,k}$ . Por último, la posición en la que se capturó la imagen de prueba se estima como las coordenadas en las que se capturó  $im_{c_i,k}$ .

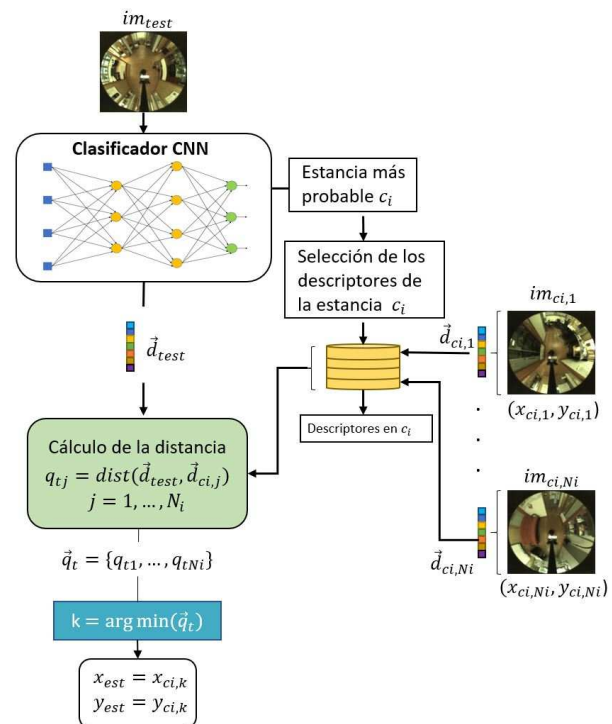


Figura 3: Diagrama de localización jerárquica.

### 4.2. BASE DE DATOS DE FRIBURGO

Las imágenes utilizadas en el presente trabajo se obtuvieron del conjunto de datos de Friburgo, incluido en la base de datos COLD (COsy Localization Database) [14]. Este conjunto de datos contiene imágenes omnidireccionales capturadas mientras el robot recorría varias trayectorias a través de las 9 estancias del entorno.

El robot aborda la tarea de captura de imágenes en condiciones reales de funcionamiento, es decir, personas que aparecen y desaparecen de la escena, cambios en el mobiliario, efectos de desenfoque, cambios dinámicos, etc. Las imágenes utilizadas fueron capturadas bajo tres condiciones de iluminación (nublado, soleado y noche).

El dataset de nublado se muestrea con el objetivo de obtener un conjunto de datos resultante con una distancia media de 20 cm entre imágenes consecutivas, lo

cual dará como resultado el conjunto de entrenamiento 1, con 519 imágenes. Adicionalmente, a este dataset se le realizará el aumento de datos descrito en la sección 3.2, dando lugar al conjunto de entrenamiento 2, que contiene 213.504 imágenes. Estos conjuntos de datos se usarán, individualmente, para entrenar las CNNs. De este modo, será posible conocer el efecto del aumento de datos en el desempeño de la red. Por su parte, se consideran diferentes conjuntos de test: el conjunto test 1, que contiene imágenes capturadas en condiciones de nublado (ruta del robot diferente a la de entrenamiento 1), con un total de 2.595 imágenes; el conjunto test 2, que contiene todas las imágenes capturadas en condiciones soleado (2.807 imágenes) y el conjunto test 3, con todas las imágenes capturadas por la noche (2.876 imágenes). Por tanto, el entrenamiento de la red se realiza, en todo caso, con imágenes capturadas en condiciones de iluminación nublado, y el test se realizará en tres condiciones distintas: nublado, soleado o noche, con lo que será posible testar la robustez de la red ante este tipo de cambios de iluminación en el entorno.

#### 4.3. ENTRENAMIENTO DE LA CNN

El proceso de identificación de la estancia en que se encuentra el robot se ha abordado como un problema de clasificación. Para ello, se reentrena la arquitectura descrita en el apartado 3.1 con el objetivo de identificar la habitación donde se capturó la imagen de entrada. Las funciones de pérdida y de optimización empleadas para los entrenamientos son la *Cross Entropy* y el *Stochastic Gradient Descent* (SGD) respectivamente. En cuanto a la optimización de los hiperparámetros mediante la optimización bayesiana, se han realizado cinco experimentos, en los cuales se ha variado el conjunto de datos de entrenamiento, el número de puntos explorados y los valores de los hiperparámetros. Los cinco experimentos abordados para entrenar la CNN son los siguientes:

**Experimento 1:** Entrenamiento con el conjunto de entrenamiento 1. Hiperparámetros a optimizar: Initial Learn Rate, Momentum y L2 Regularization. En este experimento se realizaron 30 combinaciones diferentes de valores de hiperparámetros.

**Experimento 2:** Entrenamiento con el conjunto de entrenamiento 2 (conjunto aumentado) y los hiperparámetros que se encontraron como óptimos para el experimento 1.

**Experimento 3:** Entrenamiento con el conjunto de entrenamiento 2. Se consideran diferentes valores de Momentum para estudiar la influencia de este parámetro. En total, se testan 8 valores.

**Experimento 4:** Entrenamiento con el conjunto de entrenamiento 2. Se consideran diferentes valores de Initial Learn Rate y Momentum para estudiar la in-

fluencia de estos parámetros. En total, se testan 8 valores.

**Experimento 5:** Entrenamiento con el conjunto de entrenamiento 2. Se consideran diferentes valores de Momentum y L2 Regularization para estudiar la influencia de estos parámetros. En total, se testan 30 valores.

A modo de ejemplo, la fig. 4 muestra el valor de la función objetivo tras realizar el entrenamiento del experimento 5. Tras realizar los experimentos para la optimización del entrenamiento, la tabla 2 muestra el rango de hiperparámetros y los valores óptimos obtenidos para cada experimento. Una vez entrenadas las redes con la configuración óptima de cada experimento, se han introducido los tres conjuntos de test en las redes resultantes. La precisión en la clasificación (porcentaje de veces que la red devuelve la habitación correcta en que se capturó la imagen de entrada) se muestra en la Tabla 1, en la que se detalla las redes resultantes de cada experimento de entrenamiento y la precisión alcanzada con cada uno de los tres conjuntos test.

Como podemos ver, el mejor resultado para las condiciones de soleado se obtiene en el experimento 1, que es el único que no considera aumento de datos en el entrenamiento. Un análisis más detallado del funcionamiento muestra que la CNN tiende a cometer errores en una habitación específica en la que los rayos de sol atraviesan las ventanas e invaden la habitación de una forma especialmente apreciable en las imágenes. Este hecho, en combinación con los efectos del aumento de datos, provoca confusión en el algoritmo reduciendo la precisión global pero no podemos concluir que el aumento de datos provoque que la red no funcione bien en condiciones soleadas en general. En el experimento 2 se obtienen los mejores resultados para la noche y los días nublados aunque los experimentos 3 y 4 también proporcionan un desempeño comparativamente bueno. Además, considerando conjuntamente las tres condiciones de iluminación, la mejor solución se presenta en el experimento 3.

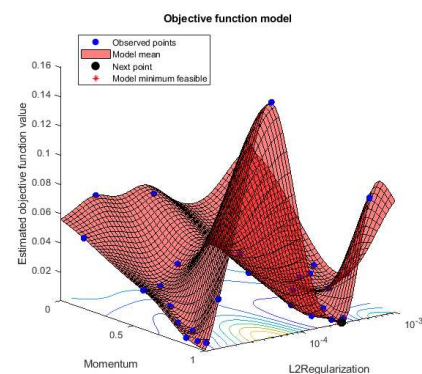


Figura 4: Optimización del entrenamiento del experimento 5.

Cuadro 1: Resultados en la identificación de estancias.

Exp	Exactitud test de clasificación (%)		
	Nublado	Noche	Soleado
1	97.42	96.91	92.27
2	98.92	98.78	89.6
3	98.77	98.4	91.73
4	98.46	98.37	89.31
5	94.72	98.02	86

Cuadro 2: Valores de los hiperparámetros obtenidos a través de la optimización bayesiana.

Exp	Hiperparámetros	Rango	Óptimo
1	Initial Learn Rate	[1e-4, 1]	0.006
	Momentum	[0.5, 1]	0.539
	L2 Regularization	[1e-10, 1e-2]	3.87e-9
2	Initial Learn Rate	0.006021	-
	Momentum	0.53961	-
	L2 Regularization	3.873e-9	-
3	Initial Learn Rate	1e-3	-
	Momentum	[0, 1]	0.911
	L2 Regularization	1e-4	-
4	Initial Learn Rate	[1e-5, 1e-2]	0.007
	Momentum	[0, 1]	0.384
	L2 Regularization	1e-4	-
5	Initial Learn Rate	1e-3	-
	Momentum	[0, 1]	0.979
	L2 Regularization	[1e-5, 1e-3]	3.06e-4

#### 4.4. LOCALIZACIÓN JERÁRQUICA EMPLEANDO DESCRIPTORES HOLÍSTICOS

Como se ha mencionado anteriormente, el método de localización propuesto para abordar esta tarea se basa en un enfoque jerárquico. Éste consiste en utilizar descriptores holísticos obtenidos de una capa intermedia de la CNN entrenada. Esta localización se aborda en dos pasos. El primer paso es la localización aproximada, que consiste en realizar la tarea de recuperación de la habitación mediante la CNN reentrenada, cuyo resultado se ha mostrado en la subsección 4.3. El segundo paso es la localización fina y consiste en estimar la posición de captura mediante un método de búsqueda del vecino más cercano utilizando descriptores holísticos. Entre las diferentes capas intermedias, hemos decidido estudiar las capas totalmente conectadas 6 y 7, ya que los experimentos preliminares mostraron que presentaban mayor robustez ante cambios de iluminación, en especial la capa  $fc_6$ , cuyo desempeño se analizará más profundamente.

Teniendo estos hechos en cuenta, los métodos de localización jerárquica considerados son los siguientes:

Método 1:  $CNN_0 + fc_6$ . Localización aproximada mediante una CNN cuyo entrenamiento no fue optimi-

zado (se seleccionaron hiperparámetros por defecto). Localización fina mediante el descriptor holístico extraído de la capa  $fc_6$ .

Método 2:  $CNN_0 + fc_7$ . Localización aproximada mediante una CNN cuyo entrenamiento no fue optimizado (se seleccionaron hiperparámetros por defecto). Localización fina mediante el descriptor holístico extraído de la capa  $fc_7$ .

Método 3:  $CNN_1 + fc_6$ . Localización aproximada mediante una CNN cuyo entrenamiento fue optimizado (se seleccionaron hiperparámetros obtenidos en el experimento 1). Localización fina mediante el descriptor holístico extraído de la capa  $fc_6$ .

Método 4:  $CNN_2 + fc_6$ . Localización aproximada mediante una CNN cuyo entrenamiento fue optimizado (se seleccionaron hiperparámetros obtenidos en el experimento 2). Localización fina mediante el descriptor holístico extraído de la capa  $fc_6$ .

Método 5:  $CNN_3 + fc_6$ . Localización aproximada mediante una CNN cuyo entrenamiento fue optimizado (se seleccionaron hiperparámetros obtenidos en el experimento 3). Localización fina mediante el descriptor holístico extraído de la capa  $fc_6$ .

Método 6:  $CNN_4 + fc_6$ . Localización aproximada mediante una CNN cuyo entrenamiento fue optimizado (se seleccionaron hiperparámetros obtenidos en el experimento 4). Localización fina mediante el descriptor holístico extraído de la capa  $fc_6$ .

Método 7:  $CNN_5 + fc_6$ . Localización aproximada mediante una CNN cuyo entrenamiento fue optimizado (se seleccionaron hiperparámetros obtenidos en el experimento 5). Localización fina mediante el descriptor holístico extraído de la capa  $fc_6$ .

El error de localización se mide como la distancia euclídea entre la posición estimada y la posición real en la que se capturó la imagen test (dada por el ground truth del conjunto de datos). Además, se evaluará el error medio de localización separadamente para cada condición de iluminación, ya que el objetivo es estudiar la robustez del método propuesto frente a los cambios de iluminación en el entorno de trabajo. Los resultados obtenidos se muestran en la fig. 5.

Un análisis detallado de los datos muestra que, como era de esperar, el error de localización está relacionado con la precisión de la clasificación. Es decir, cuando la CNN es más capaz de identificar correctamente la estancia en el paso de localización aproximada, el error de localización es menor. En términos generales, las condiciones de iluminación soleadas son las que resultan más desafiantes para la red, y el error medio más alto se encuentra en la CNN asociada al entrenamiento 5, que presentó el menor ratio de éxito entre todos los procesos de entrenamiento abordados. En cuanto a los mejores valores para nublado y noche, se dan en



$CNN_2$ ,  $CNN_3$  y  $CNN_4$ , cuyo entrenamiento se basó en la optimización bayesiana.

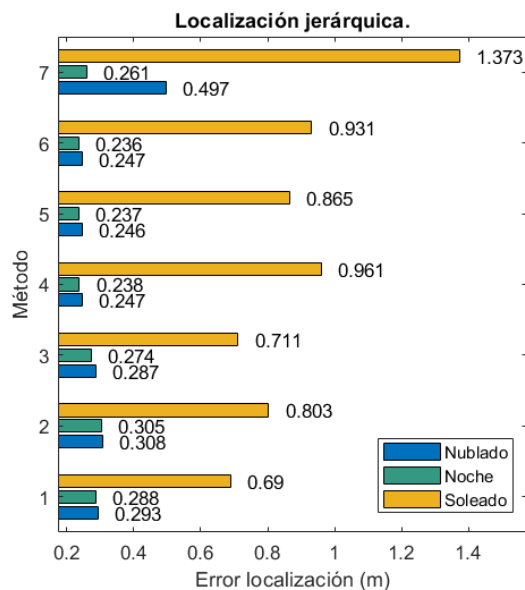


Figura 5: Resultados de la localización jerárquica.

## 5. CONCLUSIÓN

En este trabajo, hemos evaluado el uso de una técnica de aprendizaje profundo para construir modelos topológicos jerárquicos para la localización.

A lo largo del presente trabajo se ha evaluado el uso de dos técnicas para mejorar el proceso de entrenamiento de la CNN y el uso de la red para resolver la localización mediante un método basado en un enfoque de localización jerárquica.

En cuanto al proceso de optimización del entrenamiento, la optimización bayesiana es capaz de mejorar el proceso de entrenamiento de la CNN en general, ya que la tasa media de éxito aumenta cuando se considera este enfoque. Además, el aumento de los datos también permite obtener CNNs con mejores resultados. En cuanto a los resultados obtenidos en condiciones de iluminación nocturna, se han mejorado considerablemente, llegando a alcanzar un ratio de éxito similar al de las imágenes capturadas en las mismas condiciones que el conjunto de entrenamiento (es decir, en condiciones de nublado). Sin embargo, todas las redes tienden a presentar un peor desempeño con imágenes capturadas en condiciones soleadas. Tras un profundo análisis, llegamos a la conclusión de que este aumento de los errores se debe a que las imágenes capturadas en una de las salas se ven especialmente afectadas por los rayos. Este hecho, junto con los efectos del aumento de datos, provoca confusión durante el proceso de entrenamiento y, por tanto, reduce la precisión global.

En cuanto al reentrenamiento de una CNN preentrenada, ésta presenta buenos resultados para realizar una

tarea de recuperación de habitaciones partiendo de imágenes omnidireccionales. Este resultado presenta una novedad en el campo, ya que hasta el momento, son escasos los trabajos que habían propuesto un modelo de aprendizaje profundo basado en arquitecturas convencionales e imágenes omnidireccionales para fines de localización. Además, las capas intermedias también son capaces de proporcionar vectores de información que pueden ser utilizados para obtener descriptores de apariencia global.

Este método ha sido evaluado y ha demostrado ser adecuado para abordar la tarea de localización. Los resultados obtenidos muestran que el error de localización es considerablemente bajo en condiciones de nublado y noche ya que el error mínimo obtenido es de 25 cm (teniendo en cuenta que la distancia media entre imágenes de entrenamiento es de 20 cm). En cuanto a las condiciones de iluminación soleada, el error de localización es mayor, debido sobre todo a la menor tasa de éxito en la clasificación, dada por la especial influencia de los rayos de luz en una de las salas. Por el contrario, los efectos producidos por la oscuridad se han reducido completamente, ya que el error medio de localización asociado a dicha condición es prácticamente igual al obtenido sin cambios de iluminación.

En futuros trabajos, nos centraremos en reducir el error de localización en condiciones de iluminación soleadas. Además, ampliaremos el uso de las técnicas de aprendizaje profundo para la localización mediante el uso de diferentes herramientas como los autoencoders, redes LSTM o convolucionales no rectangulares. Por último, también nos gustaría abordar la tarea de localización mediante CNNs en exteriores.

## English summary

### Training, optimization and validation of a CNN for hierarchical localization using omnidirectional images.

#### Abstract

*The aim of this work is to address the localization of a mobile robot by training a Convolutional Neural Network (CNN) in order to obtain optimal results. The localization problem is approached in a hierarchical way by using an omnidirectional catadioptric system and working directly with the captured images without panoramic conversion, saving the computational time associated with this process. Localization is carried out in two steps, both using the CNN architecture for different purposes. First, a rough localization is carried out, which consists of*

*identifying the room in which the robot is located by means of the CNN. Then a fine localization is performed in the room, in which the CNN is used to obtain holistic descriptors from the intermediate layers of the network. These global-appearance descriptors allow finding the position where the robot is located more precisely by means of a nearest neighbour search, comparing the corresponding descriptor of the test image with the descriptors of the images captured in the room selected in the first step. In order to improve the accuracy of the network, data augmentation and Bayesian hyperparameter optimisation are used. These techniques prove to be an efficient and robust solution to tackle the localization problem as shown in the experiments section.*

**Keywords:** Hierarchical Localization, Omnidirectional imaging, Deep Learning, Bayesian Optimization.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

## Referencias

- [1] ARROYO, R., ALCANTARILLA, P. F., BERGASA, L. M., AND ROMERA, E. Fusion and binarization of cnn features for robust topological localization across seasons. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (Oct 2016), pp. 4656–4663.
- [2] BERGSTRA, J., AND BENGIO, Y. Random search for hyper-parameter optimization. *Journal of machine learning research* 13, Feb (2012), 281–305.
- [3] BERGSTRA, J., YAMINS, D., AND COX, D. D. Making a science of model search: Hyperparameter optimization in hundreds of dimensions for vision architectures.
- [4] CEBOLLADA, S., PAYÁ, L., FLORES, M., PEIDRÓ, A., AND REINOSO, O. A state-of-the-art review on mobile robotics tasks using artificial intelligence and visual data. *Expert Systems with Applications* 167 (2021), 114195.
- [5] CEBOLLADA, S., PAYÁ, L., FLORES, M., ROMÁN, V., PEIDRÓ, A., AND REINOSO, O. A deep learning tool to solve localization in mobile autonomous robotics. In *ICINCO 2020, 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* (LieuSaint-Paris, France, 7-9 July, 2020) (2020), Ed. INSTICC.
- [6] CEBOLLADA, S., PAYÁ, L., ROMÁN, V., AND REINOSO, O. Hierarchical localization in topological models under varying illumination using holistic visual descriptors. *IEEE Access* 7 (2019), 49580–49595.
- [7] CHAVES, D., RUIZ-SARMIENTO, J., PETKOV, N., AND GONZALEZ-JIMENEZ, J. Integration of cnn into a robotic architecture to build semantic maps of indoor environments. In *International Work-Conference on Artificial Neural Networks* (2019), Springer, pp. 313–324.
- [8] DING, J., CHEN, B., LIU, H., AND HUANG, M. Convolutional neural network with data augmentation for sar target recognition. *IEEE Geoscience and remote sensing letters* 13, 3 (2016), 364–368.
- [9] FALKNER, S., KLEIN, A., AND HUTTER, F. Bohb: Robust and efficient hyperparameter optimization at scale. *arXiv preprint arXiv:1807.01774* (2018).
- [10] HAN, D., LIU, Q., AND FAN, W. A new image classification method using cnn transfer learning and web data augmentation. *Expert Systems with Applications* 95 (2018), 43–56.
- [11] KOTTHOFF, L., THORNTON, C., HOOS, H. H., HUTTER, F., AND LEYTON-BROWN, K. Auto-weka: Automatic model selection and hyperparameter optimization in. *Automated Machine Learning: Methods, Systems, Challenges* (2019), 81.
- [12] KRIZHEVSKY, A., SUTSKEVER, I., AND HINTON, G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In *Advances in neural information processing systems* (2012), pp. 1097–1105.
- [13] PAYÁ, L., PEIDRÓ, A., AMORÓS, F., VALIENTE, D., AND REINOSO, O. Modeling environments hierarchically with omnidirectional imaging and global-appearance descriptors. *Remote Sensing* 10, 4 (2018), 522.
- [14] PRONOBIS, A., AND CAPUTO, B. COLD: COsy Localization Database. *The International Journal of Robotics Research (IJRR)* 28, 5 (May 2009), 588–594.
- [15] SALAMON, J., AND BELLO, J. P. Deep convolutional neural networks and data augmentation for environmental sound classification. *IEEE Signal Processing Letters* 24, 3 (March 2017), 279–283.
- [16] SINHA, H., PATRIKAR, J., DHEKANE, E. G., PANDHEY, G., AND KOTHARI, M. Convolutional neural network based sensors for mobile robot relocation. In *2018 23rd International Conference on Methods Models in Automation Robotics (MMAR)* (Aug 2018), pp. 774–779.
- [17] SNOEK, J., RIPPEN, O., SWERSKY, K., KIROS, R., SATISH, N., SUNDARAM, N., PATWARY, M., PRABHAT, M., AND ADAMS, R. Scalable bayesian optimization using deep neural networks. In *International conference on machine learning* (2015), pp. 2171–2180.
- [18] WOZNIAK, P., AFRISAL, H., ESPARZA, R. G., AND KWOLEK, B. Scene recognition for indoor localization of mobile robots using deep cnn. In *International Conference on Computer Vision and Graphics* (2018), Springer, pp. 137–147.



# A VIDEO SUMMARIZATION APPROACH TO SPEED-UP THE ANALYSIS OF CHILD SEXUAL EXPLOITATION MATERIAL

Rubel Biswas<sup>1</sup>, Deisy Chaves<sup>1</sup>, Laura Fernández-Robles<sup>2</sup>, Eduardo Fidalgo<sup>1</sup>, Enrique Alegre<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical, Systems and Automation, Universidad de León, León, ES

<sup>2</sup>Department of Mechanical, Informatics and Aerospace Engineering, Universidad de León, León, ES  
{rubel.biswas, deisy.chaves, l.fernandez, eduardo.fidalgo, enrique.alegre}@unileon.es

## Abstract

*Identifying key content from a video is essential for many security applications such as motion/action detection, person re-identification and recognition. Moreover, summarizing the key information from Child Sexual Exploitation Materials, especially videos, which mainly contain distinctive scenes including people's faces is crucial to speed-up the investigation of Law Enforcement Agencies. In this paper, we present a video summarization strategy that combines perceptual hashing and face detection algorithms to keep the most relevant frames of a video containing people's faces that may correspond to victims or offenders. Due to legal constraints to access Child Sexual Abuse datasets, we evaluated the performance of the proposed strategy during the detection of adult pornography content with the NDPI-800 dataset. Also, we assessed the capability of our strategy to create video summaries preserving frames with distinctive faces from the original video using ten additional short videos manually labeled. Results showed that our approach can detect pornography content with an accuracy of 84.15% at a speed of 8.05 ms/frame making this appropriate for real-time applications.*

**Keywords:** Video summarization, pHash, MTCNN, Child Sexual Exploitation Material, Pornography detection.

## 1 INTRODUCTION

The use of anonymous tools and private networks by criminals has considerably increased the number of images and videos with illegal content, like Child Sexual Exploitation Material (CSEM), on the Internet [8, 3]. The impact of exposure to this kind of contents is still under investigation [17]. Moreover, since CSEM is illegal in most countries, it has triggered the demand for techniques that enable investigators or Law Enforcement Agencies (LEAs) to browse and detect CSEM content on images and videos quickly.

Literature presents approaches for detecting

pornography content or CSEM automatically in images and videos with high accuracy [20, 12, 14, 13, 18]. Nevertheless, they require a significant amount of memory and CPU/GPU capabilities. Besides, most of these approaches [20, 14, 18] have not been assessed in terms of processing time, which limits their use in forensic laboratories where processing times are essential to detect CSEM given the large volume of investigations related to child exploitation.

To overcome these drawbacks, this paper presents a video summarization strategy based on perceptual hashing and face detection algorithms. The strategy generates highly compressed video summaries focused on people's faces, and can perform pornography detection in real-time balancing the trade-off between processing time and accuracy. Existing approaches for video summarization preserve the distinctive scenes of the whole original video [9, 10, 19, 1]. However, our strategy focuses only on the most relevant frames containing faces which may correspond to victims or offenders on CSEM.

Due to the legal constraints to access CSEM and given the sensitive nature of this kind of material, we evaluated the performance of the generated video summaries for the detection of adult pornography on the NDPI-800 dataset [12]. Besides, we created a dataset with ten videos labeled manually with the number of subjects observed, i.e., people with different identity, to analyze the capability of our approach to generate summaries preserving the subjects from the original video.

This work is part of the European project Forensic Against Sexual Exploitation of Children (4NSEEK) and the research lines defined by the Framework agreement between INCIBE (Spanish National Cybersecurity Institute) and the University of León. Therefore, results of this study may help the 4NSEEK tool users to speed-up the detection of victims or offenders on CSEM videos.

The rest of the paper is organized as follows. Closely related work to the one addressed in this paper is presented in Section 2. The proposed video summarization strategy is described in Sec-

tion 3. Experimental evaluation and results are presented in Section 4. Finally, we draw conclusions in Section 5.

## 2 RELATED WORK

### 2.1 VIDEO PORNOGRAPHY DETECTION

In the earliest stage of pornography detection, research has been associated with nudity detection [21, 11]. However, these skin-based approaches are not a suitable solution for pornography detection because skin exposure may not always be related to pornographic scenes, e.g., baby breastfeeding, wrestling, and swimming.

Later on, Bags-of-Visual-Words (BoVW) models created robust representations for detecting pornography content using hand-crafted local descriptors [20, 12]. Zhuo et al. [20] introduced a web pornographic image recognition scheme based on the combination of local and global features with a Support Vector Machine classifier. The local features correspond to Oriented FAST and Rotated BRIEF descriptors computed from skin-color regions and represented using BoVW. The global features considered were color descriptors such as Hue, Saturation, Value, or HSV. Moreira et al. [12] proposed an end-to-end BoVW-based framework with a speed of 0.5 sec/frame that integrates temporal information during the detection of pornography videos. Nonetheless, these methods used bags of static hand-crafted features and may disregard significant information to represent the video content.

Recently, Convolutional Neural Network (CNN)-based methods have been used for video pornography detection because of their outstanding performance in comparison to traditional approaches based on hand-crafted features [14, 13]. Perez et al. [14] presented a video pornography detection strategy that combines static and motion-based features for CNN-based video classification. In contrast, Mallmann et al. [13] proposed a CNN architecture, called private Parts Censor (PPCensor), to detect private body parts in real-time environments from pornographic content with a speed of 0.092 sec/frame. PPCensor was implemented as a network proxy server for video streams. Therefore, it can be run through a proxy instead of on the end-user device.

However, few of these approaches [13, 12] assess the processing time, which is crucial during the analysis of CSEM videos due to the large number of cases related to child exploitation in forensic laboratories. In this work, we explore the use

of video summaries focused on people's faces to speed-up the analysis of pornography and CSEM videos.

#### 2.1.1 VIDEO SUMMARY

There exist several summarization methods in the literature aiming to generate a short video skim that preserve the most relevant content of the original video [10, 19, 1].

Gygli et al. [10] proposed a supervised approach for learning the importance of global characteristics of a summary. It jointly combines multiple properties including saliency, aesthetics, and presence of people in the frames.

Most recently, Abhimanyu et al. [1] proposed an algorithm for generating multiscale summaries and priority-based ranking of various actions present in egocentric videos, like leading towards the goal (high priority action). Wei et al. [19] introduced a semantic attended video summarization network that comprises a frame selector and a video descriptor to maximize the diversity and representativeness in the summary.

Most of these approaches focused on summarizing videos with general content [9, 10, 19] without focusing on particular details, such as faces that may be relevant for tasks related to facial recognition. Therefore, in this study, we propose a strategy to generate video summaries containing only distinctive scenes with people faces that may be more appropriate for the detection of victims or offenders on CSEM than regular video summaries.

### 2.2 PERCEPTUAL HASHING

The perceptual hashing approach generates a fixed-length fingerprint, i.e., a hash code based on the perceptual content of the image/video/audio. In the last few years, perceptual hashing has been used in different applications such as tampering detection [15], person re-identification [7], victim identification [4], or illegal Tor domain classification [5].

Sandeep and Prabin [15] proposed a video hashing method to detect malicious video modifications using the three-dimensional radial projection technique and the two-dimensional discrete cosine transform. Fang et al. [7] proposed a multi-statistics on hash feature map descriptor for person re-identification using binarized low-level color and gradient feature maps obtained with perceptual hashing, and regional statistics computed over an image pyramid.

In this work, we used perceptual hashing to identify video frames with similar content during the

video summarization.

### 3 PROPOSED STRATEGY

We proposed a three-step video summarization strategy focused on the identification of distinctive scenes that contain people's faces, as shown in Figure 1. First, videos are preprocessed to reduce their size and the number of frames per second based on the videos' duration. Second, keyframes are detected using perceptual hashing. Finally, keyframes are filtered to identify the ones containing faces using a deep-learning-based face detection method.

#### 3.1 PREPROCESSING

Given a video, we sampled and kept a set of frames depending on the video duration. We also reduced the frames size proportionally to a fixed width and a variable height, to keep the proportions of faces and objects contained on the frame, and speed-up the later summarization process. Table 1 describes the three different scenarios considered to preprocess videos after evaluating different frame sample rates and sizes to balance between speed and accuracy.

Table 1: Preprocessing video conditions.

Video duration (min)	Preprocessing	
	Width resized	Frames to sample
3	480 pixels	5 frames per second
3-30	320 pixels	2 frames per second
+30	320 pixels	3600 frames on the whole video

#### 3.2 DETECTION OF KEYFRAMES

We detected the keyframes in a preprocessed video by obtaining the perceptual hash codes of all the frames using the pHash algorithm [22]. pHash is a perceptual hashing method based on the Discrete Cosine Transform (DCT) that generates hash codes in three-steps. First, the input frame is converted to grayscale and resized to  $32 \times 32$  pixels. Second, a two-dimensional type-II DCT is applied to obtain the DCT coefficients of the frame. Third, 64 low-frequency DCT coefficients are computed by omitting high-frequency coefficients, to generate the hash code. We selected the low-frequency coefficients because they contain more useful information for identifying keyframes, such as shape and position of the objects in the frame foreground.

After obtaining the hash codes for the video frames, we computed Euclidean distances among all of them. Later on, only the first and those

frames which are distinctive to the rest with respect to a threshold,  $T_{dist}$ , are kept. This set of frames makes up an initial summary.

#### 3.3 SELECTION OF KEYFRAMES CONTAINING FACES

We selected the keyframes containing at least one face, detected with a confidence score,  $T$ , to create the final video summary. As face detector, we chose the Multi-Task Cascade CNN (MTCNN) [23] method due to its high detection speed in comparison to other deep-learning-based detectors [6].

MTCNN detects faces in three steps. First, candidate regions, which may contain faces, are produced through a fast Proposal Network. Second, these candidate regions are refined through a Refinement Network. Third, an Output Network produces the final bounding box of a face.

The obtained video summary is highly compressed and can be used as the initial step to another process, e.g., in a forensic tool to detect CSEM in seized material.

### 4 EXPERIMENTS AND RESULTS

#### 4.1 EXPERIMENTAL SETUP

Experiments were performed on a GNU/Linux machine box running Ubuntu 18.04, using a CPU Intel Xeon E5-2630 and a GPU NVIDIA Titan XP 12Gb. Besides, we considered two criteria to evaluate the proposed video summarization strategy: (i) the impact of video summaries on the pornography detection performance, and (ii) the quality of video summaries in terms of the number of subjects contained in the summary.

We assessed the performance of our approach with a similarity threshold  $T_{dist}$  of 0.2 to detect keyframes and a confidence score  $T$  of 0.7 to select the keyframes containing faces, see Section 3.

Moreover, we compared the proposed strategy against two methods. First, we used, as a baseline, video summaries generated by uniformly sampling a video clip every 20 frames from the original video and keeping the frames with faces as described in Section 3.3. Uniform sampling is one of the most common methods for keyframe extraction employed as a baseline for video summarization [16]. Second, to evaluate the performance of the preprocessing stage, in the proposed approach, we used video summaries created by selecting frames that contain faces as detailed in Section 3.3 from a preprocessed video as described in Section 3.1.

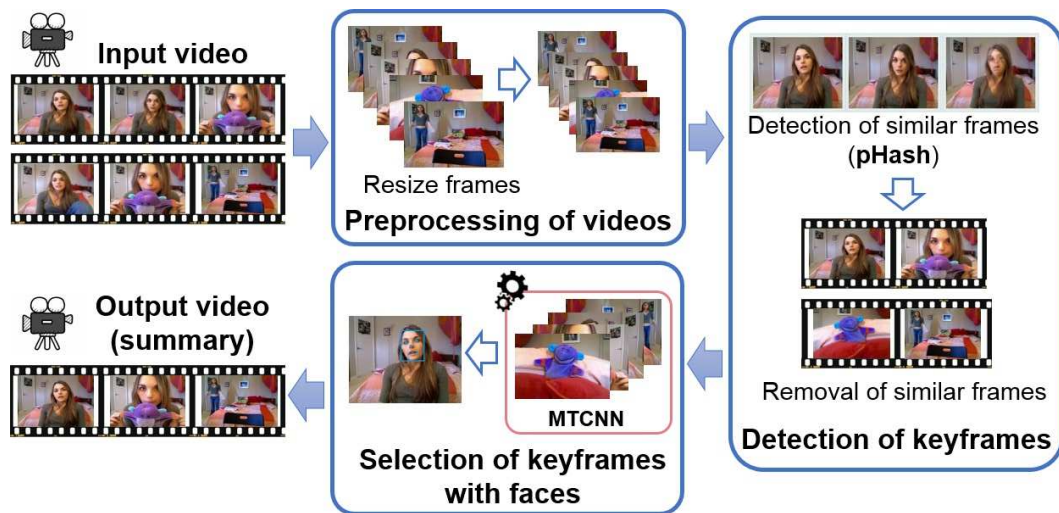


Figure 1: Stages of the proposed video summarization strategy.

To test a video sequence, first, we generated a video summary using one of the evaluated methods. Second, we classified the content of each video summary frame, as pornographic or non-pornographic, using a CNN-based adult pornography detector integrated in the 4NSEEK tool [24]. Finally, the video was labeled based on majority voting.

#### 4.2 EVALUATION OF THE IMPACT OF VIDEO SUMMARIES ON THE PORNOGRAPHY DETECTION PERFORMANCE

We evaluated the pornography detection performance on summarized videos through four metrics: Accuracy (*Acc.*), F2-Score, and total and average processing times per frame required to summarize videos and detect pornography content.

The *Acc.* is measured as the number of correctly classified pornography video summaries out of the total number of evaluated videos. While, the *F2-score* is the weighted harmonic mean of the precision and the recall measures, considering twice the weight of the recall compared to the precision [12].

The evaluation metrics were computed for each of the five folds defined in the NPDI Pornography-800 dataset [2]. This dataset [2] comprises 76.86 hours of 400 pornography and 400 non-pornography videos.

Table 2 presents the averaged results over the five folds. As it can be observed, the proposed video summarization strategy obtained a better performance (average *Acc.* of 84.15% and *F2-score* of 77.18%) compared to the baseline (average *Acc.* of 83.39% and F2-Score of 75.06%). Besides, the

use of pHash to identify keyframes and remove redundant information generates highly compressed video summaries improving the *Acc.* and the *F2-score* during pornography detection in comparison to only using the preprocessing and the face selection (MTCNN) steps.

In this case, we observed that the baseline method required less time for summarizing a video and detecting pornography in comparison to our approach. The baseline method generates summaries through uniformly sampling a frame every 20 frames from the original video. In contrast, the proposed approach sampled a variable number of frames initially depending on the duration of the video (see Section 3.1). Despite this, our approach has a processing speed of 8.05 ms/frame, which makes it suitable for real-time applications.

#### 4.3 EVALUATION OF THE QUALITY OF VIDEO SUMMARIES

We evaluated the quality of the generated video summaries considering two metrics: subject detection rate, and percentage of summary frames with people.

The *subject detection rate* is computed as the rate between the total number of subjects present in the summarized video and the total number of subjects in the original video. The *percentage of summary frames with people* is obtained as the total number of frames with faces in the summarized video divided by the total number of frames in the summary.

To conduct the quality evaluation, we created a dataset with 10 short videos with a total of 18.6 minutes (33476 frames). Videos were labeled manually with the number of observed subjects and

Table 2: Average No. of frames per video summary, Accuracy, F2-Score, total time and time per frame for generating video summaries (summary) and detecting pornography (Porn. detection) computed for the five folds of the NDPI dataset.

Summarization approach	No. frames summary	Accuracy (%)	F2-Score (%)	Total time (ms.)		Avg. time per frame (ms.)	
				Summary	Porn. detection	Summary	Porn. detection
Uniform sample 5% + MTCNN (baseline)	<b>16896.60±760.39</b>	83.39 ± 3.32	75.06 ± 5.87	<b>6671310</b>	<b>357820</b>	<b>4.24</b>	<b>0.23</b>
Preprocessing + MTCNN	27739.80 ± 1109.38	84.03 ± 2.97	76.58 ± 4.46	12651700	689900	8.05	0.44
Preprocessing + pHash + MTCNN (ours)	17451.00 ± 1253.25	<b>84.15±2.10</b>	<b>77.18±3.36</b>	12572020	406160	8.05	0.26

Table 3: No. of frames, No. of subjects, subject detection rate, and percentage of summary frames with people in video summaries.

Summarization approach	No. frames summary	No. subjects summary	Subject detection rate (%)	Summary frames with people (%)
Uniform sample 5% + MTCNN (baseline)	501	102	85.00	97.21
Preprocessing + MTCNN	1673	<b>109</b>	<b>90.83</b>	<b>97.49</b>
Preprocessing + pHash + MTCNN (ours)	<b>139</b>	76	63.33	94.96

contain a total of 120 subjects. Table 3 shows the results of the evaluation metrics on this dataset.

The proposed approach has a low value for the *subject detection rate* metric (63.33%) in comparison to the values achieved by the baseline method (85.00%), and the summaries generated only using the preprocessing and the face selection (MTCNN) steps (90.83%). This behavior may be caused at the selection of keyframes and faces in our approach since some selected keyframes with pHash may correspond to low-intensity frames and frames with faces in different orientations where the MTCNN face detector failed. Nonetheless, the proposed approach proved to generate summaries with relevant information that yield a better performance in terms of accuracy and F2-Score for pornography detection purposes (see Section 4.2).

We noticed (see Table 3) that the baseline method generated summaries with 501 frames whereas our approach generated summaries with only 139 frames (highly compressed). Hence, the proposed approach can be used as an initial step for other time-consuming tasks such as face recognition or age estimation.

## 5 CONCLUSIONS

In this work, we presented a video summarization approach that combines pHash and the MTCNN face detector to create video summaries comprised of keyframes that contain people's faces. The aim is to support LEAs by speeding-up the detection of CSEM in videos.

Experimental results showed that our approach obtained the best trade-off between processing time (8.05 ms/frame) and pornography detection accuracy (84.15%) on the NDPI-800 dataset. Therefore, it can be suitable to support the de-

tection of pornography and CSEM in videos in real-time.

As future work, robust face detectors will be evaluated to preserve a higher number of subjects in the video summaries.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the framework agreement between the Universidad de León and INCIBE (Spanish National Cybersecurity Institute) under Addendum 01. Also, this research has been funded with support from the European Commission under the 4NSEEK project with Grant Agreement 821966. This publication reflects the views only of the authors, and the European Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein. Finally, we acknowledge the NVIDIA Corporation for the donation of the TITAN Xp GPU.

## References

- [1] Abhimanyu, S., Chowdhury, A. S. (2020) "Multiscale Summarization and Action Ranking in Egocentric Videos", *IEEE Multimedia*, 133, pp 256-263.
- [2] Avila, S., Thome, N., Cord, M., Valle, E., Araújo, A.A. (2013) "Pooling in image representation: the visual codeword point of view", *Computer Vision Image Understanding*, 117, pp 453-465.
- [3] Al-Nabki, W., Fidalgo, E., Alegre, E. and Fernández-Robles, L. (2019) "ToRank: Identifying the most influential suspicious domains in the Tor network", *Expert Systems with Applications*, 123, pp 212 - 226.

- [4] Biswas, R., González-Castro, V., Fidalgo, E., Chaves, D. (2019) "Boosting child abuse victim identification in Forensic Tools with hashing techniques", *V Jornadas Nacionales de Investigación en Ciberseguridad (JNIC)*, 272, pp 344-345.
- [5] Biswas, R., González-Castro, V., Fidalgo, E. and Alegre, E. (2020) "Perceptual image hashing based on frequency dominant neighborhood structure applied to Tor domains recognition", *Neurocomputing*, 27, pp 778-790.
- [6] Chaves, D., Fidalgo, E., Alegre, E., Jáñez-Martino, F., Alaiz-Rodríguez, R., Azzopardi, G. (2020) "Assessment and Estimation of Face Detection Performance Based on Deep Learning for Forensic Applications", *Sensors*, 20 (16).
- [7] Fang, W., Hu, H.-M., Hu, Z., Liao, S., Li, B. (2018) "Perceptual hash-based feature description for person re-identification", *Perceptual hash-based feature description for person re-identification*, 272, pp 520-531.
- [8] Gangwar, A., Fidalgo, E., Alegre, E., González-Castro, V. (2017) "Pornography and Child Sexual Abuse Detection in Image and Video: A Comparative Evaluation", *8th International Conference on Imaging for Crime Detection and Prevention (ICDP)*, pp 37-42.
- [9] Gong, Y., Liu, X. (2001) "Video summarization with minimal visual content redundancies", *In Processing of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp 362 - 365.
- [10] Gygli, M., Grabner, H., Gool, L. V. (2015) "Video summarization by learning submodular mixtures of objectives", *In Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp 3090 - 3098.
- [11] Lee, J.-S., Kuo, Y.-M., Chung, P.-C., Chen, E.-L. (2007) "Naked image detection based on adaptive and extensible skin color model", *Pattern recognition*, 40, pp 2261 - 2270.
- [12] Moreira, D., Avila, S., Perez, M., Moraes, D., Testoni, V., Valle, E., Goldenstein, S., and Rocha, A. (2016) "Pornography classification: The hidden clues in video space-time", *Forensic science international*, 268, pp 46-61.
- [13] Mallmann, J. and Others (2020) "PPCensor: Architecture for Real-Time Pornography Detection in Video Streaming", *Future Generation Computer Systems*, 112, pp 945 - 55.
- [14] Perez, M. and Others (2017) "Video Pornography Detection through Deep Learning Techniques and Motion Information", *Neurocomputing*, 230, pp 279 - 293.
- [15] Sandeep, R., Prabin, K.B. (2020) "Detection of Malicious Video Modifications using Perceptual Video Hashing", *5th International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS)*, pp 1-5.
- [16] Shruti, J., Jasim, M. (2020) "Unsupervised video summarization framework using keyframe extraction and video skimming", *IEEE 5th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA)*, pp 140-145.
- [17] Tyson, G. and Elkhatib, Y. and Sastry, N. and Uhlig, S. (2015) "Are people really social in porn 2.0?", *The International AAAI Conference on Web and Social Media*, pp 436-444.
- [18] Wehrmann, J., Simoes, G.S., Barros, R.C., Cavalcante, V.F. (2018) "Adult content detection in videos with convolutional and recurrent neural networks", *Neurocomputing*, 272, pp 432-438.
- [19] Wei, H., Ni, B., Yan, Y., Yu, H., Yang, X., Yao, C. (2018) "Video Summarization via Semantic Attended Networks", *In AAAI Conference on Artificial Intelligence*, pp 216-223.
- [20] Zhuo, L., Geng, Z., Zhang, J., Li, X.G. (2016) "ORB feature based web pornographic image recognition", *Neurocomputing*, 173, pp 511-517.
- [21] Zheng, H., Daoudi, M., Jedynak, B. (2004) "Blocking adult images based on statistical skin detection", *Electronic Letter Computer Vision Image Anal.*, 41 (1), pp 256-263.
- [22] Zauner, C. (2010) "Implementation and Benchmarking of Perceptual Image Hash Functions", University of Applied Sciences, University of Applied Sciences Hagenberg, Austria.
- [23] Zhang, K., Zhang, Z., Li, Z. and Qiao, Y. (2016) "Joint Face Detection and Alignment Using Multitask Cascaded Convolutional Networks", *IEEE Signal Processing Letters*, 23(10), pp 1499-1503.
- [24] Zauner, C. (2016) "Open Not Suitable/safe For Work (NSFW) model", <https://yahooeng.tumblr.com/post/15114868>



9421/ open-sourcing-a-deep-learning-  
solution-for.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Cre-  
ative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0  
license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE SEGMENTACIÓN SEMÁNTICA DE NUBES DE PUNTOS CON REDES NEURONALES

Alejandro Espacio, Santiago Salamanca, Pilar Merchán, Emiliano Pérez, Samuel Punzón  
Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, 06006 Badajoz.  
{alespaci, ssalamanca, pmerchan, emilianoph, spunzon} @unex.es

## Resumen

*Desde sus inicios, el ámbito de la visión por computador se ha esforzado por recabar de imágenes 2D y espacios 3D la información y el conocimiento que el ser humano puede extraer fácilmente con un solo vistazo. Los métodos más efectivos han apostado por llevar el concepto de inteligencia artificial un paso más allá, optando por unir la extracción de información con el uso de redes neuronales, dando como resultado lo que hoy llamamos aprendizaje profundo, una de las ramas de la computación que más desafíos ofrece a día de hoy. Este artículo no busca sino realizar una recopilación de aquellos métodos que siguen siendo la base, como PointNet, de muchos estudios recientes, así como aquellos que bien podrían suponer nuevas líneas de investigación en el campo de la segmentación semántica de escenas y modelos tridimensionales, dada la importancia y el reto derivado de trabajar con nubes de puntos. Con este objetivo, se realiza una comparativa entre los métodos para quienes deseen introducirse en este campo, considerando aspectos que se creen convenientes para trabajar con nubes de puntos reales.*

**Palabras clave:** Segmentación semántica, estado del arte, redes neuronales profundas, aprendizaje máquina.

## 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, una de las ramas de la visión por computador que más interés está atrayendo es la de la segmentación semántica. En contraposición a la segmentación tradicional, en la que se detectan en una imagen zonas congruentes entre sí que, posteriormente, son reconocidas mediante algoritmos clásicos de aprendizaje máquina (vecino más próximo, árboles de decisión, SVM...), en la segmentación semántica se realiza el etiquetado de todos y cada uno de los píxeles de la imagen o, como en los casos que se tratan en este trabajo, los puntos de una nube de puntos 3D.

A diferencia de las técnicas clásicas de aprendizaje máquina, que requieren la definición de modelos o características de representación de manera previa al

proceso de aprendizaje, en las redes neuronales profundas (RNP) se aborda la resolución del problema en cuestión sin la necesidad de información contextual inicial. Además, las técnicas de aprendizaje máquina cuentan con varias desventajas con respecto a las RNP: trabajan peor con conjuntos grandes de datos, necesitan el apoyo de la definición de las características y ofrecen, en problemas complejos como el que se trata en este trabajo, resultados más pobres. Es por ello por lo que los mayores avances en segmentación semántica se estén consiguiendo mediante el uso de RNP.

En este artículo se revisan y analizan algunos de los métodos de segmentación semántica de nubes de puntos 3D mediante RNP propuestos hasta el momento. Para ello, en la sección 2 se establece una clasificación de estos métodos atendiendo a si realizan o no tratamiento, o estructuración, de la nube de puntos previo a la red de aprendizaje. Las secciones 3 y 4 agrupan los diferentes métodos siguiendo la clasificación anterior, ordenados cronológicamente para una visión general de la evolución en este campo, y presenta sus funciones, ventajas e inconvenientes. La sección 5 señala las diferencias entre los métodos comentados con el objetivo de que pudiera servir de ayuda a quienes quieran introducirse en el ámbito de la segmentación semántica de nubes de puntos con técnicas basadas en RNP. Cabe destacar la dificultad que supone realizar una comparación entre métodos debido a la disparidad entre las pruebas realizadas en los distintos trabajos. Por último, la sección 6 recoge las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización de esta revisión del estado del arte.

## 2 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS ANALIZADOS

Considerando las técnicas basadas en RNP, distintos artículos [4,20,22] coinciden en clasificar los diferentes métodos en función de los datos que se introducen a las redes neuronales.

Las nubes de puntos, por su propia naturaleza, presentan diversas limitaciones. Una de las más importantes es la distribución irregular de los puntos 3D, lo que obliga a aplicar, en muchos casos, tratamientos de regularización espacial. Otro problema es la falta de estructura topológica de la nube

de puntos. Como primera aproximación para solventar los problemas mencionados se estructuraron y

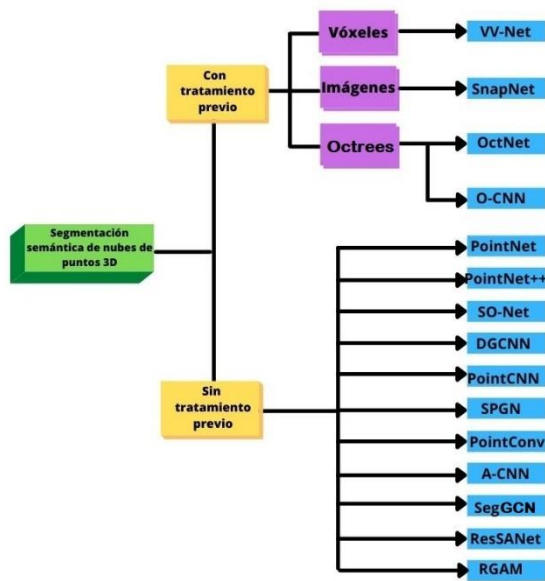


Figura 1: Clasificación de los métodos abordados.

regularizaron las nubes de puntos con vóxeles y octrees. Aunque el uso de estas estructuras de datos soluciona estos problemas, se generan otros, en la mayoría de los casos relacionados con la capacidad de almacenamiento de la información y el coste computacional de los algoritmos.

Por ello, el siguiente paso consistió en generar imágenes a partir de la nube de puntos desde diferentes puntos de vista, e introducir estas imágenes en la red neuronal, normalmente redes neuronales convolucionales (CNN) empleadas en segmentación semántica de imágenes. Los resultados obtenidos utilizando este enfoque eran muy dependientes de la extensión y complejidad de la escena.

Finalmente, la propuesta más reciente consiste en introducir directamente la nube de puntos en la RNP, siendo PointNet [11] la propuesta pionera en este ámbito. Desde entonces, muchos trabajos han mejorado esta técnica, produciendo consecuentemente más y mejores resultados, pero con un amplio rango de mejora, en bancos de pruebas exigentes como S3DIS, ScanNet y ShapeNetPart, siendo estos los más comúnmente empleados por los métodos aquí citados. Como ya se ha comentado, existen dos grandes grupos en los que se podrían separar los métodos de segmentación semántica de nubes de puntos mediante RNP, que son aquellos que necesitan que las nubes sean previamente tratadas o estructuradas y los que no. En la Figura 1 se muestra un esquema de la clasificación de las técnicas aquí recogidas. En amarillo se diferencian los dos grupos mencionados, con y sin tratamiento de las nubes de puntos; en

morado, la clasificación en función del tipo de dato de entrada a la red de aprendizaje; por último, en azul, los diferentes métodos.

A continuación, se explica cada uno de ellos, siguiendo la clasificación propuesta.

### 3 MÉTODOS CON TRATAMIENTO PREVIO DE LAS NUBES DE PUNTOS 3D

#### 3.1 MÉTODOS BASADOS EN VÓXELES

Estos métodos hacen uso de vóxeles para estructurar las nubes de puntos. Es esta nueva organización de los puntos la que posteriormente se introduce en la red neuronal para ser segmentada. Dividir las nubes en vóxeles conlleva diversas ventajas, como una solución intuitiva al problema de la distribución de los puntos, pero puede suponer otros tantos inconvenientes. Trabajando con vóxeles es posible que algunos queden vacíos o

contengan información no relevante, lo que aumentará el coste de memoria y la carga computacional.

##### 3.1.1 VV-Net

Ante las limitaciones del uso de vóxeles para ordenar los puntos en una nube, los autores de VV-Net propusieron un método a través del cual la información contenida en cada división espacial es mayor que en el uso tradicional de vóxeles. La nube de puntos se reestructura en una distribución ordenada de vóxeles, los cuales son, a su vez, divididos en subvóxeles. Estas últimas divisiones contienen varios puntos que son interpolados, consiguiendo así una representación espacial más suave que con los vóxeles tradicionales. Para compactar de manera efectiva la información anterior, VV-Net entrena un VAE (variational auto-encoder) [5] con el que consiguen mapear la distribución espacial de los puntos presentes en cada subvoxel en un espacio latente.

El método propuesto por Hsien-Yu Meng *et al.* [10] demuestra ser efectivo y robusto en tareas de segmentación semántica con pruebas experimentales en el banco de pruebas de S3DIS, que mejora ligeramente la funcionalidad de los vóxeles, aunque produjo errores puntuales en casos concretos.

Otro ejemplo del uso de vóxeles en este ámbito es SegCloud [14].

#### 3.2 MÉTODOS BASADOS EN OCTREES

A diferencia de los vóxeles, el uso de octrees permite abordar el problema de las divisiones con información relevante. De esta forma, es posible realizar una organización de la nube de puntos a través de octantes

más eficaz y eficiente. El mayor problema de estas técnicas es la posible pérdida de información al dividir la nube de puntos, dado que el resultado sería, al igual que en el uso de vóxeles, una aproximación.

### 3.2.1 OctNet

Este método, desarrollado por Gernot Riegler *et al.* [13], apuesta por el uso de octrees. Otras propuestas que emplean este tipo de divisiones de escenas tridimensionales hacen uso de un solo octree, mientras que OctNet divide las nubes de puntos en varios octrees de diferentes profundidades y extensión. Así, las zonas con mayor densidad de puntos reciben mayor atención, gracias, además, al uso de redes convolucionales para la extracción de información. A pesar de que este método puede no ser mejor en términos de uso de almacenamiento en comparación con el uso tradicional de octrees, sí mejora la compresión de la información para cada nodo de la estructura. Además, este tipo de estructuras puede ser fácilmente codificado en cadenas de bits, reduciendo así el tiempo de acceso a las celdas de las mismas. OctNet, por ello, permite trabajar con vóxeles de alta resolución, concretamente, resoluciones superiores a  $64^3$ . Los resultados obtenidos al trabajar con resoluciones altas son mejores que los obtenidos con resoluciones bajas, siendo los mejores resultados los obtenidos con  $64^3$ .

### 3.2.2 O-CNN

O-CNN (Octree CNN) [15] propone una idea similar a OctNet: divide la nube de puntos en varias ramificaciones de un solo octree, pero presta toda su atención únicamente en los límites del candidato a objeto 3D, mientras que OctNet trabaja con el interior del mismo, lo que conlleva más carga computacional. O-CNN extrae las características de los octantes de mayor profundidad, que son los que coinciden con los que contienen los límites de la figura con mayor precisión.

Una de las mayores ventajas que proporciona O-CNN es la de procesar diferentes etapas de convolución de manera paralela, permitiendo así su ejecución en la GPU.

O-CNN presenta resultados ligeramente mejores que los obtenidos mediante PointNet, método que se abordará a continuación, en tareas de segmentación parcial de objetos. De igual forma, se puede observar un mejor rendimiento a medida que se aumenta la resolución de los vóxeles, con el máximo en  $64^3$ .

## 3.3 MÉTODOS BASADOS EN IMÁGENES

Estos métodos extraen varias imágenes o capturas desde diferentes puntos de vista de la nube de puntos que son posteriormente tratadas en la red neuronal, obteniendo de ellas las características deseadas. Una

vez extraídas las características, se recupera el modelo de la nube de puntos, ahora segmentado.

Por la propia naturaleza de esta técnica, no se trata de una opción óptima en casos donde la escena capturada sea extensa o de gran complejidad, dado que sería necesario realizar una gran cantidad de imágenes para cubrir todas las zonas. Otro problema aparece en las zonas con baja densidad de puntos, donde la información podría ser insuficiente para generar una imagen.

### 3.3.1 SnapNet

SnapNet [1] es el primer método encontrado en una extensa base bibliográfica que se atrevió con la tarea de segmentación semántica empleando proyecciones de imágenes 2D a partir de nubes de puntos. Este método se desglosa en cuatro fases diferenciadas: preprocesamiento de la nube de puntos y obtención de atributos, generación de proyecciones, segmentación de las imágenes 2D y, por último, vuelta al modelo 3D, produciendo la segmentación tridimensional.

SnapNet, no obstante, sufre diversos problemas. En casos donde las nubes de puntos no son lo suficientemente densas y homogéneas, los resultados pierden interés. Lo mismo ocurre si el conjunto de datos empleado para el aprendizaje de la red neuronal no cuenta con modelos variados y ricos en información. Por tanto, SnapNet puede ser una vía fiable para escenas controladas de poca extensión y una reducida cantidad de elementos.

Desde SnapNet, pocos métodos han surgido con una clara base en el trabajo de imágenes. Un ejemplo es View-GCN [18].

## 4 MÉTODOS SIN TRATAMIENTO PREVIO DE LAS NUBES DE PUNTOS 3D

Tras los intentos de estructuración sobre las nubes de puntos, PointNet llegó para proponer una nueva manera de trabajar, utilizando directamente las nubes, sin tratamientos previos, salvo las transformaciones necesarias para alcanzar la invariabilidad a permutaciones, como se verá a continuación.

### 4.1 POINTNET

Desarrollado por C. R. Qi *et al.* [11], PointNet ha sido, desde su origen, la base de muchos de los métodos de visión 3D con nubes de puntos basados en RNP de la actualidad.

PointNet trabaja directamente con los puntos de la nube, a los cuales se les aplican diferentes transformaciones para conseguir esa invariabilidad mencionada anteriormente. A diferencia de los métodos más actuales, PointNet no emplea CNN para

la extracción de las características de los puntos, sino varias etapas de MLP (perceptrón multicapa). Una vez se ha obtenido la característica individual de cada punto, se consigue la característica global de la escena, de nuevo, con una capa MLP, y se concatena con las características individuales previamente extraídas. De este nuevo conjunto, producto de la agregación de características, deriva finalmente otro grupo de características para cada punto.

No son pocos los métodos que han empleado PointNet como raíz principal, los cuales han mejorado considerablemente los resultados en los ámbitos de segmentación, clasificación y detección. Esto es debido a la vanguardista propuesta que supuso en su día, capaz de trabajar con nubes de un millón de puntos, aproximadamente. Sin embargo, el principal problema del que adolece PointNet es la incapacidad de extraer la información topológica de la nube. Diversas pruebas han demostrado que estudiar la relación entre puntos cercanos ofrece mejores resultados en cuanto a la extracción de características y entendimiento de la escena.

#### 4.2 POINTNET++

Un año más tarde, C. R. Qi *et al.* [12] mejoraron la primera versión de PointNet dando lugar a PointNet++. En esta ocasión, la mejorada propuesta hacía uso de una estructura neuronal jerárquica para una mejor extracción de características teniendo en cuenta la información topológica de la nube. Estas se extraen de agrupaciones de puntos cercanos que, posteriormente, generan grupos más grandes con menos elementos. Estos grupos se procesan para conseguir características de mayor nivel y se repite el proceso las veces necesarias para obtener las características de más alto nivel, conformando el grupo de aprendizaje de características.

PointNet++ produce así mejores resultados con respecto a su versión anterior, PointNet. Sin embargo, este método, al trabajar con agrupaciones de puntos cercanos, puede llegar a generar errores en casos donde la densidad de la zona no alcanza ciertos números. Como resultado se pueden observar fallos entre objetos de la escena con una diferencia de escala significativa.

#### 4.3 SO-NET

SO-Net [8] ofrece otro método manteniendo la invariabilidad a permutaciones mediante la realización de un modelo para mapear la distribución espacial de los puntos mediante el uso de un mapa autoorganizado (Self-Organizing Map, SOM), cuyo objetivo es representar la nube en cuestión con un menor número de dimensiones. Posteriormente, la extracción de características se realiza mediante MLP de forma jerárquica tanto a los puntos individuales de la nube

como a los nodos producidos tras aplicar el SOM utilizando el método de los  $k$  puntos más cercanos.

Los resultados proporcionados en pruebas para segmentación parcial y clasificación de objetos muestran claras mejoras en comparación con métodos que emplean otras estructuras para la organización de la nube, como O-CNN u OctNet. La ventaja más significativa es el tiempo de entrenamiento, que se encuentra en torno a las 3 horas para modelos sin especificar de ModelNet40, en contraposición a las 20 horas de PointNet++, aunque no se compara con los tiempos que pudieran necesitar los métodos basados en octrees antes mencionados.

#### 4.4 POINTCNN

Para mejorar la pérdida de información relacionada con las nubes de puntos, PointCNN introduce el uso de la transformación  $X$  a modo de aprendizaje directamente desde los datos de entrada. De esta forma, el método propuesto por Yangyan Li *et al.* [9] es capaz de obtener la influencia de cada característica por cada punto, así como permutar puntos en un orden canónico. En términos generales, PointCNN es una generalización de las estructuras tradicionales de CNN en el ámbito del aprendizaje de características.

Por tanto, PointCNN consigue mejorar los problemas de densidad no uniforme y desorden de las nubes de puntos. A pesar de ello, el uso de la transformación  $X$  necesita un conocimiento exhaustivo del operador cuando se pretende aplicar a una red neuronal. Por otro lado, presenta resultados prometedores en segmentación en comparación con métodos como PointNet/PointNet++, SO-Net, DGCNN [3] o SGPN [16]. En clasificación, PointCNN ofrece peores resultados con respecto a otros métodos.

#### 4.5 SGPN

Se basa en el uso de las estructuras PointNet/PointNet++ aplicadas a cada uno de los puntos de la nube de entrada de forma que extrae tanto características locales como globales. Posteriormente, SGPN (Similarity Group Proposal Network) se divide en tres ramas claramente diferenciadas: generación de una matriz de similitud, generación de un mapa de confianza y segmentación semántica. Partiendo de la idea de que puntos pertenecientes a un mismo objeto son más propensos a contar con un vector de características similar y a estar situados cerca los unos de los otros, esta matriz de similitud genera diferentes candidatos para ser considerados objetos. A estos candidatos se les aplica el mapa de confianza con el objetivo de escoger el que mejor resultados aporte, siendo el elegido el que se somete a continuación a la red de segmentación semántica.

A pesar de la flexibilidad y eficacia de SGPN, dado que la matriz de similitud aumenta de manera

cuadrática conforme aumenta el tamaño de la nube de puntos procesada, el método ideado por W. Wang *et al.* no es adecuado para trabajar escenas de más de 100.000 puntos siendo esta una clara limitación para uso con datos reales adquiridos con escáneres de corto o largo alcance. Los resultados de las pruebas aportados por los responsables, aunque positivos, no son mejores que los de los métodos actuales, aunque su simpleza es una clara ventaja.

#### 4.6 DGCNN

Yue Wang *et al.* [3] introducen dos conceptos interesantes para las redes neuronales de grafos (Graph Neural Networks, GNN). Por un lado, aplican una novedosa operación denominada EdgeConv, con el que se consigue obtener las características locales de los puntos, y la relación de estos con sus puntos más cercanos, mientras se respeta la invariancia a permutaciones. La otra introducción es DGCNN (Dynamic Graph CNN), método que, a diferencia de las redes neuronales de grafos más empleadas, actualiza el resultado del grafo tras cada capa de la red, es decir, el resultado no es fijo hasta que no se termina el proceso.

DGCNN presenta grandes resultados en términos de OA (Overall Accuracy) frente a otros métodos como PointCNN. Sin embargo, aunque innovadora, esta propuesta cuenta con aspectos mejorables. LDGCNN (Linked DGCNN) [23] es un ejemplo que mejora la anterior estructura.

#### 4.7 POINTCONV

PointConv [19] parte de la idea de considerar la operación de convolución como una aproximación discreta aplicando una variación del método de Monte Carlo. El peso de las características se obtiene a través de perceptrones multicapa y funciones de densidad, aunque dichos valores son recalculados posteriormente con PointConv, consiguiendo así una mejora en resultados y tiempo de computación en comparación con PointNet en tareas de segmentación semántica y PointCNN en clasificación.

#### 4.8 A-CNN

El método propuesto por Artem Komarichev *et al.* [6] introduce una nueva variante de operador convolucional. En este caso, A-CNN (Annularly Convolutional Neural Network) propone el uso de estructuras anulares para la captación de puntos, y la consiguiente formación de agrupaciones, a diferentes escalas. Estas estructuras pueden ser bien regulares o dilatadas, siendo la diferencia entre ellas un espacio vacío intermedio entre los distintos niveles. Ambas aproximaciones evitan el solapamiento o duplicación de puntos, mejoran la extracción de características geométricas y permiten trabajar con zonas más

extensas empleando kernels del mismo tamaño sin necesidad de aumentar el número de parámetros para las etapas de convolución.

Como resultado se obtiene un método que produce una ligera mejora en segmentación semántica, segmentación parcial y clasificación de objetos en escenas de mayor extensión que otras técnicas basadas en métodos multiescala, como puedan ser PoinNet/PoinNet++, PointCNN, 3P-RNN [21], SO-Net o SGPN. La novedad de su propuesta puede suponer una interesante línea de investigación para futuros proyectos.

#### 4.9 SEGCGN

Huan Lei *et al.* [7] proponen una serie de coeficientes para el kernel borroso, una solución a los problemas de los kernels esféricos, así como el SegGCN (encoder-decoder graph convolutional network), con el fin de aplicar de manera efectiva el mencionado kernel, siendo capaz de procesar hasta un millón de puntos de la nube por segundo.

La técnica propuesta por SegGCN puede ser una interesante línea de investigación para futuros proyectos, aunque los resultados proporcionados, en comparación con otros métodos como SPG, PointConv o PointCNN, en bancos como S3DIS o ScanNet, son muy similares.

#### 4.10 RESSANET

Los autores de ResSAnet [24] propusieron recientemente una técnica similar a la convolución, con la salvedad de que emplea figuras geométricas primitivas para la extracción de características geométricas de las nubes de puntos respetando la invariabilidad a permutaciones. Este método, además, introduce el uso de dos módulos, Res-SA y Res-SA-2, que ofrecen una nueva vertiente a la hora de realizar saltos de conexiones para la adición de características multiescala y multinivel.

Se puede observar una ligera mejora en los resultados mostrados en comparación con otros métodos como PointNet o DGCNN. Además, ResSAnet presenta una reducción significativa en términos de carga computacional y número de parámetros de la red neuronal. Sin embargo, una desventaja es la necesidad de ajustar ciertos parámetros durante de proceso de entrenamiento, haciéndolo menos independiente que otros propuestos en esta revisión.

#### 4.11 RGAM

Métodos como SegGCN, SO-Net y DNNSP [17] fallan a la hora de tener en cuenta la información contextual de la escena, clave para la obtención de características globales y su posterior segmentación. A raíz de lo anterior surgió RGAM (ring grouping neural network with attention module) [2]. RGAM es



capaz de extraer tanto características locales como globales teniendo en cuenta las vecindades colindantes, mejorando el cálculo de puntos repetidos y reduciendo el tiempo de computación.

En términos generales, mejora los resultados obtenidos de segmentación semántica en bancos de prueba como S3DIS y NYU-V2. No obstante, debido a que en esta red los autores proponen el uso de una mini-PointNet en la etapa inicial de aprendizaje, no es capaz de trabajar con estructuras geométricas complejas. En el citado campo, se trata de la propuesta más reciente y que mejores resultados ofrece para escenas interiores en comparación con varios métodos, como PointNet, PointNet++, SegCloud, SPGN y DGCNN.

## 5 COMPARATIVA

En esta sección se introduce una breve comparación entre los distintos métodos indicados anteriormente. Entre los aspectos a comparar se encuentran la disponibilidad del código para acceso y testeo de cada método, si se pueden aplicar para espacios interiores, exteriores, no convencionales (NC) u objetos. Entiéndase por escenas no convencionales aquellas que presenten estructuras de geometría compleja, por ejemplo, una bóveda. Además, también se indica si los métodos en cuestión incluyen en sus respectivos artículos alguna mención a tiempos de entrenamiento. La Tabla 1 recoge la comparación entre los diferentes escenarios, mientras que la Tabla 2 reúne los aspectos relacionado con el código y el tiempo mencionados. Es necesario destacar la dificultad a la hora de comparar los diversos métodos, debido, en algunos casos, a la falta de información, y, en otros, a la disparidad en las pruebas realizadas.

Por un lado, se cree indispensable conocer el número de puntos con los que pueden llegar a trabajar estas técnicas, dado que las nubes de puntos pueden llegar a contener millones de estos. Por otro, ciertos métodos, como A-CNN, realizan pruebas en bancos de pruebas como S3DIS o ShapeNet-part mientras que SO-Net trabaja con otros como ModelNet40 o MNIST.

Lo mismo ocurre con las condiciones en las que se realizan las pruebas, con conjuntos de puntos que varían en número y distribución, y que difícilmente se pueden comparar. El hardware empleado en los ensayos de cada método, de igual forma, es un factor determinante en los resultados obtenidos, haciendo muy complicada la comparación de los resultados en términos cuantitativos. Todas estas limitaciones hacen que la comparación entre métodos se convierta en una tarea compleja.

Las tablas 1 y 2, por tanto, pretenden ofrecer una primera aproximación para quienes deseen introducirse en el campo de la segmentación semántica en relación con las nubes de puntos 3D. A

continuación, se exponen las conclusiones a las que se ha llegado.

1. Muchos de estos métodos realizan pruebas con nubes del orden de, como máximo, 5000 puntos, una cantidad ínfima en comparación con la resolución de las nubes de puntos reales. Por tanto, sería interesante realizar pruebas en nubes de puntos reales, para la obtención de resultados más representativos de la realidad.
2. Diversos autores aquí mencionados ponen de manifiesto su intención de mejorar sus respectivos métodos en el ámbito de las escenas exteriores y de gran escala, por lo que bien podría tratarse de una línea de investigación de gran interés, siendo una posible aplicación la reconstrucción y preservación de emplazamientos históricos.
3. La mayoría de pruebas realizadas, las cuales vienen indicadas en los documentos de cada método, muestran grandes resultados en escenas tradicionales, con paredes rectas y elementos típicos de interiores, y segmentación parcial de objetos, sin ninguna mención a las estructuras no convencionales antes definidas. Sin embargo, si hubiera que escoger una opción para futuras investigaciones en este ámbito esa sería A-CNN, dado los buenos resultados obtenidos en términos de estructuras anulares.

Tabla 1. Comparación entre métodos para escenas interiores, exteriores, no convencionales y objetos.

Método	Interior	Exterior	NC	Objeto
VV-Net	Sí	-	-	Sí
SnapNet	Sí	Sí	-	-
OctNet	Sí	Sí	-	Sí
O-CNN	-	-	-	Sí
PointNet	Sí	-	-	Sí
PointNet++	Sí	-	-	Sí
SO-Net	-	-	-	Sí
PointCNN	-	-	-	Sí
SGPN	Sí	-	-	Sí
DGCNN	Sí	-	-	Sí
PointConv	Sí	-	-	Sí
A-CNN	Sí	-	Sí	Sí
SegGCN	Sí	-	-	-
ResSANet	-	-	-	Sí
RGAM	Sí	-	-	-

Tabla 2. Comparación de métodos para disponibilidad del código, número de puntos máximo o tiempo de entrenamiento.

Método	Código	Tiempo
VV-Net	-	-

SnapNet	Sí	-
OctNet	Sí	-
O-CNN	Sí	-
PointNet	Sí	Sí
PointNet++	Sí	Sí
SO-Net	Sí	Sí
PointCNN	Sí	Sí
SGPN	Sí	Sí
DGCNN	Sí	-
PointConv	Sí	Sí
A-CNN	Sí	
SegGCN	Sí	-
ResSANet	-	-
RGAM	-	-

## 6 CONCLUSIÓN

Con este documento se ha realizado una revisión del estado del arte de los métodos empleados para la segmentación semántica de nubes de puntos basados en el uso de RNP, una de las técnicas más empleadas durante los últimos años y que mejores resultados aporta a la escena de la visión por computador. Asimismo, se han clasificado los distintos métodos por su necesidad de tratar las nubes previamente o no. Dada la disparidad de métodos y las pruebas realizadas en diferentes bancos de pruebas, la comparación directa entre técnicas resulta una tarea compleja. A pesar de los resultados aportados por los diferentes autores, la elección de un método concreto para la segmentación semántica, clasificación y detección de objetos de nubes de puntos 3D no es trivial.

No son pocas las aproximaciones realizadas para llevar a cabo las tareas mencionadas de la mejor manera posible, por lo que se cree que existe un amplio margen de mejora en este campo. Las últimas técnicas ofrecen resultados prometedores y futuras líneas de investigación, como tareas de segmentación semántica en escenas exteriores o no convencionales, pueden ser determinantes para conseguir dominar la segmentación semántica de nubes de puntos 3D.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto titulado “Procesamiento de datos masivos de escáneres 3D: Segmentación, reconocimiento y modelado geométrico de edificaciones no convencionales”, con referencia PID2019-108271RB-C32. AEI. 10.13039/501100011033; y el proyecto “Tecnologías 3D para la resiliencia, la recuperación y la sostenibilidad del Patrimonio Cultural Extremeño”, con referencia IB20172, de la Junta de Extremadura y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional “Una manera de hacer Europa”.

## English summary

### COMPARATIVE ANALYSIS OF POINT CLOUD SEMANTIC SEGMENTATION METHODS BASED ON NEURAL NETWORKS

#### Abstract

*During the recent years, computer vision has put efforts into adding information to 2D images and 3D scenes the same way humans extract knowledge just by looking at them. Regarding this, many methods have arisen in the past decade, some of which are machine learning-based. The more efficient ones, however, have been aiming to further improve the concept of artificial intelligence by fusing information extraction with neural networks, what it is call as deep learning techniques, a recent and challenging field in computer vision. This paper tries to survey the methods that still are the basis of the newest researches, such as PointNet, as well as those techniques that could reach new state-of-the-art results in scene and 3D models semantic segmentation based on point clouds. A comparative analysis between methods is performed for this purpose, taking into account some characteristics considered important.*

**Keywords:** semantic segmentation, machine learning, deep learning, state-of-the-art.

#### Referencias

- [1] Boulch, A., Guerry, J., Le Saux, B., Audebert, N., (2018) SnapNet: 3D point cloud semantic labeling with 2D deep segmentation networks, *Comput. Graph.* 71 189–198.
- [2] Chen, X.-T., Li, Y., Fan, J.-H., Wang, R., (2021) RGAM: A novel network architecture for 3D point cloud semantic segmentation in indoor scenes, *Inf. Sci. (Ny)*. 571 87–103.
- [3] Cui, Y., Liu, X., Liu, H., Zhang, J., Zare, A., Fan, B., (2021) Geometric attentional dynamic graph convolutional neural networks for point cloud analysis, *Neurocomputing*. 432 300–310.
- [4] Guo, Y., Wang, H., Hu, Q., Liu, H., Liu, L., Bennamoun, M., (2020) Deep Learning for 3D Point Clouds: A Survey, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 8828 1–1.
- [5] Kingma, D.P., Welling, M., (2014) Auto-encoding variational bayes, *2nd Int. Conf. Learn. Represent. ICLR 2014 - Conf. Track Proc.* 1–14.
- [6] Komarichev, A., Zhong, Z., Hua, J., (2019)

A-CNN: Annularly convolutional neural networks on point clouds, *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.* 2019-June 7413–7422.

[7] Lei, H., Akhtar, N., Mian, A., IEEE Computer Society, 2020SEG-GCN: Efficient 3D point cloud segmentation with fuzzy spherical kernel, in: *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, : pp. 11608–11617.

[8] Li, J., Chen, B.M., Lee, G.H., IEEE Computer Society, 2018SO-Net: Self-Organizing Network for Point Cloud Analysis, in: *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, : pp. 9397–9406.

[9] Li, Y., Bu, R., Di, X., (2018) PointCNN : Convolution On X -Transformed Points,.

[10] Meng, H.Y., Gao, L., Lai, Y.K., Manocha, Di., Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019VV-net: Voxel VAE net with group convolutions for point cloud segmentation, in: *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis.*, : pp. 8499–8507.

[11] Qi, C.R., Su, H., Mo, K., Guibas, L.J., (2016) PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation,.

[12] Qi, C.R., Yi, L., Su, H., Guibas, L.J., (2017) PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space, *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2017-Decem 5100–5109.

[13] Riegler, G., Ulusoy, A.O., Geiger, A., Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017OctNet: Learning deep 3D representations at high resolutions, in: *Proc. - 30th IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition, CVPR 2017*, : pp. 6620–6629.

[14] Tchapmi, L., Choy, C., Armeni, I., Gwak, J., Savarese, S., (2018) SEGCloud: Semantic segmentation of 3D point clouds, *Proc. - 2017 Int. Conf. 3D Vision, 3DV 2017*. 537–547.

[15] Wang, P.S., Liu, Y., Guo, Y.X., Sun, C.Y., Tong, X., (2017) O-CNN: Octree-based convolutional neural networks for 3D shape analysis, *ACM Trans. Graph.* 36.

[16] Wang, W., Yu, R., Huang, Q., Neumann, U., (2018) SGPN: Similarity Group Proposal Network for 3D Point Cloud Instance Segmentation,

*Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.* 2569–2578.

[17] Wang, Z., Zhang, L., Zhang, L., Li, R., Zheng, Y., Zhu, Z., (2018) A deep neural network with spatial pooling (DNN-SP) for 3-D point cloud classification, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 56 4594–4604.

[18] Wei, X., Yu, R., Sun, J., (2020) View-GCN: View-based graph convolutional network for 3D shape analysis, *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.* 1847–1856.

[19] Wu, W., Qi, Z., Fuxin, L., IEEE Computer Society, 2019PointConv: Deep convolutional networks on 3D point clouds, in: *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, : pp. 9613–9622.

[20] Xie, Y., Tian, J., Zhu, X.X., (2020) Linking Points With Labels in 3D: A Review of Point Cloud Semantic Segmentation, *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* 8 38–59.

[21] Ye, X., Li, J., Huang, H., Du, L., Zhang, X., (2018) 3D recurrent neural networks with context fusion for point cloud semantic segmentation, *Lect. Notes Comput. Sci. (Including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*. 11211 LNCS 415–430.

[22] Zhang, J., Zhao, X., Chen, Z., Lu, Z., (2019) A Review of Deep Learning-Based Semantic Segmentation for Point Cloud, *IEEE Access.* 7 179118–179133.

[23] Zhang, K., Hao, M., Wang, J., de Silva, C.W., Fu, C., (2019) Linked Dynamic Graph CNN: Learning on Point Cloud via Linking Hierarchical Features, 1–8.

[24] Zhu, X., Zhang, Z., Ruan, J., Liu, H., Sun, H., (2021) ResSANet: Learning geometric information for point cloud-processing, *Sensors.* 21.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# PROTOTIPO DE CATÉTER ROBÓTICO CON SENSOR HÁPTICO BASADO EN VISIÓN

Almudena Bravo<sup>1</sup>, Ángel Rodríguez Castaño<sup>2</sup>, Blas M. Vinagre<sup>1</sup>, Inés Tejado<sup>1</sup>,

Enrique Mancha-Sánchez<sup>1</sup>, Paloma Rodríguez<sup>1</sup>, José Emilio Traver<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, 06006 Badajoz

<sup>2</sup> Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 41092 Sevilla

{abravoi, bvinagre, itejbal, emancha, palomard, jetraverb}@unex.es, castano@us.es

## Resumen

El desarrollo de robots como asistentes de procedimientos quirúrgicos mínimamente invasivos está recibiendo un gran interés en los últimos años, fundamentalmente por ofrecer más precisión, flexibilidad y control respecto a las técnicas convencionales. En este artículo se presenta un primer prototipo de catéter autónomo basado en visión, realizando la navegación autónoma por medio del seguimiento de paredes inspirado en animales positivamente tigmotácticos. Además, se llevan a cabo distintos experimentos para verificar la funcionalidad del prototipo.

**Palabras clave:** Cirugía mínimamente invasiva, catéter, navegación autónoma, sensor háptico basado en visión, nitinol.

## 1. INTRODUCCIÓN

La cirugía mínimamente invasiva (MIS por sus siglas en inglés) ha revolucionado las intervenciones quirúrgicas en las últimas dos décadas, utilizando procedimientos guiados por imagen para tratar y diagnosticar enfermedades. El uso de esta técnica está asociada a una reducción del dolor postoperatorio, pérdida de sangre, tasa de infección, tiempo de vuelta a las actividades normales, necesidades analgésicas postoperatorias y duración de estancia hospitalaria, en comparación con las intervenciones de cirugía convencionales [2, 7].

El campo de la robótica quirúrgica emplea desarrollos tecnológicos que incorporan sistemas de ingeniería para asistir en procedimientos médicos, y son especialmente útiles para MIS. Esta ayuda, que ha ganado una creciente aceptación en los últimos años, permite a los médicos llevar a cabo técnicas quirúrgicas con más precisión, flexibilidad y control de lo que es posible con las técnicas convencionales. Instrumentos quirúrgicos, tales como endoscopios o catéteres, entre otros, son dispositivos específicamente diseñados para ese fin. Estos instrumentos se introducen manualmente en el cuerpo, conducto o vaso, y se utilizan para el drenaje de fluidos, el tratamiento de enfermeda-

des, o para llegar a sitios específicos del cuerpo para la administración de fármacos [6].

Los catéteres convencionales cuentan con un rango de movimiento y flexibilidad limitados, dependiendo en gran medida de la habilidad de los operadores, normalmente cirujanos, para maniobrar la punta del catéter a fin de lograr la interacción con el objetivo de una manera estable. Estar capacitado para desempeñar esta labor requiere mucho tiempo de aprendizaje y una costosa formación [10]. Además, la falta de información sobre la fuerza de contacto con el tejido, y la difícil anatomía de la vía, hace que este tipo de catéteres produzcan fallos de operación, debido al complejo funcionamiento en lo que a destreza y seguridad se refiere [7].

Actualmente, las fuerzas se controlan mediante el tacto y, la localización del catéter, mediante fluoroscopia. Su uso aumenta a medida que las técnicas mínimamente invasivas se desarrollan para una gama cada vez más amplia de enfermedades. El guiado y la navegación de este tipo de catéteres provoca un aumento de la dosis de radiación en el paciente y personal intervencionista. Al ser unos procedimientos con necesidad de posicionamiento preciso, se hace extremadamente complicado solo con imágenes fluoroscópicas bidimensionales, por lo que al final son necesarias múltiples inyecciones de los agentes de contraste, adquisiciones de imágenes e intercambios de catéteres [11].

El desarrollo de catéteres de punta orientable (*steerable catheter* en inglés) permite paliar los inconvenientes de los catéteres convencionales. Se caracteriza por estar dotado de un extremo distal flexible y orientable, capaz de ser controlado remotamente. Se manipula mediante un mecanismo que puede ser accionado por operadores o por actuadores. Para que sea considerado catéter de punta orientable, el catéter debe cumplir una serie de requisitos detallados en [7], entre los que destacan: el uso de material biocompatible y esterilizable en su construcción, alto grado de destreza, intuitivo y de fácil manejo.

Las ventajas del catéter de punta orientable sobre el convencional son numerosas. La desviación

del extremo distal es más controlable, mejora la accesibilidad en zonas de compleja anatomía, la estabilidad, además de reducir los tiempos de la fluoroscopia, permitiendo una disminución de la exposición a la radiación.

Entre este tipo de catéteres se encuentran los autónomos (sin manejo por parte de un médico especializado). La navegación autónoma puede liberar al médico de la realización de tareas difíciles pero rutinarias, y poder centrarse en los componentes críticos de la misión. Para que el catéter pueda navegar con seguridad, es necesario conocer su ubicación y controlar las fuerzas que aplica al tejido [4].

Los animales positivamente tigmotácticos realizan un seguimiento de paredes, rastreando los límites de los contornos de los objetos, es una forma de explorar su entorno en ausencia de estímulos visuales [4].

Inspirados en la idea propuesta por Fagogenis et al. (2019) [4], este artículo presenta el diseño y desarrollo de un primer prototipo de catéter robótico con sensor háptico basado en visión. La navegación autónoma se realiza a través de algoritmos positivamente tigmotácticos, por medio de visión por computador, creando un contacto de baja fuerza con el tejido y permitiendo el seguimiento de paredes, gracias al sensor háptico y a la estructura diseñada para el posicionamiento del extremo, situada en la punta distal del catéter.

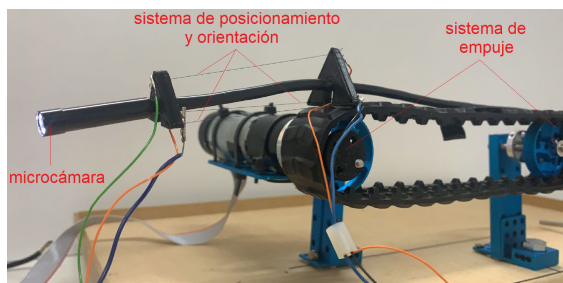


Figura 1: Prototipo de catéter autónomo (imagen real)

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

En la Figura 1 se muestra el prototipo de robot catéter autónomo para navegación por medio de la visión háptica desarrollado. Está formado por tres sistemas dependientes entre sí ya que las acciones que efectúa uno son consecuencia de la actuación de otro:

- Sistema de posicionamiento de la punta del catéter, compuesto por tres “tendones” de ni-

tinol, acoplados al extremo a través de dos piezas que hacen de columna vertebral, dotando de libertad de movimiento a la punta distal. Su actuación está gobernada por el sensor háptico basado en visión y el algoritmo diseñado.

- Sistema del sensor háptico basado en visión, que se encuentra en la punta distal del catéter, formado por una microcámara de endoscopia de  $640 \times 480$  de resolución conectada por USB al ordenador que permite adquirir imágenes del entorno en tiempo real.
- Sistema de empuje, encargado del movimiento de avance (o retroceso, para la extracción) del catéter. Consta de un motor *Maxon Motors* de 24V, una controladora digital *EPOS4* de *Maxon Motors* y un mecanismo de transmisión (correa más engranajes), todo anclado a una plataforma de madera para asegurar el sistema y evitar vibraciones innecesarias.

### 2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL PROTOTIPO

El catéter navega mediante un sensor háptico basado en visión, un algoritmo que combina el seguimiento de paredes mediante contacto intermitente y el procesamiento de imágenes en tiempo real. La medida del contacto que ejerce el extremo del robot sobre una superficie se realiza de manera indirecta mediante visión, y más concretamente, segmentación de imágenes por umbralización del color.

En la Figura 2 se resume el funcionamiento general del catéter construido, se ha confeccionado un diagrama de flujo intuitivo para que se aprecie fácilmente la jerarquía de los movimientos y cómo son gobernados por el área del tejido observado.

La rutina comienza con la adquisición de la imagen, ésta se filtra para la eliminación del ruido (con un filtro Gaussiano 2D) y, después, se segmenta por umbralización en el espacio de color CIE  $L^*a^*b$  (que se refiere a luminosidad, coordenadas rojo-verde, coordenadas amarillo-azul, respectivamente), quedando la zona iluminada (es decir, la más cercana a la pared) resaltada después de haberse aplicado la máscara binaria.

Se realizan operaciones morfológicas de relleno de huecos y cierre, con elemento de estructuración en forma de disco de radio 3. El cierre morfológico consiste en el encadenamiento de una dilatación seguida de una erosión, se utiliza para eliminar elementos salientes, conexiones finas o suavizar los contornos de un objeto. Como resultado, se obtiene una imagen binaria en la que la zona más

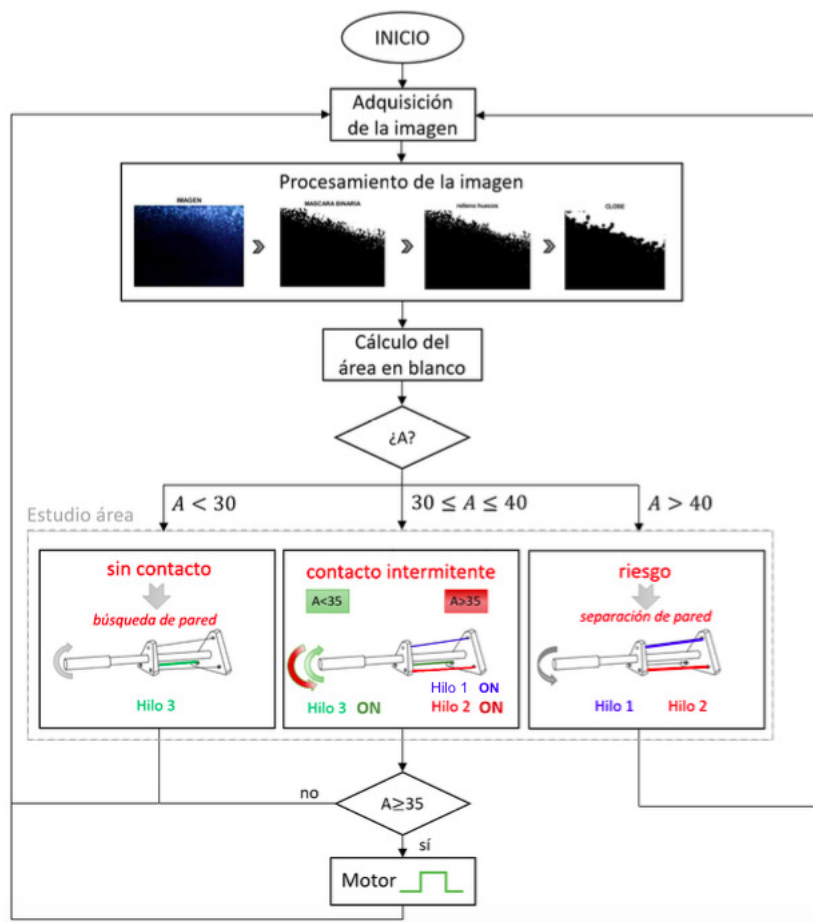


Figura 2: Diagrama general de la rutina de funcionamiento del prototipo

iluminada en la original, correspondiente al tejido próximo al extremo distal del catéter, queda en blanco (valor 1 en la imagen resultante), y el resto, en negro (valor 0). A partir de esta imagen, se calcula el área en blanco (se elige la más grande de todas las que puedan aparecer) respecto a la total de la imagen (en adelante,  $A$ ), en porcentaje.

El área del tejido observado informa de cómo de cerca se encuentra el catéter de la pared, es decir, si bien se detecta área, no significa que se esté tocando el tejido. Para justificar la efectividad de este funcionamiento, se ha realizado una serie de instantáneas conforme el prototipo se aproxima la pared, quedando demostrado en la Figura 3, que no es hasta superar el rango del 35 % aproximadamente cuando el catéter entra en contacto con la superficie a la que sigue.

Una vez el área del tejido próximo encerrado en el perímetro de la imagen está determinado, se realizan una serie de acciones dependiendo del porcentaje, provocando el movimiento hacia un lado u otro de la punta del catéter. En una zona concreta, denominada de seguimiento, será cuando el empuje por medio del motor se active e introduzca

el catéter hacia el interior de la cavidad.

En la Figura 4 se incluye el diagrama de bloques del funcionamiento completo del prototipo, en la que el área de tejido visualizada hace una realimentación a sendos sistemas, el de posicionamiento de la punta, y el de empuje, arriba y abajo respectivamente, para que, dependiendo del porcentaje obtenido, se actúe en consecuencia.

El control del motor que produce el empuje se realiza mediante un control de dos grados de libertad (DOF), en el que en el interior del lazo de realimentación se incluye un control PID, y en lazo abierto, un filtro feedforward de ganancia unitaria.

## 2.2. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DE LA PUNTA DEL CATÉTER

Para que el extremo del catéter pueda tener maniobrabilidad para hacer el seguimiento de paredes y tener un alcance óptimo para las funciones en las que pueda ser requerido, es necesario dotar a la punta distal de un sistema que le permita



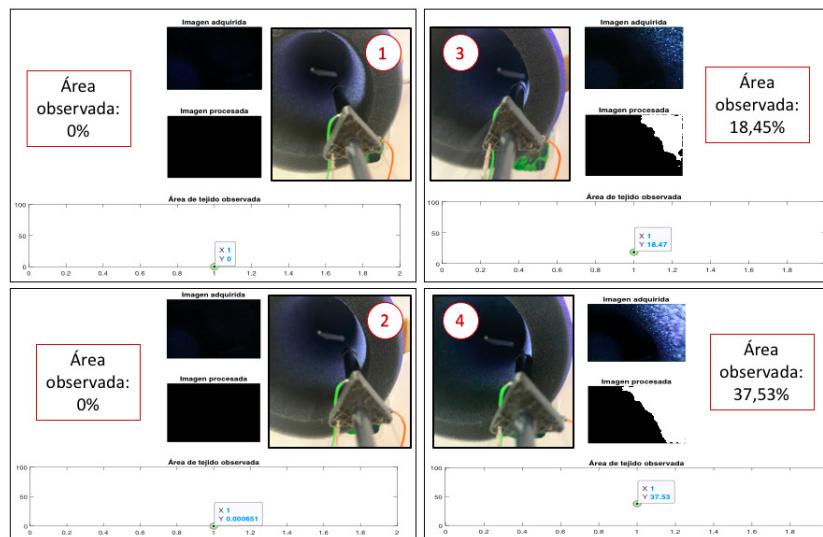


Figura 3: Justificación del rango de uso. Enumeradas en orden las instantáneas: En primer lugar alejado de la pared, detecta porcentaje de área cero; la segunda instantánea muestra el acercamiento del catéter a ésta pero con detección aproximada de cero; en la tercera detecta un porcentaje de área del 18,5 % pero se aprecia como no ha tocado aún la pared del tejido; la instantánea cuatro demuestra como en rangos superiores a 35 % de área observado, el catéter está en contacto con el tejido.

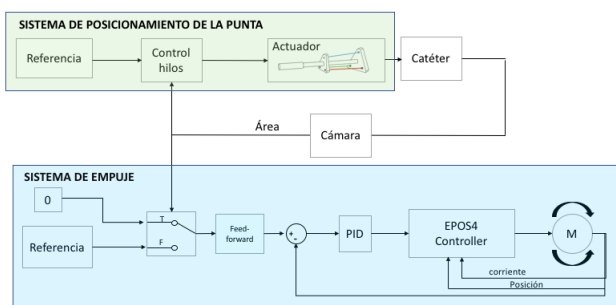


Figura 4: Diagrama de bloques del sistema completo

controlar su orientación. Para ello se coloca una estructura que lleva acoplado tres hilos de nitinol, una aleación (de níquel y titanio) de memoria de forma (SMA por sus siglas en inglés), equidistantes entre sí  $120^\circ$ . Esto permitirá, gracias a la geometría de dichas piezas y a las propiedades del material super-elástico, nitinol, que el extremo se oriente hacia cualquier ángulo cuando se produzca un cambio en la estructura cristalina de alguno de los hilos, los cuales se contraen con el calor y vuelven a su posición inicial en su ausencia. Se aplicará corriente al hilo que se desee contraer mediante un circuito de excitación.

El nitinol se conecta entre la fuente de alimentación y las resistencias de drenaje del Mosfet. Cuando se aplica corriente a la puerta el circuito se cierra y el nitinol conduce, calentándose hasta contraerse más o menos rápido dependiendo de la tensión aplicada en la puerta. La fuente de tensión

es de 5 V, las resistencias de drenaje de  $5 \Omega$  cada una y las de la puerta de  $1,2 \text{ K}\Omega$ .

### 2.2.1. Caracterización del movimiento del extremo distal

Se puede calcular de manera aproximada cuánto desvía la estructura que se ha incorporado en el extremo la punta del catéter, por trigonometría. En la Figura 5 se ve el esquema simple de la desviación al igual que se denotan cada uno de los hilos. La Tabla 1 muestra los desplazamientos junto con los parámetros de los hilos de nitinol, siendo estos aproximadamente iguales se muestra una tabla genérica, donde  $R_{Marten}$  es la resistencia del hilo cuando está en fase martensita;  $R_{Aust}$  la resistencia del hilo cuando está en fase austenita;  $L_{Marten}$  longitud del hilo cuando está en fase martensita,  $L_{Aust}$  longitud del hilo cuando está en fase austenita y  $\alpha$  el ángulo de desplazamiento.

Tabla 1: Características de la estructura

Parámetro	Valor
$R_{Marten}$	$6,9 \Omega$
$R_{Aust}$	$7 \Omega$
$L_{Marten}$	94 mm
$L_{Aust}$	92,6 mm
$\alpha$	$9,9^\circ$

En la Figura 6 se muestra el esquema de posicionamiento de la punta según los hilos que se encuentran excitados gracias al movimiento posibilitado por la estructura acoplada.

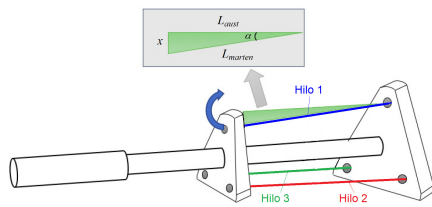


Figura 5: Cálculo de la desviación

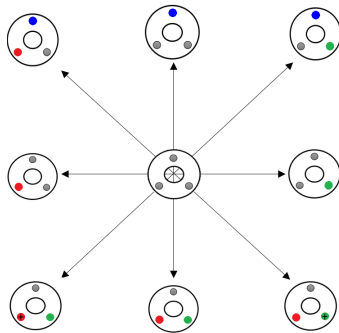


Figura 6: Esquema orientación de la punta dependiendo de hilos excitados (en color, los hilos excitados; el símbolo + representa una excitación de voltaje mayor).

### 2.3. SENSOR HÁPTICO

El principio de funcionamiento en el que se basa el sistema de navegación, explicado en el apartado 2.1, y que puede verse en la Figura 2, da como resultado un área, en porcentaje, que será la medida que controle en lazo cerrado el sistema. Las señales de referencia serán proporcionadas dependiendo del área, haciendo de nuevo incapié en que hasta no superar el rango del 35 %, no se considera que se esté tocando el tejido. También, añadir que el seguimiento de paredes está diseñado para seguir la pared derecha, y de acuerdo con el criterio propuesto en [4]:

- Si  $30\% < A$  entonces significa que el catéter se encuentra alejado de la zona de seguimiento, y por tanto, del tejido. Se excitará mediante el circuito diseñado el hilo 3 (en rojo en la Figura 2) para que el catéter vaya en busca del rango de seguimiento de paredes.
- Si  $A > 40\%$ , entra en zona de riesgo, considerando que se ejerce más presión de la necesaria en el tejido. Se excitarán los dos hilos que se encuentran en el lado contrario al área detectada con máxima corriente, provocando la separación de la pared de la manera más rápida que ofrece el nitinol, es decir, en menos de un segundo.
- Si por el contrario,  $30\% \leq A \leq 40\%$  se dice que está en zona del seguimiento de pared.

Este es el rango que se pretende mantener todo el tiempo. De manera que, cuando detecta que  $30\% \leq A < 35\%$ , la excitación del hilo 3 (en verde en la Figura 2) se hará menor, es decir que la tensión que se aplica a la puerta del Mosfet que controla dicho hilo disminuye, haciendo que el hilo no se contraiga de una manera tan rápida porque podría pasarse de la zona de interés. Se busca que entre en el rango del 35-40% de una manera lenta para que no se pase de los límites marcados y entre en zona de riesgo. Cuando  $35\% \leq A \leq 40\%$  es el hilo 2 y el hilo 1 (marcado en rojo y azul, respectivamente, en la Figura 2) los que se excitan, mientras que se le da tensión nula a la puerta del hilo 3, provocando que el catéter gire hacia la izquierda y se aleje de la pared. No se le dará máxima tensión a la puerta de ambos hilos para que no se vaya del rango que se considera de "seguimiento de pared". Es entonces cuando el ciclo vuelve a empezar.

En la parte superior de la Figura 6 se ilustra en lo que ocurre dentro del área de seguimiento del tejido.

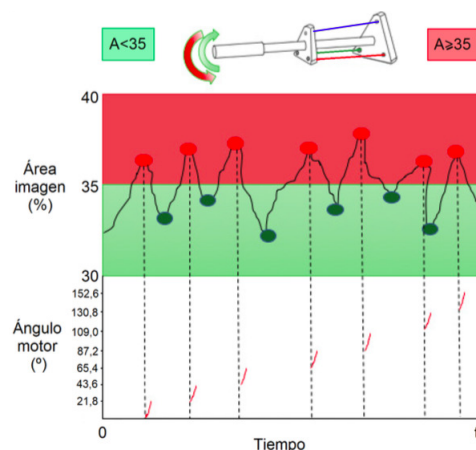


Figura 7: Esquema del modo de funcionamiento del seguimiento de paredes. Arriba el zigue y zageo del área a través de los rangos prefijados. Abajo, actuación del motor de empuje longitudinal para inserción del catéter

Los valores o rangos de excitación de los hilos en función del área se resumen en la Tabla 2; su ajuste se ha realizado de manera experimental. En los casos en los que especifica un rango, es decir, para el hilo 3 en las situaciones en las que  $15 \leq A < 30$  y  $30 \leq A < 35$ , el voltaje de excitación se calcula de manera inversamente proporcional al área para el rango indicado. Cuando no se ha detectado área de tejido próxima, el voltaje de los hilos excitados es mayor.

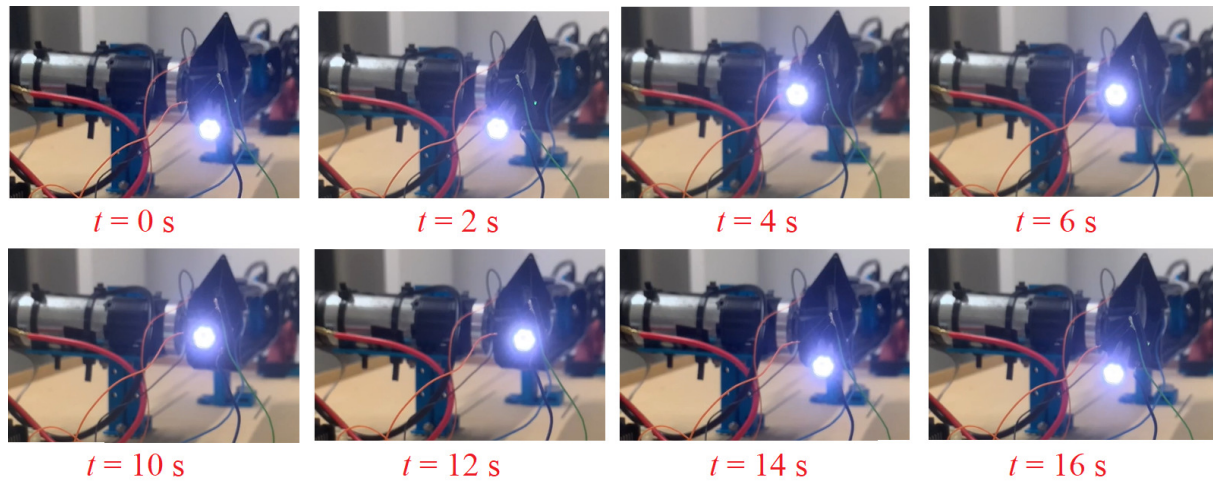


Figura 8: Experimento 1 del prototipo: fotogramas de los 16 primeros segundos del movimiento circular del extremo.

Tabla 2: Excitación de los hilos de nitinol según el área  $A$ .

Área	Hilo	Rango voltaje (V)
$0 < A < 15$	3	3,3
$15 \leq A < 30$	3	2,88 – 3,3
$30 \leq A < 35$	3	2,7 – 3,3
$35 \leq A \leq 40$	1	1,94
	2	2,7
$A > 40$	1	3,3
	2	3,3

## 2.4. SISTEMA DE EMPUJE LONGITUDINAL

En un catéter autónomo surge la necesidad de tener un sistema que lo inyecte hacia el interior del paciente cuando sea necesario, como puede verse en [9, 3, 4].

Tabla 3: Caracterización cinta transportadora-catéter

Característica	Valor
$Giro_{Motor}$	21,81°
$Radio_{Rueda}$	19,5 mm
$L_{circunferencia}$	122,522 mm
$L_{Desplazada}$	14,84355 mm

Una vez el catéter se encuentra en los rangos denominados de seguimiento de pared, este se acerca a la zona de área comprendida entre el 35-40 %, cuando la imagen procesada en el instante posterior a la llegada a este área es analizada, el sistema actúa en consecuencia excitando el hilo 2 en detrimento del hilo 1. Véase la Figura 7.

A la vez que el control de los hilos actúa sobre

el hilo 1 y 2 para alejar el extremo de la pared, el conmutador del bloque del sistema de empuje (véase la Figura 4) da paso a la referencia de posición del motor, dando lugar al giro del motor. Puede comprobarse en la Tabla 3. Con el mecanismo de transmisión se consigue que este sistema empuje al catéter hacia el interior de la cavidad.

## 3. EXPERIMENTOS

Por el momento, se han realizado dos tipos de experimentos. El primero consiste en mover el catéter de manera circular con el fin de demostrar la maniobrabilidad y capacidad que tiene para desarrollar su movimiento en los diferentes ángulos. El segundo experimento pretende verificar la capacidad de éste para realizar la navegación autónoma.

### 3.1. EXPERIMENTO 1: MOVIMIENTO CIRCULAR DEL EXTREMO DEL CATÉTER

El primer experimento llevado a cabo con el catéter se corresponde con la verificación del correcto funcionamiento del sistema de posicionamiento y orientación del extremo del robot. En concreto, se desea realizar un movimiento circular. Para ello, las señales de excitación de cada uno de los hilos de nitinol se han definido como:

$$v_i(t) = \frac{255}{2} + \frac{255}{2} \sin(\pi/5t + \phi_i) \quad (1)$$

donde  $\phi_i$  denota el desfase de la señal del hilo  $i$ , que vale  $\pi/2$ ,  $\pi$  y  $0$  rad para los hilos 1, 2 y 3, respectivamente. Con esta excitación se persigue

que, mientras un hilo comienza a enfriarse, los otros se calientan, y viceversa.

La Figura 8 muestra fotogramas de los 16 primeros segundos del movimiento obtenido con la excitación descrita, que es el tiempo que tarda en realizar un movimiento completo. Como se puede apreciar, éste se corresponde con un movimiento aproximadamente circular.

### 3.2. EXPERIMENTO 2: NAVEGACIÓN HÁPTICA

Se coloca el modelo de la Figura 1 en la entrada de un tubo de espuma negra, que se puede ver en la Figura 9. Se recuerda que está configurado para el seguimiento de la pared derecha, por lo que inicialmente si no detecta pared, se moverá hacia ese lado (hilo 3).

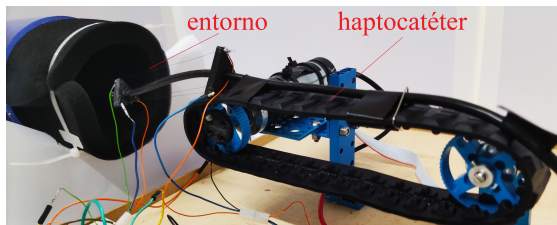


Figura 9: Configuración para el experimento.

La Figura 10 contiene los resultados obtenidos para dos de los experimentos llevados a cabo para la verificación de la navegación háptica. La Figura 10(a) muestra cómo cambia el área, mientras que la actuación del motor del sistema de empuje y las señales de activación de los hilos de nitinol se representan en las Figuras 10(b) y en las Figuras 10(c) y 10(d), respectivamente. Estos resultados demuestran el correcto funcionamiento de este primer prototipo.

## 4. CONCLUSIÓN

Se presenta el sensor háptico basado en visión como una alternativa prometedora en el desarrollo de algoritmos de navegación autónoma basándose en animales positivamente tigmotácticos, que intentan mantener el contacto con sus alrededores, utilizando el seguimiento de las paredes en entornos desconocidos. Ya se desarrolló con éxito en [4] y en este trabajo se propone su desarrollo de una manera diferente pero con una base común. Además se muestran las posibilidades que brinda la aleación de memoria de forma nitinol a la hora de controlar y dotar de maniobrabilidad a un instrumento diseñado, en este caso, para intervenciones quirúrgicas, ya sean de inspección o diagnóstico, o para depositar un microrrobot en

la zona de interés.

Se propone el uso de máscaras más robustas que permitan discriminar de una manera más efectiva el área del tejido cuando aún no se ha entrado en contacto, además de la inclusión de un control de fuerza por medio de un sensor que detecte la colisión en tiempo real, como ya hicieron [1, 5, 8] entre otros, con celdas de carga, galgas extensiométricas y un sensor de desplazamiento de fibra óptica, respectivamente.

### Agradecimientos

Este artículo ha sido financiado por la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura mediante la Ayuda a Grupos GR18159, por la Agencia Estatal de Investigación mediante el proyecto PID2019-111278RB-C22 / AEI / 10.13039/501100011033, y por los Fondos Europeos de Desarrollo Regional “Una manera de hacer Europa”.

### English summary

### Prototype robotic catheter with vision-based haptic sensor

### Abstract

*The development of robots as assistants for minimally invasive surgical procedures is receiving a great deal of interest in recent years, mainly because they offer more precision, flexibility and control than conventional techniques. This paper presents a first prototype of a vision-based autonomous catheter, performing autonomous navigation by means of wall-tracking inspired by positively tigmotactic animals. In addition, several experiments are carried out to verify the functionality of the prototype.*

**Keywords:** Minimally invasive surgery, catheter, autonomous navigation, vision-based haptic sensor, nitinol.

### Referencias

- [1] Y. Asano, T. Kozuki, S. Ookubo, K. Kawasaki, T. Shirai, K. Kimura, K. Okada, and M. Inaba. A sensor-driver integrated muscle module with high-tension measurability and



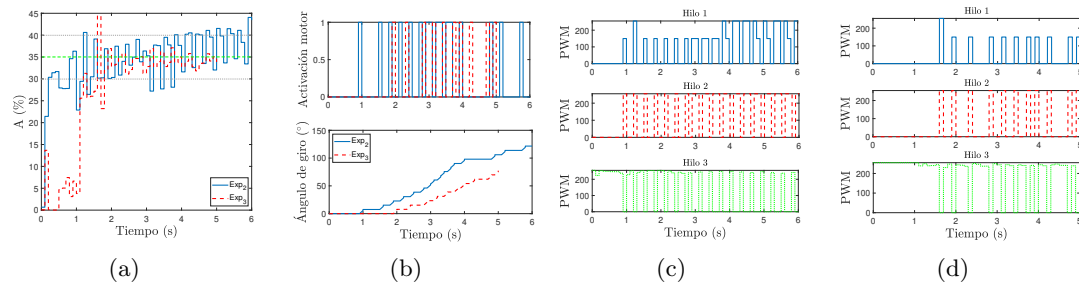


Figura 10: Experimentos finales con el *haptocatéter* relativos a la navegación háptica: (a) áreas (b) activación y ángulo del motor (c) excitación de los hilos (experimento 1) (d) excitación de los hilos (experimento 2).

- flexibility for tendon-driven robots. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 5960–5965. IEEE, 2015.
- [2] M. A. Cooper, S. Hutfless, D. L. Segev, A. Ibrahim, H. Lyu, and M. A. Makary. Hospital level under-utilization of minimally invasive surgery in the united states: retrospective review. *Bmj*, 349, 2014.
  - [3] A. Degani, H. Choset, A. Wolf, T. Ota, and M. Zenati. Percutaneous intrapericardial interventions using a highly articulated robotic probe. In *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006.*, pages 7–12, 2006.
  - [4] G. Fagogenis, M. Mencattelli, Z. Machaidze, B. Rosa, K. Price, F. Wu, V. Weixler, M. Saeed, J. E. Mayer, and P. E. Dupont. Autonomous robotic intracardiac catheter navigation using haptic vision. *Science robotics*, 4(29), 2019.
  - [5] A. Garcia, V. Feliu, and J. Somolinos. Experimental testing of a gauge based collision detection mechanism for a new three-degree-of-freedom flexible robot. *Journal of Robotic Systems*, 20(6):271–284, 2003.
  - [6] C. Heunis, J. Sikorski, and S. Misra. Flexible instruments for endovascular interventions: Improved magnetic steering, actuation, and image-guided surgical instruments. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 25(3):71–82, 2018.
  - [7] X. Hu, A. Chen, Y. Luo, C. Zhang, and E. Zhang. Steerable catheters for minimally invasive surgery: a review and future directions. *Computer Assisted Surgery*, 23(1):21–41, 2018.
  - [8] S. B. Kesner and R. D. Howe. Force control of flexible catheter robots for beating heart surgery. In *2011 IEEE international conference on robotics and automation*, pages 1589–1594. IEEE, 2011.
  - [9] S. B. Kesner and R. D. Howe. Position control of motion compensation cardiac catheters. volume 27, pages 1045–1055. IEEE, 2011.
  - [10] E. D. Liapis, C. D. Avgerinos and A. Chatziioannou. The aortic arch: Markers, imaging, and procedure planning for carotid intervention. *Vascular Disease Manage*, 6(1), 2009.
  - [11] E. E. Sutton, B. Fuerst, R. Ghotbi, N. J. Cowan, and N. Navab. Biologically inspired catheter for endovascular sensing and navigation. *Scientific reports*, 10(1):1–10, 2020.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# FUSIÓN DE SERIES TEMPORALES DE NUBES DE PUNTOS PARA SU EXPLORACIÓN EN REALIDAD VIRTUAL

Samuel Punzón Agudo, Emiliano Pérez Hernández, María Pilar Merchán García, Santiago Salamanca Miño, Alejandro Espacio Regalado

Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Extremadura. Avda. de Elvas, s/n. 06006 Badajoz, {spunzon, emilianoph, pmerchan, ssalamanca, alespacior}@unex.es

## Resumen

*Las nubes de puntos cada vez pueden contener más información, parte de la cual puede ser variable en el tiempo. Por este motivo, es valioso poder generar nubes que contengan la información correspondiente a diferentes instantes de tiempo sin la redundancia de información espacial. De esta forma, se consigue que el procesamiento y la visualización de los datos sea más sencillo, lo que beneficia a sistemas que necesitan que la información que manejen esté optimizada, como son los sistemas de Realidad Virtual. Por lo tanto, se propone una solución que mediante la fusión de las nubes de puntos tomadas en distintos instantes genera una nube resultado con la información óptima. Como prueba de funcionamiento se ha creado una aplicación de Realidad Virtual en la que se permite la exploración y sondeo de la información de la nube.*

**Palabras clave:** nubes de puntos, Realidad Virtual, información térmica, optimización de la información, visualización de información.

## 1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día existen múltiples técnicas para escanear espacios tridimensionales como las tratadas en [1]. Estas tecnologías permiten obtener información muy precisa de las dimensiones del espacio en formato de nubes de puntos. Con el tiempo, la mayoría de los dispositivos de digitalización han ido incorporando cámaras que permiten añadir información de color a la nube de puntos. Además, en la actualidad es posible capturar nubes de puntos con otras propiedades, bien porque algunos fabricantes hayan desarrollado nuevos dispositivos con más sensores incorporados o bien porque algunos investigadores hayan incorporado nuevos elementos al sistema de digitalización, como el trabajo mostrado en [2].

En ocasiones las propiedades que se miden, para una misma ubicación del escáner, varían con el tiempo, registrándose diferentes valores dependiendo de la hora del día o de la estación en la que se produzca la captura de la información. Por lo que se podría diferenciar entre propiedades estáticas, como son las

coordenadas 3D, y propiedades dinámicas, variables en el tiempo. En este sentido, puede resultar de interés el poder representar el valor de alguna propiedad dinámica en diferentes instantes de tiempo. Para ello, es necesario diseñar un procedimiento para el registro de las nubes de puntos adquiridas en instantes de tiempo diferentes en una única nube que permita recuperar el valor de tal propiedad en los diferentes momentos en que fueran adquiridos.

Por otro lado, con la mejora de las prestaciones de los escáneres 3D, el volumen de datos que generan ha ido siendo cada vez mayor. A esto se añade el hecho de que la utilización de múltiples nubes de puntos tomadas en la misma ubicación provoca que haya un número muy elevado de puntos a representar. Esto conlleva que, de cara al rendimiento en la visualización, exploración e interacción con las nubes de puntos puede resultar costoso gestionar tanta información. Esto puede ser especialmente significativo en los sistemas de Realidad Virtual donde la optimización ha de ser un paso clave, debido a la gran demanda de potencia gráfica de estos sistemas.

En este artículo se propondrá una solución que permita resolver dicha problemática y se diseñará una aplicación de Realidad Virtual que se beneficie de la optimización conseguida, probando de esta forma la utilidad del sistema. Para el desarrollo de la aplicación se utilizará el motor de videojuegos Unity, ya que otros autores [3] han demostrado su utilidad en el trabajo con nubes de puntos.

El artículo se estructura como sigue: en el apartado 2 se describe el mecanismo de fusión de nubes de puntos capturadas en diferentes instantes de tiempo. En el apartado 3 se trata la aplicación de Realidad Virtual desarrollada para probar la exploración y sondeo de la nube de puntos resultado. Por último, en el apartado 4, se desarrollan las conclusiones y perspectivas de futuro del trabajo.

## 2 MÉTODO DESARROLLADO

El método que se propone en este artículo parte de un conjunto de nubes de puntos, en adelante “nubes en



bruto”, cuyos puntos tienen información de una propiedad estática: coordenadas tridimensionales y de una propiedad dinámica, que, en concreto, se ha elegido que sea la temperatura capturada para cada punto. Estas nubes son obtenidas tras la digitalización de una de las estancias del interior de un edificio, mediante la ubicación del escáner en las posiciones que cubran todas las superficies de la estancia y repitiendo la adquisición en diferentes instantes.

El objetivo del método es obtener una nube de puntos en la que pueda visualizarse la evolución de la propiedad dinámica en una aplicación de Realidad Virtual.

El método sigue el proceso que se esquematiza en la Figura 1, y que se explica en las secciones siguientes.

## 2.1 REGISTRO

El primer paso que se ha de llevar a cabo es el alineamiento y registro de esas nubes en un mismo sistema de referencia. Se trata de un registro atemporal y redundante, en el sentido de que se han de colocar en el mismo sistema de coordenadas las nubes obtenidas en todas las adquisiciones, tanto las realizadas secuencialmente para cubrir la adquisición de la estancia entera, como las realizadas en otros instantes de tiempo, que pueden distar horas o incluso días, de las capturas anteriores, pero que tendrán cierta redundancia de información de coordenadas 3D con respecto a las anteriores.

El problema del registro, aunque viene facilitado por la asistencia que ofrece el software propio del escáner 3D, requiere de la aplicación de algoritmos tales como el clásico “Iterative Closest Point” [4], ICP, o algunas de sus variantes [5].

Como ejemplo se muestran, en las Figuras 2.a), 2.b), 2.c) y 2.d), las nubes en bruto #1, #2, #3 y #4, respectivamente, que se han adquirido en los instantes de tiempo  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  y  $t_4$ , donde  $t_1$  y  $t_2$  corresponden al mismo día, y  $t_3$  y  $t_4$ , a otro día diferente. En las Figuras 2.e) y 2.f), se muestran la posición relativa de las parejas de nubes #1-#2 y #3-#4. En primer lugar, han de alinearse, registrarse y sumarse dos a dos, dando como resultado las nubes que se observan en las Figuras 2.g) y 2.h). Por último, se ha de hacer un registro y unión de estas nubes, cuyo resultado se muestra en la Figura 2.i).

El resultado es una única nube de puntos con zonas de densidad variable. Es decir, habrá, por un lado, zonas que únicamente contengan puntos correspondientes a una única captura 3D y, por otro, en el extremo contrario, zonas en las que coincidan las dos parejas de nubes de puntos solapadas. En las Figuras 3.a) y 3.b), se resalta la zona de solapamiento entre las parejas de nubes #1-#2 y #3-#4, respectivamente. El

solapamiento de las cuatro nubes aparece ilustrado en la Figura 3.c).

Tras esto, se evidencia que, aunque cada nube de puntos tiene puntos muy próximos a otros de las otras nubes en las zonas de solapamiento, no puede hacerse una correspondencia inmediata y unívoca entre esos puntos y, por tanto, no se le pueden asignar el valor de las propiedades en otros instantes de tiempo.

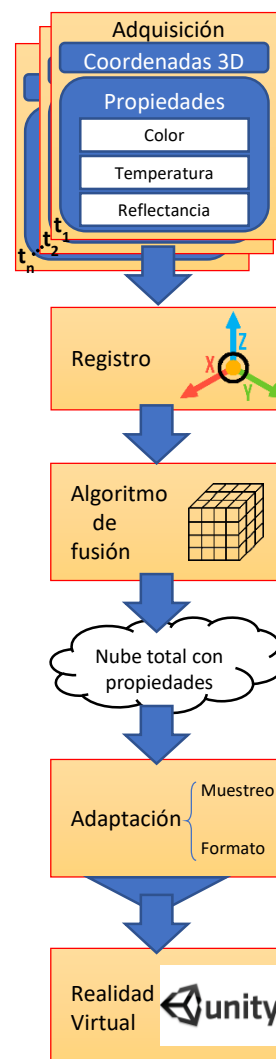


Figura 1: Esquema con las etapas que componen el método desarrollado

Para establecer esa correspondencia que posibilite analizar la evolución de las propiedades en puntos de la nube, se ha creado un algoritmo de fusión. Además de permitir el análisis temporal de la nube, este algoritmo consigue, por un lado, una reducción del número de puntos, algo que se torna esencial para la representación en tiempo real mediante Realidad Virtual. Por otro lado, genera una nube de puntos más

uniforme, característica que es valorable para la exploración visual de las nubes.

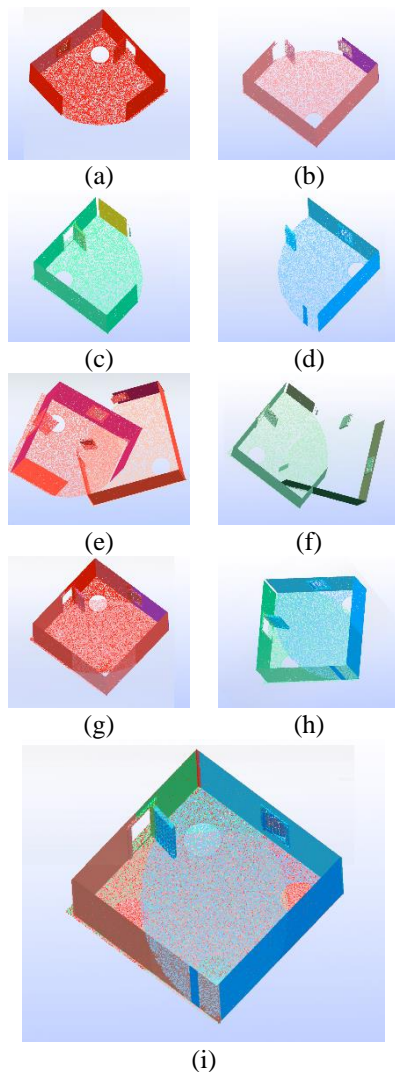


Figura 2: **a)** Nube en bruto #1. **b)** Nube en bruto #2. **c)** Nube en bruto #3. **d)** Nube en bruto #4. **e)** Nubes en bruto #1 y #2. **f)** Nubes en bruto #3 y #4. **g)** Nubes #1 y #2 registradas. **h)** Nubes #3 y #4 registradas. **i)** Nubes #1, #2, #3 y #4 registradas.

## 2.2 ALGORITMO DE FUSIÓN

Este algoritmo parte de la unión de las diferentes nubes generadas en la misma habitación (Figura 2.i), en adelante “nubes de partida”. Hay que recordar que cada una de estas nubes consisten básicamente en una lista de coordenadas 3D de cada punto y un valor de la propiedad asociada a cada una de ellas. Antes de llevar a cabo la etapa anterior, es necesario añadir una nueva propiedad,  $i$  a cada uno de los puntos de las nubes de partida. Esta propiedad  $i$  consiste básicamente en un índice o número entero que referencia la nube de puntos a la que pertenece, o también puede decirse que referencian al mismo periodo de tiempo de

adquisición. Por tanto, en el ejemplo de la Figura 2, todos los puntos de las nubes #1, #2, #3 y #4, tendrán un valor  $i$  igual a 1, 2, 3 y 4, respectivamente. De cualquier forma, si la propiedad que se está analizando de la nube de puntos tiene una variación muy lenta, como por ejemplo la temperatura, puede ser útil considerar que nubes adquiridas en instantes de tiempo próximos, comparten el mismo valor  $i$ . Por tanto, se le asigna el valor de  $i = 1$  a las nubes #1 y #2 e  $i = 2$ , a las nubes #3 y #4. Una vez ejecutado el registro se tiene una nube total con una estructura como la mostrada en la Figura 4, con los siguientes datos de cada punto:

- Coordenadas X, Y, Z.
- Temperatura en el instante del escaneo.
- Índice que indique a cuál de las nubes de partida pertenecía.

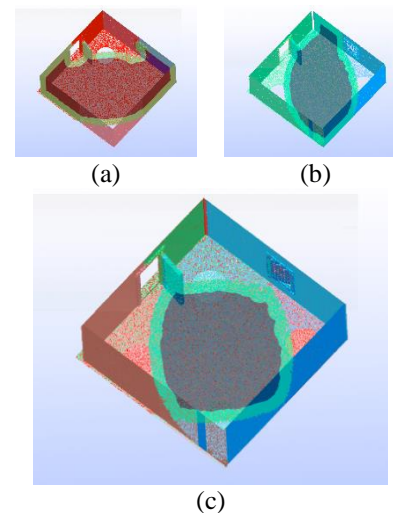


Figura 3: Solapamiento, resaltado con sombreado entre las diferentes nubes registradas: **a)** #1 y #2; **b)** #3 y #4 **c)** #1, #2, #3 y #4.

A continuación, el método propuesto *voxeliza* la nube de puntos, es decir, divide en regiones iguales el espacio ocupado por la nube de puntos, de forma que los puntos que ocupan un mismo vóxel son finalmente sustituidos por un punto en el centro del mismo. Uno de los parámetros más relevantes en el proceso de fusión es la elección del tamaño del vóxel. Vóxeles grandes consiguen un menor número de puntos en la nube resultado y con información térmica de todos los instantes, pero a su vez reducen la resolución en la representación respecto de las nubes de partida, por este motivo hay que encontrar un punto de equilibrio, que genere un modelo con la información necesaria para una correcta visualización y elimine la redundante. En la Figura 5 se muestra la adaptación de diferentes tamaños de vóxeles a la nube total de la Figura 2.i). La *voxelización* es una práctica habitual en

la optimización de nubes de puntos como se aplica, por ejemplo, en [6] y [7].

282	4.473	0.852	-0.662	36.01	1
283	4.473	0.851	-0.667	36.00	1
284	4.473	0.852	-0.673	36.16	1
285	4.474	0.852	-0.678	36.16	1
286	4.474	0.853	-0.684	36.17	1
287	4.474	0.853	-0.689	36.18	1
288	4.475	0.854	-0.695	36.16	1
	X	Y	Z	T	i
	Coordenadas				

Figura 4: Formato del archivo de la nube que almacena la suma de las nubes en bruto.

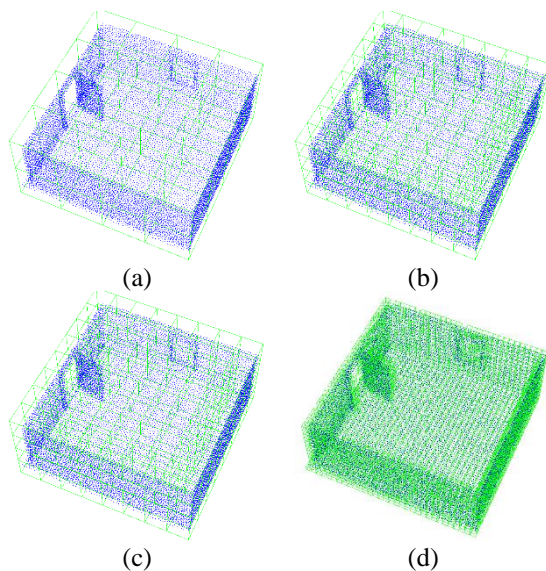


Figura 5: Densidad de puntos en función del tamaño del vóxel, relación inversa entre el tamaño del vóxel y la cantidad de puntos de la nube. Se han probado diferentes tamaños de vóxeles: **a)** se corresponde con el de menor tamaño de vóxel y **d)** con el de mayor tamaño.

Una característica del método planteado es la resolución de la fusión de los puntos pertenecientes a un mismo vóxel, Figura 6, en función de la cantidad de estos. Analizamos a continuación las distintas situaciones que pueden ocurrir:

- Un solo punto de una de las nubes de partida**, en este caso la nube fusionada presentará un punto con información térmica únicamente de ese instante y ninguna de los otros.
- Un solo punto de cada una de las nubes de partida**, el punto representado por este vóxel

tendrá información térmica de cada instante igual a la de los puntos de partida.

- Varios puntos de una o más de las nubes de partida**, si un vóxel presenta varios puntos de la misma nube de partida, entonces el punto resultado contendrá como dato térmico de dicho instante la media de las temperaturas de la nube de partida correspondiente.

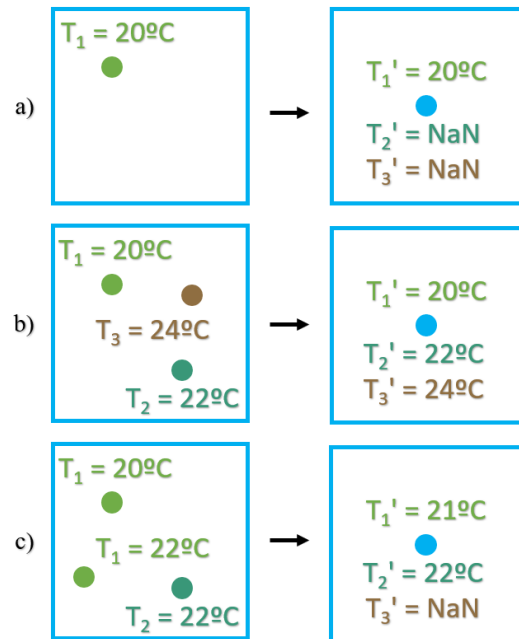


Figura 6: **a)** Fusión de puntos cuando no se presentan datos en alguna de las nubes. **b)** Fusión de puntos con información de todas las nubes. **c)** Fusión de puntos utilizando el valor medio cuando se presentan más de un punto en alguna de las nubes.

Tras el procesamiento de todos los puntos de la nube suma de las nubes de partida se obtiene el archivo resultado, mostrado en la figura 7, con los siguientes datos de cada punto:

- Coordenadas X, Y, Z.
- Temperaturas en cada instante.

123	0,028	2,446	-0,996	26,18	26,80	24,99
124	0,029	2,450	-0,986	26,19	26,80	NaN
125	0,030	2,466	-0,996	26,15	NaN	24,95
126	0,031	2,471	-1,001	26,21	NaN	NaN
127	0,032	2,476	-1,003	26,21	26,76	NaN
128	0,032	2,506	-1,004	26,18	26,76	24,85
	X	Y	Z	T <sub>1</sub> '	T <sub>2</sub> '	T <sub>3</sub> '
	Coordenadas					

Figura 7: Formato del archivo de la nube fusionada.

El último paso que hay que ejecutar es la adaptación de los datos que serán introducidos en la aplicación de Realidad Virtual. Esta adaptación se lleva a cabo en

dos etapas. La primera es la etapa de muestreo, en la que se aplica una reducción uniforme del número de puntos, con el objetivo de obtener nubes que no superen los dos millones de puntos aproximadamente. Este valor concreto está determinado por la comprobación empírica de que, con el equipo utilizado (Intel i7, 16 GB RAM, RTX 2060) y, a falta de optimizar la aplicación, nubes de un número de puntos superior a este dan lugar a un funcionamiento poco fluido de la aplicación. La segunda etapa es la de adaptación de formato. En concreto, se ha decidido usar el, cada vez más extendido, formato PLY. Además, se exporta en binario ya que permite unas transferencias de datos (*streaming*) mucho más rápidas.

### 3 APLICACIÓN EN REALIDAD VIRTUAL PARA EXPLORACIÓN DE LA NUBE FUSIONADA

El objetivo de la aplicación de Realidad Virtual que se ha desarrollado es explorar la nube de puntos de forma interactiva, permitiendo al usuario acceder a toda la información térmica temporal contenida en los puntos, de forma intuitiva y visual, así como cambiar la escala de color de la representación, como se muestra en la Figura 8.

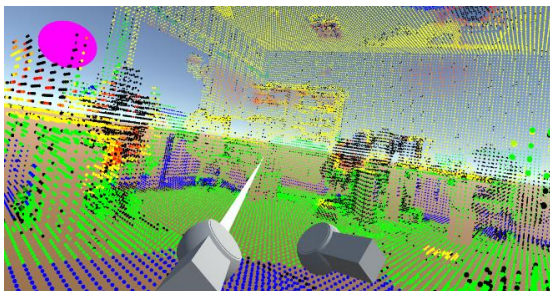


Figura 8: Captura de la aplicación de Realidad Virtual en la se está explorando una nube de puntos y se visualiza en una escala de color el valor de una de sus propiedades.

Esta aplicación ha sido desarrollada mediante el ampliamente extendido motor de tiempo real Unity. Como la gran mayoría de estos motores, Unity está enfocado al uso de modelos 3D compuestos por mallas. Esto es, Unity no soporta de forma nativa el uso de nubes de puntos. Por ello, uno de los pasos fundamentales será la implementación de un módulo que permita superar este inconveniente. La aplicación final se estructura según el esquema que puede observarse en la Figura 9.

Para trabajar con las nubes de puntos en Unity se ha implementado un importador que parte del archivo PLY y convierte la nube en un *GameObject* con

ciertos componentes. Los *GameObject* son los elementos fundamentales con los que Unity compone las escenas y una de cuyas características principales es el componente para su transformación (*Transform*) en el mundo 3D: posicionado, rotación y escalado. Además, internamente se crea un vector de puntos, *Punto[i]*, cuyo elemento fundamental es la estructura Punto, compuesta por tres componentes: Vector de posición con las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ; valor de la propiedad; e índice temporal.

Por otro lado, es primordial crear, a partir del vector de puntos, un árbol octree, para tener almacenados los datos en una estructura espacial ordenada.

Como se ha indicado previamente, Unity no integra un mecanismo propio para la representación o renderizado de nubes de puntos, por lo que se requiere del desarrollo de una estructura de datos, *Punto\_r[i]*, compuesta por las coordenadas y el color (RGB) del punto, que la tarjeta gráfica procesa y envía para ser representados. Por tanto, para la representación de los puntos es necesario un mecanismo para transformar los datos de la estructura *Punto[i]* a la estructura *Punto\_r[i]*. Para ello, se hace una conversión del valor de la propiedad a una escala de color creciente Azul-Verde-Amarillo-Rojo, en donde, el Azul se corresponde con los valores más bajos y el Rojo con los valores más altos de la propiedad. En este paso, se le da al usuario la posibilidad de escalar la representación en color, es decir, de elegir qué valor mínimo de la propiedad se asigna al mínimo de la escala de color y qué valor máximo al máximo de color.

Al *GameObject* de la nube de puntos que se quiere explorar con la aplicación hay que añadirle varios componentes (scripts) que otorgan funcionalidades para una mejor representación de la información. Entre las diferentes funcionalidades destacan:

- Cambio de tamaño de los puntos.
- Cambio de las escalas de colores.
- Elección del instante del cual se quiere visualizar la información.
- Señalización del punto con el valor más elevado de temperatura.
- Sondeo de los puntos para obtener información del valor de temperatura (Figura 11).

Dentro de las funcionalidades tratadas, algunas hacen uso de un menú, que puede verse en la Figura 10, para cambiar las propiedades y configurar la nube de acuerdo a las preferencias del usuario.

El sondeo de valores de las propiedades dentro de la nube de puntos es posible realizarlo en tiempo real gracias a la consulta dentro de la estructura de árbol



octree, que optimiza y acelera enormemente las búsquedas dentro del enorme conjunto de datos que constituye la nube de puntos. Otros trabajos, como el mostrado en [8] demuestran las ventajas del uso de estas técnicas.

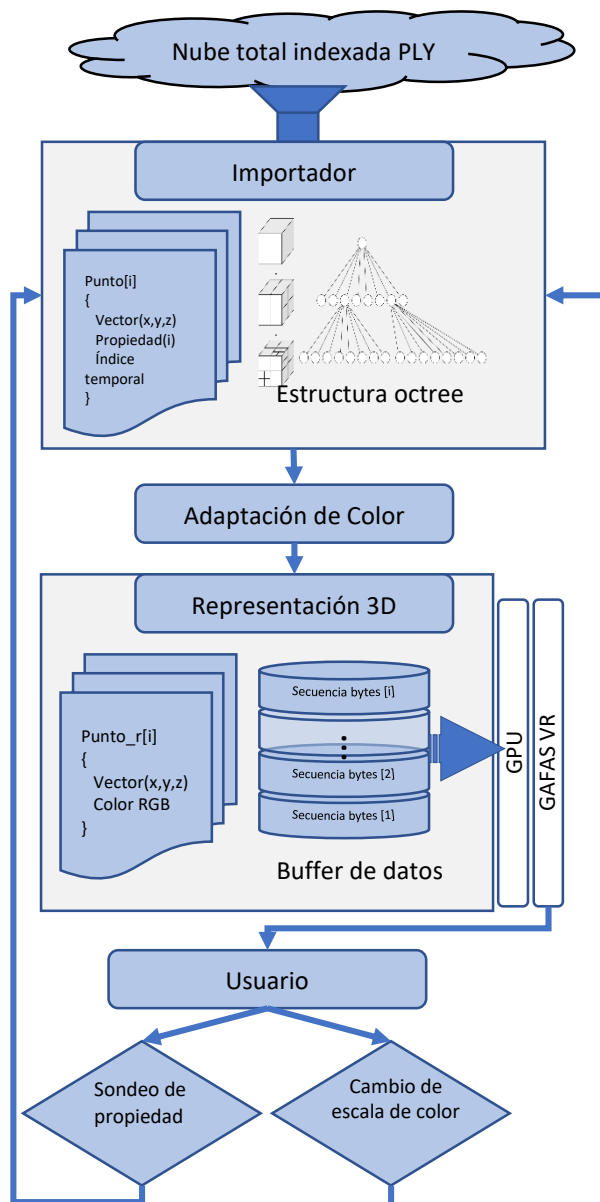


Figura 9: Estructura aplicación Realidad Virtual



Figura 10: Interfaz de usuario de la aplicación en la que puede elegirse la propiedad a representar, el tamaño del punto, y la variación de los límites de la escala de color.

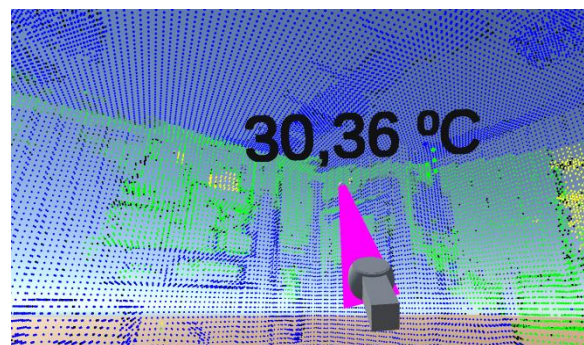


Figura 11: Sondeo de la temperatura de un punto de la nube que se está explorando.

En cuando a los resultados experimentales, específicamente, se han realizado pruebas con un conjunto de nubes de puntos obtenidas por un escáner 3D RiegIVz 400 el cual tenía incorporada una cámara térmica, FLIR AX5, que permite asociar información térmica a cada punto de la nube.

## 4 CONCLUSIONES

El sistema descrito ha resultado funcional y ha cumplido con los objetivos de reducción de la información irrelevante conservando los datos que varían en el tiempo. Además, la experiencia de navegación es fluida y visual, permitiendo captar de forma rápida las diferentes temperaturas de las zonas registradas. La dificultad de procesamiento se ve reducida notablemente ya que se pasa de varias nubes a una, haciendo accesible su uso en sistemas que precisen de optimización como el de la aplicación de Realidad Virtual que ha sido desarrollada.

En el futuro sería interesante extender las pruebas realizadas a otras propiedades que varíen en el tiempo. Por ejemplo, podría resultar de interés la variación del valor de las sombras para estudios de generación fotovoltaica. También asociado a la producción de energía por radiación solar podría ser valioso la

creación de nubes de puntos con información de la variación de la irradiación.

Dentro de la optimización de la aplicación de navegación de las nubes caben más mejoras como la renderización únicamente de los elementos que se encuentre dentro del campo de visión (*frustrum culling*).

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto titulado “Procesamiento de datos masivos de escáneres 3D: Segmentación, reconocimiento y modelado geométrico de edificaciones no convencionales”, con referencia AEI/PID2019-108271RB-C32/10.13039/501100011033; y el proyecto “Tecnologías 3D para la resiliencia, la recuperación y la sostenibilidad del Patrimonio Cultural Extremeño”, con referencia IB20172, de la Junta de Extremadura y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional “Una manera de hacer Europa”.

### English summary

## POINT CLOUD TIME SERIES FUSION FOR VIRTUAL REALITY EXPLORATION

### Abstract

*The amount of information that can be shown in point clouds is increasing. Part of this information changes over time. For this reason, is interesting to develop a system that merges data of several clouds into a single cloud which maintains the variable data and remove redundancy in spatial information. Furthermore, it is valuable for system that are dependent on optimization as Virtual Reality system. In this paper the method that generates the point cloud with all the necessary information will be described. Finally, the results will be tested in a Virtual Reality app developed for this purpose. The app will permit to explore to point cloud and to check the values of the points.*

**Keywords:** Point clouds, Virtual Reality, thermal information, information optimization.

### Referencias

- [1] Adán, A., Quintana, B., Aguilar, J.G., Pérez, V., Castilla, F.J., (2020) Towards the use of 3D thermal models in constructions, *Sustain.* 12 1–13.
- [2] Besl, P.J., McKay, N.D., (1992) A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 14 239–256.
- [3] Elseberg, J., Borrmann, D., Nüchter, A., (2013) One billion points in the cloud - An octree for efficient processing of 3D laser scans, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 76 76–88.
- [4] Montilla, M., Orjuela-Vargas, S.A., Philips, W., SPIE, 2014 State of the art of 3D scanning systems and inspection of textile surfaces, in: *Meas. Model. Reprod. Mater. Appear.*, : p. 90180A.
- [5] Özbay, E., Çinar, A., (2019) A voxelized structured refinement method for registration of point clouds from Kinect sensors, *Eng. Sci. Technol. an Int. J.* 22 555–568.
- [6] Pomerleau, F., Colas, F., Siegwart, R., Magnenat, S., (2013) Comparing ICP variants on real-world data sets: Open-source library and experimental protocol, *Auton. Robots.* 34 133–148.
- [7] Quan, S., Ma, J., Hu, F., Fang, B., Ma, T., (2018) Local voxelized structure for 3D binary feature representation and robust registration of point clouds from low-cost sensors, *Inf. Sci. (Ny).* 444 153–171.
- [8] Virtanen, J.-P., Daniel, S., Turppa, T., Zhu, L., Julin, A., Hyypä, H., Hyypä, J., (2020) Interactive dense point clouds in a game engine, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 163.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).



# MicroHikari3D: Transformando una impresora 3D en un microscopio robotizado moderno

Pablo T. Toledano, Gloria Bueno, Noelia Vállez, Óscar Déniz, Jesús Salido  
VISILAB - E.T.S.I. Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha, gloria.bueno@uclm.es

## Resumen

*Los microscopios son una herramienta imprescindible para diferentes aplicaciones en biología y medicina, entre otros. La automatización de estos microscopios y la integración de herramientas de análisis automático de imagen es un gran avance en microscopía, pero la mayoría de los sistemas disponibles en el mercado con estas prestaciones tienen un precio elevado. Por otro lado, en los últimos años ha habido un auge importante del desarrollo y venta de impresoras 3D a un precio muy asequible. Por ello, en este trabajo se busca ofrecer un kit modular que permita convertir una impresora 3D en un microscopio motorizado completamente funcional y automatizado. Para conseguir este objetivo, se ha seleccionado una impresora 3D, de la que se ha reaprovechado el eje de movimiento cartesiano, y se le ha acoplado un sistema óptico basado en Raspberry Pi HQ Camera, una iluminación superior e inferior y además de una base para portaobjetos nueva. Así como herramientas de procesamiento y métodos de clasificación automática de la imagen. Con esto se conseguirá un sistema de microscopía modular y de bajo coste, capaz de capturar muestras microscópicas de organismos y tejidos en portas 2D y en placas Petri 3D.*

**Palabras clave:** microscopio robotizado, procesamiento automático, visión por computador

## 1. INTRODUCCIÓN

La microscopía ha evolucionado desde la creación de los primeros microscopios simples compuestos por un par de lentes y un tubo opaco de H. Janssen y su hijo en 1590, o el fabricado por Galileo Galilei en 1609, hasta complejas máquinas formadas por varias componentes, ópticos y no ópticos [1].

Los microscopios tienen una especial importancia en el avance de la biomedicina, ya que permiten la observación de organismos y elementos de tamaño reducido, imposibles de apreciarse por el ojo humano. Estos elementos van desde 100  $\mu\text{m}$  de media, que tienen las células de un tejido humano al

rango de 20 nm - 450 nm que tienen la mayoría de virus o incluso de 2  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$  que llegan a alcanzar las microalgas. Otros elementos observables por el ojo humano también pueden beneficiarse del uso de un microscopio ya que permite apreciar partes de ellos a mayor aumento y por tanto percibir detalles que se escaparían de otra forma. Por ejemplo, un pelo humano tiene un diámetro medio de 75  $\mu\text{m}$ ; el uso de un microscopio permite analizar la calidad de la fibra capilar pudiendo llegar a observar elementos como la raíz del pelo. Otra utilidad importante es en la industria, por ejemplo análisis de soldadura en circuitos integrados, permitiendo detectar una soldadura rota o *dry solder* no perceptible a simple vista.

La importancia de automatizar o robotizar estos sistemas y dotarles de métodos de procesamiento de imagen hace que en los últimos años haya surgido una corriente de implementación de microscopios de bajo coste y con la filosofía de código abierto con el principal objetivo de permitir la democratización de dichos sistemas a precio reducido. Proyectos como Incubot3D [3] utilizaron una impresora 3D para transformarla en un microscopio invertido o OpenFlexure [2] son ejemplos de otros proyectos de microscopía de bajo coste.

Este trabajo describe la adaptación de una impresora 3D para convertirla en un microscopio robotizado totalmente funcional. Los microscopios robotizados incorporan elementos de control como motores paso a paso y computadores, que permiten la digitalización automática de muestras, el enfoque o incluso la clasificación por clases de la imagen. Si bien este tipo de microscopios aportan las ventajas anteriores, tienen un inconveniente y no es otro que su elevado precio en comparación con lo que podríamos llamar sistema de microscopía clásicos.

MicroHikari3D nace así como alternativa con el fin de crear un prototipo de coste reducido, modular y con el mayor número de funcionalidades posible. El sistema usa como base la estructura y electrónica de control de una impresora 3D comercial, capaz de adquirir imágenes microscópicas de diferentes tipos de muestras. El microscopio es controlado con una aplicación de móvil. Los obje-

tivos específicos son:

- *Desarrollar un método automático de captura de muestras microscópicas de gran tamaño:* el campo de visión (FoV) obtenido con el sistema óptico puede no cubrir toda la muestra que queramos capturar, por lo que se implementará un método de *stitching* que a partir de varios FoV los ensamble automáticamente.
- *Incorporar los elementos necesarios para la toma de imágenes en campo claro y con diferentes longitudes de onda:* esto permite observar muestras que requieren del uso de luces con longitudes de onda específicas para poder observarlas.
- *Desarrollar un sistema de control basado en API REST:* permitir controlar los ajustes de la cámara como el ISO o la resolución, la posición de los motores paso por paso y la iluminación mediante peticiones REST.
- *Estudiar el uso de distintos tipos de placas controladoras:* ofreciendo un sistema de cómputo que permita alcanzar un equilibrio entre velocidad y precio.

## 2. HARDWARE

Los principales componentes hardware del microscopio son: impresora 3D, Raspberry Pi 4, cámara, Arduino UNO, subsistema óptico, iluminación y base para portaobjetos.

La elección de una impresora 3D es fundamental, ya que es la estructura sobre la que se montan el resto de componentes que forman nuestro microscopio (sistema óptico, fuentes de iluminación, cámara ,etc).

### 2.1. Impresora 3D

Hay diversos modelos de impresoras 3D en el mercado. Proyectos como RepRap [4] han permitido que multitud de empresas puedan lanzar su versión de impresora 3D derivada de sus diseños base. En este trabajo se consideraron dos modelos de impresoras: BQ Prusa I3 Hephestos y Tronxy X1 3D. Finalmente se seleccionó este último modelo, Tronxy X1 3D (ver Figura 1), sobre la Prusa i3 Hephestos, debido a las siguientes ventajas: tamaño reducido, disponibilidad en el mercado, final de carrera del eje Z regulable, asa de transporte, construcción más robusta, precio inferior y sobre todo mejor precisión de movimiento. Las precisiones de movimiento de los ejes X, Y y Z son por ese orden: 0,012 mm, 0,012 mm y 0,004 mm.

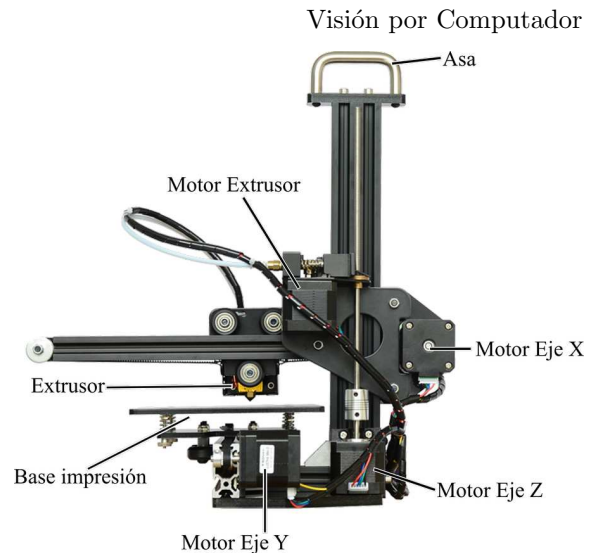


Figura 1: Tronxy X1 3D (Adaptada de Tronxy)

### 2.2. Placa de cómputo

Por otro lado, la plataforma de cómputo elegida para nuestro microscopio fue el ordenador monoplaca Raspberry Pi4. En este trabajo se utilizó la versión 4 del dispositivo. El procesador de esta versión cuarta ha sido actualizado al modelo BCM2711 de la empresa Broadcom, que incorpora cuatro núcleos de arquitectura ARM A72 y una GPU VideoCore VI funcionando a una frecuencia de 1.5 Ghz y 500 Mhz respectivamente. Otro aspecto que ha cambiado en el modelo 4 han sido las configuraciones disponibles de memoria RAM. Mientras que modelos anteriores estaban limitados a un máximo de 1Gb, la Raspberry Pi 4 puede ser configurada con 1 Gb, 2 Gb, 4 Gb o 8 Gb. Aquí hemos usado la configuración con 4 Gb de RAM. Se ha estimado que las únicas operaciones que requieren de grandes cantidades de memoria son las encargadas de hacer el *stitching* de varios FoV. Esto es así porque los distintos FoV deberán ser almacenados en RAM para su posterior procesamiento y unión.

En términos de conectividad se usará el puerto Ethernet Gigabit y dos de los puertos USB tenemos a nuestra disposición. Estos puertos serán usados para conectar los dos microcontroladores, el Arduino UNO y el de la impresora 3D elegida. Los anchos de banda proporcionados por estas interfaces satisfacen las necesidades de nuestro microscopio. Por último, la conexión para la cámara puede ser el puerto MIPI CSI de dos vías que incluye.

El sistema operativo elegido será Raspberry Pi OS (anteriormente conocido como Raspbian), una distribución de linux basada en Debian diseñado específicamente para funcionar en SBC Raspberry.

### 2.3. Sistema óptico

La cámara es un elemento central del microscopio, por lo que su elección es también de gran importancia. Se debe encontrar un equilibrio entre prestaciones, calidad y precio. Como la parte de cómputo de nuestro microscopio estará basado en alguna solución de *Single Board Computer*, el modelo de cámara elegido deberá utilizar alguno de los protocolos compatibles con la mayoría de ellos. Por ello se ha empleado la Raspberry Pi High Quality Camera, el tercer modelo de cámara para la familia de ordenadores en placa Raspberry Pi. El sensor de esta cámara tienen 12.3 megapíxeles. Otros aspectos importantes de este modelo son la incorporación de un sistema de montura con rosca C o CS, que permiten que la cámara se atornille al sistema óptico de nuestro microscopio y un filtro de luz infrarroja. Este filtro puede ser retirado en la situación de que queramos realizar imágenes con fuentes de luz infrarroja, es decir, hacer las funciones de microscopio infrarrojo. Este cambio tendrá que ser realizado teniendo en cuenta que es irreversible.

El Arduino UNO es utilizado en el MicroHikari3D como controlador de los sistemas de iluminación. Esto es gracias a la multitud de pines de entrada y salida, tanto digitales como analógicos disponibles. Para poder establecer la comunicación entre la plataforma de cómputo, la Raspberry Pi 4B, y el microcontrolador ha hecho uso de una conexión serial mediante el puerto USB de ambos. Dentro de este canal se utiliza un lenguaje muy similar al usado por las impresoras 3D, el G-code. Estos comandos accionan las rutinas necesarias para la creación de las señales necesarias para controlar los circuitos de iluminación del microscopio.

El sistema óptico en el MicroHikari3D consiste en todo el conjunto de piezas que permiten a la cámara elegida formar la imagen de la muestra que queremos analizar. Las piezas que lo componen son:

- *Lente tubular*: lente que permite a los objetivos de aumento enfocar y formar la imagen en el sensor de la cámara. Son especialmente necesarias si se utilizan objetivos plan corregidos al infinito, aunque en los objetivos enfocados a 160 mm permite acortar la distancia física entre el objetivo y el sensor.
- *Objetivo de aumento*: componente formado por una o varias lentes que permiten aumentar la imagen.
- *Soporte*: conjunto de piezas de uno o varios materiales que permiten la unión del objetivo, lente tubular y cámara de tal manera que sea posible que se capture la imagen.

Ha sido necesario diseñar y fabricar piezas 3D en plástico para el agarre de los componentes. El resultado de acoplar todas las piezas del listado anterior se puede observar en la Figura 2.

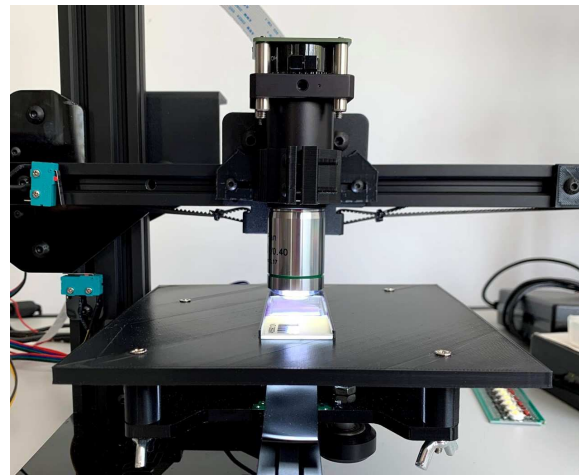


Figura 2: Montaje óptico metálico acoplado al MicroHikari3D

### 2.4. Sistemas de iluminación

La iluminación es una de las partes más importantes de un microscopio. Los modos de iluminación que tenga disponible definirán con qué tipo de microscopio estamos trabajando. El MicroHikari3D pertenece a la categoría de microscopios de campo claro. En ellos, los rayos de luz originados por el sistema de iluminación atraviesan o son reflejados por el espécimen, sin ser estos alterados más allá de los cambios que pueda hacer la propia muestra.

Se han diseñado dos sistemas de iluminación distintos, uno inferior encargado de generar luz que atraviese la muestra y otro superior encargado de generar luz que sea reflejada por la muestra. El uso de un sistema u otro dependerá de la naturaleza de la muestra observada. Una muestra fina y translúcida es perfecta para sistema de iluminación inferior, mientras que para muestras más gruesas u opacas el sistema de iluminación superior es el idóneo.

El control de la iluminación se realiza con la placa ya mencionada, el Arduino UNO, a la que se le ha acoplado un *shield* o escudo, son unas placas con electrónica que se conectan por la parte superior del Arduino y hacen las funciones de placa de expansión. Este *shield* se ha construido con una placa PCB de prototipado de 6 cm x 4 cm a la que se le ha soldado unos pines de tal manera que pueda ser insertada en los conectores macho del Arduino. Unos conectores con tornillos permiten la rápida conexión con las fuentes de alimentación conmutadas CC a CC y con los sistemas de ilumi-

nación. El circuito compuesto por relé, transistor y resistencia permite controlar la alimentación de la iluminación inferior. La Figura 3 muestra como quedan los componentes electrónicos ya montados en el *shield* y este acoplado junto al Arduino UNO en el MicroHikari3D.

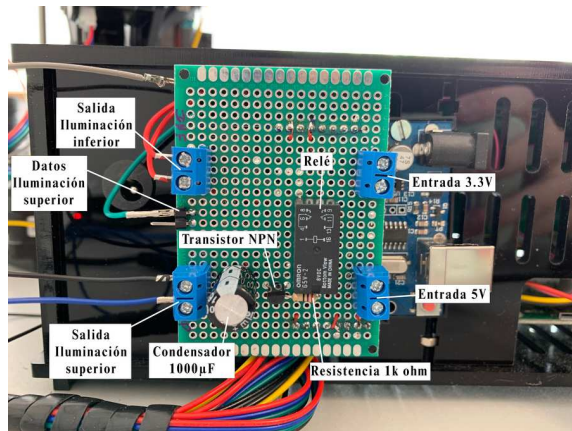


Figura 3: *Shield* de control de la iluminación

Otro aspecto importante es la alimentación de ambos sistemas de iluminación. Para este fin se ha optado por utilizar la fuente de alimentación de la impresora 3D y aprovechando que ya no existe el consumo que tendría el extrusor se puede derivar esa corriente a otros usos como la iluminación.

El sistema de iluminación inferior es el encargado de proyectar rayos de luz que atravesarán la muestra, idóneo para las muestras especialmente finas. Se ha optado por no poner un sistema fijo, ya que puede surgir que en un caso de uso se necesite un tipo específico de iluminación por ejemplo, luz ultravioleta o una disposición de LED determinado. Es por esto que se ha optado por un diseño modular que permite deslizar unas placas con la configuración de LED y longitud de onda que se vea necesario. Estas placas son unas PCB de prototipado, parecidas a la usada para el *shield* de control, pero de tamaño 7 cm x 3 cm. En las placas se pueden soldar los LED que se quieran en la disposición que se estime. La Figura 4 enseña varias de estas placas con configuraciones diferentes.

La sujeción de estas placas la realiza una pieza de plástico (Figura 5) que cuenta con una hendidura donde se deslizarán. Al final de esta pieza se encuentra un conector hembra que hace contacto con su equivalente macho soldado en la placa PCB. La parte superior de la pieza permite el deslizamiento de un difusor de luz o de un filtro. El *shield* de control permite que las luces de este sistema se puedan encender y apagar de forma remota.

El sistema de iluminación superior es el encargado de proyectar rayos de luz que serán reflejados por la muestra. Es utilizado en muestras que tienen un



Figura 4: Placas modulares del sistema de iluminación inferior

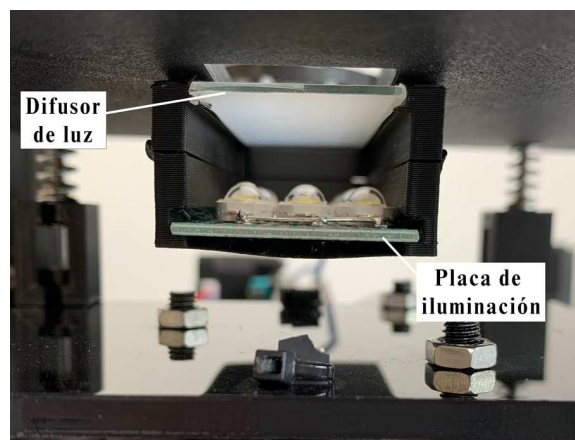


Figura 5: Sistema de iluminación inferior

grosor elevado o que son opacas.

Se compone de dos partes: Aro de luz *NeoPixel* de la compañía Adafruit y Pieza de plástico que lo mantiene unido al sistema óptico. El aro de luz *NeoPixel* está formado por 12 LED RGBW de tipo 5050 SMD con brillo elevado ordenados en un círculo con 37 mm de diámetro. La luz RGB permite elegir el color específico o lo que es lo mismo, elegir que longitud de onda queremos emitir sobre la muestra. La parte blanca emite un luz con temperatura de 4500K considerada luz blanca natural.

El control se realiza con señales de tipo modulación por ancho de pulsos (PWM) de 8 bits por canal, como los LED tienen cuatro canales (RGB y W) la suma teórica total equivale a color de 32 bits. Cada LED del *NeoPixel* está equipado con un microcontrolador WS2812B, este chip se encarga de regular la intensidad de cada canal de acuerdo a la señal que reciba por el pin de datos. A diferencia de otro tipo de microcontroladores, el control del WS2812B solo requiere de una única señal. Esto es así gracias al uso de registros de



desplazamiento, ahorrándonos el uso de más cables de los necesarios. Las señales de control son producidas por el microcontrolador Arduino UNO mediante el uso de la biblioteca *NeoPixels* publicada por el fabricante.

## 2.5. Placa para portaobjetos

Finalmente, para la platina, base donde se colocan las muestras a observar y digitalizar, hemos sustituido la base donde originalmente se extruía el plástico en la impresora Tronxy 3D por una impresa en PLA adaptada a nuestro caso de uso. Los portaobjetos siguen el estándar DIN ISO 8037-1 con medida estándar de 76 mm x 26 mm x 1,5 mm. Para montar esta base se han incorporado una serie de elevadores con la finalidad de aumentar el espacio disponible entre la pieza conectada a la correa del eje y la base portaobjetos. Ese espacio ganado permite la incorporación del sistema de iluminación inferior sin eliminar la posibilidad de ajustar la nivelación de ésta. Tener una base lo más nivelada posible es importante especialmente para aumentos altos (superiores a 40x) con el fin de reducir aberraciones en los bordes de la imagen.

## 3. SOFTWARE

El software del MicroHikari3D está basado en el modelo cliente-servidor de dos capas. La Figura 6 muestra la arquitectura y conexiones del sistema. En esta arquitectura el encargado de implementar las funciones de lógica de presentación, tales como las interfaces de usuario, es el cliente mientras que la parte dedicada a la lógica de negocio y datos se reserva para el servidor. El modelo cliente-servidor se refleja en el software del MicroHikari3D en sus dos principales elementos:

1. Servidor: programa escrito en Python 3 encargado de proporcionar el vídeo en directo de la cámara, la captura de imágenes, el control de los motores paso a paso, el control de los sistema de iluminación, etc.
2. Cliente: aplicación para dispositivos móviles Android desarrollada con Flutter donde se puede visualizar el vídeo en directo enviado por el servidor, crear las peticiones de movimiento de los motores paso a paso, encendido de los sistema de iluminación, etc.

### 3.1. Servidor

El servidor del sistema se ejecuta en la plataforma de cómputo Raspberry Pi 4, y está encargado de proveer los servicios que definen el microscopio. A

continuación se describen las bibliotecas habilitadas en el servidor de MicroHikari3D:

- *OpenCV*: conjunto de más de 2500 algoritmos optimizados dedicados a métodos de visión por computador.
- *Flask*: *framework* web en Python usado para proporcionar al servidor capacidad HTTP.
- *Flask-RESTful*: extensión de Flask. Añade soporte para la programación de APIs REST.
- *PiCamera*: interfaz de Python que permite interactuar con las cámaras creadas por la fundación Raspberry.
- *Logging*: biblioteca usada para registrar los mensajes de depuración durante el desarrollo.
- *Unittest*: módulo de desarrollo de pruebas unitarias en Python utilizado para probar la API REST.
- *TensorFlow Lite*: *framework* de la familia de TensorFlow más ligero y restringido ideado para realizar inferencia en dispositivos móviles o IoT.

Uno de estos servicios es la emisión de vídeo en vivo. Para ello se ha utilizado la función *gen* del *framework* Flask para crear una emisión MJPEG. En la compresión MJPEG cada uno de los fotogramas enviados del vídeo se codifica como una imagen JPEG.

El control de los ajustes de la cámara, posición y movimiento de los motores paso a paso y de los sistemas de iluminación se realiza mediante una API REST. El servidor del MicroHikari3D utiliza archivos JSON para representar los estados de los motores paso a paso, la iluminación y la cámara.

### 3.2. Procesamiento de la imagen

Uno de los principales problemas a la hora de capturar imágenes con un microscopio (de cualquier clase) es que la imagen puede quedar desenfocada por secciones al tener distintos planos de enfoque. Esto se traduce en que distintas partes de la imagen se encontrarán enfocadas a distintos valores del eje Z. Para conseguir una imagen enfocada, se ha incluido en el servidor la opción de realizar un apilamiento de enfoque o *focus stacking*. El apilamiento de enfoque (ver Figura 7) consiste en fusionar o unir varias fotografías obtenidas a distintos planos focales (valores del eje Z) teniendo como resultado una imagen final en la que los valores de sus píxeles serán los del plano focal donde estén más definidos. En el servidor del MicroHikari3D

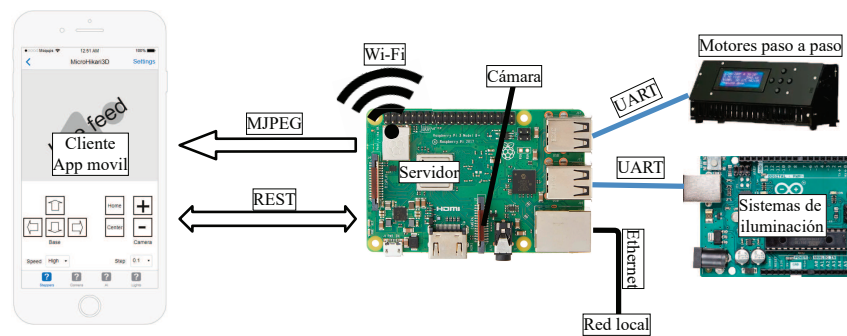


Figura 6: Arquitectura y conexiones del MicroHikari3D

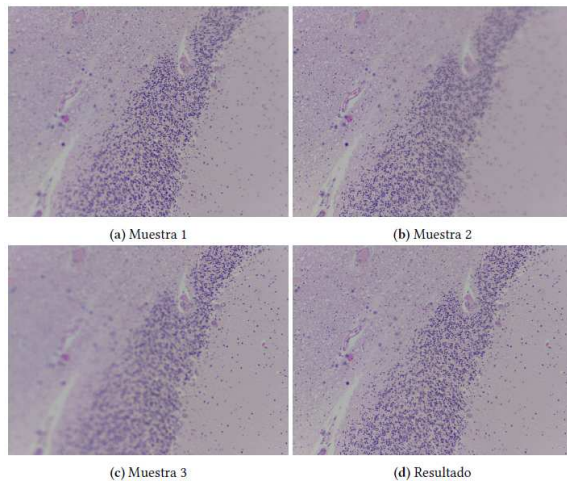


Figura 7: Apilamiento para realizar el enfoque en el MicroHikari3D

se incluye la posibilidad de hacer apilamiento de enfoque de 3, 5 o 7 muestras.

La función de escaneo automático permite pedirle al servidor que realice el *stitching* de varios FoV. Esta herramienta es muy útil para obtener una *Whole Slide Image* (WSI). El área de cada FoV está definido por el tipo de objetivo de aumento que se utilice. Esto quiere decir que la zona digitalizada con un objetivo de 20 aumentos (20x) no es la misma que con uno de 10 aumentos (10x), aunque la resolución de la imagen sea exactamente la misma. El proceso de escaneo automático del MicroHikari3D es posible gracias a la integración en el servidor de la utilidad de *stitching* xy-stitch<sup>1</sup>.

El enfoque automático es el algoritmo que se encargará de realizar las funciones que en un microscopio óptico clásico realizarían los diales macrómetro y micrómetro, moviendo el eje Z hacia arriba o hacia abajo hasta un punto en el que se pueda decir que la imagen formada en el sensor de la cámara se encuentra enfocada. Para medir el nivel de enfoque en una imagen se ha optado por apli-

car la varianza del Laplaciano como propuso J. L. Pech-Pacheco et al.[5].

Una de las posibilidades que da la integración de un computador directamente en el microscopio es la aplicación de algoritmos de procesamiento e inteligencia artificial. Así mediante el uso de TensorFlow Lite se han integrado modelos de clasificación de tejidos que permite discernir entre zona maligna o benigna para cada FoV. Para ello se realizan los siguientes pasos:

1. El cliente realiza la petición de realizar inferencia con un modelo determinado.
2. El servidor comprueba que el modelo pedido se encuentra en el JSON de modelos disponibles y carga los datos necesarios: localización, etiquetas de las clases y nombre.
3. El servidor captura una imagen de lo que se está mostrando por la cámara.
4. El servidor carga el modelo de TensorFlow Lite y preprocesa la imagen para adecuarla a la capa de entrada del modelo: redimensionado, cambio de canales, etc.
5. El servidor realiza el proceso de inferencia con la imagen obtenida en el paso anterior, etiqueta los resultados obtenidos de la inferencia y envía la respuesta al cliente.
6. El cliente recibe los resultados y los muestra como vea conveniente.

Para la carga de modelos se ha creado un JSON donde se pueden añadir los modelos que se quieran usar en el servidor. Además, una petición HTTP de tipo GET a */inference* sin el apartado de consulta o *query* permite conocer los modelos que se encuentran en dicho JSON. Por el contrario, si la petición se realiza con uno de esos modelos en el apartado de *query*, entonces se realiza el método de inferencia sobre ese modelo.

En este trabajo se han entrenado cuatro modelos de clasificación de imágenes para la detección

<sup>1</sup><https://github.com/JohnDMcMaster/xystitch>



de tejidos cancerígenos en biopsias de aguja fina. Los modelos entrenados han sido: MobileNetV2, EfficientNet0 Lite, ResNet50 e InceptionV3. Estos modelos fueron entrenados en un sistema con mayores capacidades de cómputo y fueron posteriormente incorporados al servidor. Los modelos se pueden usar para mostrar la clase con mayor probabilidad dentro de la aplicación para dispositivos móviles como muestra la Figura 8. Esto es especialmente útil en entornos médicos, aunque también puede extenderse a otros como el estudio de la calidad del agua, donde pueden clasificarse microorganismo como las diatomeas.

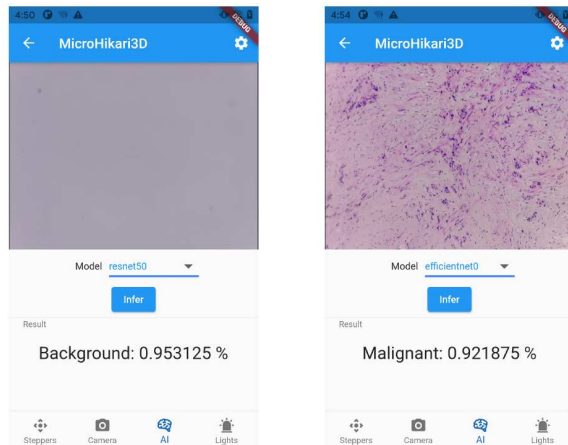


Figura 8: Aplicación para móviles mostrando el resultado de la clasificación

El Arduino UNO es el sistema basado en micro-controlador encargado de la gestión de los sistemas de iluminación, por lo que es necesario especificar algún tipo de protocolo de comunicación entre él y el programa servidor. Esto significa por ejemplo que una petición de encender la iluminación inferior realizada por la aplicación de móvil llegará al servidor en la plataforma de cómputo y éste deberá transmitirla al Arduino para que el relé se accione. Para ello se ha optado por conectar la plataforma de cómputo, Raspberry Pi 4 y el Arduino UNO con un cable USB, aprovechando así el convertidor USB-UART que tiene incorporado.

La aplicación para dispositivos móviles permite de forma ágil el control de las funciones del microscopio. Para el desarrollo de la aplicación, se ha utilizado el conjunto de herramientas de desarrollo Flutter de Google. La aplicación está dividida en dos partes: la parte superior, donde se muestra el vídeo en directo de la cámara del microscopio, y la parte inferior, donde aparecen los paneles de cada una de las funciones incorporadas. Los paneles incluidos en la aplicación son: *Panel de Steppers* (controla los motores paso a paso), *Panel Camera* (con botones de captura de imágenes normales, con apilamiento de enfoque y panorámicas), *Panel*

*AI* (clasificación del FoV mostrado por la cámara del microscopio) y *Panel Lights* (controles de los sistemas de iluminación).

Además de los paneles mencionados anteriormente, también se dispone de una pantalla de configuración donde poder cambiar ajustes como: resolución de las imágenes, resolución de la emisión en directo, filtro aplicado a las imágenes, ISO, intensidad del filtro de *sharpness* o nitidez y la saturación de la imagen.

## 4. RESULTADOS

A continuación se muestran imágenes adquiridas con el sistema MicroHikari3D descrito. El tiempo en adquirir imágenes de 1x1 FoV es de 3 segundos y para 3x3 FoVs, varía entre 2 y 12 minutos para una resolución de 3886x2885 y 9670x7137 píxeles, respectivamente, incluyendo el apilamiento para hacer enfoque completo de los FoV.

Los modelos de clasificación de imágenes probados obtuvieron la precisión y tiempos totales de inferencia mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Precisión y tiempo de inferencia de los modelos probados en MicroHikari3D

Modelo	Precisión	Tiempo
MobileNetV2	0.91915 %	128 ms
EfficientNet0 Lite	0.92137 %	159 ms
ResNet50	0.92469 %	900 ms
InceptionV3	0.92248 %	1090 ms

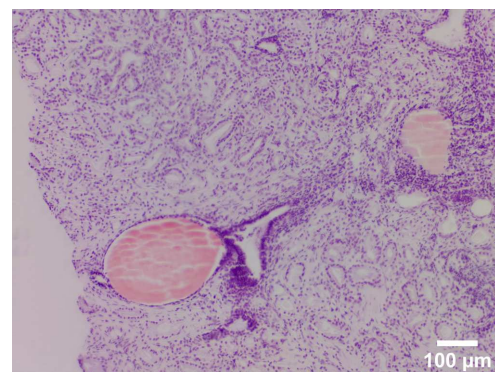


Figura 9: Muestra patológica capturada a 20x

## 5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un sistema de microscopía de bajo coste implementado a partir de una impresora 3D. La capacidad del sistema se ha ilustrado con imágenes digitalizadas de muestras biológicas y médicas; y la integración de algoritmos de inteligencia artificial que permiten clasificar las mues-



Figura 10: Copépodo en medio acuoso a 20x



Figura 11: Pelo humano a 20x

tras mediante el uso del popular *framework* TensorFlow Lite. Como futuro trabajo se evaluará la calidad de las imágenes digitalizadas mediante diferentes métricas y se optimizará el tiempo de adquisición de la WSI.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen financiación de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha con el proyecto SBPLY/19/180501/00 0273 y a la Universidad de Castilla-La Mancha por la financiación al grupo de investigación VISILAB.

#### English summary

### MicroHikari3D: Transforming a 3D printer into a modern robotic microscope

#### Abstract

*Microscopes are an essential tool for different applications in biology and medicine, among others. The automation of these microscopes and the integration of automatic image analysis tools is a breakthrough in microscopy. However, most of the systems*

*available on the market with these features have a high price, which prevents them from becoming more popular. On the other hand, in recent years there has been a significant boom in the development and sale of 3D printers at a very affordable price. Therefore, this work seeks to offer a modular kit that allows converting a 3D printer into a fully functional and automated microscope. To achieve this goal, all possible parts of a commercially available 3D printer will be used, to which all the necessary optical and lighting elements will be attached. This will result in a modular and cost-effective microscopy system.*

**Keywords:** robotic microscope, automatic processing, machine vision.

#### Referencias

- [1] R. M. Sánchez Lera y N. R. Oliva García, Historia del microscopio y su repercusión en la Microbiología, Humanidades M, vol. 15, págs. 355-372, ago. de 2015, ISSN: 1727-8120.
- [2] J. T. Collins y col., Robotic microscopy for everyone: the OpenFlexure Microscope, bioRxiv, 2019. doi: 10.1101/861856.
- [3] G.O.T. Merces y col., The Incubot: A 3D Printer-Based Microscope for Long-Term Live Cell Imaging within a Tissue Culture Incubator, HardwareX, e00189, 2021, ISSN: 2468-0672. doi:10.1016/j.ohx.2021.e00189.
- [4] R. is a community project. RepRap website. (22 de mar. de 2021), [En línea] URL: <https://reprap.org/wiki/RepRap>
- [5] Pech-Pacheco, J.L. and Cristobal, G. and Chamorro-Martinez, J. and Fernandez-Valdivia, J. Diatom autofocusing in bright-field microscopy: a comparative study, Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition, vol. 3, doi: 10.1109/ICPR.2000.903548.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Análisis de técnicas de aumento de datos y entrenamiento en YOLOv3 para detección de objetos en imágenes RGB y TIR del UMA-SAR Dataset

Álvaro Galán-Cuenca, Ricardo Vázquez-Martín, Anthony Mandow, Jesús Morales  
y Alfonso García-Cerezo

Universidad de Málaga, Andalucía Tech, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática  
amandow@uma.es

## Resumen

*El uso de imágenes de los espectros visible (RGB) e infrarrojo térmico (TIR) para la detección de objetos puede resultar crucial en aplicaciones donde las condiciones de visibilidad están limitadas, como la robótica para búsqueda y rescate en catástrofes. Para ello resulta beneficioso analizar cómo las técnicas de aprendizaje profundo basadas en redes neuronales convolucionales (CNN) pueden aplicarse a ambas modalidades. En este artículo se analizan diferentes configuraciones y parámetros para el entrenamiento de CNN tanto para imágenes térmicas como para imágenes equivalentes del espectro visible. En concreto, se aborda el problema del sobre-entrenamiento para determinar una configuración eficaz de técnicas de aumento de datos y parada temprana. El caso de estudio se ha realizado con la red de código abierto YOLOv3, pre-entrenada con el dataset RGB COCO y optimizada (o re-entrenada) con el conjunto público de datos UMA-SAR dataset, que incluye pares de imágenes RGB y TIR obtenidas en ejercicios realistas de rescate.*

**Palabras clave:** visión por computador, aprendizaje profundo, redes neuronales convolucionales, YOLO, imágenes térmicas.

## 1. INTRODUCCIÓN

La visión por computador puede contribuir decisivamente a aplicaciones complejas de la robótica como la respuesta a desastres, incluyendo el reconocimiento y cartografía, búsqueda de supervivientes, logística, primera asistencia médica, evacuación de víctimas y apoyo para la percepción cooperativa. Sin embargo, los sistemas de visión de un vehículo terrestre (UGV) o aéreo (UAV) pueden producir gigabytes de imágenes [15]. A esto se añaden las limitaciones en la calidad de las imágenes recibidas, la diversidad de los objetos de interés y lo desestructurado de los entornos [3]. De ahí que se necesiten nuevas herramientas de inteligencia artificial para identificar información útil [9][8].

En especial, las imágenes térmicas pueden ofrecer

información relevante en entornos de baja visibilidad o para supervisión de incendios [1], pero en general aportan menor resolución, mayor ruido y contornos difusos [11]. En este sentido, las redes neuronales convolucionales de aprendizaje profundo (CNN) pueden ofrecer resultados eficaces tanto para el espectro visible como para el térmico infrarrojo (TIR) [5].

Un problema para la adopción de CNNs en nuevas aplicaciones es la escasez de imágenes convenientemente etiquetadas para casos de aplicación o modalidades específicas [2]. En este sentido, las técnicas de transferencia de conocimiento han demostrado eficacia en distintas aplicaciones [7] y se pueden combinar con operaciones de aumento de datos para conseguir buenos resultados a partir de conjuntos de datos reducidos [8].

La arquitectura de código abierto YOLO, pre-entrenada con imágenes RGB del dataset COCO [12], ofrece un buen compromiso entre velocidad y precisión, y ha ofrecido buenos resultados al re-entrenarla con datos específicos (transferencia de conocimiento) en aplicaciones en el espectro visible, como la detección de congestiones del tráfico [10], la detección de objetos en entornos rurales [4], el desarrollo aplicaciones de inteligencia artificial (AI) en internet de las cosas (IoT) en un chip [19] o la detección desde cámaras vestibles [18].

En un trabajo previo [5], evaluamos la capacidad de la arquitectura CNN de YOLO para entrenar dos redes correspondientes a imágenes térmicas infrarrojas y en el espectro visible con objeto de detectar cuatro clases representativas en escenas de búsqueda y rescate (SAR) que comprendían personas (civiles e intervinientes) y vehículos (automóvil civil y vehículo de respuesta).

En este trabajo se propone un análisis de la red YOLOv3 [17] para la identificación de objetos. Se comienza analizando el problema del sobre-entrenamiento mediante técnicas de aumento de datos y parada temprana. Después se evalúa el efecto de los dos hiper-parámetros del algoritmo de aprendizaje profundo más relevantes, la tasa de aprendizaje y el tamaño de lote. Además, se analiza la respuesta de esta red RGB para detectar ob-

jetos en las imágenes TIR. Con este fin, se utiliza un conjunto de datos recogidos durante ejercicios realistas de respuesta a emergencias que contiene pares de imágenes RGB y TIR.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. La sección 2 revisa brevemente el conjunto de datos públicos utilizado en este trabajo. En la sección 3 se definen los casos de análisis para evitar el sobre-entrenamiento de la red. La sección 4 presenta los resultados para diferentes procesos de entrenamiento de la red en base a diferentes valores de sus hiper-parámetros. Finalmente, se presentan las conclusiones e ideas para desarrollos futuros.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. El dataset UMA-SAR

Para el entrenamiento hemos utilizado nuestro conjunto de datos *UMA-SAR Dataset* [14], disponible públicamente en [www.uma.es/robotics-and-mechatronics/sar-datasets](http://www.uma.es/robotics-and-mechatronics/sar-datasets).

Este *dataset* recopila información sensorial multi-modal capturada desde un vehículo tripulado todoterreno durante ejercicios realistas de búsqueda y rescate celebrados en 2018 y 2019 en el Área de Experimentación en Nuevas Tecnologías para la Intervención en Emergencias de la Universidad de Málaga [20]. En la Fig. 1(a) se muestra el conjunto sensorial, formado por dos cámaras monoculares sincronizadas de luz visible (RGB) e infrarrojo térmico (TIR), un lidar tridimensional (3D) Velodyne HDL-32, así como una unidad de medición inercial (IMU) y dos receptores del sistema de posicionamiento global (GPS) con los que obtener el *ground truth*.

Nuestra misión en los ejercicios fue recoger una amplia gama de datos del dominio SAR (*Search and Rescue*), incluyendo personas, vehículos, escombros y actividad SAR en terreno no estructurado. En concreto, se recogieron cuatro secuencias de datos siguiendo rutas cerradas durante los ejercicios, con una longitud total de la trayectoria de 5,2 km y un tiempo total de 77 minutos. Además, proporcionamos tres secuencias más del lugar vacío (es decir, antes o después del ejercicio) con fines de comparación (4,9 km adicionales y 46 min). Adicionalmente, los datos se ofrecen tanto en formato legible para el ser humano como en formato de archivos *rosbag*, y se proporcionan dos herramientas de software específicas para extraer y adaptar este conjunto de datos a la preferencia de los usuarios. Un ejemplo de imágenes y nubes de puntos 3D capturadas durante el ejercicio de



Figura 1: (a) Vehículo todoterreno y sistema sensorial, (b) Imágenes de cámaras RGB/TIR y nube de puntos 3D del LIDAR.

2019 se presenta en la Fig. 1(b).

### 2.2. Modelo de datos

El dataset empleado para el entrenamiento de la red ha sido construido con 1125 imágenes etiquetadas con cinco clases:  $C = \{civil, interviniente, víctima-yacente, automóvil-civil, vehículo-respuesta\}$ . A las cuatro clases utilizadas en [5], que comprenden personas (civiles e intervinientes) y vehículos (automóvil civil y vehículo de respuesta), se ha añadido la clase *víctima-yacente*. De estas imágenes, 775 proceden del UMA-SAR dataset. Con objeto de disponer de imágenes adicionales con suficiente número de víctimas yacentes, se han añadido 350 imágenes del conjunto publicado por Oliveira *et al.* [16], compuesto únicamente por imágenes RGB. Puesto que YOLO requiere que todas las imágenes tengan las mismas dimensiones, se han escalado todas al tamaño  $416 \times 416$ .

Así, en este trabajo se considera una única red YOLOv3 re-entrenada con imágenes RGB. Del el número total de imágenes en el dataset etiquetado, se ha utilizado el 80 % para el entrenamiento, el 15 % para validación y el 5 % para la fase de testeo.



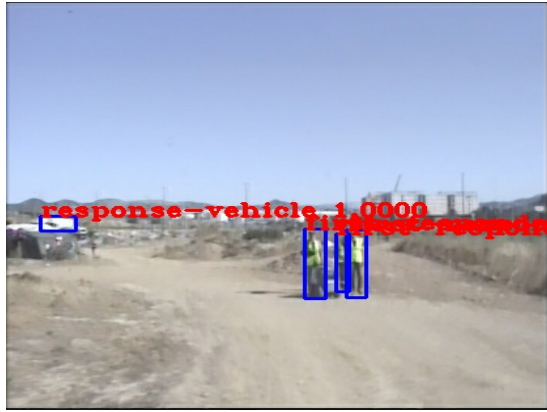


Figura 2: Imagen original del UMA-SAR dataset.

### 3. ANÁLISIS DE TÉCNICAS PARA EVITAR SOBRE-ENTRENAMIENTO

#### 3.1. Aumento de datos

El aumento de datos amplía el conjunto de datos que se usa para el entrenamiento por medio de transformaciones a las imágenes existentes y a sus respectivos cuadros delimitadores si fuera necesario. Posteriormente se añaden dichas imágenes transformadas al dataset junto a las originales. De esta forma se consigue aumentar la cantidad de datos etiquetados para el entrenamiento de la red. Además, gracias a las transformaciones sobre las imágenes, se crean nuevos ejemplos ampliando la variedad de patrones, que ayuda a la generalización de la red durante el proceso de aprendizaje.

##### 3.1.1. Transformaciones

Se analizan cuatro transformaciones a las imágenes del dataset: i) aplicar un volteo horizontal a la imagen, ii) modificar su saturación, iii) modificar el brillo y iv) cambiar el contraste. En la Figura 2 se muestra una imagen de ejemplo del UMA-SAR dataset con las etiquetas de las clases presentes en la imagen. Como se puede apreciar en la imagen, aparece un coche de primeros auxilios en la parte izquierda y tres intervinientes en la parte derecha. La Figura 3 muestra las cuatro transformaciones bajo análisis mencionadas anteriormente, aplicadas a la imagen original mostrada en la Figura 2.

##### 3.1.2. Análisis experimental de los resultados

En esta sección se analiza cómo afecta el aumento de datos al dataset del trabajo a fin de determinar qué transformación es más eficiente. Para los entrenamientos realizados en este análisis, se han

Tabla 1: Parámetros de configuración iniciales de la red.

Parámetro	Valor
Tamaño de lote	8
Tasa de aprendizaje	$1 \cdot 10^{-2}$
Épocas	80

Tabla 2: Resultados de aplicar diferentes casos de aumento de datos.

Transformación	Núm. de imágenes	mAP
ST	900	34.87 %
VH	1800	25.53 %
SAT	1800	26.09 %
BR	1800	16.02 %
CON	1800	35.30 %

fijado los cuatro parámetros mostrados en la tabla 1 para los cinco casos de estudio planteados.

Los casos de estudio son:

- Caso 1: Sin aplicar ninguna transformación (ST).
- Caso 2: Aplicar únicamente un volteo horizontal de imagen (VH).
- Caso 3: Cambiar la saturación de las imágenes (SAT).
- Caso 4: Modificar el brillo de las imágenes (BR).
- Caso 5: Cambiar el contraste de las imágenes (CON).

La Tabla 2 recoge el *mean Average Precision* (mAP) conseguido para cada uno de los casos de estudio, así como el número total de imágenes empleadas en el entrenamiento que se obtiene tras el aumento de datos. Estos resultados indican un porcentaje de acierto mayor cuando no se aplica ninguna transformación. Esto podría explicarse debido a que la red ejecuta 80 épocas (ver Tabla 1), de manera que al aumentar el número de imágenes la red converge antes pero aun así debe realizar ese número de épocas, lo que implica que la red sufra de sobre-entrenamiento. Por este motivo, se necesita establecer un protocolo de parada temprana que permita detener el entrenamiento antes de que la red comience a memorizar en lugar de aprender.

#### 3.2. Parada temprana

Esta técnica consiste en detener el entrenamiento cuando los errores de entrenamiento y validación empiecen a separarse. Para detener el entrenamiento se debe indicar el número de épocas  $p$

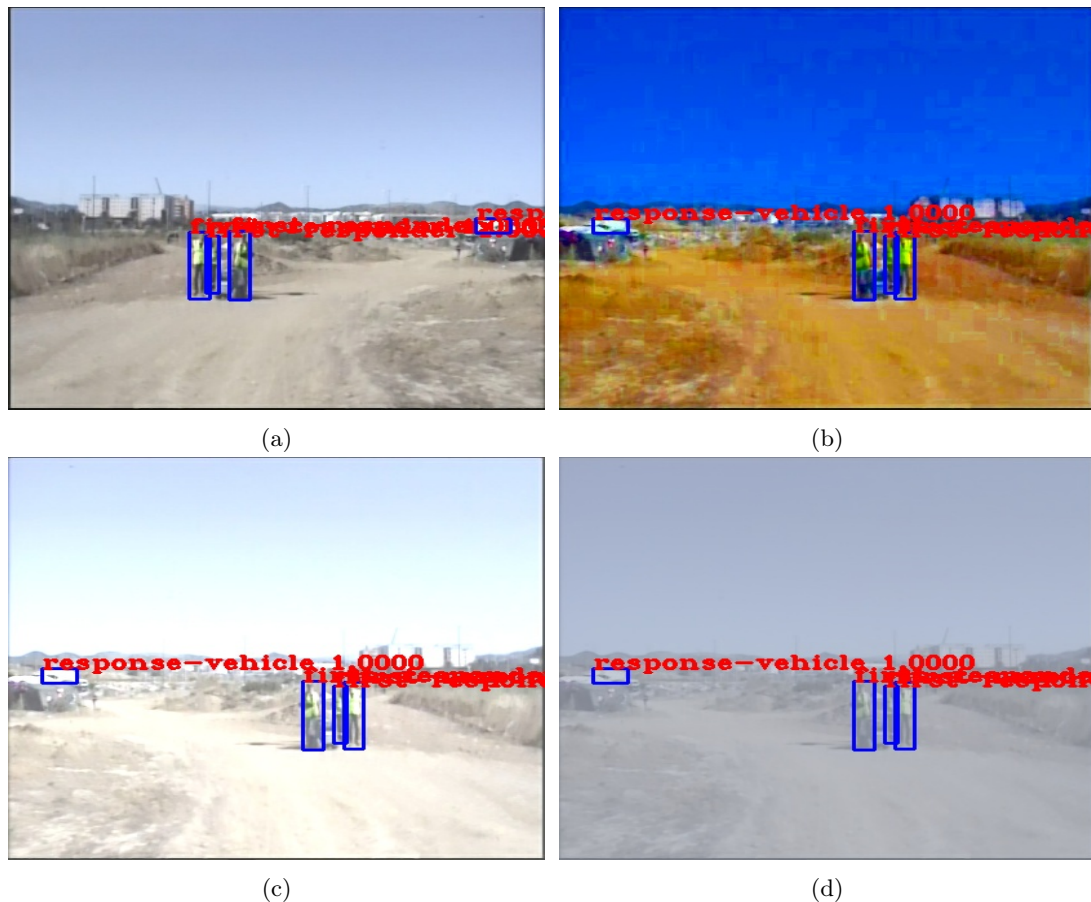


Figura 3: (a) Volteo horizontal, (b) cambio en la saturación, (c) modificación del brillo y (d) cambio de contraste.

Tabla 3: Resultados de los cinco casos de aumento de datos para  $p = 3$ .

Transformación	Número de imágenes	Número de épocas	mAP
ST	900	12	24.30 %
VH	1800	7	38.33 %
SAT	1800	8	36.73 %
BR	1800	9	42.82 %
CON	1800	9	36.25 %

que pueden transcurrir desde que ambos errores empiezan a divergir. En este trabajo se han analizado los siguientes valores para el parámetro  $p$ : 3, 5, 10 y 20.

### 3.3. Análisis conjunto de aumento de datos y parada temprana

Las Tablas 3, 4, 5 y 6 recogen los resultados de combinar la técnica de parada temprana con los cinco casos de estudio de aumento de datos. Estos resultados indican mejores resultados con las transformaciones de volteo horizontal (VH) y cambio de brillo (BR).

Tabla 4: Resultados de los cinco casos de aumento de datos para  $p = 5$ .

Transformación	Número de imágenes	Número de épocas	mAP
ST	900	15	42.46 %
VH	1800	17	60.72 %
SAT	1800	13	54.72 %
BR	1800	10	59.12 %
CON	1800	13	58.62 %

Tabla 5: Resultados de los cinco casos de aumento de datos para  $p = 10$ .

Transformación	Número de imágenes	Número de épocas	mAP
ST	900	16	51.01 %
VH	1800	16	63.27 %
SAT	1800	13	50.25 %
BR	1800	14	51.98 %
CON	1800	18	55.09 %

### 3.4. Combinación de técnicas de aumento de datos

A continuación, se estudia la combinación de técnicas de aumento de datos para producir un mayor incremento del número de imágenes de entrenamiento. En particular, se evalúan tres combina-



Tabla 6: Resultados de los cinco casos de aumento de datos para  $p = 20$ .

Transformación	Número de imágenes	Número de épocas	mAP
ST	900	35	48.08 %
VH	1800	31	49.76 %
SAT	1800	23	23.39 %
BR	1800	25	44.88 %
CON	1800	26	57.07 %

ciones:

- Caso 6: Combinación del caso 2 y del caso 4, triplicando el número de datos de entrenamiento (VH+BR).
- Caso 7: Aplicar las cuatro transformaciones por separado, de esta manera el número de imágenes de entrada se multiplica por cinco (VH+SAT+BR+CON).
- Caso 8: Combinación aleatoria de todas las transformaciones hasta conseguir aumentar el dataset a un número de datos considerable. En este caso se hacen primero las cuatro transformaciones de manera separada como en el caso 7 y luego se realizan combinaciones de ellas, como cambiar el brillo y hacer un volteo horizontal a la vez, consiguiendo así por cada imagen de entrada generar siete imágenes nuevas (COMB).

Los resultados de los ocho casos de estudio del aumento de datos para los cuatro posibles valores de  $p$  están representados en la gráfica de la figura 4. En la gráfica el eje de abscisas representa el número de épocas tras el punto de parada temprana,  $p$ , y el de ordenadas el porcentaje de acierto, el mAP. En dicha gráfica se puede ver que para el caso 7 (VH+SAT+BR+CON) con  $p = 5$  se consigue el mejor resultado, que es de un 69.55 % tras 16 épocas.

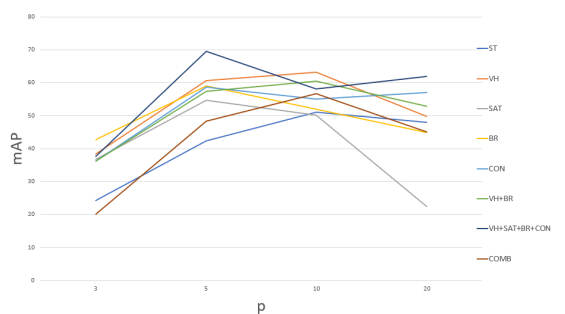
Figura 4: Gráfica representativa de los ocho casos de estudio del aumento de datos para los cuatro posibles valores de  $p$ .

Tabla 7: Resultados de modificar el valor de la tasa de aprendizaje.

Tasa de aprendizaje	mAP	Número de épocas	Tiempo
$1 \cdot 10^{-1}$	8.62 %	7	11m4s
$1 \cdot 10^{-2}$	69.55 %	16	10m50s
$1 \cdot 10^{-3}$	82.75 %	6	9m59s
$1 \cdot 10^{-4}$	79.06 %	6	8m55s
$1 \cdot 10^{-5}$	57.62 %	8	12m32s
$1 \cdot 10^{-6}$	57.84 %	26	49m31s

Tabla 8: Resultados de modificar el valor del tamaño de lote.

Tasa de aprendizaje	mAP	Número de épocas	Tiempo
8	82.75 %	6	10m50s
12	84.70 %	6	8m53s
16	81.37 %	6	9m39s
32	83.13 %	6	9m51s
64	75.46 %	9	15m11s
128	60.13 %	12	20m22s

## 4. ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE ENTRENAMIENTO

El ajuste de los parámetros del descenso del gradiente presente en los algoritmos de aprendizaje profundo mejoran la precisión de la red. En esta sección, se analizarán experimentalmente la tasa de aprendizaje o *learning rate* y el tamaño de lote o *batch size*.

### 4.1. Tasa de aprendizaje

Este parámetro permite regular cómo de rápido o lento aprende la red y cómo se adapta ésta frente nuevos patrones de entrada [6]. Su valor es positivo y comprendido entre 0 y 1, aunque los valores más empleados para este parámetro son: 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001, 0.00001 y 0.000001.

Se ha entrenado la red con la combinación de transformaciones para el aumento de datos del caso 7 (VH+SAT+BR+CON) y  $p = 5$ , pero esta vez alternando el valor de la tasa de aprendizaje para analizar su efecto. Los resultados se muestran en la tabla 7, que recoge el valor del *mean Average Precision*, el número de épocas y el tiempo que tarda la red en converger para cada uno de los valores de la tasa de aprendizaje. En vista a estos resultados, se puede concluir que mientras menor sea el valor de la tasa de aprendizaje, más tarda la red en converger; mientras mayor sea su valor, peor es el porcentaje de acierto, y que para nuestro caso de estudio, el mejor valor de la tasa de aprendizaje es de  $1 \cdot 10^{-3}$ .

### 4.2. Tamaño de lote

Este parámetro indica el número de muestras (imágenes) del dataset de entrenamiento que se emplea en cada iteración. El número de iteraciones que se realizan en cada época ( $I_E$ ) es inver-

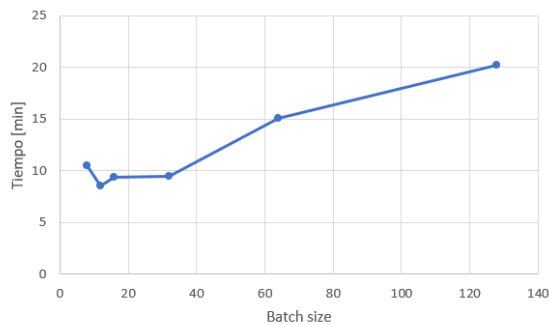


Figura 5: Identificación de objetos mediante CNN en pares de imágenes.

Tabla 9: Condiciones de la red neuronal de este trabajo.

Transferencia de conocimiento	Sí
Tamaño de lote ( $B$ )	12
Tasa de aprendizaje	$1 \cdot 10^{-3}$
Tamaño de las imágenes	$416 \times 416$
$p$	5
Aumento de datos	VH+SAT+BR+CO

samente proporcional al tamaño del lote ( $B$ ), es decir:

$$I_E = \frac{N_T}{B}, \quad (1)$$

donde  $N_T$  es el número total de imágenes usadas para el entrenamiento.

En este análisis se entrena la red con las mismas transformaciones que en el apartado anterior, un valor de la tasa de aprendizaje de  $1 \cdot 10^{-3}$ , y se modifica el valor del tamaño de lote. Los valores evaluados para este parámetro son: 8, 12, 16, 32, 64 y 128, que son considerados habituales [6] [13]. Los resultados se recogen en la Tabla 8, donde un tamaño de lote igual a 12 proporciona los mejores resultados. Esto significa que en cada una de las seis épocas se han realizado 375 iteraciones (se tienen  $N_T = 4500$  imágenes después de aplicar el aumento de datos) con 12 imágenes en cada iteración. Se consigue así alcanzar un mAP del 84.70 % de media para las cinco clases. La gráfica de la Figura 5, muestra como a medida que aumenta el tamaño de lotes, el tiempo que tarda la red neuronal en converger también aumenta.

## 5. RESULTADOS

El análisis experimental permite establecer las condiciones de entrenamiento mostradas en la Tabla 9 para el conjunto de clases  $\mathcal{C} = \{\text{civil}, \text{interviniente}, \text{víctima-yacente}, \text{automóvil-civil},$

Tabla 10: Resultados para imágenes del espectro visible.

Clase	AP
civiles	77.29 %
automóvil civil	76.84 %
intervinientes	85.27 %
vehículo de respuesta	84.56 %
victimas yacentes	99.62 %
mAP	84.70 %

Tabla 11: Resultado de la red RGB para imágenes de prueba TIR

Clase	AP
civiles	21.66 %
automóvil civil	13.51 %
intervinientes	11.45 %
vehículos de respuesta	26.48 %
mAP	18.37 %

*vehículo-respuesta*}. Los resultados obtenidos en Average Precision (AP) para cada clase para imágenes RGB se muestran en la Tabla 10. Como se puede observar, se alcanza un porcentaje muy elevado en la detección de víctimas, así como precisiones adecuadas en el resto de clases. La alta precisión en la detección de la clase víctima se ha alcanzado gracias al uso de un dataset específico de víctimas [16], que ha permitido añadir 350 imágenes donde está presente dicha clase.

En la literatura se pueden encontrar datasets con imágenes térmicas, pero son fundamentalmente de peatones. Por tanto, no existen datasets de víctimas en el espectro TIR, como las que se han utilizado para imágenes RGB. En la Figura 6 se muestran dos ejemplos de detección en imágenes TIR. Se puede apreciar como en condiciones de baja visibilidad con este tipo de imágenes se pueden detectar las clases presentes cuando no es posible que sean detectadas empleando imágenes RGB.

En un trabajo previo hemos comprobado la viabilidad de utilizar un re-entrenamiento de imágenes TIR sobre una red YOLO [5]. Resulta interesante estudiar el rendimiento de la red RGB entrenada en este trabajo para detectar objetos en imágenes TIR del dataset UMA-SAR [14]. Los resultados obtenidos se ofrecen en la Tabla 11, donde no se ha incluido la clase víctima ya que su presencia no es representativa en las imágenes de prueba. Como se puede apreciar, los resultados son muy inferiores a los que se alcanzan con imágenes RGB, ya que la red no ha sido entrenada especialmente para el espectro termográfico. Este resultado refleja la necesidad de realizar un entrenamiento específico de la red para imágenes TIR, como el realizado en [5]. En cualquier caso, dada

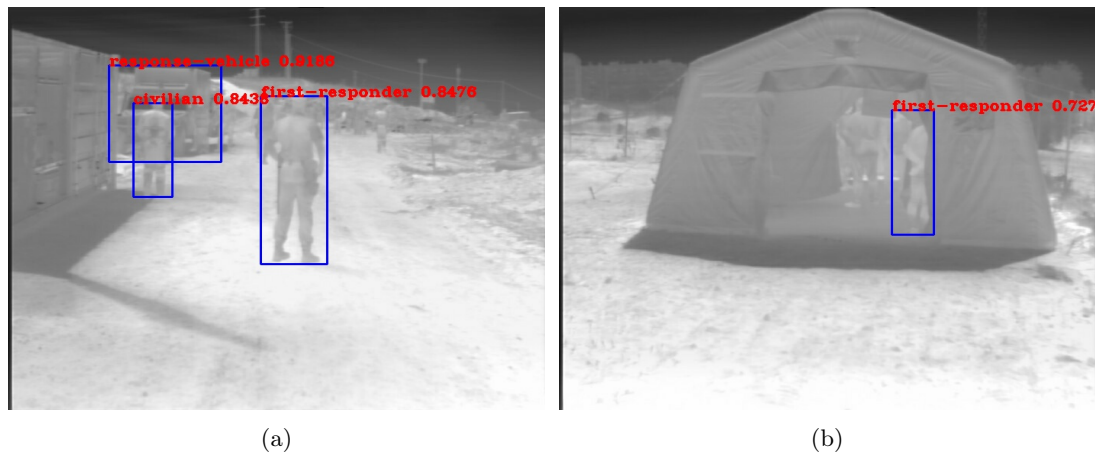


Figura 6: Detección en imágenes TIR: (a) imagen en exterior con buena visibilidad y (b) imagen con baja visibilidad.

la poca disponibilidad de imágenes TIR en datasets públicos y con imágenes etiquetadas, resulta relevante que se pueda utilizar la transferencia de conocimiento de redes pre-entrenadas con imágenes RGB para ser optimizadas con imágenes térmicas, como también se concluye en [5].

## 6. CONCLUSIONES

En este artículo se ha realizado un análisis de diferentes herramientas y parámetros para el entrenamiento de una red neuronal convolucional (CNN) utilizando imágenes RGB del dataset público multimodal *UMA-SAR Dataset*, obtenido durante ejercicios realistas de búsqueda y rescate en catástrofes. En concreto se ha abordado el problema del sobre-entrenamiento para determinar una configuración eficaz de técnicas de aumento de datos y parada temprana. La operación volteo horizontal a las imágenes originales ha producido el mejor resultado de entrenamiento. En cuanto a la técnica de parada temprana, el momento óptimo para detener el entrenamiento se ha obtenido tras 5 épocas transcurridas desde que el error de validación comienza a crecer y se aleja del error de entrenamiento. Respecto a los hiperparámetros, se ha concluido que utilizar una tasa de entrenamiento de  $1 \cdot 10^{-3}$  y un tamaño de lote de 12 son los valores que proporcionan un buen rendimiento en el entrenamiento de la red.

Los resultados muestran una buena precisión en las cinco clases tras la optimización de la red pre-entrenada de YOLO para imágenes RGB, y se alcanzan precisiones equivalentes al trabajo previo [5], donde se definían cuatro clases.

Como trabajo futuro, resulta necesario de incorporar nuevos datos públicos donde esté presente la clase víctima. Por último, también es interesante

realizar un análisis análogo al presentado en este trabajo sobre el aumento de datos en imágenes TIR, para poder determinar las transformaciones más relevantes para esta modalidad, así como aumentar el tipo de transformaciones empleadas.

## Agradecimientos

Este trabajo ha recibido financiación del proyecto nacional RTI2018-093421-B-I00, la Universidad de Málaga (Andalucía Tech).

## English summary

### Analysis of data augmentation and training techniques for YOLOv3 object detection in RGB and TIR images from the UMA-SAR Dataset

## Abstract

*The combination of imaging of visible (RGB) and thermal infrared (TIR) modalities can be crucial for object detection in applications where visibility conditions are limited, such as search and rescue robotics. For this, it is beneficial to analyze how deep learning techniques based on convolutional neural networks (CNN) can be applied to these modalities. This article discusses different settings and parameters for CNN training for two equivalent sets of thermal and RGB images. Specifically, we address the problem of overfitting and determine an effective configuration of*

*data augmentation and early stop techniques. The case study has been carried out with the open source network YOLOv3, pre-trained with the RGB COCO dataset, and optimised with the UMA-SAR dataset, which includes pairs of RGB and TIR images obtained in realistic rescue exercises.*

**Keywords:** Computer vision, deep learning, convolutional neural networks, YOLO, thermal imaging

## Referencias

- [1] Al-Kaff, A., Madridano, I., Campos, S., García, F., Martín, D. and de la Escalera, A.: 2020, Emergency support unmanned aerial vehicle for forest fire surveillance, *Electronics* **9**(2).
- [2] Alonso, I., Yuval, M., Eyal, G., Treibitz, T. and Murillo, A. C.: 2019, CoralSeg: learning coral segmentation from sparse annotations, *Journal of Field Robotics* **36**(8), 1456–1477.
- [3] Arnold, S., Ohno, K., Hamada, R. and Yamazaki, K.: 2019, An image recognition system aimed at search activities using cyber search and rescue dogs, *Journal of Field Robotics* **36**(4), 677–695.
- [4] Barba-Guaman, L., Naranjo, J. E., Ortiz, A. and Gonzalez, J. G. P.: 2021, Object detection in rural roads through SSD and YOLO framework, *Advances in Intelligent Systems and Computing* **1365 AIST**, 176–185.
- [5] Bañuls, A., Mandow, A., Vázquez-Martín, R., Morales, J. and García-Cerezo, A.: 2020, Object detection from thermal infrared and visible light cameras in search and rescue scenes, *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, pp. 380–386.
- [6] Bengio, Y.: 2012, Practical recommendations for gradient-based training of deep architectures, *Neural Networks: Tricks of the Trade* p. 437–478.
- [7] Blanco-Medina, P., Fidalgo, E., Alegre, E., Vasco-Carofilis, R. A., Jañez-Martino, F. and Villar, V. F.: 2021, Detecting vulnerabilities in critical infrastructures by classifying exposed industrial control systems using deep learning, *Applied Sciences* **11**(1), 1–14.
- [8] Cebollada, S., Payá, L., Flores, M., Peidró, A. and Reinoso, O.: 2021, A state-of-the-art review on mobile robotics tasks using artificial intelligence and visual data, *Expert Systems with Applications* **167**.
- [9] Chaves, D., Saikia, S., Fernández-Robles, L., Alegre, E. and Trujillo, M.: 2018, A systematic review on object localisation methods in images [Una revisión sistemática de métodos para localizar automáticamente objetos en imágenes], *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* **15**(3), 231–242.
- [10] Gan, H. M., Fernando, S. and Molina-Solana, M.: 2021, Scalable object detection pipeline for traffic cameras: Application to Tfl JamCams, *Expert Systems with Applications* **182**.
- [11] Hinojosa, S., Pajares, G., Cuevas, E. and Ortega-Sanchez, N.: 2018, Thermal image segmentation using evolutionary computation techniques, *Studies in Computational Intelligence* **730**, 63–88.
- [12] Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Dollár, P. and Zitnick, C. L.: 2014, Microsoft COCO: Common objects in context, *European Conference on Computer Vision*, Springer International Publishing, pp. 740–755.
- [13] Masters, D. and Lusch, C.: 2018, Revisiting small batch training for deep neural networks, *arXiv* (1804.07612).  
**URL:** <https://arxiv.org/abs/1804.07612v1>
- [14] Morales, J., Vázquez-Martín, R., Mandow, A., Morilla-Cabello, D. and García-Cerezo, A.: 2021, The UMA-SAR dataset: Multimodal data collection from a ground vehicle during outdoor disaster response training exercises, *The International Journal of Robotics Research* **40**(6-7), 835–847.
- [15] Murphy, R. R., Tadokoro, S. and Kleiner, A.: 2016, *Springer Handbook of Robotics*, Springer, Cham, chapter Search and Rescue Robotics, pp. 1151–1173.
- [16] Oliveira, G., Valada, A., Bollen, C., Burgard, W. and Brox, T.: 2016, Deep learning for human part discovery in images, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- [17] Redmon, J. and Farhadi, A.: 2018, YOLOv3: an incremental improvement, *arXiv* (1804.02767).  
**URL:** <https://arxiv.org/abs/1804.02767v1>
- [18] Sabater, A., Montesano, L. and Murillo, A. C.: 2019, Performance of object recognition in wearable videos, *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 1813–1820.

- [19] Torres-Sanchez, E., Alastruey-Benede, J. and Torres-Moreno, E.: 2020, Developing an AI IoT application with open software on a RISC-V SoC, *Conference on Design of Circuits and Integrated Systems*.
- [20] Universidad de Málaga: 2021 (Consultado en julio de 2021), Área de experimentación en nuevas tecnologías para la intervención en emergencias (LAENTIEC).  
**URL:** [www.uma.es/LAENTIEC](http://www.uma.es/LAENTIEC)



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# Clasificación y manipulación de basura doméstica utilizando deep-learning

Santiago Puente and Pablo Gil and Victor de Gea  
AUROVA Lab, Computer Science Research Institute,  
University of Alicante, Alicante 03690, SPAIN  
{santiago.puente,pablo.gil,victor.degea}@ua.es  
<http://www.aurova.ua.es>

## Resumen

*Este artículo presenta una aplicación de reconocimiento mediante el uso de redes de aprendizaje profundo para llevar a cabo la clasificación de basura en el ámbito doméstico. Así mismo, una vez realizado el reconocimiento se determina su localización, para poder obtener los puntos de agarre para que un brazo robot dotado de una pinza de dedos paralelos pueda hacerlo de manera automática. Se presenta el algoritmo utilizado, así como, los resultados experimentales que permiten comprobar la bondad de la propuesta.*

**Palabras clave:** Deep Learning, Grasping, Perception for Grasping.

## 1 Introducción

El uso de sistemas robotizados y de inteligencia artificial, permite llevar a cabo tareas de clasificación de residuos, mediante el uso de aprendizaje profundo es posible que un sistema automático sea capaz de localizar en el entorno los residuos, así como, su naturaleza y mediante un sistema robótico autónomo proceder a su recogida.

La primera consideración necesaria es el reconocer y localizar los objetos en un escenario desconocido [11]. Lo que implica sistemas de percepción visual. Estos sistemas están compuestos por diferentes tecnologías de procesamiento y captura de imágenes: como cámaras estereoscópicas, RGBD, ToF, etc. La reciente explosión de técnicas de aprendizaje profundo facilita los procesos de segmentación y detección para encontrar la posición de los objetos en la imagen, incluso cuando se presenta una escena compleja y desestructurada. Los modelos de redes neuronales más comunes para estas tareas se basan en capas convolucionales, tal y como plantean [3] y [8].

Una vez que el objeto es reconocido y localizado en la imagen, se requiere calcular la ubicación del mismo en el mundo real para permitir su manipulación por el robot. En [10] y [6] se plantea el cálculo de zonas de agarre en objetos previamente reconocidos, reconstruyendo la malla de la

superficie a partir de modelos CAD almacenados. Otros autores estiman los agarres usando aprendizaje profundo como en [7] que parte de vistas RGBD de la escena que contiene objetos, o desde una nube de puntos como en [9]. Ambos métodos no requieren que los objetos tengan que ser reconocidos y/o reconstruidos previamente.

En este trabajo, hemos creado un conjunto de muestras de objetos para acometer las tareas de clasificación y manipulación de objetos para su posterior reciclaje. Para ello se utiliza un modelo de red neuronal [4] al que se le aplica un reajuste hiperparamétrico para el conjunto de muestras. Obteniendo la localización en la imagen de los objetos a manipular, posteriormente, utilizando la información de profundidad proporcionada por el sensor RGBD se calcula la posición en el espacio 3D, para utilizando GeoGrasp [12] determinar los puntos de agarre para manipular el objeto.

Este artículo está estructurado de la siguiente manera. Primero, se describe la arquitectura del sistema. Posteriormente el conjunto de muestras generado, para seguir con la experimentación y terminar con las conclusiones.

## 2 Arquitectura del sistema

El objetivo es realizar una manipulación robótica de objetos considerados residuos o basura, tal y como se ha planteado en la introducción. Para lograrlo se utiliza una cámara RealSense d435i que proporciona datos RGBD de escenarios interiores y exteriores con los objetos a manipular. Las imágenes RGB tienen una resolución espacial de 640x480 píxeles para cada uno de los tres canales, se realiza un corte de las mismas a 512x512 para utilizarlas como entrada para la red Mask-RCNN que realiza la segmentación de instancias de objetos en la escena [2]. Aquí se utiliza la implementación planteada en [1] de Mask-RCNN [4] para detectar instancias de objetos diferentes al nuestro, esta red se re-entrena con el conjunto de muestras propio para ajustar los pesos de la misma. Este tipo de red permite distinguir qué píxeles pertenecen al objeto detectado y cuáles no. De esta forma, es posible realizar una detección



precisa de los objetos en imágenes 2D. La figura 1 muestra la arquitectura del modelo Mask-RCNN usado, que se describe en detalle en [5].

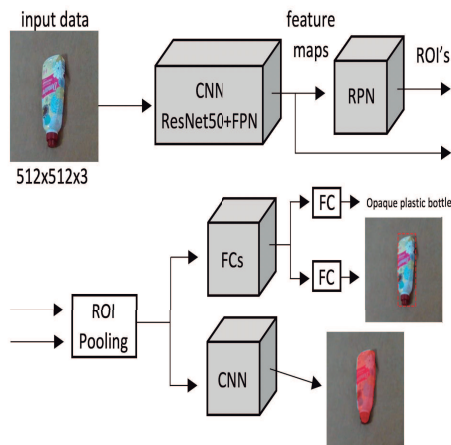


Figura 1: Modelo de la red Mask-RCNN

El enfoque realizado consiste en cargar los pesos previamente entrenados para realizar un ajuste fino mediante nuestro conjunto de muestras y ajustar el modelo al problema objetivo. El ajuste fino se realiza mediante un ajuste hiperparamétrico. Para realizar la evaluación de los hiperparámetros, se ha dividido el conjunto de datos en tres subconjuntos: un conjunto de entrenamiento, otro de validación y otro de test.

La tarea de manipulación robótica de objetos, basada en las predicciones del modelo que proporciona la red neuronal, se ha realizado teniendo en cuenta el uso de una pinza de dos dedos paralelos para llevar a cabo la tarea de manipulación. El sistema planteado se divide en los siguientes pasos (Figura 2):

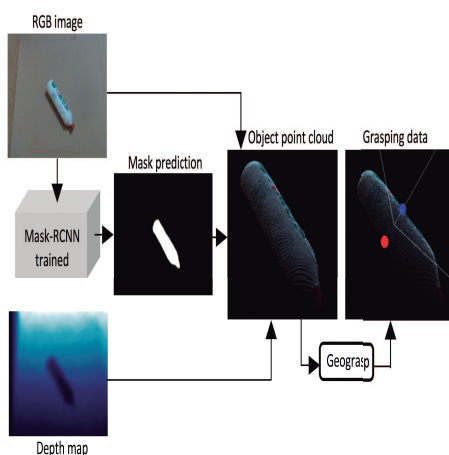


Figura 2: Arquitectura del sistema

- **Capturar datos RGBD.** Se captura la información RGBD de la escena, proporcionada

por la cámara Realsense d435i. De esta forma, se obtienen imágenes RGB y mapas de profundidad de forma simultánea y sincronizada. Las predicciones del modelo se ejecutan sobre las imágenes en color capturadas, mientras que la información del canal D se utiliza para conocer los valores de profundidad en los que se ubican los posibles objetos detectados.

- **Leer predicciones de modelos entrenados.** Una vez que se han ejecutado las predicciones en imágenes RGB, se obtiene una máscara binaria para cada objeto detectado. Esta máscara permite distinguir qué píxeles, tanto en imagen RGB como en mapa de profundidad, pertenecen al objeto y cuáles pertenecen al fondo.
- **Reconstrucción 3D de objetos detectados.** Con los siguientes datos: imágenes RGB, D y de máscara binaria de la escena, se procesa la reconstrucción tridimensional de cada objeto detectado. Para ello, se aplican las expresiones 2, 3 y 1 a cada píxel que pertenece al objeto.

$$Z = D(u, v) \quad (1)$$

$$X = Z * \frac{(u - cx)}{fx} \quad (2)$$

$$Y = Z * \frac{(v - cy)}{fy} \quad (3)$$

donde (cx, cy) es el centro óptico, (fx, fy) es la distancia focal y (u, v) son las coordenadas de la imagen en píxeles.

Realizando este procesamiento se obtiene el conjunto de puntos (X, Y, Z) que componen la nube de puntos de cada objeto detectado. La máscara binaria obtenida por predicción de red permite conocer las coordenadas de los píxeles que pertenecen al objeto (u, v).

- **Calcular datos de agarre.** Una vez que se obtienen las representaciones tridimensionales de los objetos, se utiliza al algoritmo Geograsp para calcular los puntos de manipulación para el objeto. Geograsp permite calcular dos puntos de agarre en la superficie del objeto y la orientación de la pinza para lograr la manipulación. [13].

### 3 Conjunto de muestras

En este apartado se describe el conjunto de muestras generado para llevar a cabo las pruebas del sistema.

Para el conjunto de datos de entrenamiento se han tomado desde diferentes perspectivas las imágenes, es decir, los objetos aparecen en diferentes entornos y con diferentes posiciones, orientaciones, distancias y visibilidad. Se ha creado un conjunto de muestras con 1434 imágenes de 27 objetos diferentes clasificados en 5 clases 3, cada imagen se ha etiquetado manualmente de acuerdo con las siguientes clases: botella de plástico opaco (C1), caja de cartón (C2), botella de plástico transparente (C3), lata de bebida (C4) y recipiente de plástico opaco (C5). La tabla 1 muestra la distribución de muestras de cada categoría de objeto. Para realizar la experimentación, hemos creado un conjunto de datos con una representación equilibrada de clases, el número de muestras para cada clase es muy similar para el entrenamiento y el test, el conjunto de validación queda un poco escaso en muestras para la clase C2 respecto al número de instancias en el resto de clases. Este aspecto habría que mejorarlo en posteriores análisis para trabajar con un conjunto de objetos que tengan igual número de instancias para cada categoría..



Figura 3: Imagen de los objetos en las cinco categorías

Tabla 1: Distribución de instancias de objetos para cada categoría.

Categoría	Entre	Vali	Test
C1	157	42	117
C2	131	24	93
C3	145	36	109
C4	152	41	95
C5	163	35	94

## 4 Experimentación

En este apartado se describen los resultados experimentales obtenidos. Se han dividido en dos

partes diferenciadas: la detección de objetos 4.1 y la estimación del agarre una vez detectados los objetos 4.2.

### 4.1 Detección de objetos

En esta sección, se ha utilizado el modelo Mask-RCNN para probar la detección de objetos una vez que fue entrenada con nuestro conjunto de muestras y se seleccionaron los hiperparámetros óptimos para el entrenamiento (tabla 2).

Tabla 2: Hyperparámetros seleccionados para el entrenamiento.

Batch size	1
Numero de clases	1+5
Tamaño imagen	512x512 pixels
Arquitectura neuronal base	resnet50
Ratio de aprendizaje	0.006
ROIs por imagen	200
Factor ROI positivo	0.23
Number of anchors	512
Anchor scales	(64,128,256,512,1024)
Anchor aspects	[0.5 1 2]
Umbral	0.9

De cara a evaluar el rendimiento del modelo propuesto, se ha utilizado un conjunto de datos de validación y prueba. El rendimiento en términos de MS COCO Average Precision (AP) se ha probado con diferentes valores para el índice Jaccard (IoU) (Tabla 3) donde AP50 se corresponde con un umbral de 0,5 y AP75 con un umbral de 0,75. Además, también se ha realizado para diversas escalas del objeto (Tabla 4), donde AP<sub>m</sub> se corresponde con el AP para objetos pequeños, AP<sub>m</sub> con el AP para objetos medianos y AP<sub>l</sub> el AP para objetos grandes.

Tabla 3: Diferentes valores del umbral IoU.

Evaluation data	AP	AP50	AP75
Test data set	0.370	0.556	0.417
Validation subset	0.703	0.896	0.851

Tabla 4: Diferentes escalas de los objetos.

Evaluation data	APs	AP <sub>m</sub>	AP <sub>l</sub>
Test data set	0.059	0.374	0.511
Validation subset	0.289	0.720	0.766

El modelo entrenado tiene una mayor precisión en imágenes similares a las que se utilizan para entrenar el modelo, subconjunto de validación, mientras que al evaluar el modelo con imágenes menos

similares, conjunto de datos de prueba, el sistema devuelve un menor nivel de precisión.

Además, la precisión del modelo entrenado se evalúa en cada categoría de objeto en los datos de prueba (Figura 4).

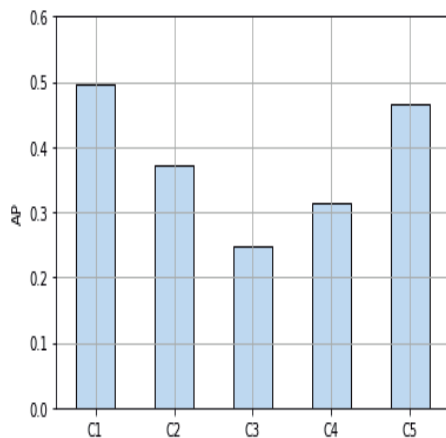


Figura 4: Resultados de AP por categoría

Según los resultados (Figura 4), el modelo entrenado tiene una precisión AP más alta en botellas de plástico opacas (C1) y recipientes de plástico opacos (C5). Sin embargo, los objetos con una menor precisión AP son las botellas de plástico transparente (C3). Para observar el comportamiento del modelo entrenado desde otro punto de vista, se visualizan algunos ejemplos de predicciones que el modelo calcula en imágenes del conjunto de datos de prueba. En algunas pruebas, se puede ver cómo las predicciones son incorrectas (Figura 5), porque las sombras proyectadas por los objetos pueden confundirse con píxeles pertenecientes al mismo, e incluso el reflejo del objeto en el terreno. Mientras que en otras pruebas, las predicciones de clase y máscara se ejecutan correctamente, donde se puede observar como en otros casos la detección no se ve afectada por sombras.

#### 4.2 Estimación del agarre

Este apartado evalúa los agarres de las predicciones de objetos obtenidas según 4.1. Los experimentos se llevan a cabo a partir de la detección correcta de los objetos, con el objetivo de evaluar únicamente el procesamiento de los datos de agarre, ya que los objetos incorrectamente detectados no podría ser manipulados por el brazo robot.

La figura 6 muestra el resultado de las nubes de puntos para diferentes objetos detectados. Analizando los resultados, el hecho de utilizar una sola cámara en el procesamiento limita la recon-



Figura 5: Predicciones correctas e incorrectas

strucción del área del objeto visible por el sensor. En la prueba (c), se observa que la nube de puntos no tiene suficiente información 3D sobre el objeto para calcular un buen agarre. Esta limitación depende del posicionamiento de los objetos en relación con la cámara y la forma de los objetos. Para objetos claros, los datos de profundidad registrados no son del todo correctos debido a la transparencia. Esto provoca que las reconstrucciones de este tipo de objetos no sean tan precisas como en los objetos opacos. Se obtienen buenos puntos de contacto en el objeto probado (f), pero estas limitaciones podrían afectar al cálculo de los agarres. Por otro lado, la prueba (e) muestra que los datos de profundidad de algunos píxeles pertenecientes a la lata de bebida no son correctos, lo que también podría afectar el cálculo del agarre. Las pruebas (a, b, d) muestran un cálculo de agarre correcto.

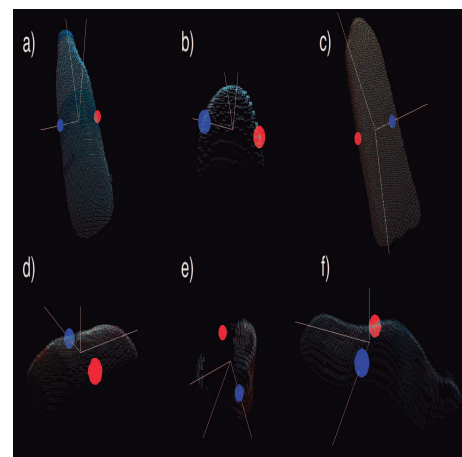


Figura 6: Datos de agarre

## 5 Conclusiones

Para concluir, el presente trabajo permite conocer una buena configuración paramétrica para los datos propios, con los que re-entrenar el modelo original. En general, de acuerdo con las pruebas realizadas, el procesamiento propuesto para calcular los datos de agarre a partir de las predicciones del modelo entrenado Mask-RCNN permite obtener agarres correctos. Un punto a destacar es que el sistema se puede extender a un gran número de clases para clasificar los objetos con criterios de reciclaje. Ahora el trabajo se está instalando en una plataforma móvil para probar en campo el algoritmo propuesto. Además, esta extensión a un entorno de campo nos permitirá mejorar el conjunto de datos y por tanto mejorar el método de clasificación.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea y los fondos FEDER por medio del proyecto COMMANDIA (SOE2/P1/F0638), dentro del programa Interreg-V Sudoe. Para la fase de entrenamiento se ha usado la infraestructura computacional financiada por la Generalitat Valenciana y los fondos FEDER en el proyecto ID-IFEDER/2020/003.

### English summary

#### Classification and pick-up of domestic waste using deep-learning

### Abstract

*This paper presents an application of recognition through the use of deep learning networks to carry out domestic waste classification. Likewise, once the recognition is carried out, it is used to determine its location, in order to obtain gripping points so that a robot arm equipped with a two-finger parallel gripper performs it automatically. Initially, the algorithm used is explained, as well as the experimental results that allow to verify the goodness of the proposal.*

**Keywords:** Deep Learning, Grasping, Perception for Grasping.

## Referencias

- [1] W. Abdulla. Mask r-cnn for object detection and instance segmentation on keras and tensorflow. [https://github.com/matterport/Mask\\_RCNN](https://github.com/matterport/Mask_RCNN), 2017.
- [2] H. Azizpour, A. Razavian, and J. Sullivan. Factors of transferability for a generic convnet representation. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 38, 2016.
- [3] D. Chaves, S. Saikia, L. Fernandez-Robles, E. Alegre, and M. Trujillo. A systematic review on object localisation methods in images. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 15(3):231–242, 2018.
- [4] K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, and R. Girshick. Mask r-cnn. In *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 2980–2988, 2017.
- [5] J. Hui. Image segmentation with mask r-cnn. <https://jonathan-hui.medium.com/image-segmentation-with-mask-r-cnn-eb6d793272>, 2018.
- [6] S. Jain and B. Argall. Grasp detection for assistive robotic manipulation. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2015–2021, 2016.
- [7] I. Lenz, H. Lee, and A. Saxena. Deep learning for detecting robotic grasps. *The Int. J. of Robotics Research*, 34(4-5):705–724, 2015.
- [8] L. Liu, W. Ouyang, X. Wang, P. Fieguth, J. Chen, X. Liu, and M. Pietikäinen. Deep learning for generic object detection: A survey. *Int J Computer Vision*, (2):261–318, 2020.
- [9] A. ten Pas, M. Gualtieri, K. Saenko, and R. Platt. Grasp pose detection in point clouds. *The Int. J. of Robotics Research*, 36(13-14):1455–1473, 2017.
- [10] N. Vahrenkamp, L. Westkamp, N. Yamanobe, E. E. Aksoy, and T. Asfour. Part-based grasp planning for familiar objects. In *16th Int. Conf. on Humanoid Robots*, pages 919–925, 2016.
- [11] A. Wei and B. Chen. Robotic object recognition and grasping with a natural background. *Int. J. of Advanced Robotic Systems*, 17(2), 2020.

- [12] B. Zapata-Impata, C. Mateo, P. Gil, and J. Pomares. Using geometry to detect grasping points on 3d unknown point cloud. In *14th Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics*, volume 2, pages 154–161, 2017.
- [13] B. S. Zapata-Impata, P. Gil, J. Pomares, and F. Torres. Fast geometry-based computation of grasping points on three-dimensional point clouds. *Int. J. of Advanced Robotic Systems*, 16(1):1–18, 2019.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# DISEÑO BASADO EN MODELOS DE APLICACIONES FOG COMO WORKFLOW DE MICROSERVICIOS

E. Hurtado\*, A. López\*, I. Sarachaga\*, A. Armentia\*, E. Estévez\*\*, M. Marcos\*

\*Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, UPV/EHU, España

{ekaitz.hurtado, alejandro.lopez, isabel.sarachaga, aintzane.armentia, marga.marcos}@ehu.eus

\*\*Dpto. Ingeniería Electrónica y Automática EPS de Jaén, España

e-mail: eestevez@ujaen.es

## Resumen

*La irrupción de la Industria 4.0 ha dado lugar a integraciones con tecnologías innovadoras, las cuales permiten el desarrollo de aplicaciones que utilizan datos recogidos desde la planta para optimizar los procesos industriales. En un principio, estas aplicaciones se desplegaron en la nube. Sin embargo, por problemas de latencia y seguridad, la niebla ha surgido como un nuevo paradigma, con capacidades similares a la nube, pero más cerca de los activos de planta. El despliegue de aplicaciones en la niebla ha sido un tema de discusión creciente. No obstante, a pesar de que diferentes autores conciben las aplicaciones según la misma lógica (como un flujo dirigido de componentes), no se ha presentado una solución global. Así, los autores proponen un enfoque genérico basado en modelos para la definición de aplicaciones de computación en la niebla.*

**Palabras clave:** Industria 4.0, Fog Computing, aplicación, meta-modelo, workflow, Node-RED.

## 1 INTRODUCCIÓN

La Industria 4.0 ha surgido en los últimos años como respuesta a las exigencias del mercado en términos de calidad y optimización. Uno de los pilares de la Industria 4.0 es generar valor añadido en el proceso de fabricación a partir de los datos generados por los activos de la planta (el conjunto de recursos de la fábrica a nivel de planta [6]).

Así, con el avance de la Industria 4.0, varias tecnologías se han integrado a este paradigma (e.g., sistemas multiagente (MAS), inteligencia artificial (IA), Internet de las cosas (IoT), computación en la nube, etc.) [15], habilitando el desarrollo de aplicaciones innovadoras relacionadas con la analítica inteligente, la planificación dinámica o el mantenimiento preventivo [7], [12], [15]. Se trata, por lo tanto, de aplicaciones que pueden tener cabida en ámbitos de aplicación dispares, por lo que pueden presentar requisitos dependientes del dominio. Por

ejemplo, en las aplicaciones del ámbito de la sanidad, se deben garantizar unas latencias predefinidas, así como un acceso seguro [1], mientras que en aplicaciones industriales, otros requerimientos toman más importancia, como la viabilidad y la rentabilidad [2].

Desde un punto de vista estructural, la jerarquía de los sistemas de fabricación también se ha visto transformada en un modelo de interconectividad global que se vertebra a través de tres niveles: 1) la planta o edge, en la que los activos físicos (robots, máquinas, transportes) ofrecen los servicios de fabricación y transporte necesarios en el proceso productivo; 2) la niebla o fog, que ofrece recursos de computación y almacenamiento ubicados en un entorno cercano al origen de los datos; y 3) la nube o cloud, que ofrece unas funcionalidades equiparables a las de la niebla, con la diferencia de que tanto los recursos de procesamiento como de almacenamiento se encuentran en servidores externos, alejados del origen de los datos y sólo accesibles a través de Internet, aumentando la capacidad de cómputo y almacenamiento [1], [13], [15].

Debido a sus limitaciones en cuanto a capacidad de procesamiento y almacenamiento, los activos de planta no cuentan, por norma general, con recursos computacionales necesarios para soportar estas aplicaciones, por lo que, en primera instancia, estas aplicaciones se desplegaron en la nube [2]. Sin embargo, el despliegue de aplicaciones en la nube conlleva nuevos problemas, como la aparición de latencias y la vulnerabilidad en el acceso a los datos de las empresas [13]. Por ese motivo, dichas aplicaciones se han desplegado específicamente en uno de los niveles comentados anteriormente: el Fog.

El software disponible para las aplicaciones Fog se puede clasificar en dos categorías: framework y plataforma de software. La primera se refiere al conjunto de metodologías y herramientas para el desarrollo de este tipo de aplicaciones, mientras que la segunda se refiere al entorno que proporciona las funcionalidades y mecanismos para la orquestación de las aplicaciones [11]. Estas plataformas deben cumplir



una serie de características: flexibilidad, reconfigurabilidad, adaptabilidad, seguridad, escalabilidad, interoperabilidad y portabilidad, entre otras [1], [2], [15]. Por ello, diferentes instituciones han promovido la estandarización del paradigma Fog Computing, con enfoques como OpenFog [8] o FORA [10].

Por otro lado, las aplicaciones Fog suelen expresarse como un flujo dirigido en el que cada componente tiene entradas y/o salidas (workflow) [4], [5], [7], [9], [14]. Cada componente debe cumplir con una función específica, distribuyendo así la funcionalidad de la aplicación [7]. Este enfoque ofrece facilidad y flexibilidad en el desarrollo de las aplicaciones. Esto se debe a que el hardware, los protocolos y la funcionalidad se abstraen como nodos en el flujo, por lo que el diseño de la lógica de la aplicación se simplifica considerablemente [2]. De hecho, varios trabajos han aplicado técnicas de modelado para la definición de aplicaciones Fog siguiendo este enfoque orientado al flujo de datos. Sin embargo, ninguno de ellos ofrece herramientas para abordar la concepción, diseño y despliegue de este tipo de aplicaciones [3], [4], [9]. Es más, a pesar de los intentos de estandarización, por lo que los autores saben, el diseño y la composición de las aplicaciones suele resolverse con el desarrollo de soluciones ad-hoc para cada situación, no siendo aplicables a diferentes dominios de aplicación.

Por lo tanto, en este artículo se propone un proceso genérico para la definición y desarrollo de aplicaciones Fog pertenecientes a diferentes dominios. La propuesta está basada en el concepto de workflow y en el uso de técnicas de meta-modelado. Así, se permite definir y desarrollar la aplicación como una composición de servicios y de la que pueden generarse los componentes que la forman.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 contiene el modelado de componentes y aplicaciones Fog propuesto. La sección 3 presenta una herramienta de diseño para este tipo de aplicaciones. La sección 4 describe el caso de estudio desarrollado en el ámbito de la Industria 4.0. Finalmente, la sección 5 resume las principales aportaciones del trabajo y presenta las líneas de trabajo futuro.

## 2 MODELADO DE APLICACIONES FOG

Como se ha comentado, las aplicaciones Fog suelen expresarse como un conjunto de componentes organizados en un flujo dirigido. Esta sección presenta la propuesta de los autores para el modelado de aplicaciones Fog que consta de dos meta-modelos: 1) uno para la definición de componentes Fog, los

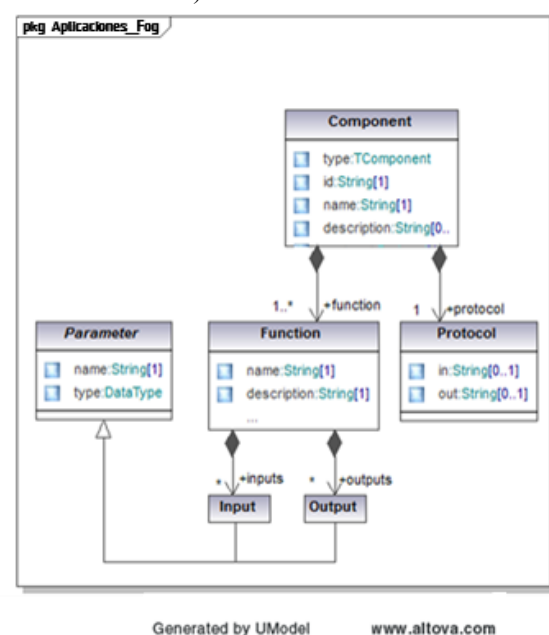
cuales, después de ser desarrollados, se almacenan en una biblioteca de componentes reutilizables y, posiblemente, de terceros; y 2) otro para la definición de las propias aplicaciones Fog. Estos meta-modelos tienen en cuenta las propiedades de los sistemas Fog Computing para satisfacer los requisitos de las aplicaciones.

### 2.1 META-MODELO PARA COMPONENTES FOG

La Figura 1 representa el meta-modelo para la definición de los componentes Fog. Los componentes deben ser de un tipo concreto (TComponent), siendo el número y variedad de tipos dependientes del dominio. Es decir, se crearán nuevos tipos de componentes, o nuevas funcionalidades de componentes existentes, cuando alguna aplicación necesite un nuevo servicio que no está desarrollado.

Para la comunicación entre los elementos Fog es esencial un mecanismo de identificación estandarizado. La nomenclatura es muy importante en Fog Computing para asegurar varios conceptos: la autenticación de la identidad, el control y la gestión de objetos, o la comunicación de datos, entre otros. Por ese motivo, se han incluido los conceptos de identificador (id) y de nombre. Por otro lado, en el atributo de la descripción se pueden añadir más detalles sobre el componente.

Los componentes ofrecen un conjunto de microservicios o funciones que pueden ejecutar por sí mismos. Estas funciones se caracterizan por el nombre y los parámetros de entrada y salida asignados. Asimismo, los parámetros se definen por su nombre y el tipo de dato (puede ser un dato simple o una estructura de datos).



Generated by UModel [www.altova.com](http://www.altova.com)  
Figura 1: Meta-modelo para componentes Fog

Los componentes interactúan entre sí, por lo que deben de tener la capacidad de enviar o recibir datos, o ambas cosas, para poder realizar sus funciones. Para garantizar el intercambio de datos, hay que especificar los protocolos de comunicación de entrada y/o salida soportados por el componente. Los protocolos de entrada y salida no tienen que ser necesariamente los mismos, pero si un componente envía datos a otro, sus protocolos (en este caso el de salida del remitente y entrada del receptor) sí deben ser idénticos.

## 2.2 META-MODELO PARA APLICACIONES FOG

Siguiendo el concepto de workflow antes mencionado, la Figura 2 recoge el meta-modelo para la definición de aplicaciones para Fog Computing como un conjunto de dos o más componentes (ComponentInstance) concatenados creando un flujo dirigido. De este modo, las aplicaciones sirven a un propósito específico ejecutando secuencialmente las funciones realizadas por sus componentes (Function). Por lo tanto, cuando un componente es instanciado en una aplicación Fog, se debe seleccionar el microservicio que se desee que ejecute, entre los proporcionados por dicho componente.

El direccionamiento de mensajes a través de los componentes es relevante para la aplicación ya que cada uno de ellos puede tener diferentes interfaces. La capacidad de comunicación de un componente depende de sus puertos de entrada y salida (Ports), los cuales definen las estructuras de datos que se espera enviar y recibir a través de ellos (Data). Así, el inicio

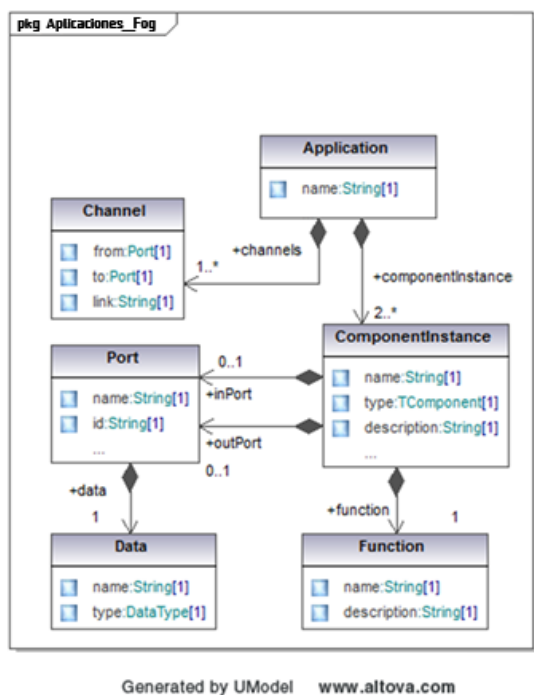


Figura 2: Meta-modelo para aplicaciones Fog

y el final del flujo quedará determinado por los componentes que sólo tienen un puerto de entrada o un puerto de salida, respectivamente.

La conexión entre el puerto de salida de un componente y el puerto de entrada del siguiente se especifica como canal de comunicación (Channel). Se debe definir un canal con el protocolo adecuado para cada conexión entre todas las instancias de componentes, y sus interfaces deben ser compatibles. De no ser así, las instancias de los componentes serán incapaces de comunicarse entre sí.

## 3 HERRAMIENTA DE DISEÑO DE APLICACIONES FOG

Dado que se recomienda el uso de herramientas de modelado para facilitar el diseño y la generación de aplicaciones Fog [5], esta sección ilustra la aplicabilidad de la herramienta Node-RED para el modelado de dichas aplicaciones. Esta herramienta permite diseñar aplicaciones de forma gráfica concatenando nodos para formar un flujo [4], por lo que encaja con la concepción de los autores sobre aplicación Fog.

Para el diseño de estas aplicaciones la herramienta de modelado debe incluir una librería que disponga de todos los tipos de componentes necesarios para cualquier aplicación que se desee crear. En este sentido, Node-RED proporciona plantillas predefinidas para algunos componentes [16], aunque también permite desarrollar nodos personalizados [5]. De este modo, es posible incluir componentes conformes al meta-modelo de componente propuesto en la sección anterior y así garantizar que todos ellos tengan la estructura correcta. Por lo tanto, Node-RED permite crear una librería de componentes Fog basados en modelos (librería de Fog Computing).

Un ingeniero software deberá ser el encargado de desarrollar y clasificar todos los tipos de componentes Fog existentes en la librería de Fog Computing. La Figura 3 presenta la vista de este ingeniero software en la herramienta Node-RED. A la hora de añadir nuevos componentes a la librería de Fog Computing se deberá seguir una serie de pautas: 1) Analizar qué tipo de componente se quiere añadir y comprobar si ya está disponible en la librería; 2) Especificar qué microservicios podrá ejecutar el nuevo componente; 3) Desarrollar el código fuente del componente que permita ejecutar todas sus funciones; 4) Crear la imagen base del componente y almacenarla en la librería.

El encargado de desarrollar las aplicaciones Fog tendrá otra vista de Node-RED, representada en la Figura 5, en la que creará el flujo añadiendo los nodos deseados. Al instanciar cada componente deberá

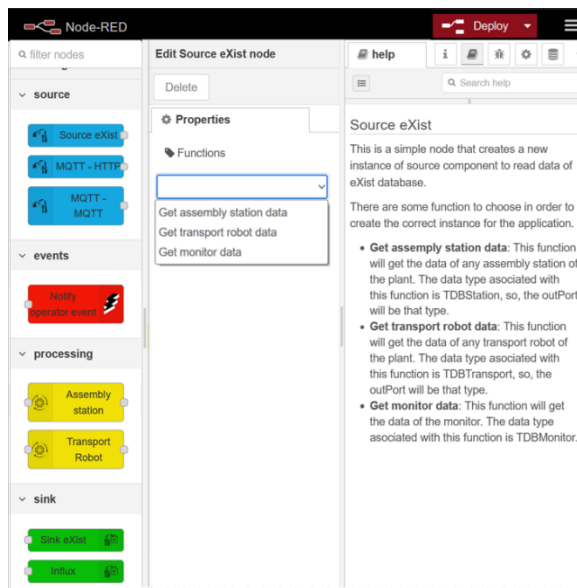


Figura 3: Vista de Node-RED para desarrollar la librería de Fog Computing

seleccionar una función entre las disponibles. A modo de ayuda, Node-RED permite añadir una descripción de cada componente y de sus funciones. En esta descripción se detallarán las estructuras de datos con las que trabajará cada función. El ingeniero software será el que añada estas descripciones al desarrollar los tipos de componentes.

## 4 CASO DE ESTUDIO

Una de las bases de la Industria 4.0 es tener la capacidad de obtener información útil a partir de los datos recogidos de la planta. Para ello, es necesario asegurar la comunicación entre la planta y la niebla, y almacenar los datos obtenidos para evitar pérdidas. También es necesario ser capaz de extraer información útil de los datos para tomar decisiones basadas en el estado actual del sistema. Por último, se requiere la capacidad de retroalimentar el proceso de fabricación con las acciones inferidas del análisis de la información.

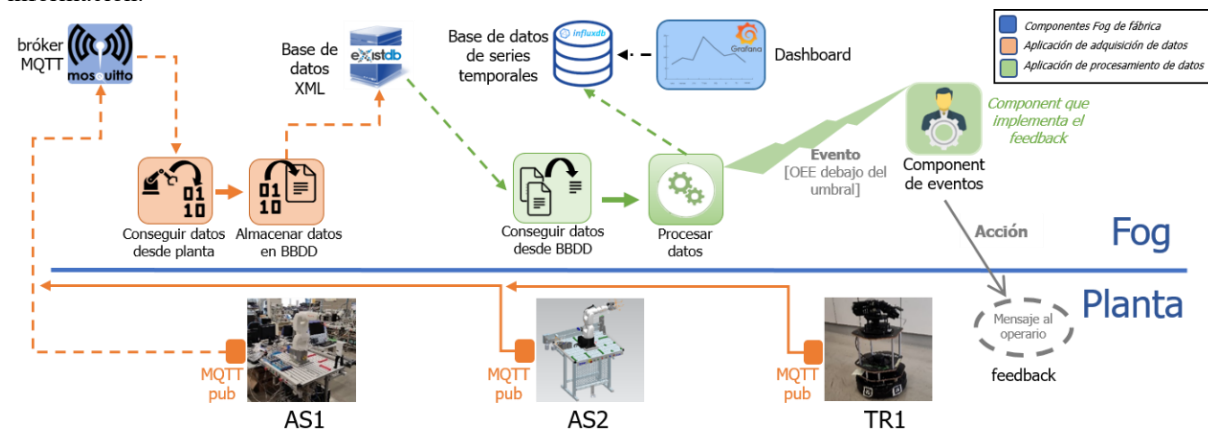


Figura 4: Perspectiva general de las aplicaciones de adquisición y procesamiento

Esta sección describe un caso práctico en el que se satisfacen dichas necesidades mediante aplicaciones Fog definidas conforme a los modelos propuestos. De este modo, se proponen dos aplicaciones: en primer lugar, una aplicación de adquisición capturará los datos de los recursos de fabricación de la planta y los almacenará en una base de datos basada en XML. En segundo lugar, una aplicación de procesamiento leerá los datos y los procesará para obtener la eficacia global de las estaciones. En este caso, calculará el Overall Equipment Effectiveness (OEE), el cual es un indicador de rendimiento. La misma aplicación gestionará la retroalimentación de la planta, activando un evento para avisar al operario en caso de que el OEE baje de un umbral predefinido, o si mantiene una tendencia negativa.

El sistema de fabricación utilizado en este caso de estudio, representado en la Figura 4, está estructurado en dos niveles: la planta y el Fog. Los recursos a nivel de planta consisten en dos estaciones de montaje interconectadas mediante robots de transporte. Estas estaciones generan datos que alimentan la entrada de las aplicaciones Fog, que capturan la información a través de MQTT. Además de estos recursos de fabricación, el sistema proporciona varios recursos a nivel Fog, que pueden ser utilizados y compartidos por las aplicaciones Fog activas (una base de datos XML, un bróker MQTT para la comunicación Planta-Fog y una base de datos de series temporales, entre otros).

### 4.1 DESARROLLO DE LA LIBRERÍA DE FOG COMPUTING

Para la generación de la librería de Fog computing se sigue la pauta indicada en el apartado 3. En primer lugar, se identifican los componentes necesarios y su funcionalidad. Por un lado, para la aplicación de adquisición se necesitan dos tipos de componentes: un cliente MQTT para obtener los datos de planta a través del protocolo MQTT sub/pub (source MQTT-HTTP) y un componente para leer/escribir en la base de datos

XML (sink eXist). Por otro lado, la aplicación de procesamiento hará uso de un componente que lee de la base de datos (source eXist), otro para procesar el OEE (Processing assembly station) y, si es necesario, generar un evento al componente de eventos (Notify operator), que es el encargado de realimentar al operador de la planta.

A continuación, se desarrolla el código fuente que permite al componente realizar sus funciones. Los componentes desarrollados conforme al meta-modelo propuesto estarán encapsulados en contenedores Docker. Así, cada componente está aislado y es independiente de los demás, por lo que es posible actualizar y/o cargar sólo funciones/contenedores específicos de forma totalmente independiente.

Finalmente, se asocia cada componente a una imagen de contenedor que se utiliza para lanzar las instancias de componentes. Las imágenes de contenedores se definen mediante un archivo *dockerfile* usando una imagen base, que puede ser de terceros o construida desde cero [7]. Una vez creadas las imágenes base de los componentes se almacenarán en la librería de Fog Computing. Dichas imágenes contienen la funcionalidad de todos los microservicios que puede realizar el componente.

## 4.2 DESARROLLO DE LAS APLICACIONES FOG

El usuario de la herramienta de modelado, diseñará las aplicaciones como un conjunto de instancias de componentes de la librería de Fog Computing. Para cada una de las instancias deberá seleccionar una de sus funcionalidades. También debe definir el flujo de la aplicación mediante las conexiones entre las instancias. Por cada componente de aplicación se crea una nueva imagen de componente, a partir de su correspondiente imagen base del repositorio, mediante un archivo *dockerfile*.

La Figura 5 ilustra el uso de la herramienta Node-RED para la composición de las dos aplicaciones mencionadas anteriormente. Para las aplicaciones Fog de adquisición y procesamiento de datos del caso de estudio, la Figura 6 representa la secuencia que siguen

los datos (workflow). Cada envío de datos se realiza con una estructura de datos específica. Esta estructura será la misma en el puerto de salida del remitente y el puerto de entrada del receptor.

Los componentes de las aplicaciones Fog interactuarán con los componentes fog de fábrica, destacados con el color azul. Por ejemplo, el componente source eXist conseguirá los datos desde la base de datos eXist o el componente Assembly station Influx almacenará los cálculos de los OEE en la base de datos de series temporales Influx.

La aplicación de adquisición, destacada en naranja, va a interactuar de esta manera:

- Cuando un activo de planta haya finalizado alguna operación enviará los datos recogidos (tiempo inicio, tiempo final, etc...) vía MQTT al bróker situado en el Fog.
- El componente source MQTT-HTTP, conectado al bróker, recibirá estos datos, para enviárselos al elemento Sink eXist vía HTTP.
- Sink eXist tendrá la capacidad de gestionar la base de datos eXist, la cual está basada en XML, y en el caso de esta aplicación, procesará y almacenará los datos generados por los activos de planta.

Por otro lado, la aplicación de procesamiento, destacada en verde, será la encargada de analizar esos datos generados en el nivel de planta:

- El primer componente, source eXist, conseguirá los datos de la BBDD y se los enviará al segundo componente en una estructura de datos específica (TDBStation).
- El segundo componente será el encargado de procesar esos datos, calculando el OEE. Cuando tenga el resultado, le enviará los datos al Sink Influx, para que puedan ser almacenados en la base de datos de series temporales. Después, analizará los resultados conseguidos.
- Si el OEE calculado está por debajo de un umbral definido para esa estación, es decir, si la eficiencia de la estación ha caído por debajo de valores asumibles, se pedirá al último elemento (Notify operator) que le



Figura 5: Vista de Node-RED para composición de la aplicación de procesamiento.

Diagrama de secuencia de las aplicaciones Fog para adquisición y procesamiento de datos

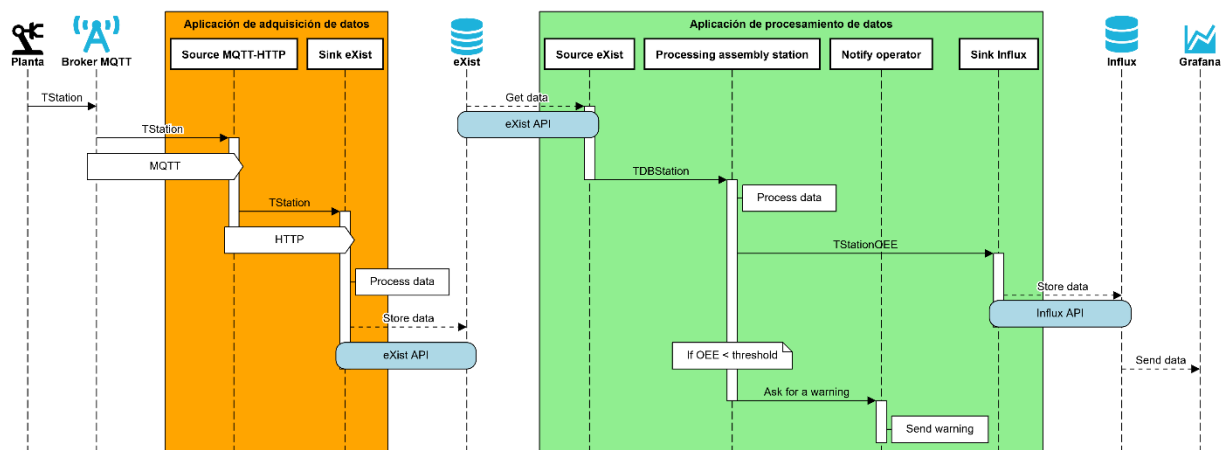


Figura 6: Diagrama de secuencia de las funcionalidades de las aplicaciones de adquisición y procesamiento

mande una advertencia al operario, avisándole del estado actual del sistema, para que pueda llevar a cabo acciones de corrección u optimización.

Además, se ha desarrollado un nuevo elemento, ajeno a esta aplicación, para visualizar gráficamente el rendimiento actual de la fábrica. Así, el elemento Grafana recogerá los cálculos de los OEE y los mostrará en una gráfica, junto con el umbral predefinido, para así poder ver en cualquier momento el estado actual de cualquier activo de planta.

La Figura 7 representa la definición de los archivos *dockerfile* de los componentes source, sink y processing de las aplicaciones desarrolladas. La secuencia de los datos representada en la Figura 6 se puede apreciar en los puertos de entrada y salida definidos en los *dockerfile*. Como se ha comentado anteriormente, estos puertos deben ser coherentes en cuanto al workflow. Por ejemplo, en la Figura 7 se puede ver que el puerto de salida del componente Source MQTT-HTTP coincide con el puerto de entrada del Sink eXist (TStation). Las estructuras de datos corresponden con las presentadas en el flujo de la Figura 6.

<pre>FROM source_mqtt_http_base_image ENV function=assemblyStationData ENV outPort=TStation CMD python3 source.py</pre>	<pre>FROM source_exist_base_image ENV function=getAssemblyStationData ENV outPort=TDBStation CMD python3 source_eXist.py</pre>
<pre>FROM sink_exist_base_image ENV function=storeAssemblyStationData ENV inPort=TStation CMD java -jar sin_exist.jar</pre>	<pre>FROM processing_assembly_base_image ENV function=processingOEE ENV inPort=TDBStation ENV outPort=TStationOEE CMD java -jar processing.jar</pre>

Figura 7: Dockefiles de los componentes source HTTP-MQTT, sink eXist y processing assembly Station.

## 5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En la actualidad, el diseño y composición de aplicaciones Fog se realiza principalmente de forma ad-hoc. En este artículo se hace uso de técnicas de meta-modelado para proponer un enfoque genérico con objeto de definir y desarrollar aplicaciones Fog como un flujo de componentes que implementan microservicios. En concreto se proponen dos meta-modelos: uno para los componentes Fog y otro para la definición de las aplicaciones en base a dichos componentes.

El meta-modelo para componentes Fog permite recoger las características principales de cada componente, siendo posible crear una librería con todos los tipos de componentes desarrollados y su imagen Docker asociada. El meta-modelo de las aplicaciones permite definir la interconexión de los componentes. Así, se consigue separar la definición de los componentes de la definición de la lógica de aplicación al mismo tiempo que se favorece la reutilización de las imágenes a la hora de desarrollar las aplicaciones.

Además, se ha probado que Node-RED es una herramienta útil para el diseño tanto de los componentes como de las aplicaciones.

No obstante, la aproximación no puede asegurar la correcta composición de las aplicaciones, ni proporciona el concepto de aplicación en tiempo de ejecución. Por ello, los próximos pasos se centran en el desarrollo de una arquitectura Fog que resuelva estas limitaciones y sea capaz de gestionar el ciclo de vida de las aplicaciones. Además, se debería garantizar la reactividad de las aplicaciones Fog para realimentar el proceso de fabricación.



## Agradecimientos

Este trabajo está financiado por MCIU/AEI/FEDER, UE (proyecto RTI2018-096116-B-I00) y GV/EJ (proyecto IT1324-19).

## English summary

### MODEL-BASED DESIGN OF FOG APPLICATIONS AS MICROSERVICE WORKFLOWS

#### Abstract

*The emergence of Industry 4.0 has led to integrations with innovative technologies, enabling the development of applications that use plant-level data to optimize industrial processes. Initially, these applications were deployed in the cloud. However, due to latency and security problems, the fog has arisen as a new paradigm, with similar capabilities to the cloud, but closer to the plant assets. Application deployment in the fog has been a topic of growing discussion. Still, although different authors conceive applications based on the same logic (as a workflow of components), no global solution has been presented. Thus, the authors propose a generic model-based approach for the definition of fog computing applications.*

**Keywords:** Industry 4.0, Fog Computing, application, meta-model, workflow, Node-RED

#### Referencias

- [1] Akrivopoulos, O., Chatzigiannakis, I., Tselios, C., Antoniou, A., (2017) "On the Deployment of Healthcare Applications over Fog Computing Infrastructure", *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*.
- [2] Bellavista, P., Zanni, A., (2017) "Feasibility of Fog Computing Deployment based on Docker Containerization over RaspberryPi", *Proceedings of the 18th International Conference on Distributed Computing and Networking*.
- [3] Dintén, R., López, P., Zorrilla, M., (2021) "Arquitectura de referencia para el diseño y desarrollo de aplicaciones para la Industria 4.0", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*.
- [4] Giang, N. K., Blackstock, M., Lea, R., Leung, V., (2015), "Developing IoT applications in the Fog: A Distributed Dataflow approach", *2015 5th International Conference on the Internet of Things (IOT)*.
- [5] Giang, N. K., Lea, R., Leung, V., (2020) "Developing applications in large scale, dynamic fog computing: A case study", *Software: Practice and Experience*.
- [6] Glossary, disponible en <https://www.platform-i40.de/PI40/Navigation/EN/Industrie40/Glossary/glossary.html>.
- [7] Hurtado, E., López, A., Armentia, A., Sarachaga, I., Casquero, O., Marcos, M., (2021) "On the development of Fog-Edge feedback applications", aceptado para presentación en *IEEE CASE 2021*.
- [8] *IEEE Standard for Adoption of OpenFog Reference Architecture for Fog Computing*.
- [9] Kum, S. W., Moon, J., Lim, T.-B., (2017) "Design of Fog Computing based IoT Application Architecture", *2017 IEEE 7th International Conference on Consumer Electronics*.
- [10] Pop, P., Zarrin, B., Barzegaran, M., Schulte, S., Punnekkat, S., Ruh, J., Steiner, W., (2021) "The FORA Fog Computing Platform for Industrial IoT", *Information Systems*.
- [11] Puliafito, C., Mingozi, E., Longo, F., Puliafito, A., Rana, O., (2019) "Fog Computing for the Internet of Things: A Survey", *ACM Transactions on Internet Technology*.
- [12] Seitz, A., Henze, D., Miehle, D., Bruegge, B., Nickles, J., Sauer, M., (2018) "Fog Computing as Enabler for Blockchain-Based IIoT App Marketplaces - A Case Study", *2018 Fifth International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security*.
- [13] Stojmenovic, I., Wen, S., (2014) "The Fog Computing Paradigm: Scenarios and Security Issues", *2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*.
- [14] Taherizadeh, S., Stankovski, V., (2017) "Incremental Learning from Multi-level Monitoring Data and Its Application to Component Based Software Engineering", *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*.



- [15] Wang, S., Wan, J., Li, D., Zhang, C., (2016) "Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook", *International Journal of Distributed Sensor Networks*.
- [16] Xhafa, F., Kilic, B., Krause, P., (2020) "Evaluation of IoT stream processing at edge computing layer for semantic data enrichment", *Future Generation Computer Systems*.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# DESARROLLO DE GEMELOS DIGITALES PARA LA SIMULACIÓN E INTEGRACIÓN DE ACTIVOS DE FABRICACIÓN EN LA INDUSTRIA 4.0

D. Orive\*, A. López\*, E. Estévez\*\*, A. Orive\*, M. Marcos\*

\*Dept. Ingeniería de Sistemas y Automática, UPV/EHU, España

e-mail: {dario.orive, alejandro.lopez, marga.marcos}@ehu.eus, aorive005@ikasle.ehu.eus

\*\*Dept. Ingeniería Electrónica y Automática EPS de Jaén, España

e-mail: eestevez@ujaen.es

## Resumen (12 ptos, negrita)

*El paradigma de la Industria 4.0 plantea el uso de herramientas y tecnologías que aumenten la eficiencia y la capacidad de adaptación de los procesos productivos para hacer frente a un mercado globalizado y con una alta competitividad. El concepto de Gemelo Digital es clave en el contexto de la Industria 4.0, y ha sido objeto de interés para la industria y la academia. Sin embargo, no hay consenso en la definición de este concepto, existiendo principalmente tres interpretaciones: la primera define un Gemelo Digital como un modelo de simulación de alta precisión; la segunda lo interpreta como una representación virtual del estado y el comportamiento de un activo de fabricación para su integración en la Industria 4.0; y la tercera, de reciente aparición, plantea la combinación de las anteriores. En este trabajo, se propone una metodología para la implementación de Gemelos Digitales que se ajusten a esta tercera interpretación. De esta forma, se proponen acciones concretas para la implementación de un Gemelo Digital que tenga capacidad de simular una estación y realizar su puesta en marcha virtual, además de facilitar su integración en la Industria 4.0.*

**Palabras clave:** Gemelo Digital, Industria 4.0, Puesta en Marcha Virtual, Sistemas de Fabricación Flexibles.

## 1 INTRODUCCIÓN

El paradigma de la cuarta revolución industrial, también denominada Industria 4.0, surge como respuesta ante la transformación hacia un mercado globalizado y con una alta competitividad. En un contexto en el que el cliente exige cada vez una mayor calidad y personalización de los productos, la Industria 4.0 plantea el uso de herramientas y tecnologías que aumenten la eficiencia y la capacidad de adaptación de los procesos productivos [6]. La Industria 4.0 basa el cumplimiento de estos objetivos en el valor añadido de los datos que se generan en

planta. De esta manera, propone el uso de una serie de tecnologías dedicadas a la adquisición y el procesamiento de datos y la posterior realimentación de acciones inferidas de ese análisis (inteligencia artificial, big data, simulación, sistemas ciber-físicos, internet de las cosas, etc.) [12].

Uno de los conceptos que mayor repercusión e impacto ha tenido en el contexto de la Industria 4.0 es el de Gemelo Digital, recibiendo gran atención durante los últimos años tanto por parte de la academia [1],[9] como de la industria [7], [5]. Este concepto consiste en una representación virtual de la realidad a lo largo de las diferentes fases del ciclo de vida de un producto, desde la concepción o idea inicial, pasando por los diferentes procesos de fabricación, trazabilidad, distribución y venta, hasta el reciclado final del mismo [4]. Sin embargo, no hay un consenso respecto al alcance y las funcionalidades que debe tener un Gemelo Digital.

Una corriente de pensamiento está alineada con la primera definición que se le dio al término Gemelo Digital en el año 2003, según la cual, un Gemelo Digital es un modelo de simulación de alta precisión utilizado para el análisis y optimización de procesos de fabricación [3]. Los autores alineados con esta postura defienden que las interfaces de entrada y salida de datos de un Gemelo Digital deben ser las mismas que las del proceso que replican, de forma que para el controlador la interacción con el proceso real y con su Gemelo Digital sea idéntica [1].

Además, revisiones más actualizadas de esta idea mantienen que los Gemelos Digitales deben ser de utilidad no solo para simulación *offline*, sino que se deben de utilizar de forma dinámica, utilizando la información adquirida del proceso real para fines como la adaptación de parámetros o el mantenimiento predictivo [10], incluso para llevar a cabo la puesta en marcha virtual del proceso, lo que permite reducir tiempo, recursos y costes a la hora de poner en marcha procesos o máquinas reales [7]. Esto implica que el Gemelo Digital no solo debe presentar las mismas interfaces de entrada y salida que el proceso real, sino

que, además, permita validar las soluciones de control y automatización a implementar en el proceso real.

Por otra parte, diferentes autores y organizaciones, como la plataforma alemana para la Industria 4.0, definen un Gemelo Digital como una representación digital de las características y los comportamientos/funcionalidades de una entidad de fábrica, generalmente de un activo de planta (p.ej., un robot industrial) [2]. Esta aproximación está muy ligada al concepto de los sistemas ciber-físicos, formado por una parte física (un activo de planta), y una parte virtual (es decir, su Gemelo Digital) que representa el estado de la parte física, permitiendo así su interacción con otros activos en un intercambio de información y servicios [13]. De esta manera, el Gemelo Digital se convierte en imprescindible para la integración de activos de fabricación dentro de arquitecturas para la Industria 4.0 [5].

Sin embargo, en los últimos años ha surgido una tercera vía, que plantea que ambas aproximaciones no solo son compatibles, sino que deberían ser integradas en un único concepto más amplio de Gemelo Digital [8]. De esta manera, se interpreta al Gemelo Digital como una entidad encargada de gestionar al activo físico, representando su estado y sus funcionalidades en arquitecturas 4.0, e integrando las capacidades de simulación y puesta en marcha virtual como recursos con los que poder ejecutar las decisiones resultantes de esta gestión [11]. Para ello, se considera que para cumplir con este objetivo un Gemelo Digital debe permitir lo siguiente:

- Definir y simular trayectorias, considerando el activo y su entorno.
- Definir y simular el control de la estación, y generar el código para la estación real.
- Definir y simular la automatización de la estación, y generar el código para la estación real.
- Definir y simular las capacidades de comunicación y procesamiento de datos para su participación en el intercambio de información y servicios con otros Gemelos Digitales.

En este trabajo se propone una metodología para la implementación de Gemelos Digitales que se ajusten a este concepto en el que se integran las capacidades de simulación y gestión de activos.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: el apartado 2 describe las herramientas para el desarrollo de gemelos digitales y su integración en la Industria 4.0; el apartado 3 presenta un caso de estudio; finalmente, el apartado 4 cierra el trabajo con las conclusiones de los autores.

## 2 SIMULACIÓN E INTEGRACIÓN DE ACTIVOS INDUSTRIALES

En la sección anterior, se ha comprobado que el concepto de Gemelo Digital ha sido interpretado de múltiples maneras en la literatura y la industria, dando lugar a diferentes aproximaciones. La implementación final de un Gemelo Digital, así como el conjunto de herramientas utilizadas para su desarrollo, varían en gran medida dependiendo de los objetivos que se persiguen con el mismo.

Una vez definido el concepto de Gemelo Digital que se desea implementar, en primer lugar hay que definir las pautas para poder desarrollarlo. El siguiente paso consistirá en la elección de herramientas adecuadas para implementar el Gemelo Digital deseado, atendiendo a la integridad de la solución. Finalmente, se concreta cómo llevar a cabo las pautas propuestas para el desarrollo de Gemelos Digitales utilizando las herramientas seleccionadas.

### 2.1 ACCIONES PARA EL DESARROLLO DEL GEMELO DIGITAL

La implementación de un Gemelo Digital puede resultar compleja, debido a la diversidad de funcionalidades que debe soportar para cumplir con los requisitos que se han identificado en la introducción. Para simplificar esa tarea, los autores proponen dividir la implementación en una serie de acciones concretas:

- Modelado de la estación: el primer paso consiste en la generación del modelo de simulación de la estación. De acuerdo con los requisitos que se han definido, este modelo tiene que permitir la generación de trayectorias y del código de control del activo.
- Proyecto de automatización: Una vez creado el modelo de simulación de la estación, el siguiente paso es generar un proyecto de automatización para el control de este. La lógica de este proyecto de automatización deberá ser válida para el Gemelo Digital o para el activo de fabricación real.
- Integración en arquitecturas para la Industria 4.0: Por último, hay que dotar al proyecto de automatización de recursos para procesar los datos que se reciben del proceso (sea el proceso real o el simulado), así como de la capacidad de compartir esos datos con otros activos de la fábrica mediante protocolos de comunicación de uso habitual en la Industria 4.0 (OPC UA, MQTT, etc.).

### 2.2 ELECCIÓN DE HERRAMIENTAS

Para poder poner en práctica las pautas del subapartado anterior, resulta necesaria la interacción y cooperación de diferentes herramientas software. Esta distribución permite un tratamiento individualizado de

los diferentes requisitos, utilizando la herramienta apropiada en cada caso. Sin embargo, también implica que las diferentes herramientas utilizadas puedan trabajar de forma integrada, permitiendo simular las diferentes funcionalidades del Gemelo Digital de manera conjunta.

Teniendo en cuenta estos factores, se ha decidido utilizar herramientas de la plataforma PLM de Siemens como base para el concepto de Gemelo Digital propuesto por los autores. En concreto, se han considerado las siguientes herramientas (Figura 1):

- *Tecnomatix Process Simulate (PS)*: permite el desarrollo del Gemelo Digital, la definición y simulación de trayectorias, así como la definición, generación y simulación del código de control. También facilita un API para la simulación con otras herramientas.
- *TIA Portal*: permite generar proyectos de automatización.
- *PLCSIM Advanced*: permite ejecutar en simulación el código de un proyecto de automatización desarrollado en TIA Portal.
- *SIEMENS ODK 1500S*: permite la invocación de funciones ejecutadas sobre un sistema operativo Windows desde un proyecto de automatización desarrollado en *TIA Portal*, permitiendo definir, generar y simular el código para hacer procesamiento y envío de datos hacia otros activos de fabricación.

## 2.3 PARTICULARIZACIÓN DE LAS ACCIONES

En este apartado se particularizan las pautas para implementar Gemelos Digitales definidas en el apartado 2.1 utilizando las herramientas definidas en el apartado 2.2.

### 2.3.1 Modelado de la estación

#### PASO 1: Construcción del Gemelo Digital en Tecnomatix PS.

Una vez definida la estación de trabajo que se quiere desarrollar y el equipamiento que la compone, el primer paso para construir su Gemelo Digital es disponer de los modelos CAD de todos los componentes que la conforman.

Tras introducir el propio activo que realiza las operaciones, el siguiente elemento en orden de relevancia es la herramienta de trabajo del activo. Las herramientas requieren de un Punto Central de la Herramienta (o TCP), el cual determina el posicionamiento del activo a la hora de realizar operaciones.

Finalmente, se deben ubicar el resto de los elementos del escenario, definiendo las zonas de entrada, montaje y salida, así como los alimentadores de piezas.

Hay que indicar que la validación del escenario real a partir de lo definido en el Gemelo Digital no es algo inmediato ni fácil de conseguir. Durante el desarrollo del Gemelo Digital hay que hacer una serie de pruebas y comprobaciones de ciertos movimientos a puntos importantes del escenario que permitan asegurar la máxima similitud del Gemelo Digital respecto de la estación real. Si esto no se hace de una forma precisa, se presentarán problemas cuando lo desarrollado y validado en el Gemelo Digital se vuelque a los controladores de la estación real. A pesar ello, siempre habrá que hacer pequeños ajustes al pasar del mundo virtual al real, pero cuanto más precisa sea esta validación previa, menos ajustes habrá que realizar.

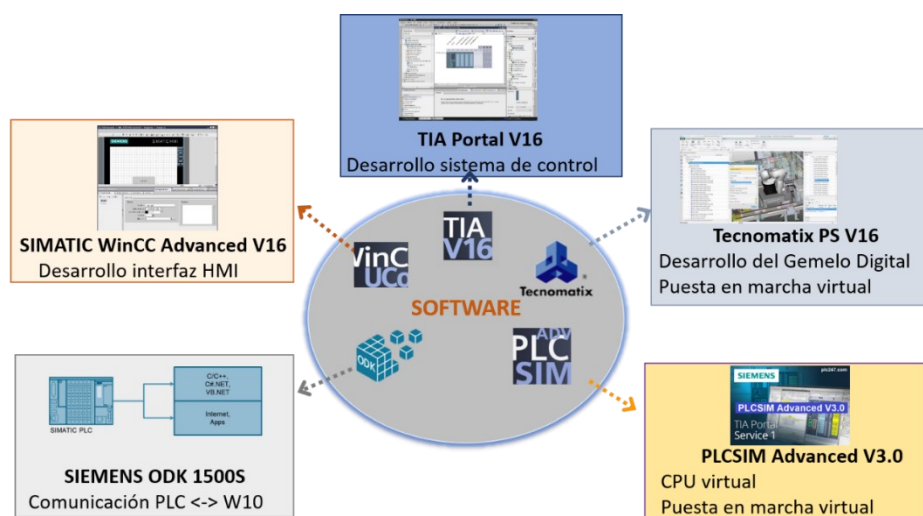


Figura 1: Integración de herramientas para el desarrollo de un Gemelo Digital

### PASO 2: Estructura del modelo del Gemelo Digital en Tecnomatix PS.

Después de introducir los componentes de la estación en el Gemelo Digital, hay que generar las trayectorias de las operaciones y el flujo de materiales.

Para la generación de trayectorias hay que definir qué tipo de CPU virtual se va a utilizar en la simulación del Gemelo Digital. Existe la opción de una CPU genérica, en cuyo caso el código generado para las trayectorias es específico de la herramienta Tecnomatix PS. Como alternativa, se puede seleccionar la CPU virtual del activo que se esté utilizando en el Gemelo Digital, en cuyo caso, el código generado para las trayectorias se podrá utilizar en el control del activo en la estación real.

Por otra parte, para realizar simulaciones con el Gemelo Digital es necesaria la definición del flujo de materiales o *Material Flow*. En esta parte del modelado se definen los caminos que pueden seguir las piezas que se manipulan en el gemelo, durante la ejecución de los servicios.

#### **2.3.2 Proyecto de automatización del Gemelo Digital desde PLC**

### PASO 3: Estructura del programa de automatización de la estación en TIA Portal.

Tras desarrollar el Gemelo Digital en Tecnomatix PS y validar el programa de control del activo en simulación, hay que realizar el programa de control del PLC que permita seleccionar en cada caso las operaciones a realizar en función del servicio solicitado a la estación. Este programa de control debe ser válido para la simulación con *Software in the Loop* (SiL) y para su ejecución en el PLC real en el control de la estación real. El proyecto de control de la estación se implementa en la herramienta de ingeniería TIA Portal, y para la simulación con el Gemelo Digital se ejecuta en la CPU virtual PLCSIM Advanced.

#### **2.3.3 Integración en arquitecturas para la Industria 4.0**

### PASO 4: Comunicación PLC-W10, mediante SIEMENS ODK 1500S.

Como se ha explicado anteriormente, el uso de la librería SIEMENS ODK 1500S permite ejecutar desde un proyecto de automatización funciones que se ejecuten sobre un sistema operativo Windows. Esto permite la utilización de código desarrollado en lenguajes de alto nivel (C++, C#, VB). Este tipo de funciones aportan una gran flexibilidad a la hora de procesar y enviar los datos con diferentes protocolos

de comunicación. Por este motivo, se ha optado por esta herramienta para la publicación de datos.

## **3 CASO DE ESTUDIO**

En esta sección se presenta un caso de estudio en el que se muestra cómo un Gemelo Digital desarrollado según los pasos propuestos por los autores se utiliza para realizar la puesta en marcha virtual de una estación de la que se recogen datos de proceso y se publican en una base de datos mediante el protocolo MQTT para su posterior análisis.

### **3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN**

La estación de trabajo replicada en este caso de estudio mediante un Gemelo Digital ha sido diseñada para realizar el ensamblado de un conjunto de piezas, fabricadas mediante impresión 3D, que emulan un eje de motores paso a paso. Este conjunto se compone de cinco partes: base, rodamiento, bulón, tapa interior, y tapa exterior (Figura 2).

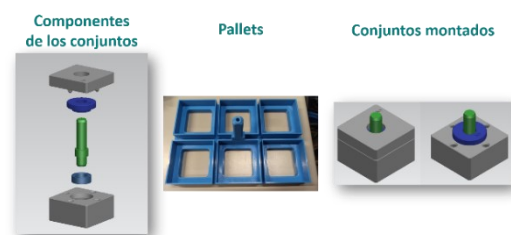


Figura 2: Detalle del producto fabricado en la estación del caso de uso

La estación recibirá peticiones de operaciones, o servicios, que pueden implicar el montaje total o parcial del conjunto. Cada servicio identifica una situación del producto a la entrada en la estación y a la situación a la salida de esta. Para el producto fabricado en esta estación, se han identificado 10 servicios que se indican en la tabla 1.

De cara a la ejecución de un servicio, la estación recibe pallets a su entrada con un número variable de ítems que puede oscilar entre una y seis piezas. El servicio se ejecuta para todos los conjuntos de un pallet o pedido, por lo que todos los conjuntos tienen que llegar en la misma situación.

Como se puede ver en la tabla 1, para el servicio número 4, en el pallet llega solo la pieza base del conjunto y se colocan en la estación el resto de los componentes, hasta finalizar el montaje. Sin embargo, en el servicio 6, en el pallet llegan conjuntos con la base y el rodamiento desde una estación previa y, se colocan el bulón y la tapa blanca, dejando los conjuntos en la zona de salida a falta de colocar la tapa exterior en otra estación.

Tabla 1: Detalle de los servicios de fabricación ofrecidos por la estación

Servicios	Situación de entrada	Tareas a realizar	
1	Base	Rodamiento	
2		Rodamiento	Bulón
3		Rodamiento	Bulón
		Tapa Interior	
4		Rodamiento	Bulón
	Base + Rodamiento	Tapa Interior	Tapa Exterior
5		Bulón	
6		Bulón	Tapa Interior
7	Base + Rodamiento + Bulón	Bulón	Tapa Interior
		Tapa Exterior	
8	Base + Rodamiento + Bulón	Tapa Interior	
9		Tapa Interior	Tapa Exterior
10	Base + Rodamiento + Bulón + Tapa Interior	Tapa Exterior	

De cara a la ejecución de un servicio, la estación recibe pallets a su entrada con un número variable de ítems que puede oscilar entre una y seis conjuntos. El servicio se ejecuta para todos los conjuntos de un pallet o pedido, por lo que todos los conjuntos tienen que llegar en la misma situación a la estación.

Como se puede ver en la tabla 1, p.ej., para el servicio número 4, en el pallet llega solo la pieza base del conjunto y se colocan en la estación el resto de los componentes, hasta finalizar el montaje. Sin embargo, en el servicio 6, en el pallet llegan conjuntos con la base y el rodamiento desde una estación previa y, se colocan el bulón y la tapa blanca, dejando los conjuntos en la zona de salida a falta de colocar la tapa exterior en otra estación.

Para realizar estos servicios de fabricación, la estación cuenta con un robot industrial KUKA KR3 R540 AGILUS, controlado mediante una controladora KR C4 COMPACT. Este robot está equipado con una

herramienta terminal equipada con dos pinzas que permiten la manipulación de las distintas piezas del conjunto. Estas pinzas son controladas por el robot mediante un nodo EtherCAT con E/S digitales.

A su vez, el robot es controlado por un PLC Open Controller de Siemens, modelo ET200 SP PC2. Este equipo tiene la particularidad de estar equipado con un controlador de software PLC convencional, y tener además un sistema operativo Windows 10 embebido sobre el que se pueden desplegar funcionalidades con mayor capacidad de procesamiento.

El robot está ubicado sobre una mesa de aluminio con los dispositivos de maniobra y protección de las acometidas eléctrica y neumática. Sobre esta mesa, la estación cuenta con dos posiciones de entrada, por las que se reciben las materias primas (base y tapa exterior) y/o productos semielaborados sobre los que realizar un servicio de fabricación, y con una posición salida, donde se dejan los productos acabados o semielaborados después de realizar el servicio demandado. Además, la estación también cuenta con almacenes de materiales consumibles (rodamiento, bulón y tapa interior), necesarios para completar el ensamblado del conjunto (Figura 3).

### 3.2 PUESTA EN MARCHA VIRTUAL CON SOFTWARE IN THE LOOP (SiL)

Una vez desarrollado el Gemelo Digital de la estación y el programa de control de la misma para un PLC, el siguiente paso es realizar simulaciones entre ambas partes para validar las prestaciones de ambas partes en simulación, antes de utilizarlo en la estación real. Esta simulación se puede realizar con *Software in the Loop* (SiL) o con *Hardware in the Loop* (HiL). En este caso, se ha optado por hacerlo con (SiL).

En la simulación con SiL se lleva a cabo en una única plataforma PC en Windows 10, e intervienen varias herramientas software:

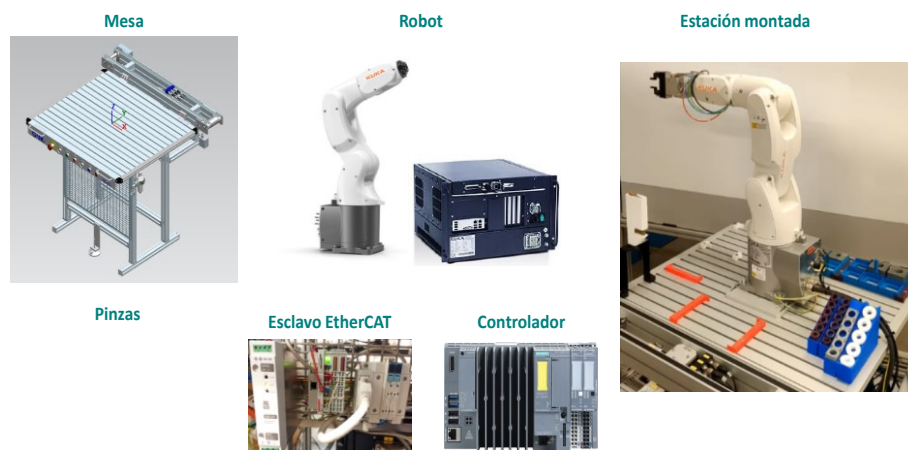


Figura 3: Detalle de los recursos utilizados en el caso de estudio



- TIA Portal V16: Herramienta en la que se ha desarrollado el proyecto de control de la estación y que habrá que utilizar para observar y forzar valores de variables del proceso, así como para depurar el programa de control.

- PLCSIM Advanced V3.0: CPU virtual de PLC que permite ejecutar programas de PLC.

- Visual Studio: Herramienta en la que se ha desarrollado un programa que adapta los datos (en este caso, se transforma el formato de fechas recibido desde el PLC al formato esperado en la base de datos), y otro programa para la publicación de los datos generados en fabricación en la base de datos, utilizando la plataforma ODK de TIA Portal. La aplicación desarrollada en Visual Studio con ODK, genera 2 ficheros que hay que instalar en carpetas concretas de Windows 10. El fichero \*.scl permite integrar las aplicaciones en el código de control. El fichero \*.dll contiene la aplicación ODK para comunicarse con el entorno Windows 10, que se instalará en la instancia del PLC virtual de PLCSIM Advanced. El código de control se carga en el PLC virtual que, una vez mapeadas las E/S con Tecnomatix PS, permite llevar a cabo la puesta en marcha virtual.

- Tecnomatix PS: Por último, hay que poner en simulación el gemelo digital desarrollado en Tecnomatix PS. Hay que realizar el mapeado de E/S del PLC virtual con S/E del modelo en Tecnomatix PS (figura 4)

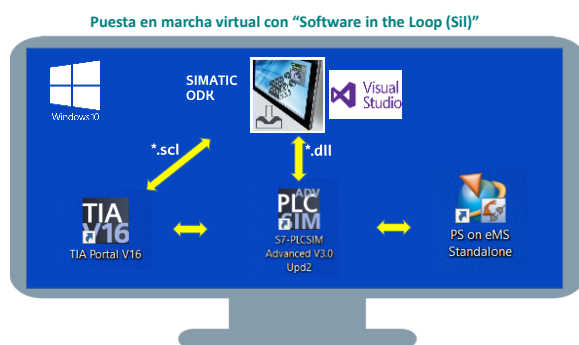


Figura 4: Detalle de la interacción entre las herramientas utilizadas para la puesta en marcha virtual

Durante esta fase se han ajustado valores y se ha depurado el software hasta que se ha validado el programa de control.

### 3.3 PUESTA EN SERVICIO DE LA ESTACIÓN REAL

Una vez validados los programas del robot y del PLC en simulación con SiL, la última operación que hay

que realizar es poner en funcionamiento la estación real utilizando los proyectos utilizados en simulación. Esta operación se ha realizado en los siguientes pasos.

#### PASO 1: Proyecto de control del robot Kuka.

El proyecto de control de un robot Kuka consta de dos partes; la configuración del hardware y el software de la aplicación. Los programas de control de un robot Kuka están estructurados o divididos en 2 ficheros. El \*.DAT que contiene la información sobre los puntos de las trayectorias y el \*.SCR en el que se encuentran las instrucciones de movimiento del robot.

Indicar que, si en Tecnomatix PS se ha seleccionado la CPU del robot de Kuka, se generan estos dos ficheros en la fase de creación de las trayectorias del gemelo digital. Los ficheros así generados, se pueden utilizar en el robot real sin tener que realizar ninguna modificación.

#### PASO 2: Montaje del sistema de control real.

Para poner en servicio la estación real con el robot, es necesario disponer de un conjunto de dispositivos, un conjunto de herramientas software y la comunicación entre todos ellos (ver figura 5).

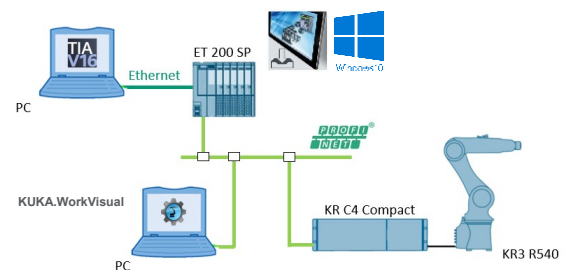


Figura 5: Sistema de control de la célula

En la Puesta en marcha real, el proyecto de control de PLC validado en la puesta en marcha virtual, se carga en el PLC ET 200 SP, en el cual se ha instalado previamente el fichero \*.dll, en la parte de Windows 10, para la comunicación ODK. El PLC se comunica con la Unidad de Control del Robot, vía Profinet IO. El PLC tiene el rol de Controlado IO y el robot tiene rol de Dispositivo IO, en Profinet. Las señales que se intercambian entre ambos dispositivos se configuran en un proyecto con la herramienta de ingeniería KUKA.WorkVisual. Utilizando la herramienta KUKA.WorkVisual se han copiado en la Unidad de Control del Robot los ficheros \*.DAT y \*.SRC generados en simulación en Tecnomatix PS.

## 4 CONCLUSIONES

Este artículo se centra en el concepto de Gemelo Digital debido a su relevancia e impacto en el contexto

de la Industria 4.0. Se revisan de forma breve las diferentes interpretaciones que recibe el término, resultando la más interesante para los autores aquella que plantea combinar las capacidades de simulación del activo con las de representación y gestión de este para integrarlo en arquitecturas para la Industria 4.0.

En este contexto, se ha realizado una propuesta para la implementación de Gemelos Digitales que sigan esta aproximación, para lo que se ha llevado a cabo un análisis de los pasos a realizar y las herramientas adecuadas para ello. En opinión de los autores, la principal ventaja del concepto propuesto es la facilidad de integración entre las diferentes herramientas necesarias para desarrollar el Gemelo Digital. Si bien es cierto que se trata de una solución ligada a un único fabricante, en este caso Siemens, se ha considerado que resulta de utilidad, dado que se trata de un fabricante con un gran peso específico en la industria.

#### Agradecimientos

Este trabajo está financiado por MCIU/AEI/FEDER, UE (proyecto RTI2018-096116-B-I00) y GV/EJ (proyecto IT1324-19).

#### English summary

## DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS TO SIMULATE AND INTEGRATE MANUFACTURING ASSETS IN THE INDUSTRY 4.0

#### Abstract

*The paradigm of Industry 4.0 proposes the use of technologies and tools to improve the efficiency and the adaptability of manufacturing processes to face a globalized and competitive market. The Digital Twin is a key concept within the context of Industry 4.0 and has received great attention from both industry and academia. However, there is a lack of consensus in the definition of this concept. There are mainly three interpretations: the first defines the Digital Twin as a high precision simulation model; the second interprets it as a virtual representation of the state and the behavior of manufacturing assets for its integration into Industry 4.0; and the third, of recent appearance, which proposes the combination of the previous ones. In this work, it is proposed a methodology to implement Digital Twins according to this third interpretation. Therefore, the authors propose concrete actions to implement a Digital Twin with the ability to simulate an station and perform its virtual commissioning, besides facilitating its integration in Industry 4.0.*

**Keywords:** Digital Twin, Industry 4.0, Virtual Commissioning, Flexible Manufacturing Systems.

#### Referencias

- [1] Gabor, T., Belzner, L., Kiermeier, M., Beck, M.T., Neitz, A., (2016) "A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems", *2016 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC)*, pp. 374-379.
- [2] Glossary, disponible en <https://www.platform-i40.de/PI40/Navigation/EN/Industrie40/Glossary/glossary.html> (visitado el 16/06/2021).
- [3] Grieves, M., (2015) Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication.
- [4] Orive, D., Iriondo, N., Casquero, O., Marcos, M., (2019) "Hacia la puesta en marcha virtual de células robotizadas basada en gemelo digital", *XL Jornadas de Automática*, pp. 147-154.
- [5] Platenius-Mohr, M., Malakuti, S., Grüner, S., Goldsch, T., (2019) "Interoperable Digital Twins in IIoT Systems by Transformation of Information Models: A Case Study with Asset Administration Shell", *Proceedings of the 9th International Conference on the Internet of Things*, pp 1-8.
- [6] Santos, C., Mehra, A., Barros, A.C., Araújo, M., Ares, E., (2017) Towards Industry 4.0: an overview of European strategic roadmaps, *Procedia Manufacturing*.
- [7] Schroeder, G., Steinmetz, C., Pereira, C.E., Muller, I., García, N., Espindola, D., Rodrigues, R., (2019) "Visualising the digital twin using web services and augmented reality", *2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pp 522-527.
- [8] Tao, F., Qi, Q., Wang, L., Nee, A.Y.C., (2019) Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison, *Engineering*.
- [9] Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A.Y.C., (2019) Digital Twin in Industry: State-of-the-Art, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.
- [10] Vachálek, J., Bartalský, L., Rovný, O., Šišmišová, D., Morhác, M., Lokšík, M., Hoffmeister, M., Zimmermann, P., (2017) "The

- digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept”, *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*, pp. 258-262.
- [11] Wagner, C., Grothoff, J., Epple, U., Drath, R., Malakuti, S., Grüner, S., Hoffmeister, M., Zimermann, P., (2017) “The role of the Industry 4.0 asset administration shell and the digital twin during the life cycle of a plant”, *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pp. 1-8.
- [12] Wang, S., Wan, J., Li, D., Zhang, C., (2016) Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook, *International Journal of Distributed Sensor Networks*.
- [13] Weyer, S., Meyer, T., Ohmer, M., Gorecky, D., Zühlke, D., (2016) Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: an Example from the Automotive Industry, *IFAC-PapersOnLine*.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative  
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# TRAZABILIDAD DE LA PRODUCCIÓN BASADA EN AGENTES INDUSTRIALES

A. López\*, E. Estévez\*\*, M. Marcos\*

\*Dept. Ingeniería de Sistemas y Automática, UPV/EHU, España  
e-mail: {alejandro.lopez, marga.marcos}@ehu.eus

\*\*Dept. Ingeniería Electrónica y Automática EPS de Jaén, España  
e-mail: eestevez@ujaen.es

## Resumen

*Uno de los principios fundamentales de la Industria 4.0 consiste en poner en valor los datos que se generan en una fábrica para extraer rendimiento de ellos. Estos datos pueden servir a diferentes finalidades, siendo la trazabilidad una de las más relevantes porque se demanda a todos los niveles, desde el cliente hasta el nivel de gestión de la empresa. Los agentes industriales suponen una buena alternativa para implementar la trazabilidad en planta por su capacidad de colaborar intercambiando información para cumplir sus objetivos. En este artículo, los autores proponen una solución basada en agentes industriales para realizar la trazabilidad en tiempo real de la producción a diferentes niveles (lote de fabricación, pedido de cliente, y fábrica) de forma desacoplada, para optimizar la gestión de la información y los servicios derivados de la trazabilidad a cada uno de los niveles.*

**Palabras clave:** Industria 4.0, Trazabilidad, Sistemas Ciber-Físicos, Agentes Industriales, Sistemas de Fabricación Flexible.

## 1 INTRODUCCIÓN

La industria se encuentra en un momento de profunda transformación que diferentes organizaciones coinciden en identificar como la cuarta revolución industrial o Industria 4.0 [2]. Ante la globalización de los mercados, la incertidumbre económica y la exigencia cada vez mayor de los clientes, el paradigma de la Industria 4.0 propone el uso de tecnologías como inteligencia artificial, big data, simulación, sistemas ciber-físicos o el internet de las cosas aplicado a la industria para conseguir sistemas de fabricación inteligentes y descentralizados [13].

Uno de los principios fundamentales de la Industria 4.0 consiste en poner en valor los datos que se generan en una fábrica para extraer rendimiento de ellos. La información obtenida de la fábrica puede tener diferentes finalidades, como la optimización de un

proceso [16], el mantenimiento de la maquinaria [11], o la trazabilidad de los productos a lo largo de todo su ciclo de vida [12]. Este último aspecto es sensible porque se trata de uno de los más demandados en la actualidad por los clientes, que quieren hacer un seguimiento estrecho de los productos que han encargado, pero a la vez es relevante para los operarios a nivel de proceso, y para las fábricas a nivel de planificación.

Una buena trazabilidad requiere de gran agilidad a la hora de intercambiar datos entre los diferentes activos de la fábrica que generan (e.g., máquinas, transportes, etc.) o consumen (e.g., un MES u otras entidades vinculadas a la monitorización del proceso) datos. Estos requisitos se pueden cumplir mediante la implementación de arquitecturas basadas en el concepto de sistemas ciber-físicos. Un sistema ciber-físico es un componente formado por una parte física (por ejemplo, un robot industrial), que ofrece y demanda servicios a su entorno, y una parte virtual, que representa a la parte física en el sistema de activos interconectados y le permite interactuar con otros componentes de la fábrica. Los sistemas ciber-físicos deben garantizar una serie de funcionalidades: interoperabilidad entre los participantes en el sistema (R1); identificación del componente (R2); representación del estado de la parte física (R3) y accesibilidad de otros componentes a esa información (R4); integración entre sus partes virtual y física (R5); y, por último, gestión de los servicios que ofrece (R6) [19].

Los sistemas multi-agente son una tecnología ampliamente reconocida en la literatura para implementar arquitecturas basadas en sistemas ciber-físicos, gracias a su capacidad para competir y colaborar con otros agentes del sistema para conseguir sus objetivos [7]. El uso de sistemas multi-agente solo garantiza un cumplimiento parcial de estos requisitos (R1-R4), ya que un agente es únicamente una entidad software, y no contempla mecanismos específicos para la integración con activos industriales y su gestión. De esta necesidad surge el concepto de agente industrial. Un agente industrial es un agente que integra un activo físico [5], por lo que satisface los

requisitos restantes de integración (R5) y gestión (R6) del activo.

En este artículo, los autores proponen una solución basada en agentes industriales para proporcionar trazabilidad en el proceso de fabricación a tres niveles: trazabilidad orientada al producto o lote de productos que constituyen una unidad indivisible a lo largo del proceso; trazabilidad orientada al cliente, monitorizando el conjunto de lotes que constituyen una orden o pedido; y trazabilidad orientada a la fábrica, que registra toda la información relativa a un plan de fabricación. Se propone que la trazabilidad sea gestionada a cada uno de los niveles por agentes industriales con una dependencia jerárquica entre sí. De esta manera, la gestión de la información y los servicios derivados de la trazabilidad a cada uno de los niveles queda desacoplada, permitiendo una gestión más eficiente de la información que circula por la fábrica.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: el apartado 2 revisa otros trabajos basados en tecnología de agentes orientados a trazabilidad de la producción; el apartado 3 presenta la solución desarrollada por los autores; el apartado 4 ilustra esta propuesta mediante un caso de estudio que consiste en un proceso de ensamblado; finalmente, el apartado 5 cierra el trabajo con las conclusiones de los autores y las líneas de trabajo a futuro.

## 2 TRABAJOS RELACIONADOS

El objetivo de este apartado es revisar trabajos que presenten arquitecturas basadas en sistemas multi-agente, con especial atención al trato que dan a la problemática de la trazabilidad.

Los sistemas multi-agente han sido utilizados con frecuencia para el desarrollo de sistemas de fabricación flexibles con inteligencia distribuida a lo largo de las dos últimas décadas, presentando algunas arquitecturas de referencia como PROSA [17], o ADACOR [8], y más recientemente ejemplos como CASOA [15] o la arquitectura propuesta por Cruz Salazar et al. [3]. Estas soluciones proponen diferentes conjuntos de agentes que desarrollan tareas específicas e interactúan con el resto de agentes en el sistema para alcanzar sus objetivos [14].

La mayoría de estos trabajos comparten la presencia de un par de agentes básicos para gestionar un proceso de fabricación: un tipo de agente dedicado a representar los servicios y necesidades de los recursos disponibles en la fábrica (suele aparecer como Resource Agent –RA- o bien como Machine Agent –MA-), y otro dedicado a gestionar el producto o lote de productos (normalmente denominado Product Agent –PA-) [4],[6]. El RA se encarga de interactuar

con su activo, representando su estado y ofreciendo sus servicios al resto de agentes del sistema. Bennulf et al. en [1] proponen un RA que se postula en las negociaciones de los servicios que puede ofrecer y gestiona una pila con las tareas que tiene asignadas. Esta propuesta de RA es similar en la mayoría de los trabajos analizados [4], [6].

Por otra parte, PA se dedica a realizar la trazabilidad de su activo, que puede tener diferente granularidad dependiendo de cada caso. Dentro de este tipo de agentes, se puede distinguir entre las soluciones pasivas (i.e., aquellas en las que el PA simplemente recibe información y la procesa) [1] y las activas, en las que el PA guía el proceso de fabricación, identificando los recursos de los que dispone en su entorno para completar el siguiente paso en su proceso de fabricación [4], [10]. También se puede diferenciar entre aquellas soluciones que realizan la trazabilidad únicamente a nivel de producto [1], [6], y las que tienen trazabilidad a más niveles. Vrba et al. [18] plantean, además del PA, un agente de orden de fabricación (OA), que monitoriza una orden, entendida como un lote o conjunto de piezas, recibidos desde niveles superiores del sistema. Munkelt y Krockert [10] proponen una jerarquía similar, en la que se crea un agente asociado a cada orden de compra (OA), y de dicho agente dependen los agentes asociados a cada producto que conforma el pedido (PA).

Del análisis de estos trabajos se concluye que las soluciones basadas en sistemas multi-agente suelen contar con dos principales tipos de agentes: RA y PA. Además, se han encontrado trabajos que también plantean desacoplar la trazabilidad a diferentes niveles. Sin embargo, estas soluciones plantean una trazabilidad a dos niveles (producto y lote/pedido), mientras que, en opinión de los autores, un tercer nivel ligado al plan de fábrica resultaría beneficioso cuando fuera beneficioso adaptar el plan de fabricación a eventos sobrevenidos, como, por ejemplo, el fallo de algún activo de fabricación. Una trazabilidad basada en agentes a este nivel permite aumentar la agilidad tanto en la interacción con otras entidades de la fábrica como en la capacidad de toma de decisión, pudiendo asumir algunas de las funcionalidades tradicionalmente asociadas al MES.

## 3 PROPUESTA PARA LA TRAZABILIDAD DE LA PRODUCCIÓN

Este apartado presenta la propuesta de los autores para llevar a cabo una trazabilidad de la fabricación a tres niveles: producto/lote, cliente, y fábrica. En ella se detalla la relación entre los agentes asociados a cada uno de los niveles de trazabilidad y sus interacciones con los agentes recurso de la fábrica.

### 3.1 AGENTES RECURSO

Se han contemplado tres tipos diferentes en función del tipo de servicios que ofrecen, para poder gestionar la fábrica: máquinas (Machine Agent –MA-, ofrecen servicios de fabricación), transportes (Transport Agent –TA-, ofrecen servicios de transporte) y nodos de procesamiento (Processing Node Agent –PNA-, ofrecen capacidad de alojar a otros agentes, ejecutar servicios de procesamiento de datos, etc.). Estos agentes son de carácter permanente, por lo que permanecen en funcionamiento de forma ininterrumpida desde su puesta en marcha hasta que el recurso al que están asociados sufre cualquier contingencia.

Durante el desarrollo de un proceso de fabricación, los MA notifican al agente de trazabilidad que corresponda los resultados de sus servicios de fabricación. Por otra parte, los agentes de trazabilidad se encargan de solicitar servicios de transporte a los TA para asegurarse de que los servicios de fabricación que necesitan se pueden ejecutar en tiempo y forma según lo planeado. Estas interacciones se analizan con mayor detalle en el subapartado 3.2.

La integración de estos agentes con sus activos está estructurada de acuerdo con una arquitectura de capas que permiten abstraer los diferentes aspectos implicados en la integración: una capa superior implementada en el agente, encargada de gestionar las interacciones con otros agentes del sistema; una capa intermedia, también implementada en el agente, que se encarga de gestionar los datos obtenidos del activo y su accesibilidad por parte de otros agentes; y dos capas inferiores, implementadas en el activo, que implementan la automatización y el control del este, respectivamente. Esta arquitectura ha sido propuesta en un trabajo anterior de los autores [9].

### 3.2 AGENTES DE TRAZABILIDAD

Como se ha explicado antes, se han definido tres niveles diferentes de granularidad en la trazabilidad, por lo que cada uno de esos niveles tiene su propio agente: la trazabilidad a nivel producto/lote la realiza el agente lote (Batch Agent –BA-), a nivel cliente el agente pedido (Order Agent –OA-) y a nivel de fábrica, el agente plan de fabricación (Manufacturing Plan Agent –MPA-).

A diferencia de los agentes recurso, estos agentes son de carácter transitorio: son creados cuando se inicia el proceso de fabricación al que están ligados, y posteriormente terminan su ejecución una vez que tienen toda la información del proceso. Además, muestran una dependencia jerárquica entre sí, de forma que un conjunto de lotes conforma un pedido, y un conjunto de pedidos forma un plan de fabricación.

De esta manera, los agentes de un nivel se encargan de gestionar la puesta en marcha de sus agentes hijo (los agentes del nivel inmediatamente inferior que dependen de él), en sentido descendente. Por el contrario, el flujo de la información es en sentido ascendente, de modo que los BA son los únicos que interactúan directamente con los agentes recurso de la fábrica, y éstos se encargan de reportar la información a sus agentes padre (el OA del que dependa cada uno y éstos a su vez al MPA).

La Figura 1 ilustra mediante un diagrama de secuencia el flujo de comunicaciones entre los agentes de trazabilidad. Como se ha explicado antes, un BA puede realizar la trazabilidad de un lote de productos o de un único producto (lote unitario). El proceso de fabricación monitorizado por un BA se corresponde con una secuencia de uno o más servicios de fabricación, que pueden ser realizados por una o varias máquinas, gestionadas por sus MA. Durante la ejecución de un servicio, el MA envía un mensaje al BA correspondiente cada vez que se procesa un ítem (1), y el BA actualiza su estado con la información recibida (2). Esta dinámica se repite hasta que el servicio se ha completado.

Una vez completado el servicio, el MA actualiza su listado de servicios a realizar (3) y notifica al BA de que el servicio ha concluido. Cada vez que el BA tiene toda la información sobre un servicio de fabricación, esta es enviada al OA (4). De este modo, el estado del OA se actualiza cada vez que un lote completo ha completado una etapa de su proceso de fabricación (5).

En caso de que queden servicios pendientes de realizar para completar el proceso de fabricación, el BA solicita una negociación entre los TA disponibles para trasladar el lote de productos desde la máquina en la que se encuentra hasta la máquina que debe realizar el siguiente servicio de fabricación (6). El TA ganador de la negociación informa al BA de que él es que va a proporcionar el servicio de fabricación (7). Una vez trasladado el lote, informa por un lado al BA de que se ha completado el servicio, y por otro al MA que tiene que realizar el siguiente servicio de que ya ha recibido el lote de productos (8). Cuando finaliza el proceso de fabricación, el BA que monitoriza este proceso informa al OA correspondiente y se auto elimina del sistema (9).

En el momento en que el OA tiene toda la información relativa a un lote (i.e., cada vez que se termina de fabricar un lote), envía esta información al MPA (10). Así, a este nivel la información se actualiza cada vez que un lote ha concluido su proceso de fabricación (11). Cuando todos los lotes que conforman un pedido se han completado, el OA que monitoriza este pedido informa al MPA y se auto elimina del sistema (12). Por último, cuando el MPA ha recibido la información



relativa a todos los pedidos que forman el plan de fabricación, el plan se da por concluido y el MPA también se auto elimina del sistema (13).

Cabe destacar que en esta secuencia solo se explican las interacciones entre los diferentes tipos de agentes,

pero no así el resto de las funcionalidades que pueden desarrollar cada uno de ellos, y que son dependientes del caso concreto, como se ilustra en el siguiente apartado de este trabajo.

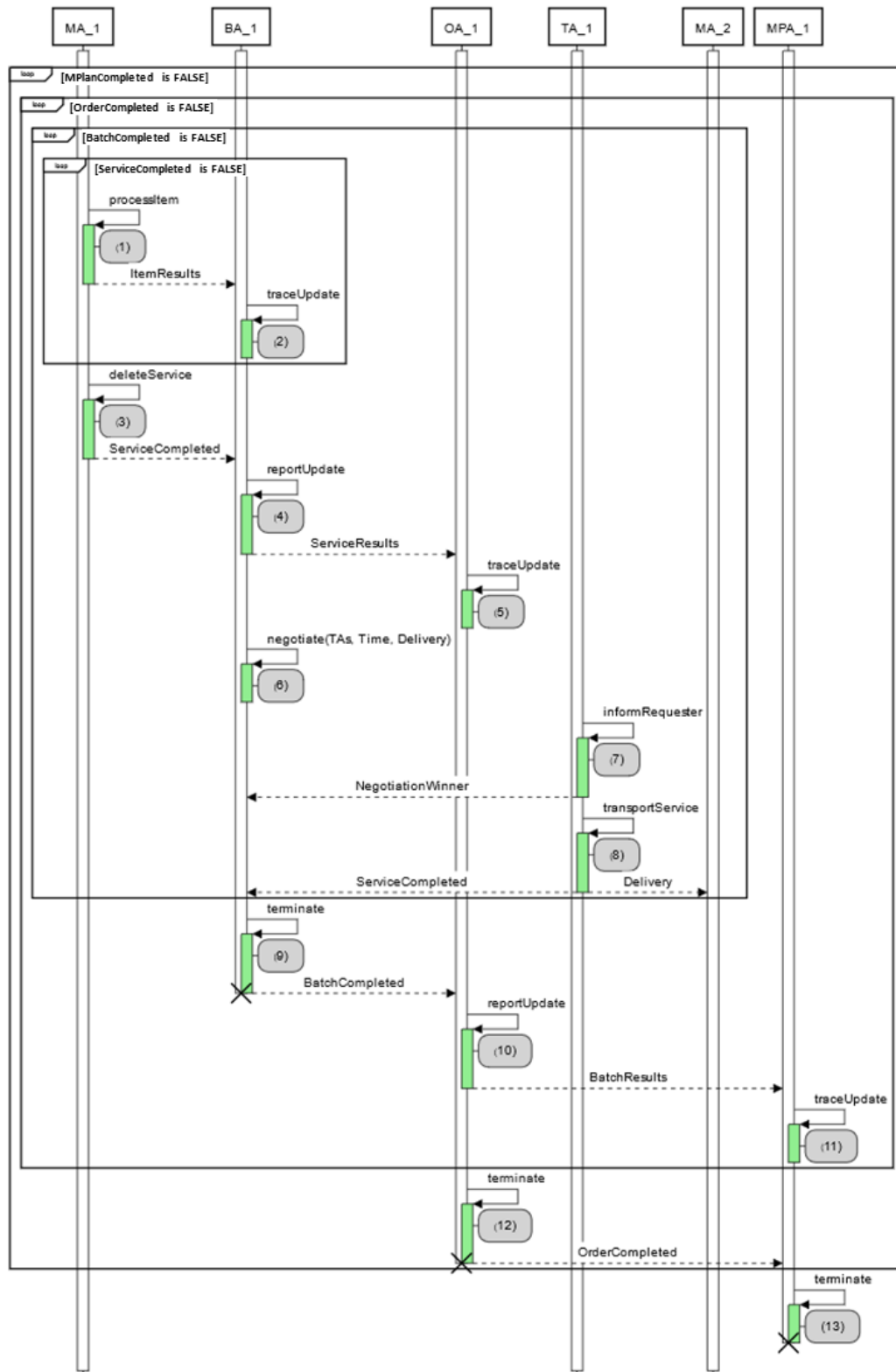


Figura 1 Secuencia de interacción entre los agentes industriales para la trazabilidad de la producción

## 4 CASO DE ESTUDIO

En este apartado se particulariza la solución de trazabilidad propuesta por los autores para monitorizar un proceso de fabricación en el que dos estaciones robotizadas trabajan en paralelo en operaciones ensamblado.

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL DEMOSTRADOR

El demostrador industrial utilizado en este caso de estudio se compone de los siguientes elementos:

- Estación de ensamblado real: Esta estación, representada en la Figura 2, consta de un robot KUKA KR 3 R540 que realiza el montaje de diferentes modelos de eje para motores paso a paso. Este robot está gestionado por un controlador compacto KUKA KR C4 y un controlador abierto Siemens SIMATIC ET 200SP. La particularidad de este dispositivo es que cuenta por un lado con un controlador de software que permite la ejecución de programas de automatización que cumplen con IEC 61131-3, y por otro con un entorno Windows que permite la ejecución de agentes.

- Gemelo digital: Se cuenta con una réplica virtual idéntica a la estación de trabajo de la Figura 2, desarrollada mediante la herramienta Tecnomatix Process Simulation de Siemens. Esta estación simulada se controla desde una instancia virtual de PLC generada mediante la herramienta PLCSIM Advanced, por lo que la integración de esta estación con su respectivo MA es idéntica a la utilizada con la estación real.

- Clúster de procesamiento: Por último, se cuenta con un clúster equipado con hasta 14 placas Raspberry Pi dedicadas en este caso al despliegue de los agentes de trazabilidad.

### 4.2 DESARROLLO DEL ESCENARIO

Partiendo de la solución descrita en el apartado 3, se han dado tres pasos para su particularización para este caso de estudio: en primer lugar, se ha definido qué información se va a leer por cada ítem fabricado en las estaciones de ensamblado; en segundo lugar, se han definido las funcionalidades adicionales de cada uno de los agentes industriales que participan en esta demostración; por último, se ha definido el escenario a probar en este caso de estudio.



Figura 2 Estación de ensamblado real

- Datos de trazabilidad: en este ejemplo ilustrativo, se propone recoger los datos de trazabilidad indicados en la Tabla 1, los cuales identifican el sub-producto sobre el que se ha realizado una operación concreta, la estación que la ha realizado y la marca de tiempo en que se ha producido.

- Funcionalidades adicionales: para este ejemplo, se ha contemplado la posibilidad de que los OA puedan recibir solicitudes en tiempo real de información relativas al estado del pedido que supervisan. Por otra parte, también se ha determinado que el MPA debe generar un fichero de texto estructurado que contenga toda la información que ha recogido sobre el estado del plan de fabricación una vez este ha concluido.

- Escenario de pruebas: para ilustrar el funcionamiento de la solución de trazabilidad propuesta, se ha decidido ejecutar un plan de fabricación que cuenta con un único pedido, y que a su vez cuenta con dos lotes de fabricación. Estos lotes se fabrican en una única etapa (un único servicio de fabricación), y cada uno de ellos ha sido asignada una estación diferente.

Tabla 1 Información de proceso recogida en la estructura de datos

Nombre	Descripción
Machine_Reference	Referencia de la máquina
Order_Reference	Referencia del pedido
Batch_Reference	Referencia del lote
Ref_Subproduct_Type	Referencia del subproducto
Ref_Service_Type	Referencia del servicio (operación)
Item_Number	Número del ítem completado
Initial_Time_Stamp	TimeStamp de inicio del ítem
Final_Time_Stamp	TimeStamp de final del ítem
Service_Time_Stamp	TimeStamp de inicio del servicio

Los agentes utilizados en este caso de uso han sido implementados mediante la plataforma de sistemas multi-agente de código abierto JADE. Además de dar soporte para el desarrollo de sistemas multi-agente, JADE proporciona herramientas como el JADE sniffer, una herramienta gráfica que permite visualizar el intercambio de mensajes entre los agentes del sistema durante el proceso, así como su contenido. La Figura 3 muestra parte del intercambio de mensajes como resultado de probar el escenario descrito, con detalle del contenido del mensaje enviado por un MA a su correspondiente BA al terminar un ítem.

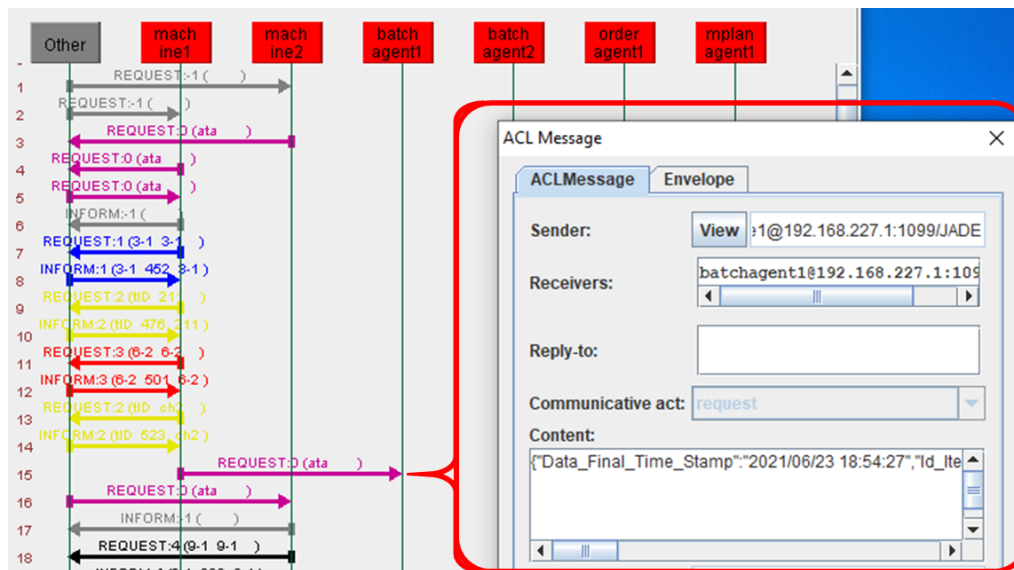


Figura 3 Detalle del intercambio de mensajes y su contenido mediante la herramienta JADE sniffer

## 5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha propuesto una solución basada en agentes industriales para garantizar la trazabilidad de la fabricación a diferentes niveles. Para ello, se han definido unos agentes tipo para gestionar los recursos de fábrica y ofrecer servicios necesarios para llevar a cabo los procesos de fabricación, y otros agentes tipo destinados a la trazabilidad en cada uno de los niveles. Además, se han definido las interacciones entre estos tipos de agentes para poder llevar a cabo el proceso de fabricación.

Sin embargo, esta solución solo cubre las interacciones en un escenario de funcionamiento ideal, sin imprevistos como podrían ser la falta de materias primas, retrasos en la planificación, o averías en las estaciones de trabajo. En este sentido, los autores trabajarán en el futuro en la definición y desarrollo de agentes que den soporte en la resolución de estos problemas para permitir una gestión de la fabricación de manera flexible.

### Agradecimientos

Este trabajo está financiado por MCIU/AEI/FEDER, UE (proyecto RTI2018-096116-B-I00) y GV/EJ (proyecto IT1324-19).

### English summary

## MANUFACTURING TRACEABILITY BASED ON INDUSTRIAL AGENTS

### Abstract

*One of the main principles of Industry 4.0 is the obtention of added value from data generated during the manufacturing process. These data may serve to different purposes, being traceability one of the most relevant, since it is required at every level from customer to factory management. Industrial agents are a good alternative to implement traceability in the plant due to their ability to collaborate by exchanging information to meet their objectives. In this article, the authors propose a solution based on industrial agents to carry out the traceability of production at different levels (manufacturing batch, customer order, and factory) in a decoupled way, to optimize the management of information and services derived from traceability at each of the levels.*

**Keywords:** Industry 4.0, Traceability, Cyber-Physical Systems, Industrial Agents, Flexible Manufacturing Systems.

### Referencias

- [1] Bennulf, M., Danielsson, F., Svensson, B., Lennartson, B., (2020) Goal-oriented process plans in a multi-agent system for Plug & Produce, IEEE Transactions on Industrial Informatics.
- [2] Colombo, A.W., Karnouskos, S., Kaynak, O., Shi, Y., Yin, S., (2017) "Industrial Cyberphysical Systems: A Backbone of the Fourth Industrial Revolution", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 6-16.

- [3] Cruz Salazar, L.A., Ryashentseva, D., Lüder, A., Vogel-Heuser, B., (2019) Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design pattern—comparison of selected approaches mapping four agent patterns, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [4] Jana, T.K., Bairagi, B., Paul, S., Sarkar, B., Saha, J., (2013) "Dynamic schedule execution in an agent based holonic manufacturing system", *Journal of Manufacturing Systems*, pp. 801-816.
- [5] Karnouskos, S., Leitão, P., Ribeiro, L., Colombo, A.W., (2020) "Industrial Agents as a Key Enabler for Realizing Industrial Cyber-Physical Systems: Multiagent Systems Entering Industry 4.0", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 18-32.
- [6] Kovalenko, I., Tilbury, D., Barton, K., (2019) "The model-based product agent: A control oriented architecture for intelligent products in multi-agent manufacturing systems", *IEEE Control Engineering Practice*, pp. 105-117.
- [7] Leitão, P., (2009) "Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, pp. 979-991.
- [8] Leitão, P., Restivo, F., (2006) ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control, *Computers in Industry*.
- [9] López, A., Casquero, O., Estévez, E., Leitão, P., Marcos, M., (2021) Towards the generic integration of agent-based AASs and Physical Assets: a four-layered architecture approach, aceptado para publicación en IEEE INDIN 2021.
- [10] Munkelt, T., Krockert, M., (2018) "Agent-based self-organization versus central production planning", *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference*, pp. 3241-3251.
- [11] Peres, R.S., Rocha, A.D., Leitão, P., Barata, J., (2018) IDARTS – "Towards intelligent data analysis and real-time supervision for industry 4.0", *Computers in Industry*, pp. 258-262.
- [12] Platenius-Mohr, M., Malakuti, S., Grüner, S., Goldsch, T., (2019) "Interoperable Digital Twins in IIoT Systems by Transformation of Information Models: A Case Study with Asset Administration Shell", *Proceedings of the 9th International Conference on the Internet of Things*, pp. 1-8.
- [13] Santos, C., Mehraei, A., Barros, A.C., Araújo, M., Ares, E., (2017) Towards Industry 4.0: an overview of European strategic roadmaps, *Procedia Manufacturing*.
- [14] Shen, W., Hao, Q., Yoon, H.J., Norrie, D.H., (2006) "Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review", *Advanced Engineering Informatics*, pp. 415-431.
- [15] Tang, H., Li, D., Wang, S., Dong, Z., (2018) "CASOA: An Architecture for Agent-Based Manufacturing System in the Context of Industry 4.0", *IEEE Access*, pp. 12746-12754.
- [16] Vachálek, J., Bartalský, L., Rovný, O., Šišmišová, D., Morhác, M., Lokšík, M., Hoffmeister, M., Zimmermann, P., (2017) "The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept", *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*, pp. 258-262.
- [17] Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., Peeters, P., (1998) "Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA", *Computers in Industry*, pp. 255-274.
- [18] Vrba, P., Tichý, P., Mařík, V., Hall, K.H., Staron, R.J., Maturana, F.P., Kadera, P., (2011) "Rockwell Automation's Holonic and Multiagent Control Systems Compendium", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, pp. 14-30.
- [19] Ye, X., Hong, S.H., (2019) Toward Industry 4.0 Components: Insights Into and Implementation of Asset Administration Shells, *IEEE Industrial Electronics Magazine*.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# SOFTWARE Y COMPUTADOR EMBARCADO BASADO EN COTS PARA EL EXPERIMENTO TASEC-LAB

Ángel Grover Pérez Muñoz,<sup>\*</sup> Juan Zamorano Flores,<sup>\*</sup> David González Bárcena,<sup>\*\*</sup> Juan Antonio de la Puente<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> *Information Processing and Telecommunications Center (IPTC-UPM)*

<sup>\*\*</sup> *Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio da Riva”  
Universidad Politécnica de Madrid*

## Resumen

*TASEC-Lab es un proyecto desarrollado por estudiantes, con la ayuda de profesores, de los grupos IDR y STRAST de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), que será lanzado a bordo de un globo estratosférico. Su objetivo es caracterizar la transferencia de calor por convección en misiones de este tipo y realizar un estudio del entorno térmico durante las fases de ascenso y flote de la misión. En este artículo se describen los dispositivos y el computador embarcado basados en componentes comerciales (COTS) que han sido empleados en el experimento TASEC-Lab, así como también la arquitectura, metodología y herramientas elegidas para el desarrollo y validación del software de a bordo.*

**Palabras clave:** Computadores y control, software de vuelo, desarrollo de software basado en componentes, sistemas empotrados heterogéneos.

## 1. INTRODUCCIÓN

El proyecto TASEC-Lab (*Thermal Analysis Support and Environment Characterization Laboratory*) nace de la experiencia del Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio da Riva” (IDR) de la UPM en el Control Térmico de misiones de globos estratosféricos con el objetivo de caracterizar mejor la transferencia de calor por convección, el entorno térmico y la dinámica en este tipo de plataformas[1, 2]. El IDR y el grupo de Sistemas de Tiempo Real y Arquitectura de Servicios Telemáticos (STRAST) han propuesto el experimento TASEC-Lab, que ha sido desarrollado íntegramente por estudiantes del Grado en Ingeniería Informática, del Máster en Sistemas Espaciales y del doctorado en Ingeniería Aeroespacial de la Universidad Politécnica de Madrid, con el apoyo del personal docente e investigador de ambos grupos.

TASEC-Lab será lanzado en un globo estratosférico desde el Aeropuerto de León en el mes de julio de 2021. La compañía B2Space<sup>1</sup> será la encargada de operar el lanzamiento dentro del programa *Fly your CubeSat*, en el que estudiantes de diferentes

universidades diseñan y fabrican un experimento tipo CubeSat. Concretamente, TASEC-Lab tiene unas dimensiones de 330x130 mm, aproximándose al estándar de CubeSat, con un peso inferior a 3 kg y una estructura de aluminio (Figura 1).

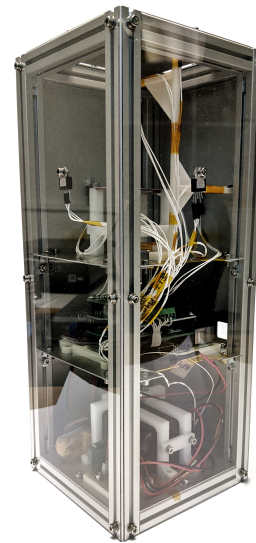


Figura 1: Vista general de la estructura de TASEC-Lab.

El grupo STRAST se encarga del desarrollo del software de vuelo y de la elección de los componentes de hardware, tanto del computador embarcado como de algunos dispositivos. El proceso de diseño y construcción de este experimento se realizó en unos seis meses, y por eso los sensores, actuadores, y el computador embarcado (OBC, *On-Board Computer*) elegidos son de tipo COTS (*Commercial Off-The-Shelf*). En este caso las condiciones ambientales que tienen que soportar estos componentes no son tan extremas como las que se tendrían en una órbita baja.

Los laboratorios o experimentos de la misión se resumen en el apartado 2. En el apartado 3 se describen los componentes de hardware del sistema, el OBC, los sensores y actuadores que lo conforman, y su disposición en la estructura. Posteriormente, en la sección 4 se expone la metodología de desarrollo basado en componentes (CBD) y el conjunto de herramientas TASTE empleadas pa-

<sup>1</sup><https://b2-space.com>



ra la implementación del software embarcado. La arquitectura de software, es decir los componentes de software y la comunicación entre ellos, se describe en el apartado 5. Finalmente, en el apartado 6 se presenta un resumen y las conclusiones de este trabajo.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Para cumplir con el objetivo del experimento, TASEC-Lab cuenta con tres laboratorios conformados por una serie de sensores y actuadores que se resumen a continuación:

- *Attitude Determination Lab.* El laboratorio de determinación de actitud tiene como objetivo conocer la dinámica del vuelo (inclinación y orientación de la góndola) durante toda la misión. Para ello es necesario contar con una IMU (Unidad de Medición Inercial) y un dispositivo GPS (Sistema de Posicionamiento Global).
- *Environmental Lab.* Su objetivo es determinar el entorno térmico, es decir las variables o parámetros que afectan a la transferencia térmica, como la velocidad del aire o la presión atmosférica. Para ello el experimento cuenta con dos sensores de presión, un anemómetro y un calefactor para controlar la temperatura del anemómetro.
- *Heat Transfer Lab.* En este laboratorio se realiza un estudio de la transferencia de calor por convección. Para cumplir con su objetivo, el experimento está equipado con cinco sensores de temperatura digitales, seis termistores, y un calefactor.

Estos laboratorios no son independientes, ya que algunos sensores contenidos en unos laboratorios complementan la funcionalidad de otros. Por ejemplo, el *Heat Transfer Lab* necesita los valores obtenidos por los sensores de presión del *Environmental Lab* para las transiciones entre sus modos de funcionamiento.

La Figura 2 muestra el diagrama de contexto del sistema TASEC-Lab. En dicha figura se aprecia la relación entre el sistema y sus laboratorios.

## 3. COMPONENTES DE HARDWARE DE LA MISIÓN

### 3.1. COMPUTADOR EMBARCADO

En cuanto al OBC, tras analizar los requisitos de la misión, teniendo en cuenta que las condicio-

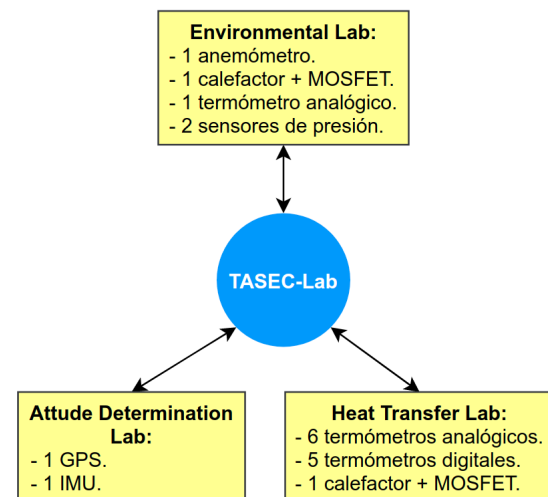


Figura 2: Diagrama de contexto de TASEC-Lab.

nes ambientales (niveles de radiación, temperatura, etc.) no son extremas, se eligió un computador Raspberry Pi (RPi) modelo 3B+, con las siguientes características:

- Procesador Dual-core Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC @ 1.4GHz.
- 1 GB de LPDDR2 SDRAM.
- Puerto RJ45 Gigabit Ethernet.
- 40-GPIO header, 26 pines digitales GPIO (*General-purpose input/output*).

Adicionalmente a las funciones de entrada/salida en los pines GPIO (3.3 V para nivel alto), la RPi soporta diversos protocolos de comunicación que se indican a continuación:

- **IIC (Inter-Integrated Circuit):**
  - Cantidad: 1.
  - 7 bits para la dirección de los esclavos, configurable a 10 bits.
  - Hasta 127 esclavos con 7 bits.
  - Transmisión: half-duplex.
  - Ancho de banda: hasta 100 Kbps, y 400 kbps en *fast mode*.
  - No está disponible el *clock stretching*.
- **SPI (Serial Peripheral Interface):**
  - Cantidad: 2.
  - SPI-0: hasta dos CS (*Chip Select*).
  - SPI-1: hasta tres CS.
  - Transmisión: full-duplex.
  - Su velocidad de reloj es igual a la velocidad del reloj central.



■ **UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter):**

- Cantidad: 2.
- Solo uno disponible a través de los pines GPIO.
- Transmisión: full-duplex.

La ventaja que implica usar este tipo de computador es que en el mercado hay disponible una gran variedad de módulos y HATs (*Hardware Attached on TOP*) que soportan estos protocolos, y por consiguiente facilitan el montaje y la integración de nuevos elementos al sistema.

Asimismo, se han empleado con éxito Raspberry Pi como OBC en misiones similares a TASEC-Lab, como los experimentos [11] y [12] propuestos para el programa BEXUS (Balloon Experiments for University Students) de la ESA (Agencia Espacial Europea), con características similares al programa *Flight your Cubesat* en el que se lanzará TASEC-Lab.

### 3.2. SENSORES Y ACTUADORES

En este sistema hay dos tipos de sensores y actuadores conectados al computador embarcado (OBC) para interactuar con el entorno:

- Dispositivos conectados directamente al computador a través de los pines GPIO, ya sea empleando las funciones de E/S o mediante los protocolos de comunicación que soporta, como SPI, IIC, o UART.
- Dispositivos que no se pueden conectar directamente al GPIO (por ejemplo, sensores analógicos). En estos casos se precisan componentes adicionales, como convertidores ADC o DAC, o drivers MOSFET.

El cuadro 1 presenta una descripción de las conexiones entre los dispositivos y el OBC. En la segunda columna se muestra el número de dispositivos incluidos en el experimento, y en la tercera columna se indica el tipo de interfaz entre cada dispositivo y el computador o el HAT (*Hardware Attached on Top*) que se utiliza para ampliar la capacidad de entrada y salida del OBC.

En el apartado 2, se han presentado los laboratorios y los dispositivos que los componen.

La Figura 3 muestra el diagrama de composición del sistema. En ella se pueden apreciar todos los dispositivos conectados al OBC, así como también el tipo de interfaz o protocolo de sus conexiones.

Todos estos dispositivos son componentes de tipo COTS. La mayoría de ellos se han ensamblado

Cuadro 1: Dispositivos conectados al OBC.

Dispositivo	Cant.	Interfaz
IMU 9DOF click Mikrobús	1	IIC
IIC MUX pHAT	1	IIC
Sensor de temperatura digital TC74	5	IIC
IRF520 MOSFET Driver Module	2	GPIO.
Anemómetro A100L2	1	GPIO.
Sensor de presión MS5611-01BA03	2	SPI
MIKROE-1032 GPS (u-blox LEA-6s)	1	USB
Termistor PT1000	7	ADC
Calefactor de silicona	2	MOSFET

mediante un HAT de prototipos que se puede enganchar en la parte superior de la RPi, resultando en un diseño más cómodo y robusto.

En la Figura 4 se ilustra el HAT con el IMU, un GPS, los dos sensores de presión y algunas resistencias empleadas como divisores de tensión para el anemómetro y los termistores.

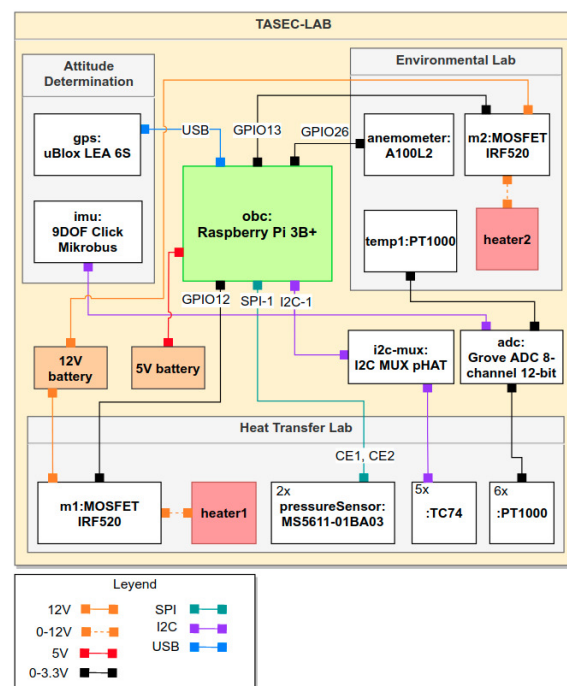


Figura 3: Diagrama de composición UML de TASEC-Lab.

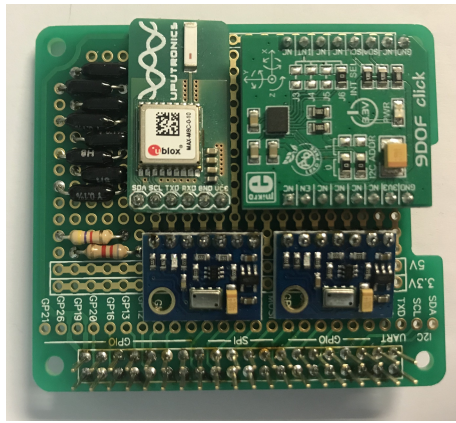


Figura 4: HAT de prototipos de TASEC-Lab.

## 4. METODOLOGÍA y HERRAMIENTAS PARA EL DESARROLLO DEL SOFTWARE

### 4.1. DESARROLLO BASADO EN COMPONENTES

El desarrollo basado en componentes (CBD, *Component-based development*), también conocido como ingeniería de software basada en componentes (CBSE, *Component-based software engineering*) es un enfoque de ingeniería de software cuya entidad de diseño más básico (*building block*) es el componente de software.

En la especificación UML 2.1 (*Unified Modelling Language*) [6], un componente de software se define como una unidad reemplazable del sistema que proporciona y requiere un conjunto de especificaciones. Asimismo, en la *Onboard Software Reference Architecture* (OSRA) de la iniciativa SAVOIR, un componente de software se define como una pieza de software más abstracta que las clases y los objetos del paradigma OOP (*Object Oriented Programming*), que presenta las siguientes propiedades [3]:

- Actúa como un proveedor de servicios, con o sin estado.
- Actúa como un consumidor de servicios implementados por otros componentes, formándose una relación de contrato entre el proveedor y el cliente. Es decir, el componente proveedor se compromete a ofrecer unos servicios específicos, y el componente cliente puede acceder a estos servicios tal como se especifica en el contrato.
- Puede ser visto como una caja negra que encapsula, oculta, y abstrae los detalles de implementación.

- Su implementación puede realizarse a partir de otros componentes existentes o desde cero en algún lenguaje de programación (visto como una caja blanca).

El desarrollo del software de este proyecto ha seguido este enfoque debido a los principios arquitectónicos sobre los que se asienta el CBD: encapsulamiento, consistencia, bajo acoplamiento, y reusabilidad. Además, gracias a dichos principios, la calidad del software se incrementará reduciendo el tiempo y los costes del futuro mantenimiento.

### 4.2. CONJUNTO DE HERRAMIENTAS TASTE

El conjunto de herramientas TASTE (*The ASSERT Set of Tools for Engineering*) tuvo su origen en el proyecto europeo ASSERT [13]. TASTE ha sido extendido y mantenido por la Agencia Europea del Espacio (ESA), con la colaboración de grupos universitarios e industriales. Estas herramientas están orientadas al desarrollo de sistemas de tiempo real empotrados heterogéneos con un enfoque de ingeniería de software basada en componentes (CBSE) y generación automática de código.

TASTE permite describir formalmente un sistema mediante cuatro vistas [14]:

- *Datos (data view)*: describe los tipos de datos que se usan en el sistema y que intercambian los componentes como se especifica en la vista de interfaces.
- *Interfaces (interface view)*: describe los componentes del sistema y las interfaces que ofrecen o solicitan de otros componentes. Los componentes son heterogéneos, en el sentido de que pueden estar modelados con distintas herramientas y lenguajes de modelado o implementación.
- *Despliegue (deployment view)*: describe la aplicación en hardware de las funciones especificadas en la vista de interfaces. Esta vista permite especificar la comunicación entre elementos remotos, mediante elementos como puertos serie, sockets, etc.
- *Concurrencia (concurrency view)*: proporciona una descripción global del sistema, permitiendo simular su ejecución y realizar análisis temporal o de planificación.

La elección de TASTE para desarrollar el software del experimento TASEC-Lab se debe fundamentalmente a dos razones:

- Soporte a la implementación del software embarcado. El diseño basado en componentes y la abstracción que se consigue con las diferentes vistas permite encapsular detalles de implementación como el sistema operativo, drivers, mecanismos de comunicación, lenguajes de programación, etc.
- TASTE soporta el modelo computacional de Ravenscar [15], restringiendo el código generado de acuerdo con este modelo con objeto de garantizar un comportamiento temporal predecible, que permita analizar el cumplimiento de los requisitos temporales del sistema.

## 5. SOFTWARE EMBARCADO

### 5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

El software embarcado del experimento TASEC-Lab interactúa con el entorno físico a través de una serie de sensores y actuadores (Figura 2) y, por tanto, es un sistema de tiempo real empujado.

A grandes rasgos, el OBSW (*On-board software*, software embarcado) lleva a cabo las siguientes funciones:

- Control de los sensores y actuadores,
- implementación de todos los experimentos (apartado 2),
- almacenamiento en memoria persistente de todos los datos recogidos por los sensores de los experimentos.

La arquitectura de software está basada en capas jerárquicas y almacenes de datos, siguiendo los principios definidos en las referencias [7, 8]. Los requisitos funcionales del software sugieren la siguiente descomposición:

- *Gestión de dispositivos*. Esta capa se encarga de la adquisición de datos de los sensores y del control de los actuadores según un esquema cíclico o por petición (esporádico).
- *Almacén de datos*. Esta capa representa una estructura de datos que contiene todos los valores recogidos por la capa de gestión de dispositivos, actuando como mediador entre esa capa y la capa de aplicaciones.
- *Aplicaciones*. Esta capa realiza las funciones del *heat transfer lab*, el control térmico del anemómetro, y los componentes de registro de datos.

El sistema operativo y los manejadores de dispositivos conforman una cuarta capa situada en la parte baja de la arquitectura, que ofrece sus servicios a todos los componentes del OBSW. Esta capa interactúa con el OBC y el hardware conectado a él mediante los manejadores (drivers) de los distintos dispositivos, accesibles en el espacio de usuario por medio de bibliotecas de software específicas.

### 5.2. PROCESO DE DESARROLLO

Como se ha dicho anteriormente, se ha seguido el enfoque CBD para el desarrollo e implementación del software de TASEC-Lab. A continuación, se muestra el proceso seguido, que está basado en los procesos de desarrollo e implementación definidos en la referencia [3]:

#### 1. Definición de los tipos de datos e interfaces

Este paso consiste en definir los tipos de datos y las interfaces. En TASTE, la definición de los tipos de datos se puede escribir en el lenguaje ASN1 dentro de la vista de datos.

Hay que tener en cuenta que, con objeto de preservar el modelo de Ravenscar, TASTE solo admite una operación por interfaz. Lo más cercano a un conjunto de operaciones está definido como un *grupo de conexiones* en la nueva versión gráfica de TASTE (*Space Creator*). Sin embargo, su único objetivo es visual (no abrumar la interfaz gráfica con muchas conexiones).

#### 2. Definición de los tipos de componentes.

En este paso se definen los tipos de componentes. Un tipo de componente está compuesto de: (i) una o más interfaces proporcionadas (PI), (ii) cero o más interfaces requeridas (RI), y (iii) un conjunto de atributos accesibles en el componente con una serie de modificadores (de solo escritura, de lectura, o ambos).

Este paso se puede realizar en la vista de interfaz de TASTE. En dicha vista, se pueden definir los tipos de funciones (*function types*) del sistema, y las PIs y RIs que implementa el componente. La diferencia entre un tipo de componente y una *function type* en TASTE es que la segunda también contiene la implementación del componente (es tipo e implementación al mismo tiempo).

#### 3. Implementación de los tipos de componentes.

En este paso se implementan los tipos de componentes definidos en el paso anterior. Este

paso se realiza en la vista de interfaz de TASTE.

#### 4. Creación de ejemplares de los componentes.

Este paso consiste en crear ejemplares (*instances*) de los tipos de componentes implementados en el paso anterior.

#### 5. Enlazado de los componentes.

Una vez creados los ejemplares de componentes, en este paso se realizan las conexiones entre ellos a través de sus interfaces. Aquí también se definen los atributos no funcionales de las interfaces como por ejemplo: el tamaño de la cola para una interfaz esporádica, el tiempo de ejecución en el peor caso (WCET), el tiempo mínimo entre activaciones (MIAT), el periodo de una interfaz cíclica, etc.

Este paso se puede realizar en la vista de interfaz de TASTE mediante la creación de ejemplares de funciones tipo. Además, TASTE también permite establecer los atributos no funcionales antes mencionados.

#### 6. Definición de la arquitectura física.

En este paso se realiza un modelo del hardware relevante del sistema, como procesadores (CPU), dispositivos, instrumentos, buses que interconectan estos elementos, etc.

Este paso se puede realizar en TASTE ya que la arquitectura física se puede definir en la vista de despliegue. En dicha vista se pueden modelar los siguientes elementos:

- nodos,
- particiones,
- plataformas o entornos de ejecución,
- drivers y buses para comunicar varios nodos.

#### 7. Aplicación de los componentes en la arquitectura física.

Por último, en este paso se aplican los componentes de software a los componentes de hardware definidos en la arquitectura física. Las comunicaciones que se realizan entre componentes ubicados en nodos remotos también se deben asignar a un bus de comunicación concreto. Todo esto se puede realizar en la vista de despliegue de TASTE.

## 6. CONCLUSIONES

Se ha presentado la estructura y metodología de desarrollo del computador embarcado del experimento TASEC-Lab. Para su desarrollo se han

empleado componentes comerciales, en el caso del hardware, y las herramientas TASTE para el software. Gracias a las facilidades de abstracción de TASTE y a su proceso de generación de código compatible con el perfil de Ravenscar se ha conseguido desarrollar todo el sistema en el plazo establecido y pasar las pruebas funcionales sin contratiempos.

#### Agradecimientos

Los autores quieren manifestar su agradecimiento a todos los miembros, estudiantes y profesores, que conforman el proyecto TASEC-Lab.

#### English summary

### ONBOARD SOFTWARE AND COMPUTER BASED ON COTS FOR THE TASEC-LAB EXPERIMENT

#### Abstract

*TASEC-Lab is a project developed by students, with the help of teachers, of the IDR and STRAST research groups from the Technical University of Madrid (UPM, Universidad Politécnica de Madrid), that will be launched from a stratospheric balloon. Its main purpose is to characterize the heat transfer by convection in this type of mission, and to study the thermal environment during the ascent and float phases of the mission. The following article describes the equipment and onboard computer based on COTS selected for the TASEC-LAB mission, as well as the architecture, methodology, and toolset used during the development and validation of the on-board software system.*

**Keywords:** Computers and control, on-board software, Component-Based Software Development, heterogeneous embedded systems.

#### Referencias

- [1] D. Gonzáles, A. Fernández, I. Pérez, y A. Sanz. Real data-based thermal environment definition for the ascent phase of Polar-Summer Long Duration Balloon missions

- from Esrange (Sweden). En *Acta Astronáutica 170 (2020)*, páginas 235-250, 20 de enero de 2021.
- [2] I. Pérez, A. Sanz, N. Bezdenjnykh, A. Farrahi, P. Barthol, y R. Meller. Thermal control of SUNRISE, a balloon-borne solar telescope. En *Proc. IMechE Vol. 255*, páginas 1037–1049, febrero 2011.
- [3] A. Jung, M. Panunzio, y J. Terraillon, *SAVOIR-FAIRE – On-Board Software Reference Architecture*, Savoir-Faire, 10-jun-2010 [En línea]. Disponible en: <https://essr.esa.int/project/osra-onboard-software-reference-architecture>.
- [4] Alejandro Alonso, Emilio Salazar, y Juan A. de la Puente. Design of On-Board Software for an Experimental Satellite [En línea]. Disponible en: <https://www.dit.upm.es/~str/papers/pdf/alonso&13a.pdf>
- [5] B2Space, “The Blue Jay Programme” [En línea]. Disponible en: <https://b2-space.com/blue-jay-programme/>.
- [6] Grady Booch, James Rumbaugh, e Ivar Jacobson, *Unified Modeling Language User Guide, The (2nd Edition)*, Addison-Wesley Professional, 2005.
- [7] J.A. de la Puente y J. Zamorano, OBDH.LABS, repositorio de GitHub, [https://github.com/STR-UPM/OBDH\\_LABS](https://github.com/STR-UPM/OBDH_LABS)
- [8] Jens Eickhoff. *Onboard Computers, Onboard Software and Satellite Operations*, 2012.
- [9] M. Perrotin, T. Tsiodras, J. Delange, y J. Hugues, *TASTE Documentation*, 27-ene-2012 [En línea]. Disponible en: <https://download.tuxfamily.org/taste/snapshots/doc/taste-documentation-current.pdf>.
- [10] Universidad Politécnica de Madrid, “El IDR lanzará este verano un experimento en un globo estratosférico” 24-ene-2021 [En línea]. Disponible en: [https://www.upm.es/Investigacion?id=b0c70088bbe89710VgnVCM10000009c7648a\\_&prefmt=articulo&fmt=detail](https://www.upm.es/Investigacion?id=b0c70088bbe89710VgnVCM10000009c7648a_&prefmt=articulo&fmt=detail).
- [11] “Student Experiment Documentation - BEXUS 20. Cosmic Particle Telescope”, Timo A. Stein *et al.*, 18-may-2016 [En línea]. Disponible en: [http://rexusbexus.net/wp-content/uploads/2016/05/BX20\\_CPT-SCOPE\\_SEDv5-0\\_18May16\\_reducedFileSize.pdf](http://rexusbexus.net/wp-content/uploads/2016/05/BX20_CPT-SCOPE_SEDv5-0_18May16_reducedFileSize.pdf)
- [12] “Student Experiment Documentation - BEXUS 19. Attitude determination system for a pico satellite based in a star tracker, a horizon sensor and Earth’s magnetic field measurements”, GranaSAT, 15-ene-2015 [En línea]. Disponible en: [http://rexusbexus.net/wp-content/uploads/2015/07/BX19\\_GRANASAT\\_SED\\_v5-0\\_15Jan15-reduced.pdf](http://rexusbexus.net/wp-content/uploads/2015/07/BX19_GRANASAT_SED_v5-0_15Jan15-reduced.pdf)
- [13] Eric Conquet. ASSERT: a step towards reliable and scientific system and software engineering. *Embedded Real Time Software and Systems (ERTS2008)*, Jan 2008, Toulouse, France.
- [14] Philippe Kruchten. The 4+1 View Model of Architecture. *IEEE Software*, Volume 12 Issue 6, November 1995.
- [15] Alan Burns, Brian Dobbing, Tullio Vardane-ga, *Guide for the use of the Ada Ravenscar Profile in high integrity systems* April 2003 ACM SIGAda Ada Letters XXIV(2)



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# ARQUITECTURA MODULAR PARA LA GESTIÓN AUTOMÁTICA DEL TRÁFICO EN ROTONDAS

Adrian Lara-Dominguez

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universitat Politècnica de València (UPV),  
Valencia, España, adrianfagot@gmail.com

Pedro Uribe-Chavert

Escuela de Doctorado, Universitat Politècnica de València (UPV),  
Valencia, España, pedurcha@doctor.upv.es

Jose-Luis Poza-Lujan

Instituto de Automática e Informática Industrial (ai2), Universitat Politècnica de València (UPV),  
Valencia, España, jopolu@upv.es

Juan-Luis Posadas-Yagüe

Instituto de Automática e Informática Industrial (ai2), Universitat Politècnica de València (UPV),  
Valencia, España, jposadas@upv.es

## Resumen

En los entornos de movilidad, calles o carreteras, los cruces y las rotondas pueden generar problemas de atascos. Poder optimizar el tráfico entrante y saliente de un cruce o rotonda es uno de los campos de investigación de los sistemas de control inteligente. Para optimizar el tráfico se debe disponer de dispositivos capaces de detectar los vehículos así como de actuar, regulando el tráfico, de forma dinámica para adaptarse a las distintas circunstancias. El sistema presentado busca la adaptación a las necesidades de tráfico en una rotonda. Dependiendo de la saturación de cada carril de entrada se intenta crear un tráfico fluido y continuo en el interior de la misma. Para lograr mejorar el tráfico, en este trabajo se presenta una arquitectura modular que permite adaptarse a cualquier cruce o rotonda para, a partir del control específico de un sector, mejorar el rendimiento global. El sistema simulado está compuesto por dispositivos independientes, que, dependiendo de la información adquirida varían el tiempo de paso. Se presenta, asimismo, un experimento de simulación en el que se pone en valor la capacidad de reducir el tráfico adaptando los tiempos de paso en función de la demanda. Los resultados muestran que es posible descongestionar una rotonda cuando se automatizan dinámicamente los tiempos de paso sobre los que se tiene control.

**Palabras clave:** Control inteligente, Control distribuido, Gestión del tráfico, Ciudades inteligentes

## 1 Introducción

El concepto de Industria 4.0 (I4.0) se centra en lograr un sistema eficiente en entornos automatizados y con un alto nivel de inteligencia [11]. Para ello, el modelo I4.0 se caracteriza principalmente por aspectos como [5]:

- Adaptación al cambio, al tener periodos cortos en los que se incorporan, o modifican, tanto los productos como los propios componentes del sistema.
- Demanda personalizada, que se plasma en una adaptación de la producción en la industria, o de la acción de control, a las circunstancias concretas en cada momento.
- Flexibilidad, que permite una respuesta temprana, lo más rápida posible, a las demandas de los usuarios.
- Descentralización, tanto en la obtención de los datos como en la toma de decisiones. Esta descentralización se debe centrar en lograr una agilidad que cumpla la siguiente característica.
- Eficiencia en el manejo de los recursos. Esta eficiencia no sólo está asociada a los costos, sino también enfocada al cambio social y a la sostenibilidad ambiental.

Consecuentemente, las arquitecturas que sirven de modelo a los sistemas deberán cubrir las carac-



terísticas anteriores. Estas arquitecturas deben, además, orientarse hacia la optimización de un sistema de control inteligente distribuido [1]. Esta optimización implica, consecuentemente, tener que orientar el sistema hacia una computación cercana al dispositivo o un sistema inteligente distribuido del Internet of Things [2]. Para este tipo de sistemas es posible adaptar modelos de arquitecturas basadas en el 'Edge', 'Fog' y 'Cloud' [7].

En el caso del trabajo presentado, se centra en dispositivos que se encuentran en contacto con el entorno físico real, es decir se centra en el 'Edge'. En [10] se define el 'Edge' como todo dispositivo intermedio entre la realidad y la nube. Es decir el Edge está definido en función de la red.

La computación en el 'Edge' [6] propone trasladar la capacidad computacional de los servidores en la nube, generalmente centralizados, a los nodos periféricos cercanos al usuario o al entorno real. La informática del 'Edge' proporciona dos mejoras importantes a las que proporciona la computación en la nube. El primero es que los nodos del 'Edge' pueden preprocesar grandes cantidades de datos antes de transferirlos a los servidores centrales en la nube. El otro es que los recursos de la nube se optimizan habilitando nodos de control en el 'Edge' que ya tienen una capacidad de computación. En resumen, un control, con un cierto nivel de inteligencia, al nivel del 'Edge', permite reducir la carga de comunicaciones y de computación en la nube, además de responder de una forma más ágil a cambios de contexto.

Los entornos de ciudades inteligentes necesitan de arquitecturas adaptadas a las necesidades de cada espacio [4]. Basándose en el espacio común en el que interaccionan varios dispositivos, en [9] se define el 'Edge' como la zona donde el rango de operación de dichos dispositivos. Basándose en las premisas anteriores, en este artículo se presenta una arquitectura modular de control inteligente distribuido que es posible ubicar en el modelo de arquitecturas de industria 4.0 y que cumple el paradigma de computación en Cloud/Fog/Edge. La arquitectura dispone de elementos modulares en los que situar elementos de computación. Para experimentar, se ha implementado en MatLab con Simulink un modelo de tráfico básico de entrada a la rotonda.

En la siguiente sección se muestran los detalles generales de la arquitectura del sistema modular de control distribuido. Seguidamente se modela el caso de estudio realizado para, finalmente, exponer la experimentación realizada con una sección de rotonda, y los resultados de aplicar un control adaptativo en comparación con el control de tiempos fijos.

## 2 Arquitectura del sistema

El control inteligente del tráfico tiene una gran dependencia de los modelos de implementación física utilizados, lo cual implica una gran dependencia de la disponibilidad y ubicación de los sensores, controladores y actuadores. Diferentes arquitecturas afrontan la implementación de los sistemas de control distribuido basándose, la mayoría de los trabajos, en una organización centralizada o en agrupaciones semi-centralizadas. En cualquiera de los casos, lo habitual es que el sistema dependa de un nodo supervisor que gestiona a una serie de nodos de control dependientes [8]. Estos nodos de control generan, y consumen, datos. La gestión de estos datos es habitual que se delegue en servidores dedicados, conectados en la capa de la nube. Estos servidores son los responsables de recibir los datos, mantenerlos para proporcionar un histórico de datos, u ofrecerlos para que diferentes elementos del sistema puedan emplearlos en sus algoritmos [3].

En el presente artículo, se plantea una arquitectura modular mostrada en la figura 1.

Esta arquitectura implementa un control descentralizado y modular. El elemento básico de la arquitectura es el módulo de control (CM) definidos como nodos que disponen de sensores y actuadores, junto con un control reactivo. Un ejemplo del módulo de control es un detector de vehículos o una de las luces del semáforo. La unión de varios CM, mediante un canal de comunicación, es un Recurso Inteligente (del inglés, SR). Por ejemplo, un semáforo inteligente. Un SR puede estar formado por diferentes tipos de CM, pudiendo haber diferentes SR en una misma rotonda. El área de interacción de los distintos CM de un SR se llama Área de Operación (OA). El área de comunicación entre distintos SR se llama Área de Control (CA). Por ejemplo, el área de control para las comunicaciones entre varios semáforos en una misma rotonda. A su vez, CM y SR pueden interactuar con servicios en la nube.

El hecho de que un elemento tan cercano como un módulo de control pueda llegar a alcanzar directamente a un servidor en la nube, facilita la compartición de datos ya procesados con otras áreas de control. En el caso del entorno de experimentación, presentado más adelante, un Recurso Inteligente es un semáforo que dispone de módulos de control independientes para detectar vehículos, detectar peatones, señalizar el paso a vehículos y a peatones, e incluso iluminar el espacio de espera de los peatones en función de la detección de los mismos.

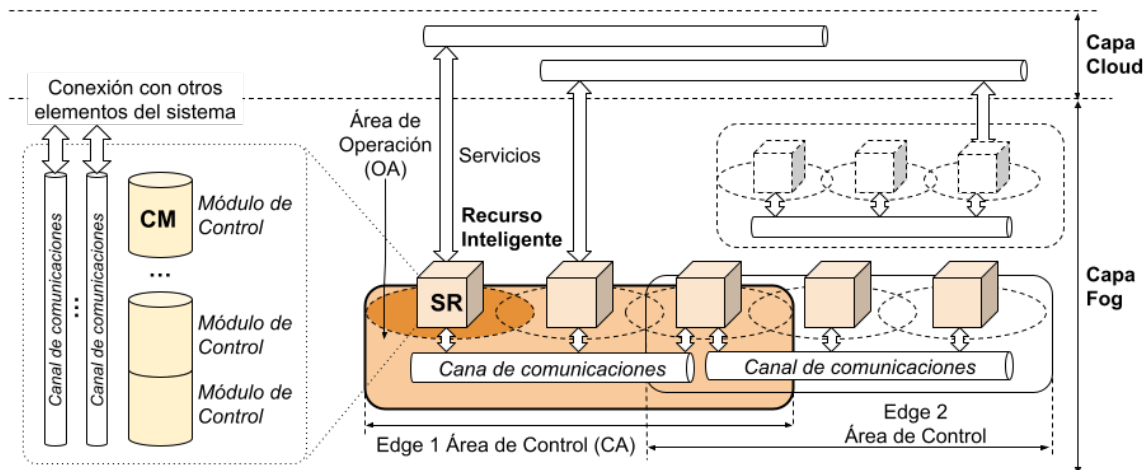


Figura 1: Arquitectura propuesta basada en el modelo (cloud/fog). Los módulos de control se combinan para formar un recurso inteligente que, a su vez, al comunicarse con otros recursos inteligentes forman un área de control. Este área se caracteriza por tener una comunicación muy cercana entre los recursos, sin necesidad de esperar acciones de control desde la nube.

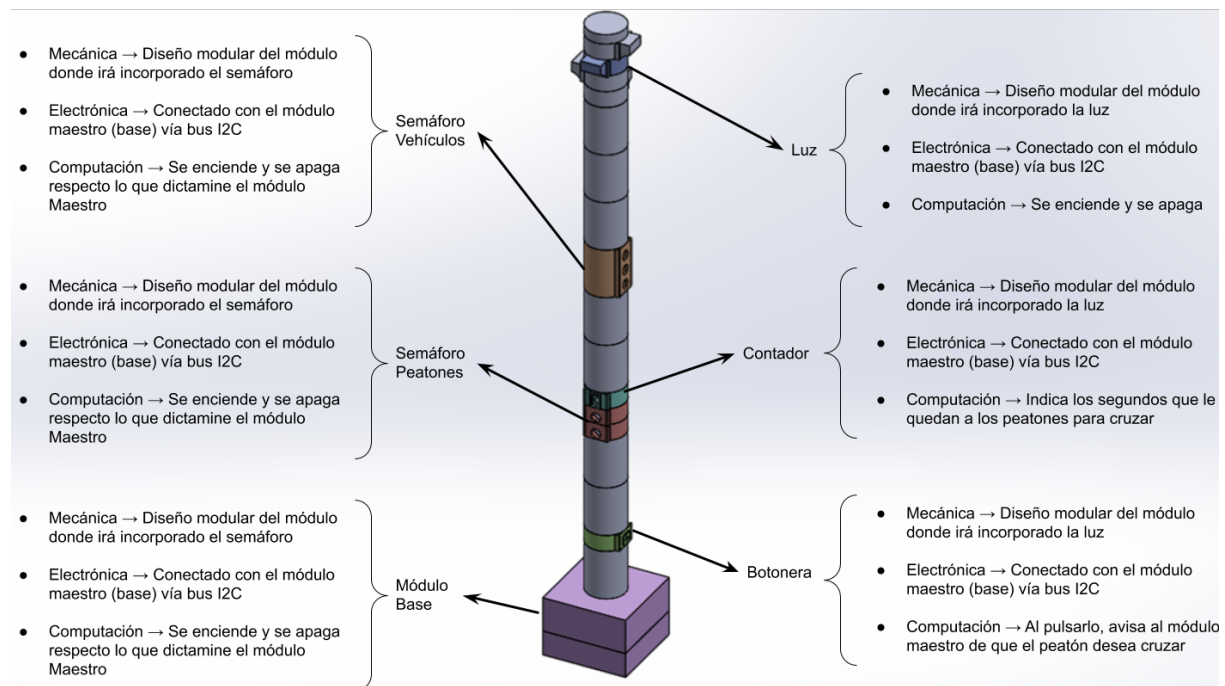


Figura 2: Ejemplo de un Recurso Inteligente. En este caso, se dispone de elementos de detección y de actuación que juntos pueden seleccionar un control adaptativo a las circunstancias que estos mismos Recursos Inteligentes detectan. Por ejemplo, con un flujo mayor de vehículos se puede ampliar el tiempo de paso de los mismos para salir de la rotonda y descongestionarla, o disminuir dicho tiempo para evitar introducir más vehículos en la rotonda de los que ésta pueda asumir.

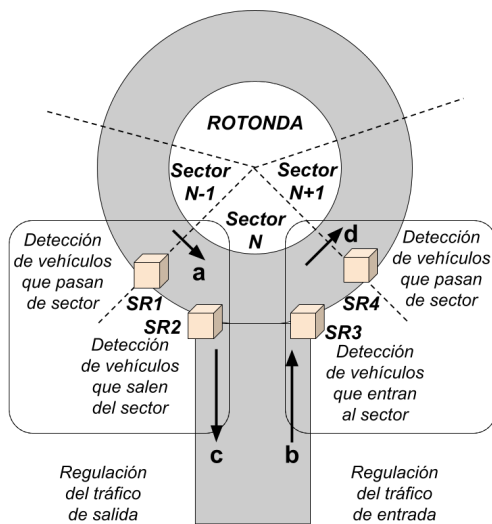


Figura 3: Sector de rotonda y posibles configuraciones dependiendo del tipo de calle conectada a la rotonda.

### 3 Modelado y control implementado

#### 3.1 Rotonda como conjunto de sectores

Se ha decidido realizar la simulación, diseño y control de una sección de rotonda basada en calle por la modularidad que ello representa y la escalabilidad que tiene dicho sistema, al poder crear mediante la unión de varias secciones una rotonda entera, lo que ayuda al diseño de estas y su ejecución en ciudades y urbes. Las secciones de rotonda pueden detectar los coches que salen de ellas y comunicarse con el resto de secciones, estos métodos de detección y comunicación no son parte de este estudio pero pueden desarrollarse posteriormente e incorporarse al implantar el modelo en una situación real.

Para facilitar, tanto el modelado como la simulación, una rotonda se divide en secciones. Cada sección de rotonda se puede considerar como un enlace entre la calle y la rotonda (figura 3). En cada sección "n" con su calle asociada se distingue entre el tráfico "a" proveniente de la sección "n-1", el tráfico "c" que sale de la rotonda a través de la calle, el tráfico "b" que entra en la rotonda a través de la calle y el tráfico "d" que pasa a la sección "n+1". Los dispositivos que se incluyan en la rotonda deben ser capaces de detectar tanto el tráfico en ésta (a y d) como el tráfico entrante y saliente (b y c respectivamente). Además, también es conveniente que los dispositivos puedan regular el tráfico.

Este modelado tiene como principal ventaja el he-

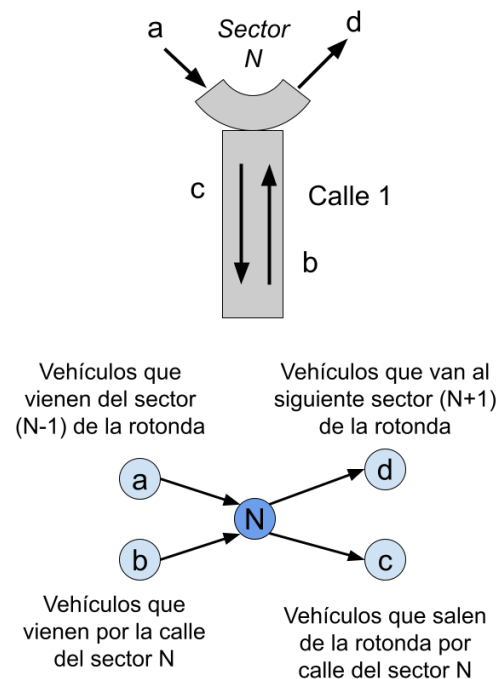


Figura 4: Sector de rotonda y posibles configuraciones dependiendo del tipo de calle conectada a la rotonda.

cho de aislarse del tipo de calle que aporta o recibe vehículos en la rotonda. Las calles que sólo reciben vehículos de la rotonda no tienen componente *b*, y las calles que sólo aportan vehículos a la rotonda no tienen componente *c*. Además, tal como se comentó en el apartado de arquitectura, cada sector de rotonda puede considerarse como un conjunto de recursos del 'Edge', por lo que el control de la misma se ve facilitado. Básicamente, un sector de rotonda se podría llegar a modelar como un sistema de control donde las entradas *a* y *b*, determinan la carga entrante del sector, y las salidas *c* y *d* permiten descargar el mismo (figura 4).

#### 3.2 Algoritmo de control

Tal y como se puede contemplar en el diagrama de flujo de la figura 5, el sistema consta de un tiempo de ciclo constante en el tiempo. Este tiempo puede ser modificable para distintas simulaciones. Este tiempo es la suma del tiempo en rojo más el tiempo en verde. Estos tiempos varían dependiendo de la longitud de cola que tenga la entrada a la rotonda.

El control comienza con el semáforo de la calle de entrada a la rotonda en rojo para vehículos. El módulo de computación calcula la longitud de cola *colab* de la calle de entrada. Si *colab* es mayor o igual a un umbral *colab<sub>top</sub>*, 7 en el caso del ejem-

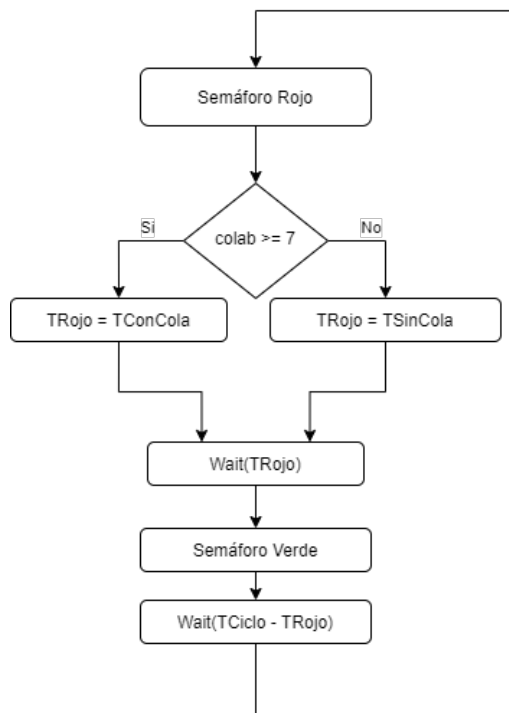


Figura 5: Diagrama de flujo del control del semáforo

plo, el tiempo de espera en rojo se determina a un valor máximo para descargar la rotonda o tiempo con cola  $TConCola$ . En cambio, si  $colab$  es menor al umbral, el tiempo de espera en rojo se asigna al valor mínimo para descargar la calle o  $TSinCola$ . Los tiempos  $TConCola$  y  $TSinCola$  tienen una diferencia variable dependiendo de la carga que se haya medido en el sector de la rotonda. A continuación, se espera el correspondiente tiempo calculado anteriormente y se pone el semáforo en verde, estando un tiempo igual al total de ciclo menos el tiempo en rojo calculado. El tiempo de ciclo se ha determinado fijo en el caso de los experimentos que se presentarán más adelante. Con esto se consigue que, cuanto se genere cierta saturación en la entrada de la rotonda, se consiga despejar más rápidamente.

## 4 Experimentos y resultados

A partir de la arquitectura y el caso de estudio expuesto anteriormente, para comprobar la conveniencia de emplear un algoritmo de control adaptativo, se van a medir las siguientes variables:

- at: Número total de vehículos entrantes por “a” detectados.
- parac: Número total de vehículos que van a salir por la calle.

Tabla 1: Resultados de las variables medidas con el control en tiempos fijo y el control de tiempo variable.

Variables	Tiempo fijo	Tiempo variable
at	272	272
parac	136	136
parad	136	136
bt	179	218
ct	136	136
d1t	135	135
d2t	178	217
dt	313	352
colab	47	8
cs	2	2

- parad: Número total de vehículos que van a salir por el siguiente tramo y provienen de la anterior sección.
- bt: Número total de vehículos entrantes provenientes de la calle.
- ct: Número total de vehículos salientes hacia la calle.
- d1t: Número total de vehículos salientes hacia el siguiente tramo provenientes del anterior tramo.
- d2t: Número total de vehículos salientes hacia el siguiente tramo provenientes de la calle de entrada.
- dt: Número total de vehículos que se dirigen a la siguiente sección.
- colab: Cola generada en la calle de entrada.
- cs: Número de vehículos en la sección.

La tabla 1 muestra los resultados tras 1200 segundos de simulación tanto para el sistema controlado por tiempos fijos, como para el controlado por tiempos variables.

En la columna “Tiempo fijo” de la tabla 1 se puede observar que el sistema de distribución de vehículos al 50% para que estos se dirijan a “c” o a “d” funciona, ya que se incorporan por “a” 272 transeúntes y se distribuyen 136 equitativamente hacia cada salida. El problema que se ve reflejado es la gran cola que se produce con los parámetros establecidos, tras 20 minutos de simulación se genera una cola de 47 vehículos en la calle, lo que supone un colapso grande en el tráfico.

Cuando el algoritmo de control empleado es el de tiempos variables, se producen algunos cambios interesantes. Los resultados de emplear tiempo

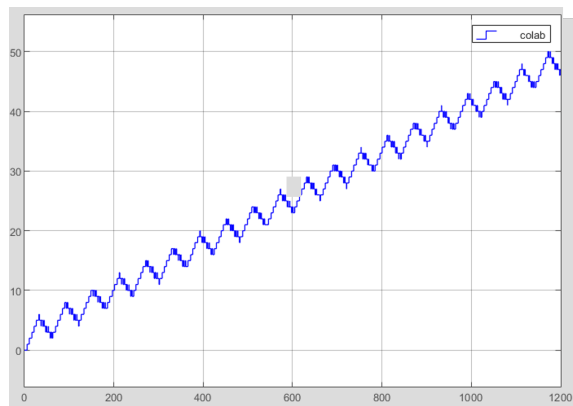


Figura 6: Evolución de la cola de vehículos a la entrada de la rotonda con un control por tiempos fijos y simulación de 1200 segundos

variable se muestra en la columna "Tiempo variable" de la tabla 1. En este caso los tiempos de entrada de vehículos y características del sistema son iguales que en los datos anteriores y el tiempo de simulación se mantiene en 1200 segundos. En los resultados se puede observar que los vehículos de entrada desde la anterior sección son los mismos, pero los vehículos incorporados desde la calle han aumentado, esto debido a que por el control se permite un mayor tiempo de paso para los vehículos que se incorporan a la rotonda. El dato más interesante es el de cola que ha quedado establecido tras la simulación en 8 vehículos mucho menor que en los datos obtenidos con el control de tiempos fijos.

Se han obtenido también mediante la herramienta scope que facilita Simulink, la progresión del número de vehículos en sección y número de vehículos en cola a lo largo de la simulación. En la figura 6 se muestra la evolución de la cola de vehículos a lo largo de la simulación con el algoritmo de tiempos fijos. En el eje  $x$  se muestra la variable tiempo y en el eje  $y$  se muestra la longitud de la cola de entrada a la rotonda.

Cómo se puede observar, la primera gráfica muestra un perfil serrado donde las rampas de subida corresponden al tiempo en que el semáforo está cortando el paso y las de bajada a cuando el semáforo deja paso. Es una gráfica ascendente debido a que este tipo de control con estas condiciones no logra descongestionar el tráfico de la calle, lo que genera cola y acumulación de vehículos. El pico más alto de vehículos se muestra en 50 acumulados. En lo que respecta a carga en el sector de la rotonda, en la simulación, se obtiene que el número de vehículos en la sección no supera los 3 vehículos circulando por ella, lo que muestra que no se ha saturado en ningún momento (figura 7).

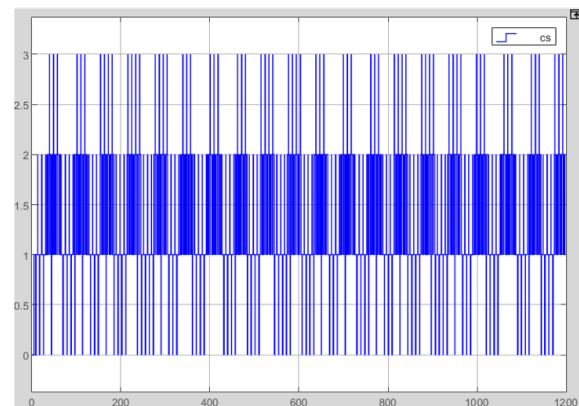


Figura 7: Evolución de la carga de vehículos en el sector de la rotonda con un control por tiempos fijos y simulación de 1200 segundos

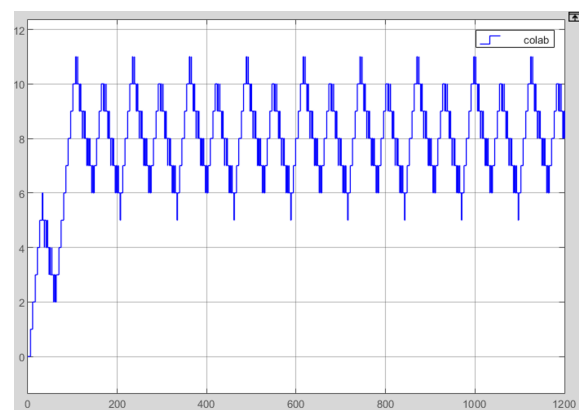


Figura 8: Evolución de la cola de vehículos a la entrada de la rotonda con un control por tiempos variables simulación de 1200 segundos

En la figura 8 se muestra la evolución de la cola de vehículos a lo largo de la simulación con el algoritmo de tiempos variables. Se puede observar, al igual que en el anterior caso, que también se forma un perfil serrado.

Sin embargo, en este caso, al entrar en funcionamiento cuando se detecta una cola mayor de 7 vehículos, el segundo modo del semáforo el cual corta el paso durante 20 segundos y deja pasar vehículos cada 40, con este control, se puede observar una mejoría en cuanto a la cola generada, ya que al dejar más tiempo de paso para los vehículos que se incorporan de la calle cuando el sistema detecta cierto tamaño de cola. Consecuentemente hace que la congestión de tráfico disminuya y que la máxima cola generada bajo estas condiciones sea de 11 vehículos. Al igual que en el caso de tiempos fijos, el total de vehículos en la sección de la rotonda, no supera en ningún momento los 3 vehículos (Figura 9).

Este último aspecto, el de la carga de vehículos

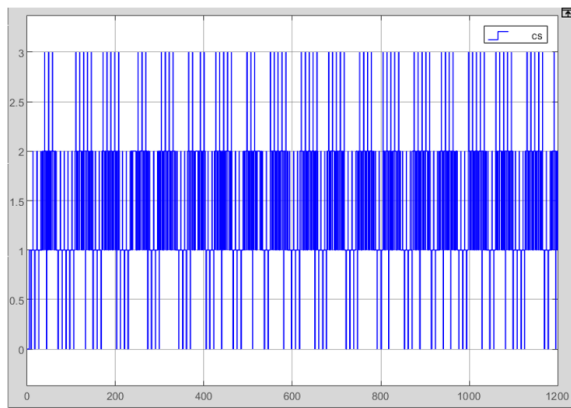


Figura 9: Evolución de la carga de vehículos en el sector de la rotonda con un control por tiempos variables y simulación de 1200 segundos

en el sector, es importante debido a que la capacidad de vehículos se estableció en 3. Consecuentemente, en ambos casos la rotonda está ofreciendo un servicio similar al tráfico. Sin embargo, en el segundo de los casos las colas de espera son menores.

## 5 Conclusiones

Actualmente el control modificando los tiempos de los estados de los semáforos en rotondas no está muy extendido. A su vez el crear un diseño de rotonda modular genera una escalabilidad muy grande y permite la adaptación de este sistema a cualquier tipo de rotonda ya existente de manera rápida y eficiente, ya que la aplicación del control por cola, mejoraría el estado del tráfico.

Gracias al control diseñado y la mejora de tráfico que conlleva su implementación se consigue reducir la contaminación producida en retenciones por los vehículos parados en estos

Optimizando el tráfico se consigue que el tiempo empleado para realizar un desplazamiento sea menor, lo que conlleva que los conductores de vehículos pierdan menos tiempo en sus trayectos. Por otra parte, gracias a un buen control del tráfico el número de accidentes se ve reducido. Ambas mejoras ayudan a mejorar la calidad de vida de las ciudades. A partir del trabajo desarrollado en este proyecto se puede trabajar en la implantación de nuevos sistemas de control y adaptar el sistema a las necesidades de cada rotonda al tratarse de un sistema modular. Además, pueden simularse los problemas de retenciones que podrían surgir en una futura rotonda que se desee instalar, ajustando los parámetros, y optimizar al máximo el tráfico en esta, haciendo uso de la herramienta de simulación con diferentes cambios en

el control. Una de las ampliaciones posibles sería el desarrollo de un prototipo del sistema diseñado, la cual no ha sido posible realizar debido a la actual situación de pandemia y las restricciones de acceso a los laboratorios que esta ha desarrollado.

## Agradecimientos

Trabajo apoyado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España MICINN: Proyecto CICYT PRECON-I4: "Sistemas informáticos predecibles y confiables para la Industria 4.0" TIN2017-86520-C3-1-R.

## English summary

### INTELLIGENT CONTROL IN THE EDGE AND THE FOG: AUTOMATIC TRAFFIC MANAGEMENT IN ROUNDABOUTS

**Abstract** *Crossroads and roundabouts,*

*can produce traffic jams if traffic management is not optimized. To manage these elements, it is necessary to have devices able to detect the level of traffic as well as to act dynamically in order to adapt the cross access time in each street. The system seeks to adapt to the traffic needs in the roundabout, depending on the saturation of each entrance lane, trying to create a fluid and continuous traffic inside it. In order to optimize the traffic, in this work, a simulation experiment is presented in which the ability to reduce traffic is valued by adapting the access times to a roundabout according to the traffic demand. The simulated system is composed of independent devices, which, depending on the information acquired, can change the access time to the roundabout. The results show that it is possible to reduce the traffic load in a roundabout when access times are dynamically automated.*

**Keywords:** Intelligent control, Distributed control, Traffic management, Smart cities.



## Referencias

- [1] Andoni Amurrio, Ekain Azketa, J Javier Gutierrez, Mario Aldea, and Jorge Parra. A review on optimization techniques for the deployment and scheduling of distributed real-time systems. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 16(3):249–263, 2019.
- [2] PJ Escamilla-Ambrosio, A Rodríguez-Mota, E Aguirre-Anaya, R Acosta-Bermejo, and M Salinas-Rosales. Distributing computing in the internet of things: cloud, fog and edge computing overview. In *NEO 2016*, pages 87–115. Springer, 2018.
- [3] Hung-Chin Jang and Ting-Kuan Lin. Traffic-aware traffic signal control framework based on sdn and cloud-fog computing. In *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pages 1–5. IEEE, 2018.
- [4] Rida Khatoun and Sherali Zeadally. Smart cities: concepts, architectures, research opportunities. *Communications of the ACM*, 59(8):46–57, 2016.
- [5] Heiner Lasi, Peter Fettke, Hans-Georg Kemper, Thomas Feld, and Michael Hoffmann. Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6(4):239–242, 2014.
- [6] He Li, Kaoru Ota, and Mianxiong Dong. Learning iot in edge: Deep learning for the internet of things with edge computing. *IEEE network*, 32(1):96–101, 2018.
- [7] Jie Lin, Wei Yu, Nan Zhang, Xinyu Yang, Hanlin Zhang, and Wei Zhao. A survey on internet of things: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(5):1125–1142, 2017.
- [8] Mohsen Mahoor, Farzad Rajaei Salmasi, and Tooraj Abbasian Najafabadi. A hierarchical smart street lighting system with brute-force energy optimization. *IEEE Sensors Journal*, 17(9):2871–2879, 2017.
- [9] Jose-Luis Poza-Lujan, Juan-Luis Posadas-Yagüe, José-Enrique Simó-Ten, and Francisco Blanes. Distributed architecture to integrate sensor information: Object recognition for smart cities. *Sensors*, 20(1):112, 2020.
- [10] Weisong Shi, Jie Cao, Quan Zhang, Youhuizi Li, and Lanyu Xu. Edge computing: Vision and challenges. *IEEE internet of things journal*, 3(5):637–646, 2016.
- [11] František Zezulka, Petr Marcon, I Vesely, and Ondrej Sajdl. Industry 4.0—an introduction in the phenomenon. *IFAC-PapersOnLine*, 49(25):8–12, 2016.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN SISTEMAS DE CONTROL MEDIANTE ENTROPÍA

A. Ruiz-Alba, Ken Sharman y Sergio Sáez

Instituto Tecnológico de Informática (ITI), Universitat Politècnica de València  
{aruizalba, ken,ssaez}@iti.es

## Resumen

*Calculamos, analizamos y medimos la entropía relativa en sistemas de control. Los datos obtenidos se pueden utilizar para detectar errores en su funcionamiento o para ajustar los recursos de cálculo de los componentes, mejorando su rendimiento. Evaluamos la ventaja del método a través de un experimento de simulación.*

**Keywords:** Entropía, sistemas de control, adaptación del periodo, control de rendimiento.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los controladores están presentes en la tecnología con diferentes roles, como estabilizar dinámicas inestables o aumentar el rendimiento [8]. A menudo contienen algunas funciones de control que requieren una ejecución duradera y continua en entornos cambiantes. Para conseguir una adaptación continua, durante su funcionamiento, se puede obtener conocimiento sobre su comportamiento de ejecución.

El controlador mide características del sistema, decide la acción a tomar y actúa sobre el sistema. En este proceso, obtiene cierta información sobre el sistema y la utiliza para reducir la entropía [1]. La reducción de la entropía del sistema debido a su interacción con el controlador de retroalimentación se investiga en [2].

Antes de desplegar el sistema en su campo de acción, solo existe un conocimiento limitado sobre la dinámica del sistema y las interacciones entre diferentes aspectos del entorno. Podemos mejorar esto si se observa el comportamiento real de un sistema en tiempo de ejecución. Ya se han propuesto métodos de adaptación que utilizan monitoreo en línea [3] [4] para mejorar el rendimiento del control.

La entropía está asociada con la cantidad de incertidumbre en el sistema. Se puede reducir si damos más potencia de cálculo a los elementos que participen en el cálculo del controlador. Cuanta más información tenga el controlador, mejor funcionará

el algoritmo de control. El aprendizaje por refuerzo utiliza esta idea en algunos algoritmos, como la búsqueda de políticas de entropía relativa [7].

Los índices de rendimiento se emplean en aplicaciones de control para evaluar su eficiencia. Están asociados con el error de control [5], el cual está influenciado por aspectos que a veces no se pueden mejorar elevando las capacidades de la computación [9].

En este artículo, presentamos un método que utiliza la entropía como parámetro de rendimiento. Esto aporta importantes ventajas; permite distinguir cuando una degradación en el comportamiento del sistema es debida a fuentes de ruido producidas por el entorno, o es debida a un ajuste deficiente de los parámetros de control. También permite adaptar, en tiempo de ejecución, los recursos computacionales con más precisión.

En la sección 2, calculamos la reducción de entropía en los sistemas controladores usando un conjunto continuo de estados. El resultado nos permite establecer un parámetro de rendimiento que se puede utilizar para asignar recursos computacionales. En la sección 3, ilustramos la aplicabilidad y usabilidad de los resultados con un simple péndulo invertido. Finalmente, resumimos los resultados del artículo en la sección 4.

## 2. REDUCCIÓN DE ENTROPÍA EN SISTEMAS CONTROLADOS

Para lograr la operación deseada del sistema, el controlador ejecuta los pasos de control. En cada uno de los cuales realiza las siguientes funciones; estima el estado del sistema, calcula la acción de control teniendo en cuenta el estado estimado y actúa en consecuencia. Por lo tanto, el controlador trabaja utilizando un agente externo que conduce al sistema hasta el estado deseado. Denotamos por  $C_k = c$  la acción de control que en el momento  $t_k$  tiene el valor  $c$ .

Denotamos por  $X_k := X(t_k)$  el estado del sistema en el momento  $t_k$ . La entropía del sistema justo

antes del primer paso de control es

$$S_1^b = - \sum_{x \in \mathcal{X}} p_{X_1}(x) \ln p_{X_1}(x) =: H(X_1), \quad (1)$$

con  $\mathcal{X} = \{x_1, \dots, x_n\}$  como el conjunto de posibles estados del sistema,  $p_{X_1}(x)$  es la probabilidad de cada estado  $x$  en el momento  $t_1$ . En este momento, el controlador mide el estado del sistema, determinando la acción que tomará el controlador. Así, si la medida implica una acción de control  $C_1 = c_1$ , la entropía del sistema disminuirá a

$$S_1^a = - \sum_{x \in \mathcal{X}} p_{X_1|C_1}(x|c_1) \ln p_{X_1|C_1}(x|c_1) \\ =: H(X_1|C_1 = c). \quad (2)$$

Se consigue una reducción de la entropía gracias a la información adquirida por el sistema de control. La reducción de entropía en el  $k$ ésimo paso es

$$\Delta S_k = S_k^a - S_k^b \quad (3)$$

La información utilizada por el controlador en  $M$  pasos es utilizada para reducir la entropía. La reducción de entropía total tras realizar  $M$  pasos de control es

$$\Delta S_{\text{info}} = \sum_{k=1}^M \Delta S_k. \quad (4)$$

Nos centraremos ahora en el caso en el que el estado del sistema se compone de variables continuas, como la posición y la velocidad. El estado discreto  $X_k$  se puede obtener dividiendo un estado continuo  $X_k^c$  en rodajas de ancho  $\Delta$  con una muestra  $i\Delta$  dentro de las rodajas, es decir

$$X_k = i\Delta, \quad \text{if } i\Delta \leq X_k^c \leq (i+1)\Delta. \quad (5)$$

Usamos la entropía diferencial  $h(X_k^c|\mathbf{C}^k = \mathbf{c}^k)$ , que es la entropía de una variable aleatoria continua después del paso de control  $k$ . Es similar a la entropía discreta pero con algunas diferencias significativas [6]. Existe una conexión importante entre la entropía diferencial y la entropía discreta si la densidad de probabilidad de la variable aleatoria  $X_k^c$  es integrable de Riemann, en este caso, podemos escribir esta conexión como

$$\lim_{\Delta \rightarrow 0} H(X_k|\mathbf{C}^k = \mathbf{c}^k) = h(X_k^c|\mathbf{C}^k = \mathbf{c}^k) - \ln \Delta. \quad (6)$$

De todas las distribuciones con la misma desviación estándar, la normal maximiza la entropía [6]. La entropía diferencial de una distribución normal es  $\ln(\sigma\sqrt{2\pi e})$ , lo que da una buena cota superior en términos de la desviación estándar de la variable aleatoria. Usando las ecuaciones (6) y (3),

podemos escribir la reducción de entropía en el paso  $k$  como

$$\Delta S_k = h(X_k^c|\mathbf{C}^k = \mathbf{c}^k) - h(X_k^c|\mathbf{C}^{k-1} = \mathbf{c}^{k-1}) \\ = \ln \frac{\sigma_k^b}{\sigma_k^a}. \quad (7)$$

Donde  $\sigma_k^b$  y  $\sigma_k^a$  son las desviaciones estándar de  $X_k^c$  antes y después de la acción de control  $k$ , respectivamente.

Normalmente se desea especificar cuantitativamente el rendimiento deseado del sistema. Por lo tanto, en la fase de diseño, se puede establecer un umbral en la incertidumbre del sistema, que se corresponde con una entropía  $S_{\text{th}} = \ln(\sigma_{\text{th}}\sqrt{2\pi e})$ , donde  $\sigma_{\text{th}}$  es la desviación estándar máxima del ruido que se puede aceptar. Definimos la entropía relativa como la diferencia entre la entropía después del  $k$ ésimo paso de control y la entropía umbral. Podemos expresar esta diferencia como

$$\Delta S_k^{\text{th}} = S_{\text{th}} - S_k^a = \ln \frac{\sigma_{\text{th}}}{\sigma_k^a}. \quad (8)$$

En una aplicación real, donde tenemos miles de pasos de control, es útil promediar estas diferencias de entropía para calcular el rendimiento. Por lo tanto, definimos la entropía relativa media como la diferencia media entre la entropía después de un paso de control y la entropía umbral como

$$\Delta S^{\text{th}} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \Delta S_k^{\text{th}}. \quad (9)$$

Podemos evaluar esta expresión, y cuando su valor es negativo, se puede reconfigurar el sistema para reducir la incertidumbre.

La reducción de entropía en el sistema debido a la información utilizada por el controlador es un ingrediente fundamental en los sistemas de control con retroalimentación. Una vez que sepamos cómo calcularlo, podemos mejorar el rendimiento de estos sistemas. En particular, en la sección 3, mostramos cómo evaluar la entropía y decidir cómo adaptar los recursos de cálculo en un sistema de control que gobierna a un péndulo invertido.

### 3. APLICACIÓN: SISTEMA DE CONTROL DE UN PÉNDULO INVERTIDO

La idea de utilizar la entropía en la evaluación del rendimiento es distinguir cuando las desviaciones se deben a fuentes de incertidumbre o una mal configuración de los parámetros del sistema. Podemos reconfigurar el sistema con más precisión teniendo en cuenta la entropía relativa. Para mostrar estas ventajas, empleamos el controlador de

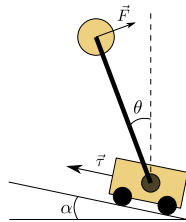


Figura 1: Diagrama del péndulo con las fuerzas que actúan sobre él. El punto de equilibrio inestable se establece en  $\theta = 0$

un péndulo invertido. La figura 1 muestra el sistema físico utilizado, que es un péndulo montado en un carro, que puede moverse bajo el control de un sistema de servos. El ángulo entre el suelo y la línea horizontal es  $\alpha$ . Establecemos el punto de equilibrio inestable en  $\theta = 0$ . El servo actúa sobre el carro con un empuje  $\tau$  que produce una fuerza  $F$ . El sensor es un acelerómetro de dos ejes que se encuentra en la parte superior del péndulo.

Las ecuaciones diferenciales que rigen la dinámica del péndulo son

$$\begin{aligned} (M + m)\ddot{x} + m(l\ddot{\theta} \cos(\theta + \alpha) - l\dot{\theta}^2 \sin(\theta + \alpha)) \\ = F - Mg \sin \alpha \\ l\ddot{\theta} + g(\sin \alpha \cos(\theta + \alpha) - \cos \alpha \sin(\theta + \alpha)) \\ = -\ddot{x} \cos(\theta + \alpha). \end{aligned} \quad (10)$$

Donde  $m$  y  $M$  son las masas del péndulo y el vehículo respectivamente,  $l$  es la longitud del péndulo,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $x$  es el desplazamiento del vehículo en el plano inclinado. Se modificará el valor de  $\alpha$  para simular un entorno donde no conocemos con precisión todos los parámetros. De esta manera podremos estudiar como afecta este desconocimiento en el rendimiento del control. Este valor puede estar en el intervalo  $(\alpha_{min}, \alpha_{max})$  donde  $\alpha_{min}$  y  $\alpha_{max}$  son los valores mínimo y máximo de  $\alpha$ .

La figura 2 muestra la arquitectura para controlar el sistema físico. El controlador lee una señal de error  $e[k]$  y calcula la entrada del actuador  $u_d[k]$ . El actuador (servo) transforma la señal discreta  $u_d[t]$  en una señal continua  $\tau(t)$ , que actúa sobre el sistema físico. Los sensores obtienen la salida de la planta  $a(t)$  y producen una señal discreta  $y_{accel}[k]$ . Finalmente, el estimador de estado calcula el ángulo del péndulo  $\theta_s[k]$  con los datos obtenidos de los sensores. La diferencia entre  $\theta_s[k]$  y una señal de referencia  $r[k]$  es la señal de error  $e[k]$ .

El controlador procesa la información obtenida del estimador de estado y actúa en la planta para obtener el estado deseado. El sistema tiene varias fuentes de incertidumbre; Las condiciones ambien-

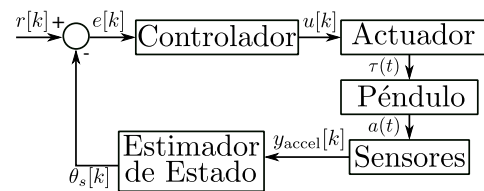


Figura 2: Diagrama de bloques del sistema de control utilizado para estabilizar un péndulo.

tales y las conversiones digitales afectan el comportamiento de los sensores y actuadores. El controlador también tiene fuentes de incertidumbre, como la precisión del reloj del procesador y la planificación de las diferentes tareas que está ejecutando.

Para mantener clara esta demostración, solo tenemos en cuenta el ruido del acelerómetro. La salida de este se puede escribir como:

$$\begin{aligned} y_{accel,x}[k] &= a_x(kT_s) + \eta_{accel,x}[k] \\ y_{accel,y}[k] &= a_y(kT_s) + \eta_{accel,y}[k]. \end{aligned} \quad (11)$$

Donde  $y_{accel,x}[k]$  y  $y_{accel,y}[k]$  son la aceleración medida por los sensores en el eje  $x$  y  $y$ , respectivamente.  $a_x$  y  $a_y$  son las aceleraciones reales en cada eje,  $T_s$  es el período de muestreo y  $\eta_{accel,x}$  y  $\eta_{accel,y}$  son variables aleatorias con una distribución normal de media cero y la misma desviación estándar  $\sigma_s$ .

El estimador procesa las salidas del acelerómetro para obtener  $\theta_s[k]$ . Por lo tanto, está influenciado por el ruido de los sensores. En nuestra aplicación, el estimador de estado consiste en filtros de paso bajo para reducir el ruido del sensor y en un cálculo de  $\text{atan2}$  para obtener el ángulo estimado  $\theta_s$ :

$$\begin{aligned} \theta_s[k] &= \text{atan2}(\text{LPF}(y_{accel,x}[k]) - F[k], \\ &\quad \text{LPF}(y_{accel,y}[k])) = \hat{\theta}_s[k] + \eta_\theta[k]. \end{aligned} \quad (12)$$

Donde  $\text{LPF}(\cdot)$  Representa el operador del filtro de paso bajo,  $F[k]$  es la fuerza sobre el péndulo producida por el empuje del automóvil, y  $\hat{\theta}_s[k]$  es el valor esperado del sensor sin ruido.  $\eta_\theta[k]$  es el error propagado, que es una variable aleatoria con una desviación estándar  $\sigma_\theta[k]$ . Como mencionamos en la sección anterior, para una desviación estándar dada, la distribución que maximiza la entropía es la normal. Por lo tanto, para obtener un límite de entropía, asumimos que  $\eta_\theta[k]$  es una distribución normal de media cero con desviación estándar  $\sigma_\theta[k]$ .

Para evaluar el rendimiento del controlador diseñado, usamos  $\Delta S^{\text{th}}$  dado en la ecuación (9) y configurando  $\sigma_k^a = \sigma_\theta[k]$ . En el apéndice se muestra un método para obtener un valor estimado

de  $\sigma_\theta[k]$ , teniendo en cuenta que es la desviación estándar de una distribución normal. También usamos el coste de control, que puede tener múltiples definiciones, pero elegimos la Integral de Error Absoluto (IAE), que tiene la forma general.

$$J = \int_0^{t_{ss}} |e(t)| dt. \quad (13)$$

Donde  $e(t)$  es la señal de error, que se integra de  $t = 0$ , cuando la referencia comienza a cambiar, a  $t = t_{ss}$  cuando el sistema está en estado estable.

En este ejemplo, el sistema de control intenta sostener el péndulo. Su posición inicial es  $\theta = \frac{\pi}{4}$ , y evoluciona a  $\theta = 0$ . Realizamos varias simulaciones de esta maniobra con diferentes ruidos de sensor. La figura 3 (a) muestra el costo de control y la entropía para diferentes desviaciones estándar del sensor  $\sigma_s$ . Cuando la desviación estándar aumenta, el estado estimado es más inexacto y, por lo tanto, la entropía también aumenta. Las acciones del controlador son aún más inexactas y, en consecuencia, el costo de control también aumenta.

La figura 3 (b) muestra el costo de control y la entropía para diferentes ángulos  $\alpha$ . En este caso, la entropía no aumenta porque la desviación estándar estimada para  $\theta$  es similar en todas las simulaciones. Por otro lado, el costo de control aumenta porque los parámetros del controlador no se configuran teniendo en cuenta el nuevo ángulo.

Si medimos un incremento de entropía como en la figura 3 (a), las fuentes de ruido deben revisarse antes de establecer nuevos valores en los parámetros del sistema de control. Por otro lado, si la entropía relativa es menor que un valor específico, podemos relajar los recursos en el estimador y asignarlos a otras unidades. Por tanto, es posible detectar si las desviaciones se deben a un estado estimado incorrecto, a causa del ruido, o a un ajuste de control impreciso, lo que permite reconfigurar el sistema con mayor precisión. En sistemas más complejos, con más sensores y con más variables de estado, este método permite adquirir más información útil que usando solamente costes de control.

## 4. CONCLUSIÓN

En este artículo, hemos presentado una descripción de la entropía relativa para sistemas de control. El enfoque propuesto permite detectar las fuentes de error en el funcionamiento del control o los procesos que pueden transferir recursos computacionales a otros, mejorando su rendimiento total. Hemos demostrado, mediante la simulación de un péndulo invertido, la aplicabilidad del método.

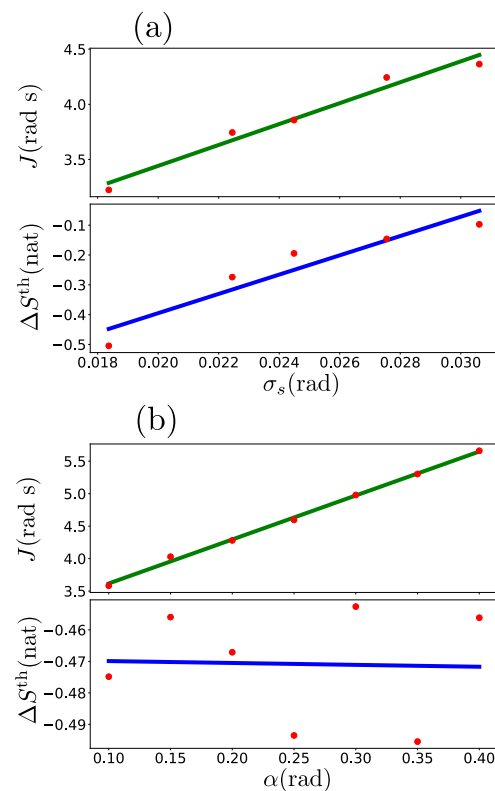


Figura 3: Coste de control  $J$  y entropía relativa  $\Delta S^{\text{th}}$  para diferentes desviaciones estándar del sensor  $\sigma_s$  (a) y ángulo  $\alpha$  con la horizontal (b).

## 5. APÉNDICE

$\sigma_k^a$  es una variable desconocida y debe estimarse. Dividimos el tiempo de simulación en  $M$  rodajas de longitud  $T$ . Hacemos  $N$  medidas en este intervalo de tiempo, obteniéndose el valor  $y_k$ , que se puede expresar como

$$y_{k,i} = x_{k,i} + \sigma_{k,i}^a, \quad (14)$$

donde  $k = (1, \dots, N)$ ,  $i = (1, \dots, M)$  y  $x_{k,i} = x(kT_s + iT)$  es el estado del sistema en el momento  $kT_s + iT$ . La evolución del sistema en el período de tiempo  $T$  puede ser aproximadamente como

$$x_i(t) = a_i + b_i t, \quad (15)$$

donde  $a_i$  y  $b_i$  son constantes que se estiman con el método de mínimos cuadrados. Entonces  $\sigma_k^a$  se puede estimar como

$$\hat{\sigma}_i^a = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^N (y_{k,i} - x_{k,i})^2. \quad (16)$$

La diferencia entre la entropía estimada en el momento  $iT$  y la entropía umbral es  $\Delta \hat{S}_i^{\text{th}} = \ln \frac{\sigma_i^{\text{th}}}{\hat{\sigma}_i^a}$ . Finalmente, teniendo en cuenta todos los intervalos

los de tiempo, obtenemos:

$$\Delta \hat{S}^{\text{th}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta \hat{S}_i^{\text{th}} \quad (17)$$

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CPS4EU de la Comisión Europea (ECSEL-JU, contract 826276).

### English summary

## PERFORMANCE OPTIMIZATION IN CONTROL SYSTEMS USING ENTROPY

### Abstract

*We calculate, analyze and measure the relative entropy in control systems. The data obtained can be used to detect a source of malfunction or to adjust the computation resource of the components improving its performance. We evaluate the advantage of the method through a simulation experiment.*

**Keywords:** Entropy, control systems, rate adaptation, control performance.

### Referencias

- [1] J. Bechhoefer, “Feedback for physicists: A tutorial essay on control”, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 77, pp. 783, 2005.
- [2] F. J. Cao and M. Feito, “Thermodynamics of feedback controlled systems”, *Phys. Rev.*, vol. 79, 2009.
- [3] X. Dai and A. Burns, “Period Adaptation of Real-Time Control Tasks with Fixed Priority Scheduling”, 2019.
- [4] M. M. Ben Gaid, Arben Cela, Yskandar Hamam, and Cosmin Ionete. “Optimal scheduling of control tasks with state feedback resource allocation”, In *American Control Conference*, 2006, pages 6–pp. IEEE, 2006.
- [5] C. Lozoya, P. Marti, M. Velasco, and J. M. Fuertes. “Control performance evaluation of selected methods of feedback scheduling of real-time control tasks”. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2):10668–10673, 2008.

- [6] T. M. Cover and J. A. Thomas, “Elements of Information Theory” (Wiley, New York, 1991).
- [7] J. Peters, K. Mülling, and Y. Altun, “Relative entropy policy search”. In *AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2010.
- [8] S.Y. Liang, L.H. Rogelio, G.L. Robert “Machine process monitoring and control: the state-of-the-art”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, pp. 297-310, 126 (2004)
- [9] A. Cervin, J. Eker, and L. Sha. “An introduction to control and scheduling co-design”. In *Decision and Control*, 2000. Proceedings of the 39th IEEE Conference on, volume 5, pages 4865–4870. IEEE, 2000



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).



# Revisión de tecnologías habilitadoras para el control biológico y de plagas en el sector hortofrutícola

Cristian Martín, Luis Llopis, Bartolomé Rubio, Manuel Díaz  
ITIS Software, Universidad de Málaga, Málaga, España, (e-mail: cmf@lcc.uma.es)

Fernando Díaz

Software for Critical Systems SL, Arquitecto Francisco Peñalosa, 18, 29010, Málaga, España

## Resumen

La monitorización continua tanto de plagas que afectan a los cultivos hortofrutícolas en agricultura intensiva de invernadero, como de la lucha biológica, utilizada en este tipo de cultivos para combatir las plagas de una forma sostenible con el medio ambiente son esenciales en este sector. Actualmente, en la mayoría de los casos este control se realiza de forma manual (no siempre sin dificultad), lo que requiere a los agricultores de una supervisión continua para poder detectar, en el menor tiempo posible, cualquier brote que afecte a sus cultivos. En este trabajo se presenta una revisión de tecnologías habilitadoras para permitir una monitorización continua, sostenible y de forma autónoma en este sector estratégico en España. Estas tecnologías se integran en una propuesta de sistema de ayuda a la decisión para el control de plagas y control biológico.

**Palabras clave:** Control biológico; control de plagas; sector hortofrutícola; arquitecturas multi-nivel; vehículo de inspección autónomo; inteligencia artificial

## 1 Introducción

España es una de las mayores regiones agrícolas de Europa, y en concreto su provincia de Almería, también conocida como la “Huerta de Europa”, produce y exporta un amplio abanico de productos hortofrutícolas gracias a la explotación de la agricultura intensiva en su “Mar de Plástico”. Esta actividad económica ha sido el principal motor económico de esta región desde los años 60 hasta hoy en día, siendo la región con la mayor concentración de invernadero de Europa. El camino hacia la producción sostenible, el posicionamiento de los productos hortofrutícolas andaluces en mercados internacionales y la mejora en la gestión de plagas, llevaron a la incorporación y la obligatoriedad de la Gestión Integrada de Plagas (GIP) [4] y la adopción de mecanismos de sostenibilidad como el control biológico de plagas.

El control biológico de plagas permite emplear elementos y organismos biológicos respetuosos con

el medio ambiente y con garantías sanitarias para el control de plagas, lo que se traduce en una disminución del uso de productos fitosanitarios y, por tanto, en una mejora en la seguridad alimentaria y la calidad resultante de los productos hortofrutícolas, libres de residuos. Ejemplos de control biológico de plagas son el *Orius laevis* y *Amblyseius swirskii*, especies que permiten luchar y combatir contra el trips (*Frankliniella occidentalis*) y la mosca blanca (*Bemisia tabaci*) que hacen un especial daño a explotaciones hortofrutícolas como la del pimiento. Al ser depredadores naturales de trips y mosca blanca, y dado el especial daño que hacen estas plagas a los cultivos de pimiento, su presencia en invernaderos es crítica para el control de estas plagas de manera sostenible. A pesar de los beneficios que aportan este tipo de depredadores para el control biológico de plagas, su detección no siempre es sencilla, ya que en muchos casos estos depredadores se desplazan en el envés de las hojas de las plantas y poseen de un tamaño muy reducido (ver Figura 1). Por tanto, resulta a veces muy tedioso, lo que requiere de pasadas manuales y con una lupa, tener una visión clara del estado de los invernaderos con respecto al control biológico. Además, actualmente el tejido agrario carece de una solución autónoma que lo permita.



Figura 1: Especies *Amblyseius swirskii* de control biológico presentes el envés de una hoja de pimiento

Cuando una plaga se expande y daña seriamente

a los cultivos, es fácilmente detectable a simple vista ya que las hojas pueden cambiar de color y la planta detiene drásticamente su crecimiento. Sin embargo, cuando éstas se desplazan a lo largo de las plantaciones, pueden ser difícil de localizar, ya que pueden poseer un carácter diminuto al igual que las especies depredadoras. Por otro lado, la aplicación de las especies de control biológico es llevada a cabo en diferentes etapas de las plantaciones hortofrutícolas, siguiendo normalmente un proceso manual y seguido por un patrón preestablecido, como, por ejemplo, depositando una solución biológica cada 5-6 plantas (ver Figura 2). Sin embargo, al igual que las plagas, la presencia de estos organismos puede variar a lo largo del ciclo de vida de los cultivos hortofrutícolas, por lo que una monitorización continua del cultivo es actualmente requerida tanto por los propios agricultores como por los técnicos agrícolas. Por otro lado, las características de las plantaciones y su biodiversidad presente pueden dar lugar a otro tipo de disposición de las soluciones de control biológico, que puede tener una repercusión económica positiva para los agricultores, y para la que la monitorización continua es necesaria para asegurar su habitabilidad. El exceso de control biológico puede dar lugar también a que los depredadores naturales empiecen a consumir recursos de las plantas para su alimentación y mermen su rendimiento, por lo que un perfecto equilibrio entre plagas y control biológico es requerido para asegurar la biodiversidad de especies y un óptimo ambiente para los cultivos hortofrutícolas.

En el presente trabajo se presenta una revisión de tecnologías habilitadoras para mejorar la sostenibilidad en el sector hortofrutícola, en concreto, para ofrecer un sistema de monitorización autónomo del control biológico y de plagas en cultivos de invernadero, que son elementos clave para el desarrollo de sus productos. Estas tecnologías se dividen en tres principales líneas: 1) arquitecturas multinivel para optimización de latencia y computación de soluciones IoT (Sección 2); 2) vehículos de inspección autónomos (Sección 3); y 3) técnicas de visión por computador e inteligencia artificial (Sección 4). Por último, en la Sección 5 se presenta una propuesta de sinergia de estas tecnologías y como pueden integrarse para contribuir con el objetivo propuesto.

## 2 Arquitecturas multinivel para optimización de latencia y computación de soluciones IoT

El Internet de las cosas (IoT) [5] es una tecnología que involucra un conjunto de objetos conectados entre sí a través de Internet y que se caracteriza



Figura 2: Solución depositada de *Amblyseius swirskii* para el control biológico en cultivo de pimiento

por ser una tecnología ubicua que está presente en un gran número de áreas, como puede ser la monitorización de infraestructuras críticas, smart home, smart city, sistemas de monitorización o sistemas asistidos para el cuidado de la salud. El IoT está cada vez más presente en nuestro día a día, cubriendo un gran abanico de posibilidades con el fin de optimizar los procesos y problemas a los que se enfrenta la sociedad. Sin embargo, los dispositivos involucrados en el IoT se corresponden normalmente con dispositivos embebidos con limitaciones de almacenamiento y procesamiento, así como restricciones de memoria y potencia. Además, el número de objetos o dispositivos conectados a Internet contiene grandes previsiones de crecimiento para los próximos años, con unas expectativas de 500 mil millones de objetos conectados para 2030 según CISCO.

Por lo tanto, para dar cabida a despliegues del IoT, además de suplir las limitaciones que existen, es necesario involucrar nuevos sistemas y paradigmas que faciliten la adopción de este campo. Diferentes integraciones han sido investigadas para suplir las limitaciones del IoT [5]. Entre ellas, cabe destacar a cloud computing (computación en la nube), también conocido como el cloud de las cosas, que ha intentado solventar las limitaciones del IoT. Cloud computing permite un acceso bajo demanda a un conjunto configurable

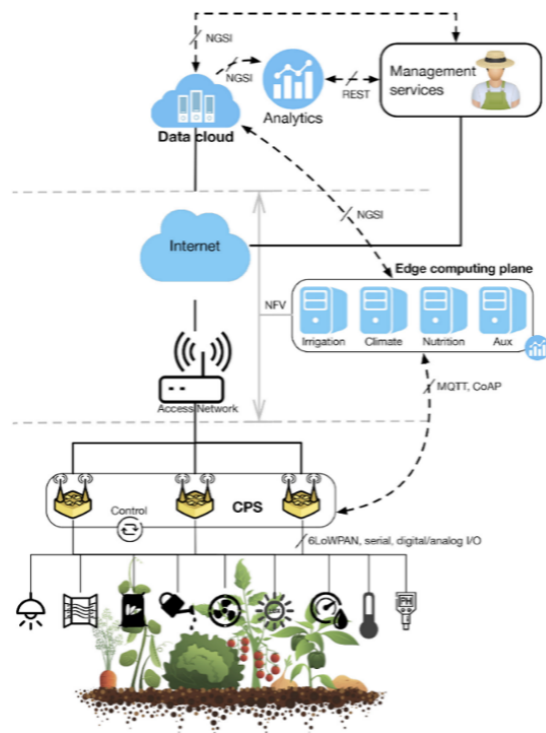


Figura 3: Visión general de la arquitectura utilizada para agricultura de precisión. Fuente: [20]

de recursos, proveyendo capacidades ilimitadas en términos de almacenamiento y procesamiento, las principales limitaciones en el IoT. Aunque la integración con cloud computing provee al IoT de las capacidades mencionadas, las necesidades actuales de extraer conocimiento de información en tiempo real implican pensar más allá. Recientes paradigmas como fog y edge computing intentan abordar este último problema, moviendo el procesamiento lo más cerca posible a dónde es generado, reduciendo por tanto la latencia y el ancho de banda en las comunicaciones entre el IoT y el cloud. En el contexto de la agricultura, este tipo de paradigmas ha sido aplicado en múltiples procesos en los que cabe destacar la agricultura de precisión y el estado de plantaciones [8]; marcos de trabajo para facilitar a los usuarios la simulación de escenarios agrícolas personalizados, específicamente para identificar la ubicación sensores, el área de cobertura y la implementación de la línea de visión [2]; y la gestión eficiente del cultivo en invernaderos [14]. También han sido aplicados a técnicas de visión por computador para mejorar los tiempos de latencia y cómputo [7]. La Figura 3 muestra un ejemplo de la aplicación de edge computing para optimizar el análisis de información en la agricultura de precisión.

Existe actualmente una tendencia para desplegar los algoritmos de visión por computador en el ciclo de cómputo que va desde el IoT hasta

el cloud, incluyendo paradigmas como el edge y fog computing, para diversos fines, como el soporte para acciones críticas y la reducción del ancho de banda a partir del particionamiento, a veces dinámico [9] de las capas involucradas. Se ha demostrado que tener múltiples capas de estos algoritmos puede aumentar la solidez del reconocimiento de patrones, pero también reducir la latencia de ejecución si estas están distribuidas en diferentes niveles y pueden tener salidas de predicción intermedias [17]. Por esta razón, las capas de estos algoritmos se están distribuyendo en arquitecturas multicapa tales como edge y fog en el continuo IoT-cloud. La monitorización, la administración y la implementación adaptable de estos algoritmos distribuidos están actualmente limitadas, lo que puede dificultar el desarrollo de estas aplicaciones. Nuevas arquitecturas y capas de comunicación flexibles son necesarias en este campo.

### 3 Vehículos de inspección autónomos

Un vehículo de inspección puede ofrecer una solución no intrusiva para evaluar el estado de los cultivos con respecto a las plagas existentes y el control biológico. Este debe realizar sus tareas de forma completamente autónoma, siendo capaz de llevar a cabo la inspección sin intervención humana. Para ello, el vehículo debe resolver una serie de tareas por si solo que son habituales en la robótica móvil, como la localización, planificación y control de movimientos. Estas cuestiones, aunque habituales en el campo de la robótica móvil, son complejas en el sector hortofrutícola, debido a las características del entorno en el que se debe desenvolver su trabajo: un entorno de interior no estructurado. El hecho de tratarse de un entorno interior sin una estructura geométrica regular, como el interior de cualquier edificio o construcción, y un terreno inestable, conlleva concentrar las características más desfavorables para un sistema autónomo.

La principal desventaja de un entorno interior frente a uno exterior es la imposibilidad de utilizar el sistema GPS para determinar la localización de un vehículo en la superficie terrestre [19]. Contar con la localización proporcionada por un GPS alivia enormemente el problema de localización de un vehículo. Por tanto, en un entorno interior la localización debe realizarse por otros medios, empleando sensores internos: odometría [6] (giro de las ruedas) y sensores inerciales (giroscopos y acelerómetros), y sensores que realizan una medida externa al vehículo para corregir los errores acumulativos provocados por los sensores internos. Como sensores internos se suelen utilizar LIDAR

o Sonar, y cámaras. Sin embargo, el uso de estos sensores en entornos interiores está muy desarrollado en los entornos interiores más habituales, como el interior de edificios donde existe una estructura geométrica regular, compuesta por paredes, puertas, columnas, etc., que se pueden identificar y cuya información geométrica es fácilmente parametrizable para ser usado por técnicas de localización o incluso para localización y creación de mapas (SLAM) [15]. Además, en este tipo de entorno interiores el suelo suele ser liso y estable, lo que no solo facilita el movimiento del vehículo, sino su propia localización.

En un entorno como en el que debe trabajar el vehículo autónomo no existe una estructura regular que pueda emplearse para resolver los problemas anteriormente mencionados, tanto la localización como incluso la creación de mapas del entorno. Por tanto, supone un reto en el seno del presente proyecto, que puede beneficiarse de la modificación del entorno introduciendo tags o elementos visualmente distinguibles en las zonas de inspección. De esta forma, con estos elementos se consiguen resolver dos cuestiones, la identificación de las zonas de inspección y la localización del vehículo en el entorno. Esto último permitirá desarrollar técnicas de localización, o incluso de SLAM para obtener mapas precisos del entorno, adaptadas a la situación especial del presente proyecto.

Resolver el problema de localización es esencial para cualquier vehículo autónomo, para poder desempeñar de forma precisa el resto de las tareas necesarias, como la planificación y el control de movimientos. En primer lugar, la planificación de las tareas de inspección se puede llevar a cabo empleando técnicas de búsquedas en grafos [12], ampliamente conocidas y que proporcionan muy buenos resultados. Estas técnicas se basan en encontrar los mejores caminos entre las zonas, en este caso de inspección, que se deben visitar minimizando algunos factores como la distancia, la energía necesaria para realizar los movimientos, la maniobrabilidad del camino que une dichas zonas o cualquier otro criterio que permita establecer un coste. Este tipo de técnicas tendrán que estar adaptadas a superar problemas en función de la dimensión del entorno y las zonas de inspección.

Una vez resuelto el problema de planificación del camino a realizar, es necesario enviar al vehículo la serie temporal de acciones que lleven desde la posición actual al destino. Este problema se suele resolver con técnicas de evitar obstáculos para realizar el movimiento de forma reactiva y garantizar un movimiento con seguridad en entornos dinámicos. En otras situaciones, donde

el movimiento está fuertemente condicionado por las condiciones del entorno, se utilizan técnicas de seguimiento de trayectorias [1]. Este tipo de técnicas se utilizan en situaciones como la conducción autónoma para la circulación en un carril de la carretera, el comportamiento de seguimiento de pasillos en robot de limpieza, etc. En el caso del movimiento en entorno agrícolas, el camino también está establecido por la estructura regular del cultivo, por lo que se pueden definir trayectorias que atraviesen estos caminos prefijados y, empleando las técnicas de evitar obstáculos, el vehículo se mantenga a una distancia adecuada de las plantas y reaccionar ante obstáculos imprevistos. El trazado de estas trayectorias se puede realizar empleando curvas de Brezier o Splines, asegurando que las características cinemáticas y dinámicas del vehículo permiten realizar los giros y movimientos necesarios para ejecutar dichas trayectorias. Estos movimientos son complicados debido a las características del terreno, un suelo inestable (compuesto por tierra y piedras) en el que además pueden existir canalizaciones de instalaciones u otros obstáculos, como suele ocurrir en los invernaderos.

#### 4 Técnicas de visión por computador e inteligencia artificial

Las técnicas de visión por computador comprenden mecanismos que permiten adquirir, procesar y analizar imágenes tomadas del mundo real. Tradicionalmente, los sistemas de visión por computador han sido utilizados para la extracción de características de las imágenes que permitirían evaluar o clasificar diferentes aspectos de las mismas, a veces apoyados en técnicas de Machine Learning para dichos objetivos. Pese a que los sistemas de visión tradicionales ofrecen buenos resultados desde un punto de vista de rendimiento, su potencial es menor a la hora de extraer información y patrones complejos. Hoy en día la combinación de técnicas de visión por computador, junto con técnicas de inteligencia artificial como Deep Learning, y en conjunción con arquitecturas multi-nivel que permiten mejorar su rendimiento, ofrecen un nuevo paradigma que permitirá resolver problemas complejos de forma eficiente.

El desarrollo de sistemas de reconocimiento de patrones o de aprendizaje automático ha requerido durante numerosos años de un gran trabajo de ingeniería y una considerable experiencia en el dominio, especialmente en aquellos considerados como complejos, para poder diseñar un extractor de características que transformara datos en bruto en una representación interna adecuada para que



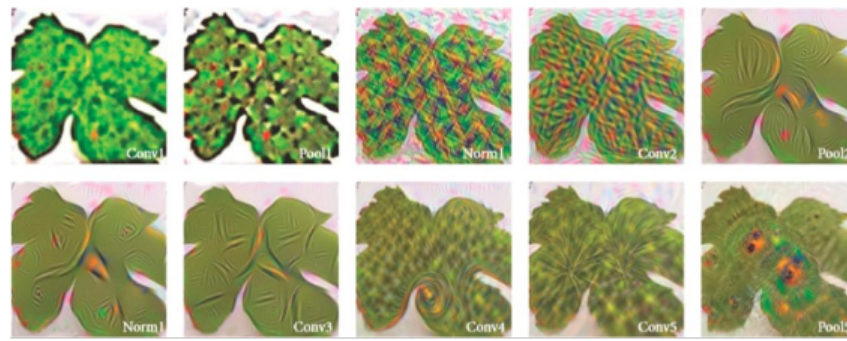


Figura 4: Visualización de las imágenes de las capas de salida después de cada paso de procesamiento de una red convolucional para la identificación de enfermedades de plantas a partir de imágenes de hojas. Fuente: [16]

los sistemas de predicción puedan realizar una correcta clasificación. Deep learning [11] está basado en técnicas de aprendizaje de representación que permiten descubrir de forma automática las representaciones necesarias para la detección o clasificación de patrones, reduciendo así el esfuerzo humano en el diseño de características. Deep learning ofrece modelos computacionales que se componen de múltiples capas de representación o procesamiento no lineales, obtenidas a partir de representaciones simples, que son utilizadas para aprender representaciones de datos con múltiples niveles de abstracción. Por tanto, una sola capa neuronal puede aprender una nueva representación simple a través de datos de entrada, y de forma conjunta, las técnicas de deep learning pueden aprender representaciones complejas. Las técnicas de deep learning han mejorado notablemente el estado del arte en reconocimiento de voz, detección de objetos y muchos otros dominios, como el descubrimiento de fármacos.

En el contexto de la agricultura [10], las técnicas de deep learning se han utilizado ampliamente para la detección de plagas. Cabe destacar las redes neuronales convolucionales, que permiten aprender características abstractas en el procesamiento de imágenes a partir de la combinación de múltiples capas convolucionales. Estas permiten detectar y/o predecir a través de imágenes no intrusivas de plantas. Las capas convolucionales actúan como extractores de características de imágenes, cuya dimensionalidad es luego reducida por las capas agrupadas. Las capas convolucionales codifican múltiples características de nivel inferior en características más discriminativas, de una manera sensible al contexto. Un ejemplo se muestra en la Figura 4, para la detección de enfermedades en hojas. Se puede observar que después de cada paso de procesamiento, los elementos particulares de la imagen que revelan la indicación de una enfermedad se vuel-

ven más evidentes, especialmente en el paso final (Pool5). Estas técnicas también han sido aplicadas con éxito para la detección de plagas como se demuestra en diversos trabajos [13], [3] y enfermedades de plantas [16]. Además de los autoencoders [18], que permiten reconstruir patrones a partir de muy escasa información de entrada, por lo que es posible detectar plagas en plantaciones hortofrutícolas con pequeños patrones. Otros enfoques, aunque en menor medida, también utilizan Differential Recurrent Neural Networks (DRNN), Long Short-Term Memory (LSTM), y deep belief networks (DBN). A pesar de los avances en este sector, actualmente existe una carencia de soluciones e implementaciones para la detección de los individuos utilizados para el control biológico, al igual que ocurre para la detección de plagas, que junto con la detección de plagas pueden ofrecer una completa visión de la biodiversidad presente en los invernaderos para la toma de decisiones de los agricultores. Además, este sector necesita nuevos y completos datasets que sirvan de base a la comunidad científica y e industrial para mejorar y crear nuevas soluciones en este sector.

## 5 Sistema de ayuda a la decisión: Integración de tecnologías para el control biológico y de plagas

Como resultado del análisis previo, se presenta un sistema de ayuda a la decisión para la monitorización continua tanto de plagas que afectan a los cultivos hortofrutícolas en agricultura intensiva de invernadero, como de la lucha biológica, usado en este tipo de cultivos para combatir las plagas de una forma sostenible con el medio ambiente. Para ello, se pretende la sinergia e integración de tecnologías punteras e innovadoras presentadas: 1) un vehículo de inspección autónomo que recorrerá los pasillos de los invernaderos para su continuo análisis y evaluación de la biodiversi-

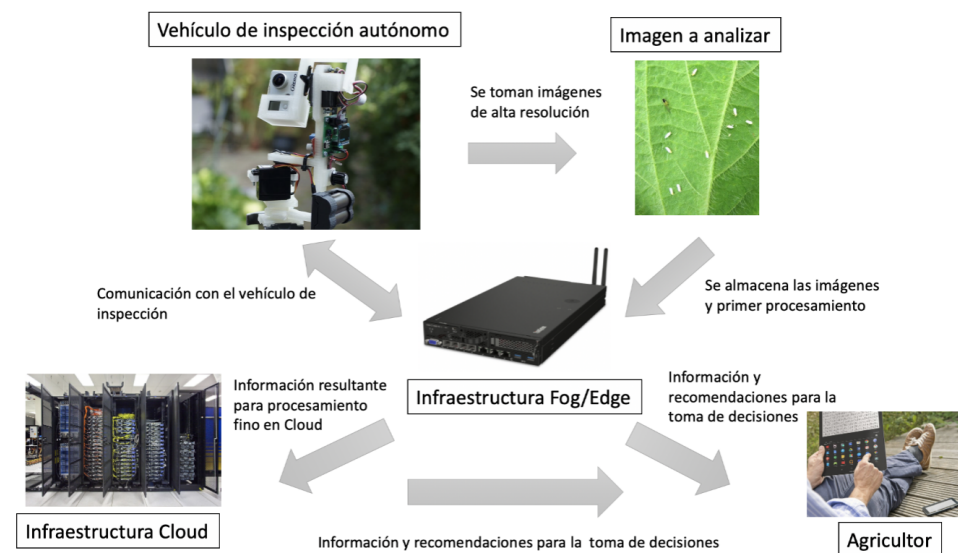


Figura 5: Visión general de la arquitectura del sistema de ayuda a la decisión para el control biológico y de plagas

dad existente; 2) técnicas de visión por computador que analizarán en tiempo real el estado de los cultivos y los depredadores y plagas existentes; 3) y una arquitectura multinivel para optimizar los tiempo de latencia y ejecución de las técnicas de visión por computador y poder actuar en la menor brevedad posible ante cualquier situación anómala o brote. Esta integración ofrecerá un nuevo sistema de monitorización continua que permitirá a los agricultores de una forma cómoda y accesible a través de sus móviles y tabletas comprobar el estado actual de sus plantaciones, ofreciendo una solución para la ayuda en la toma de decisiones en el proceso de gestión de plagas.

El vehículo de inspección autónomo no intrusivo se desplazará por los pasillos de los invernaderos para monitorizar de forma continua el estado de los cultivos con respecto a las plagas existentes y el control biológico. Aparte de la gestión de trayectorias que serán necesarias para que el vehículo se desplace de la forma adecuada y esperada por los invernaderos, y su correcto diseño para que el vehículo no tenga problema durante su trayectoria, el vehículo deberá de contar con un sistema móvil de visión que permita capturar imágenes de alta resolución para la detección de las especies presentes en los invernaderos y en posiciones de difícil acceso como el envés de las hojas.

Las técnicas de visión por computador permitirán analizar en tiempo real las imágenes capturadas por el vehículo de inspección para identificar la biodiversidad existente en los invernaderos y poder predecir el futuro estado de los mismos. Estas técnicas se desarrollarán teniendo en cuenta que pueden ser desplegadas de forma dis-

tribuida en infraestructuras multinivel para la optimización de su ejecución y tiempos de respuesta.

Por último, nuevas arquitecturas multinivel permitirán desbloquear la flexibilidad de las anteriores técnicas de análisis en invernaderos en paradigmas como edge y fog computing, y habilitar su gestión, despliegue y monitorización para optimizar la respuesta del sistema. Las técnicas de análisis serán distribuidas de forma eficiente a través de estas capas, en lo que es conocido como el Cloud-to-things continuum, con el objetivo de reducir la latencia del sistema y actuar lo antes posible ante cualquier plaga o escasez de control biológico. Estas arquitecturas requerirán de nuevas capas de comunicación que puedan analizar la infraestructura existente y puedan conectar el conjunto de técnicas y procesamiento de una forma ininterrumpida y segura.

Para la consecución del sistema de ayuda a la decisión será necesaria la perfecta integración de los anteriores desafíos con el fin de que el vehículo de inspección se desplace por la trayectoria indicada por los invernaderos y se pueda analizar en tiempo real el estado de los cultivos a partir de técnicas de visión distribuidas en las arquitecturas multinivel. Todo ello con el fin de ofrecer a los agricultores un sistema de ayuda a la decisión y con el que podrán visualizar el estado de sus plantaciones (tanto de plagas como de control biológico) de una forma cómoda y accesible a través de sus smartphones o tablets.



## 6 Conclusiones y Trabajos futuros

El camino hacia la producción sostenible en la agricultura necesita de la mejora en la gestión de plagas y la adopción de mecanismos como el control biológico de plagas que reduce drásticamente el uso de pesticidas. Aunque existen diversas soluciones que abordan ciertos aspectos en este sentido, como la detección de enfermedades y brotes de plagas en invernaderos, actualmente existe una carencia de soluciones que aborden el tan importante control biológico para lograr un perfecto equilibrio entre depredadores y parásitos y favorecer el óptimo desarrollo de los cultivos hortofrutícolas. El control biológico y de plagas necesitan una monitorización continua por parte de los agricultores y las nuevas tecnologías pueden ayudar, no solo a facilitar su labor sino a poder anticiparse a la aparición de plagas y a controlar, de forma más precisa, la lucha biológica. En este trabajo se hace una revisión de tres tecnologías habilitadoras para promover un sistema autónomo para la monitorización continua de plagas y control biológico en invernaderos. Estas líneas se engloban en: arquitecturas multinivel para la optimización de latencia; vehículos de inspección autónomos; y técnicas de inteligencia artificial y visión por computador. Por último, se presenta una integración de las mismas en un sistema que sirva de soporte en la toma de decisiones para los agricultores.

Como trabajo futuro se espera que el sistema propuesto sea implementado y validado en una explotación hortofrutícola en invernaderos, y en particular, en plantaciones de Pimiento California, que servirán como primera experiencia para poder extrapolar los resultados a otras frutas y hortalizas donde se requiera de un control de plagas y control biológico.

### Agradecimientos

Este trabajo está financiado por los proyectos RT2018-099777-B-I00 (“rFOG: Improving latency and reliability of offloaded computation to the FOG for critical services”), PY20.00788 (“IntegraDos: Providing Real-Time Services for the Internet of Things through Cloud Sensor Integration”) y UMA18FEDERJA-215 (“Advanced Monitoring System based on Deep Learning Services in Fog”). Colaboración con el Grupo de Investigación en Robótica y Mecatrónica de la Universidad de Málaga.

### English summary

**Review of enabling technologies for pest and biological control in the horticultural sector**

## Abstract

*Continuous monitoring of pests affecting vegetable crops in intensive greenhouse agriculture as well as biological control, used in this type of crops to combat pests in an environmentally sustainable way, are essential in this sector. Currently, this control is done manually in most cases (not always without difficulty), which requires farmers to continuously monitor to detect, in the shortest possible time, any outbreak affecting their crops. This paper presents a review of enabling technologies to allow continuous, sustainable and autonomous monitoring in this strategic sector in Spain. These technologies are integrated in a decision support system for pest control and biological control.*

**Keywords:** biological control; pest control; horticultural sector; multilevel architectures; autonomous inspection vehicle; artificial intelligence

## Referencias

- [1] M. Abdelbar and R. M. Buehrer. Indoor localization through trajectory tracking using neural networks. In *MILCOM 2017-2017 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pages 519–524. IEEE, 2017.
- [2] N. Ahmed, D. De, and I. Hussain. Internet of things (iot) for smart precision agriculture and farming in rural areas. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(6):4890–4899, 2018.
- [3] X. Cheng, Y. Zhang, Y. Chen, Y. Wu, and Y. Yue. Pest identification via deep residual learning in complex background. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141:351–356, 2017.
- [4] J. de Andalucía. Gestión integrada de plagas. Disponible online: <https://bit.ly/362Cvid>. (accedido el 30 de Junio de 2021).
- [5] M. Díaz, C. Martín, and B. Rubio. State-of-the-art, challenges, and open issues in the integration of internet of things and cloud computing. *Journal of Network and Computer applications*, 67:99–117, 2016.

- [6] J. Engel, V. Koltun, and D. Cremers. Direct sparse odometry. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 40(3):611–625, 2017.
- [7] T. N. Gia, L. Qingqing, J. P. Queralta, Z. Zou, H. Tenhunen, and T. Westerlund. Edge ai in smart farming iot: Cnns at the edge and fog computing with lora. In *2019 IEEE AFRICON, September 25-27, Accra, Ghana*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [8] E. Guardo, A. Di Stefano, A. La Corte, M. Sapienza, and M. Scatà. A fog computing-based iot framework for precision agriculture. *Journal of Internet Technology*, 19(5):1401–1411, 2018.
- [9] C. Hu, W. Bao, D. Wang, and F. Liu. Dynamic adaptive dnn surgery for inference acceleration on the edge. In *IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications*, pages 1423–1431. IEEE, 2019.
- [10] A. Kamilaris and F. X. Prenafeta-Boldú. Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and electronics in agriculture*, 147:70–90, 2018.
- [11] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton. Deep learning. *nature*, 521(7553):436–444, 2015.
- [12] S. Li, Z. Zheng, W. Chen, Z. Zheng, and J. Wang. Latency-aware task assignment and scheduling in collaborative cloud robotic systems. In *2018 IEEE 11th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*, pages 65–72. IEEE, 2018.
- [13] L. Liu, R. Wang, C. Xie, P. Yang, F. Wang, S. Sudirman, and W. Liu. Pestnet: An end-to-end deep learning approach for large-scale multi-class pest detection and classification. *IEEE Access*, 7:45301–45312, 2019.
- [14] A. W. Malik, A. U. Rahman, T. Qayyum, and S. D. Ravana. Leveraging fog computing for sustainable smart farming using distributed simulation. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(4):3300–3309, 2020.
- [15] J. M. Santos, D. Portugal, and R. P. Rocha. An evaluation of 2d slam techniques available in robot operating system. In *2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, pages 1–6. IEEE, 2013.
- [16] S. Sladojevic, M. Arsenovic, A. Anderla, D. Culibrk, and D. Stefanovic. Deep neural networks based recognition of plant diseases by leaf image classification. *Computational intelligence and neuroscience*, 2016, 2016.
- [17] S. Teerapittayanon, B. McDanel, and H.-T. Kung. Branchynet: Fast inference via early exiting from deep neural networks. In *2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pages 2464–2469. IEEE, 2016.
- [18] K. Trang, L. TonThat, and N. G. M. Thao. Plant leaf disease identification by deep convolutional autoencoder as a feature extraction approach. In *2020 17th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, pages 522–526. IEEE, 2020.
- [19] R. Vincent, B. Limketkai, and M. Eriksen. Comparison of indoor robot localization techniques in the absence of gps. In *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XV*, volume 7664, page 76641Z. International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [20] M. A. Zamora-Izquierdo, J. Santa, J. A. Martínez, V. Martínez, and A. F. Skarmeta. Smart farming iot platform based on edge and cloud computing. *Biosystems engineering*, 177:4–17, 2019.



© 2021 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication  
under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

# ML Models FOR REAL-TIME HYBRID SYSTEMS

Manuel I. Capel

Department of Software Engineering, 18071 University of Granada, Spain  
manuelcapel@ugr.es

## Abstract

*A correct system design can be systematically obtained from a specification model of a real-time system that integrates hybrid measurements. In a realistic industrial environment, this has been carried out through complete Matlab / Simulink / Stateflow models. However, there is a widespread interest in carrying out that modeling resorting to Machine Learning models, which can be understood as Automated Machine Learning for Real-time systems that present some degree of hybridization. An AC motor controller which must be able to maintain a constant air flow through a filter is one of these systems. The article also discusses a practical application of the method for implementing a closed loop control system to show how the proposed procedure can be applied to derive complete hybrid system designs with ANN.*

**Palabras clave:** Automated Machine Learning, Real-time embedded control systems, Cyber-physical systems, Time series forecasting, Neural networks, Energy efficiency.

## 1 INTRODUCTION

Automated Machine Learning (AML) methods for design and implementation of Real-Time systems, applied to the specification of non-functional user requirements, such as timing constraints between system actions, are also starting to be applied successfully in the requirement specification, design and implementation phases of cyber-physical systems. Although AML methods help us to find a consistent implementation of system requirements, however they present serious application problems regarding fitness calculation, overfitting, lack of scalability and a high amount of time to compute the hyperparameters on which real-time and control systems are dependable.

The problem above is worsened if we chose an artificial neural network (ANN) to calculate the hyperparameters by following an optimization method as the gradient descent one. Therefore, we propose in this paper to complement the expensive training phase of artificial neural networks (ANN) with hyperparameter updates carried out manually with the help of tools widely used in the industry (Simulink and Stateflow). The values of the hyperparameters can be

validated following a mixed approach that is based on the interleaving of updates of the values with the training of the neural network. This method could be considered as very model-specific but, on the other hand, it allows us to obtain efficiently and with time constraints many hyperparameters of the cyber-physical model, which lays the basis for obtaining a great improvement over other approaches currently more used for example, obtaining hyperparameters using Bayesian optimization (HPO)[1].

Our approach works better for modelling analogic systems or those that capture measured data continuously; and it is inspired in some prior results obtained in solving prediction problems with ANN [9] for Energy Efficiency systems; but if discrete components are interrelated with continuous ones, the common result is to produce inflexible models, with parameters that are difficult to change at run time in simulations.

In hybrid state machines [10] the continuous behavior described by a system of differential equations associated must change as result of the occurrence of discrete events too. Our approach gives very compact and flexible specifications of complex hybrid systems, however there are very few tools that support this class of tools now. In our case, we hypothesize that there is no major problem in building a trained ANN that substitutes the PID controller a closed loop control system to react and produce a correct response even in the case of discrete events, i.e., messages or signals that may modify the values of the cyber-physical model's hyperparameters.

The remainder of the paper is structured as follows. We first give some background on Automated Machine Learning, which is the formal foundation of our method. Then, the approach proposed here is applied to solve an industrial problem of a real-time feedback closed loop used to maintain constant rotor speed of an induction motor driven by a *TriaC* device such as the one used by an AC motor to keep a constant air flow through a filter in HVAC systems. The case study shows how the proposed method can be applied to derive a hybrid system that also contains discrete components. Finally, the conclusions and the ongoing lines of work are presented.

## 2 AUTOMATED MACHINE LEARNING

Most real-time systems problems that can be solved by algorithms or heuristics are characterized by complexities such as non-convexity, nonlinearities, discontinuities, variables of mixed nature, which involve expertise in multiple disciplines, as well as to face high dimensionality, which renders algorithms ineffective, impractical, or inapplicable in Real-time systems (RTS) implementation. There are no known mathematically well-founded algorithms for finding the best solution for RTS and for *control problems*, in general cyber-physical domains, within a limited amount of time. In order to solve such problems practically, we are compelled to search new optimization *algorithms*, which are typically developed by using heuristics that, despite lacking strong mathematical foundations, are capable of reaching an approximate solution in a reasonable amount of time to the aforementioned problems. These so-called *metaheuristic* methods do not guarantee that the exact optimal solution will be found, but they can lead to a near-optimal solution in a computationally efficient manner. Therefore, *metaheuristic methodologies* are gaining an every day growing popularity in a variety of application domains due to their practical appeal and ease of implementation.

Most metaheuristic methods are stochastic in nature and imitate a natural, physical, or biological principle that resembles a search or optimization process. Evolutionary algorithms, more specifically, *genetic algorithms* and their evolution strategy; *particle swarm*, *ant colony*, *bee colony* optimization; *simulated annealing*, and a variety of other methods, are among the most used nowadays.

Metaheuristics have a certain advantage over traditional optimization methods, namely,

- Can provide good solutions that can hinder traditional methods for computationally easy challenges involving large input complexity.
- Can yield sufficient solutions to difficult problems, e.g., problems for which an exact algorithm is not known and can be resolved in reasonable time.
- In contrast to most conventional methods, they do not require information on gradients and can therefore be used with non-analytical black box or simulation-based objective functions.
- Most of them are inherently stochastic or deterministic heuristics that are specifically designed for this purpose and have the ‘capacité’ to recover from local optima.
- Because metaheuristics can better deal with interties in goals, they are also able to recover from local optima.
- Most metaheuristics have only a few algorithmic changes to handle multiple objectives.

### 2.1 ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND GRADIENT BASED OPTIMIZATION

Complex numerical and symbolic calculations can be made at incredible speed on modern parallel computers. However, they cannot still be close to the performance of human minds to carry out perceptual tasks such as the recognition of language and images. Computers need accurate input information and sequentially follow instructions’ streams while the human mind performs tasks in a highly distributed and parallel mode. We can say, therefore, that a biological neural network is the basis for the design of an artificial intelligence neural network (ANN) and thereof it must be considered as a computation model that is intrinsically parallel and convenient to solve very complex problems in the cyber-physical domain.

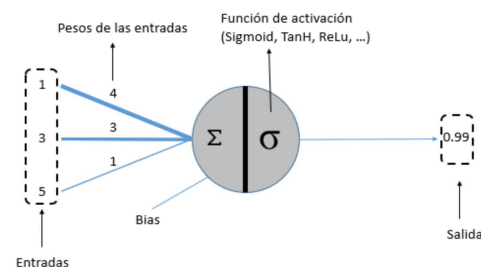


Figure 1: Artificial Neuron

Just as the human brain is made up of interconnected biological neurons, an ANN is made up of artificial neurons connected and grouped at different levels called layers. For a neural network to obtain satisfactory results, it must have been previously *trained*. The latter process consists of adjusting each of the weights of the inputs of all the neurons that are part of the neural network so that the responses of the output layer fit as closely as possible to the known data.

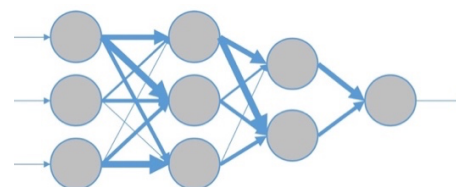


Figure 2: Simple Artificial Neural Network

#### 2.1.1 Optimization and Gradient Descent

Modern parallel computers and graphics cards as NVIDIA GPUs make currently possible to obtain the gradient of model selection w.r.t. crucial hyperparameters of cyber-physical models [1].

Following this approach, evaluations of the *target function* results into a hyper-gradient vector instead of single values that are usually obtained by other methods such as the called *hyperparameter optimization* (HPO).

Thanks to parallel computing we can now handle many hyperparameters of a model [2] [3] by deploying gradient-based methods efficiently, more specifically, our method for ANN applied to high-dimensional HPO problems can perform the following tasks,

- optimize the learning rate of an ANN for each iteration and layer separately.
- Calculate optimal weights for each layer in the ANN.
- Reduce likelihood of overfitting by L2 regularization for each individual parameter of the model.

We can, therefore, overcome the backpropagation through the complete training procedure of an ANN by carrying out hyperparameter updates and by following separate validation interleaved with the training of the network. This method is highly model-specific but, in return, it allows us to tune many hyperparameters of the cyber-physical model, which sets the ground for obtaining a great improvement with respect to HPO carried out, e.g., by Bayesian optimization.

## 2.2 FEATURE PROCESSING ALGORITHMS

To build arbitrary size ML pipelines our approach proposes to use more than one algorithm and dynamically add these algorithms to the parallel calculation in order to enlarge the search space and then to haste select the right algorithm and its hyperparameters [4][5].

## 2.3 SCALABILITY

There are many machine learning problems which cannot be directly tackled due to their scale. We understand the term *scale* here as the size of the configuration space and the highly computational cost of individual model evaluations. There are currently some successes in training the neural network with small datasets and setting the hyperparameters of the training procedure manually [6]. Our approach with respect to cope with the *scalability* problem is to take advantage of massive parallel computing and try to full exploit large-scale computer clusters or the thousand of SMs of GPU/CUDA multiprocessors.

## 2.4 OVERFITTING AND GENERALIZATION

Overfitting is an open problem when we try to apply ANN with a finite validation set and the calculation of the model's hyperparameters suffer from this problem [7]. To reduce the amount of overfitting we can use a different shuffling for each function that we need to evaluate. This approach has shown to improve the generalization accuracy and recall by deploying a cross-validation strategy of the cyber-physical

models. We can also use the strategy of finding *stable optima* instead optima in the objective function, as it was noted in [8].

## 3 MODELING METHOD

In the proposed ANN-based method [9] to design a real-time hybrid system with continuous and discrete components, we use a typical design of a neural network, in which we define the usual two main phases: *training* and *testing*. The generated output of the model, i.e., next values of variables of the cyber-physical system, which represent the functional and dynamic aspects of model, are used to feed Simulink/Stateflow blocks.

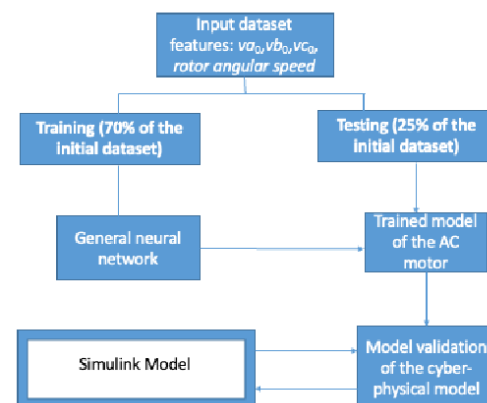


Figure 3: Diagram of the approach to deploy the AC Motor general model; there is only one neural network that learns from input data and outputs the next value

## 4. REGULATION OF ROTOR SPEED WITH AN INDUCTION MOTOR

An informal description of the user's requirements specification of a closed loop control system is presented for controlling an AC motor (or induction motor) in figure 4. The open loop control of the engine is obtained by feeding it with a controlled voltage of 220 volts and 50 Hz. This control is carried out by cutting the sinus wave, which represents the input voltage using an electronic device named TriaC, which operates as a very fast switch. The control line of the TriaC is driven by a synchronization signal (*synch*), which informs when the input voltage passes through a zero value, at this moment the TriaC automatically stops to conduct electricity.

If after switching the TriaC off, it is fed with current several milliseconds later, it will be driven to saturation by the signal *texct* and will start to conduct until the input voltage passes through a zero value again. The closed loop of control is obtained in this case by calculating the precise time at which the TriaC must be enabled, so the excitation time must be calculated in real-time and in every cycle of the input voltage. The system should address its own safety if synchronization signal fails, or the TriaC overheats. If



the *synch* signal is missed out after passing a complete cycle of the input voltage, then *syncf* is raised. Other possible failure could happen if the *TriaC* overheated, in this case the electronic device might short-circuit and lead the engine to start working at the maximum number of revolutions, which would cause the loss of the engine after 1 second approximately.

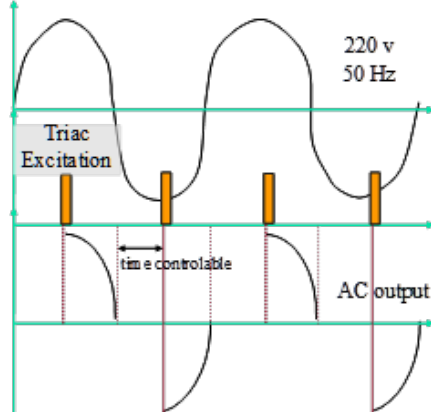


Figure 4: Description of the operation of *TriaC* device that controls the AC induction motor

The combination of induction motor with *TriaC* device can be used to control or maintain constant the velocity of a centrifuge of washing machine, the air flow through a filter, the speed of a vehicle, etc. From now on we suppose that AC induction motor directed by the *TriaC* device controls the air flow through a filter.

#### 4.1 SYSTEM MODEL DERIVATION

The high-level diagram can be seen in the following figure 5, which includes five control flows: the synchronization signal (*synch*), which informs when the input voltage passes through zero value; the *TriaC* overheating warning; two signals, the first one signals the missing of *synch* and the second one signals *TriaC* overheating; the reactivating (*textct*) signals can make the *TriaC* returns to allow current to pass again. It also includes 2 data flows: the first one gives the present air flow through the filter (*flow*) and the second one, the air flow reference value (*ref*).

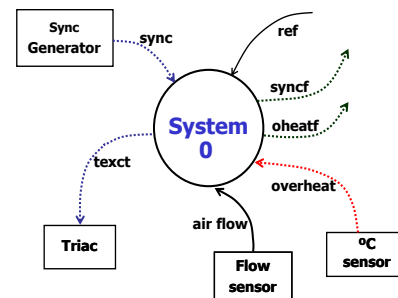


Figure 5. System Context Diagram.

value, respectively. If the *timeval* is outside the interval  $[0, 1/\text{freq} \cdot 2]$ , its value is saturated by the maximum or minimum value. Then one Simulink subsystem block can traditionally designed as the PID controller with its interface made up of two ports: the error signal (speed error signal) as the input port and the corrected *timeval* as the output one (figure 6).

#### 4.2 MATLAB/SIMULINK MODEL OF AN INDUCTION MOTOR DRIVE

The model of an induction motor <http://lsi.ugr.es/~mcapel/miscelanea/motor> has been structured in 3 main blocks: (1) transforms the three stator voltages  $v_a, v_b, v_c$ , with a phase of  $2\pi/3$  between each two, into the rotating reference system  $d_q$ ; (2) the block representing the *induction motor* itself (which inputs the three phase voltages, the synchronous angular speed  $\omega_e$  and the load torque); (3) this block returns the expression of the model variables in the  $d_q$  system back to the three phases *abc* reference system, since the latter one give us the standard graphical representation of currents in the stator. Two specific blocks have been designed to calculate the electrical torque  $M_e$  given by the motor and another to calculate the rotor axis angular speed  $\omega_r$ .

Finally, all the physical model constants given in table I have been defined using IS physical units in a *m-file* of Simulink, which has to be executed in Matlab before opening the Simulink model of the system.

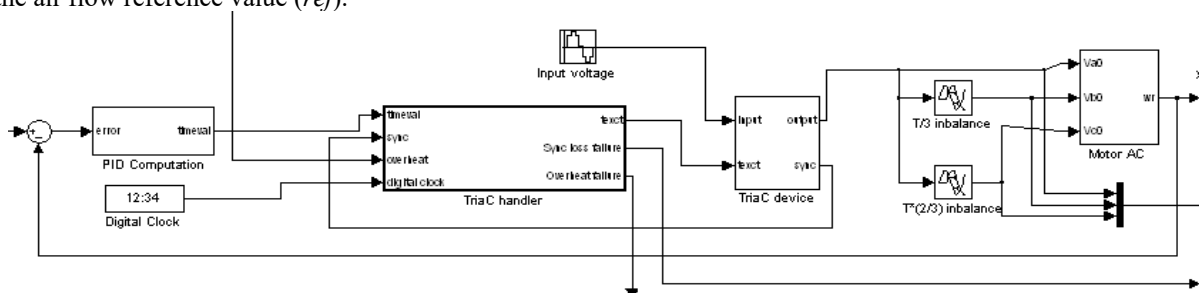


Fig.6. Simulink model of the final system



Table I: Constants and variables of the physical variables of an induction motor

$d$ : direct axis of the rotating reference system	$\chi_{lm}^* = 1/(1/\chi_{ls} + 1/\chi_{lr} + 1/\chi_m)$ : total reactance with the losses for magnetizing ( $\chi_m$ )
$q$ : quadrature axis of the rotating referente system	$i_{qs}, i_{ds}$ : currents of the $q$ and $d$ stator axis
$s$ : subindex for the stator variable	$i_{qr}, i_{dr}$ : currents of the $q$ and $d$ rotor axis
$r$ : subindex for the rotor variable	$p$ : number of poles of the motor
$F_{ij} = \Phi_{ij}$ , magnetic linkage, where $i=q$ or $d$ and $j=s$ or $r$	$J$ : inertia momentum
$v_{qs}, v_{ds}$ : stator voltages	$M_e$ : motor electrical torque (output variable)
$v_{qr}, v_{dr}$ : rotor voltages	$M_l$ : load torque (input variable)
$R_r, R_s$ : rotor and stator resistors	$\omega_e$ : stator synchronous speed (input variable)
$\chi_{ls}$ : stator reactance ( $\omega_e L_{ls}$ )	$\omega_b = 2 \cdot \pi f_b$ : angular speed corresponding to the electric frequency of the motor feeding voltage.
$\chi_{lr}$ : rotor reactance ( $\omega_e L_{lr}$ )	$\omega_r$ : rotor angular speed (output variable)

## 5. HYBRID SYSTEM SIMULATION

In order to carry out a simulation of the hybrid system proposed in this paper, more components must be added to the model. We need to construct the model of a *Triac* device, one for the *AC Motor*, and the *sensor of flow* (i.e., a sensor to measure the speed of the rotor as a *tachometer* does in trucks), the *sensor of temperature* and one for the *sync generator*. This model is implemented by using the Simulink/Stateflow framework, as figure 6 shows, as usual.

### 5.1 PHYSICAL MODELING OF AN INDUCTION MOTOR

The most difficult component to model is the *AC Motor* since the rest of the other devices can be modeled by means of simple switches or a combination of them.

The functioning of an induction motor is based on the Physical principle of mutual induction between electrical circuits traversed by a variable magnetic flux  $\Phi$ . According to the Faraday law, which is given by the following equation:

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}(N \cdot \Phi_B) \quad (1)$$

the magnetic flux traversing a motor winding only depends on the current conducted by the circuit. It does not depend, for instance, on the number of poles of the motor. We can assign a self-induction constant  $L$  to any circuit being affected by magnetic induction, according to the equation:

$$N \cdot \Phi_B = L \cdot i_{reel} \quad (2)$$

Nowadays the winding of induction motors is made of three windings, carrying each one of them a voltage phase separated  $\pi \text{ rad.}$  from the next phase, which

yields a rotating magnetic field in the stator, as figure 7 shows. The velocity of rotation is called the *synchronous speed*, which is given as a parameter of induction motors. If we short-circuit the rotor winding –using a squirrel cage winding, for instance–, then the motor will start rotating because the change in the magnetic field direction yielded by the synchronous speed of the stator  $\omega_e$  induces a current that produces an electromagnetic force in the rotor. The difference between the rotation velocity of the stator  $\omega_e$  and the rotor's one  $\omega_r$  is named slip, which is also given as a parameter of induction motors.

### 5.2 THE TWO-PHASE SYNCHRONOUS ROTATING FRAME

We can assume a reference system that rotates at the synchronous speed  $\omega_e$  of the stator to ease the representation of the rotating  $\vec{B}$  and inductance linkages by a system of coupled differential equations that describe the physical induction and motor dynamics, as figure shows. The induction motor is therefore modeled by two reels, the first one is aimed at conducting the current in the stator and it also generates the rotating magnetic field. The second one generates the induced magnetic field in the rotor. This simple model allows us to describe the magnetic coupling between the stator and rotor windings of an induction motor very accurately.

The first axis of the following figure is called the direct axis and the second one, the quadrature axis.  $\theta_e$  is an additional variable representing the rotor angle and it can be considered an additional state of the induction motor model. An induction motor with a squirrel cage rotor winding (short-circuited) will have null  $v_{qr}$  and  $v_{dr}$  voltages. The constants and system variables of the above linear differential equations system are given in table I.

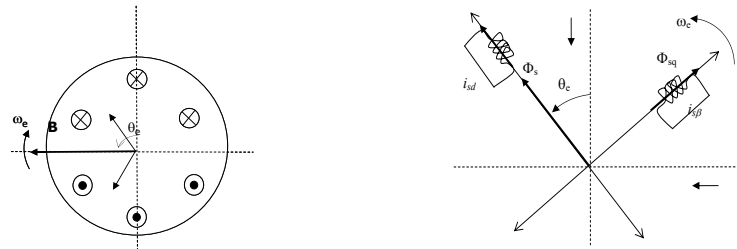


Figure 7: (a) Motor winding (b) Rotating reference system

### 5.3 CALCULATION OF THE ELECTROMAGNETIC TORQUE GENERATED BY THE MOTOR

We can derive a mathematical expression for calculating the electromagnetic torque generated by the motor. Since we know that the mechanical power given by the motor is obtained from the electromagnetic equation:

$$P_{\text{mech}} = \frac{3}{2} (\omega_b \cdot \Phi_{sq} \cdot i_{sd} - \omega_b \cdot \Phi_{sd} \cdot i_{sq}) \quad (3)$$

and the magnetic linkage  $\Phi_{sq, sd}$  only depends on the angular speed and the magnetic flux  $F_{ij} = \omega_e \cdot \Phi_j$ . The mechanical power can be made equivalent to the electrical torque  $T_e$  generated by the motor, then we can obtain:

from the magnetic linkages  $F_{ds}$ ,  $F_{qs}$ , and currents, which are obtained by solving a system of differential linear equations with concrete values of  $p$  (the number of poles) and  $\omega_e$  as the input data to the induction motor model. The angular velocity  $\omega_r$  of the rotor can also be calculated since the load torque  $T_l$  and moment of inertia  $J$  are also parameters of the induction motor model. As the above equations show, the electrical torque and the angular rotor velocity depend on the number of poles of the rotor winding, on the contrary of what happens with the magnetic couplings.

## 6. MATLAB/SYMULINK MODEL OF AN INDUCTION MOTOR DRIVE

The model of an induction motor <http://lsi.ugr.es/~mcapel/miscelanea/motor> has been structured in 3 main blocks: (1) transforms the three stator voltages  $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$ , with a phase of  $2\pi/3$  between each two, into the rotating reference system  $dq$ ; (2) the block representing the *induction motor* itself (which inputs the three phase voltages, the synchronous

angular speed  $\omega_e$  and the load torque); (3) this block returns the expression of the model variables in the  $dq$  system back to the three phases  $abc$  reference system, since the latter one give us the standard graphical representation of currents in the stator.

Two specific blocks have been designed to calculate the electrical torque  $M_e$  given by the motor and another to calculate the rotor axis angular speed  $\omega_r$ . Finally, all the physical model constants given in *table I* have been defined using IS physical units in a m-file of Simulink, which must be executed in Matlab before opening the Simulink model of the system.

### 6.1 OBTAINED RESULTS

The results obtained with the two models (OLP and CLP) were quite different. In the first case, it was only considered an open control loop model; thus, only after a constant time the *Triac* is excited in every cycle. In this case the disturbances in the system response ( $\omega_r$ ) are remarkable. Rotor speed follows the changes produced in the synchronous angular speed in the stator ( $\omega_e$ ) (figure 9), but any change in the value of  $\omega_e$  provokes fast oscillations around the new value in the rotor velocity. If we carry out a simulation with the rotor velocity controlled by a PID, then we will obtain better results (figure 8).

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{p}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} (F_{ds} i_{qs} - F_{qs} i_{ds}) \quad (4)$$

Moreover, if we take a plot of the electrical torque output by the induction motor w.r.t. a constant load torque, which is given as an input variable to the system, we will take only important oscillations at the beginning, while the system is trying to get a stabilisation point. The oscillations shown in figure 8 represent about the 20% of the target value for the torque  $M_e$ , (300 Nm); these oscillations are caused by dynamic conditions during motor functioning, as the rotor axis friction.

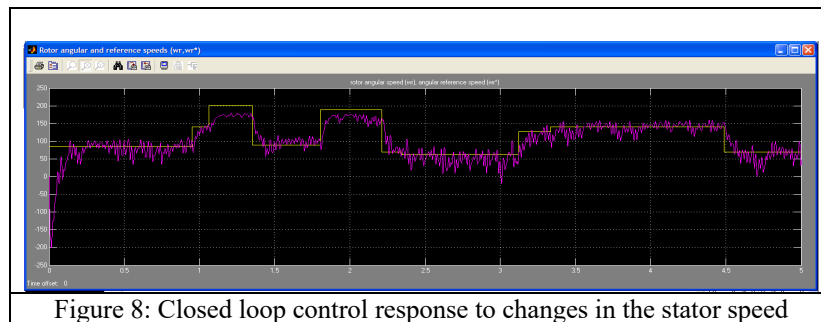


Figure 8: Closed loop control response to changes in the stator speed

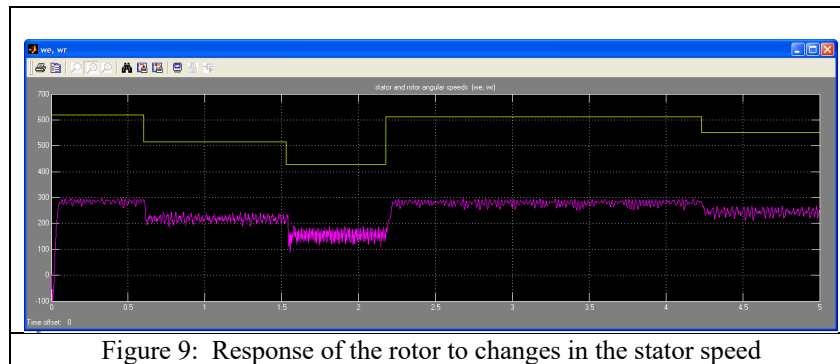


Figure 9: Response of the rotor to changes in the stator speed

## 7. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

We have presented one method and application derivation scheme to obtain a correct control system with real-time features. Automated Machine Learning methods together with a certain class of ANN will allow us modeling continuous and discrete dynamic systems, such as the AC motor controller that is the case study. We have shown that PID (*proportional integrative differential*) controllers can be substituted by a trained neural network that has been used to integrate continuous components in a hybrid real/time system design without any accuracy or timeliness losses. However, unlike other proposals that attempted to overcome the same problem, our methodological scheme is mainly a set of guidelines at moment, which have proved to be of use for deriving a verifiable model of a cyber-physical complex system. The method has been defined for its easy integration in industrial environments for simulation (Simulink/Stateflow) and can be used with standard libraries for neural networks development, such as SkLearn [11] and PySpark. As future work, we plan to develop a tool capable of automated code generation of real-time and embedded system software for several computing platforms.

### References

- [1] Maclaurin, D., Duvenaud, D., Adams, R. (2015) Gradient-based Hyperparameter Optimization through Reversible Learning. In: Bach and Blei, pp. 2113–2122
- [2] Franceschi, L., Donini, M., Frasconi, P., Pontil, M. (2017) Forward and Reverse Gradient-Based Hyperparameter Optimization. In: Precup and Teh, pp. 1165–1173
- [3] Pedregosa, F.: Hyperparameter optimization with approximate gradient. In: Balcan and Weinberger, pp. 737–746
- [4] Almeida, L.B., Langlois, T., Amaral, J.D., Plakhov, A. (1999) Parameter Adaptation in Stochastic Optimization, p. 111–134. Cambridge University Press
- [5] Baydin, A.G., Cornish, R., Rubio, D.M., Schmidt, M., Wood, F. (2018) Online Learning Rate Adaption with Hypergradient Descent. In: Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR'18)
- [6] Loshchilov, I., Hutter, F. (2016) CMA-ES for hyperparameter optimization of deep neural networks. In: International Conference on Learning Representations Workshop track
- [7] Cawley, G., Talbot, N. (2010) On Overfitting in Model Selection and Subsequent Selection Bias in Performance Evaluation. Journal of Machine Learning Research 11
- [8] Levesque, J.C. (2018) Bayesian Hyperparameter Optimization: Overfitting, Ensembles and Conditional Spaces. Ph.D. thesis, Université Laval
- [9] J.R.S. Iruela, L.G.B. Ruiz, M.I. Capel and M.C. Pegalajar (2021). A TensorFlow Approach to Data Analysis for Time Series Forecasting in the Energy-Efficiency Realm. Journal Energies

- (MDPI). In Energy Fundamentals and Conversion, Time Series Forecasting for Energy Consumption-Special Issue (in press)
- [10] Maler, O., Manna, Z., Pnuelli, A. (1992) From timed to hybrid systems. Proceedings of REX workshop "Real-time: theory in practice", Springer-Verlag.
- [11] Feurer, M., Klein, A., Eggenberger, K., Springenberg, J.T., Blum, M., Hutter, F. (2015) Efficient and robust automated machine learning. In: Cortes, C., Lawrence, N., Lee, D., Sugiyama, M., Garnett, R. (eds.) Proceedings of the 29th International Conference on Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS'15). pp. 2962–2970 (2015)



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

# Índice de Autores

## A

Álvarez Pastor, Jesús, 126, 419, 515, 521  
Abad, Roman, 606  
Aboutalebi, Payam, 37, 54  
Acedo Bueno, Luis Fernando, 388  
Acién Fernández, Francisco Gabriel, 119, 301  
Alegre, Enrique, 648  
Alonso Martín, Fernando, 550, 565, 573  
Alvarado Aldea, Ignacio, 248, 254  
Alvarez, María Luz, 240  
Americano-Dacosta, Marcus V., 294  
Aranda, Joan, 168  
Arizala, Asier, 435  
Armentia, Aintzane, 701  
Arnau-Papí, Manuel, 411, 419, 515  
Arriandiaga, Ander, 175  
Avila, Mario, 66  
Ayuso Olmeda, Pablo, 395  
Azorin, Jose M., 133, 140

## B

Balaguer, Carlos, 499, 528  
Ballesta, Mónica, 640  
Bausa Ortiz, Irina, 427  
Bayón, Cristina, 99  
Beltrán San Segundo, Héctor, 349, 395  
Berenguel Soria, Manuel, 119, 294, 301  
Bernal García, Ezequiel, 60  
Bernal, Miguel Ángel, 419  
Besada-Portas, Eva, 232  
Biswas, Rubel, 648  
Blanco, Andrea , 126, 515, 521  
Blanco, Víctor, 477  
Blasco, Xavier, 317  
Blaya, Fernando, 542  
Blaya-Ros, Pedro José, 477  
Boada Acosta, Lissete, 269  
Boada, Yadira, 269, 485  
Borja Conde, José Antonio, 248, 254  
Bravo Arrabal, J., 581  
Bravo, Almudena, 160, 461, 663  
Brull, Asier, 83  
Bueno, Gloria, 678  
Buonocore, Luca Rosario, 593  
Burgos, Arantzazu, 240

## C

Cabanes, Itziar, 75, 83, 111, 175, 606, 611  
Cabrera Mora, Juan José, 640  
Calatrava Nicolás, Francisco Miguel, 632  
Calderón, Antonio José, 183, 190  
Calderón, Manuel, 183, 190  
Calvo-Rolle, José Luis, 259  
Camarena, María, 485  
Campelo, Daniel, 435  
Candelas, Francisco A. , 588  
Cantalejo-Escobar, David, 542, 599  
Capel, Manuel I. , 752  
Carbonell, Pablo, 485  
Cardo Miota, Javier, 395  
Carrasco Martínez, Sara, 550, 557, 565, 573  
Castaño-Amoros, Julio, 535  
Casteleiro-Roca, José-Luis, 259  
Castillo, José C., 557  
Castro González, Álvaro, 557  
Castro-Gutiérrez, Jairo, 617  
Catalán, José María, 126, 411, 515  
Cebollada, Sergio , 640  
Cecilia, Andreu, 357, 365  
Chacón Mosquera, Esteban, 6, 13  
Chacón, Jesús, 232  
Chaves, Deisy, 648  
Cisnal, Ana , 152  
Clemente, Alejandro, 357  
Contreras González, Aldo Francisco, 542, 599  
Costa, Teresa, 521  
Costa-Castelló, Ramon, 357, 365  
Cristea, Smaranda Podar, 427

## D

Díaz, Manuel, 744  
Díaz, Sergio, 325  
Díaz-Cacho Medina, Miguel, 226  
Díaz-Sanahuja, Carlos, 210  
Díez, Mikel, 309  
De Gea, Víctor, 695  
De la Ossa, Luis , 140  
De la Puente, Juan Antonio, 724  
De La Sen, Manuel, 54  
del Horno, Leticia, 45  
Delgado Guerrero, María Luisa, 373  
Delgado-Oleas, Gabriel, 99  
Deniz, Oscar, 678

Di Castro, Mario, 593  
 Diaz Torrijos, Patricia, 1  
 Domingo, Rafael, 477  
 Domingo-Enrich, Roger, 365  
 Dormido, Raquel, 341  
 Dormido, Sebastián, 341

**E**

Espacio Regalado, Alejandro, 655  
 Espacio, Alejandro, 671  
 Estévez, Elisabet, 282, 288, 701, 709, 717  
 Ezquerro, Santiago, 411, 515, 521

**F**

Fernández, Garazi, 611  
 Fernández, Inés, 535  
 Fernández-Cantí, Rosa Maria, 6, 13, 60  
 Fernández-Robles, Laura, 648  
 Fernandez-Lozano, J., 581  
 Ferre, Manuel, 542, 599  
 Ferrero, Laura, 133  
 Fidalgo, Eduardo, 648  
 Flores, Jose A. , 133  
 Flores, María, 507  
 Fraile Marinero, Juan Carlos, 152

**G**

Gámez García, Javier, 282  
 Gómez Jiménez, Jaime, 550, 557, 565, 573  
 Gómez Ortega, Juan, 282  
 Gómez Palacín, Carlos, 450  
 Gómez-Bravo, Fernando, 617  
 Galán-Cuenca, Álvaro, 686  
 Gallarta-Sáenz, David, 492  
 García Cerezo, A., 581  
 García García-Verdier, Tomás Jorge, 450  
 García Rivera, Matias, 226  
 García, Miriam, 442  
 García-Aracil, Nicolás, 126, 411, 419, 515, 521  
 García-Cerezo, Alfonso, 686  
 García-Mañas, Francisco, 218  
 García-Pérez, José Vicente, 515, 521  
 García Haro, Juan Miguel, 528  
 Garrido Campos, Julio, 21  
 Garrido Satue, Manuel, 388  
 Garrido, Aitor J., 37, 54  
 Garrido, Izaskun, 37, 54  
 Garrocho-Cruz, Alejandro, 617  
 Garrote, Alicia, 521  
 Gil, Arturo, 507  
 Gil, Juan D., 294  
 Gil, Pablo, 535, 695  
 Gil-Martínez, Montserrat, 203, 275, 492  
 Giménez-Gallego, Jaime, 333  
 Goncalves López de Medrano, Daniela  
     Alejandra, 232  
 González Bárcena, David, 724  
 González Barreda, Javier, 349  
 González Hernández, José, 301

González, Isaías, 183, 190  
 González-Teruel, Juan Domingo, 29, 477  
 Guinaldo, Martía, 341  
 Gutiérrez, Gloria, 450  
 Gutiérrez-Estrada, Juan Carlos, 617  
 Guzmán Sánchez, José Luis, 119, 218, 294, 301

**H**

Haes Ellis, Richard, 254  
 Herrán, Asier, 611  
 Herrero, Juan Manuel , 317  
 Herreros López, Alberto , 625  
 Hoyo, Ángeles, 218  
 Huilcapi, Victor, 317  
 Hurtado, Ekaitz, 701

**I**

Iáñez, Eduardo, 133, 140  
 Ibarrola-Lacalle, Julio José, 333  
 Iriondo, Nagore, 240  
 Isalgué Buxeda, Antonio, 60

**J**

Jiménez Buendía, Manuel, 632  
 Jimenez, Luis Miguel, 640  
 Jove, Esteban, 259  
 Juan, Javier V., 140

**L**

Lázaro Villa, José Antonio, 6  
 López, Alejandro, 701, 709, 717  
 López-Domínguez, Samuel, 617  
 López-Labrador, Francisco, 419  
 López-Orozco, Jose Antonio, 232  
 Lara Domínguez, Adrián, 731  
 Lara Ortiz, Manuel, 373  
 Lastra, René, 226  
 Lekube Gazagaetxeberria, Blanca , 21  
 Llata García, José Ramón, 1  
 Lledó, Luís Daniel, 411, 419, 521  
 Llopis, Luis, 744  
 Lora-Millan, Julio S., 91  
 Lucas, Sergio, 83, 175

**M**

Mañas-Álvarez, Francisco José, 341  
 Méndez, Carlos , 450  
 Malfaz, María, 557  
 Mancha-Sánchez, Enrique, 160, 461, 663  
 Mancisidor, Aitziber, 75, 606, 611  
 Mandow, Anthony, 686  
 Manich Vallès, Carles , 13  
 Manrique Balmaceda, R.F., 581  
 Marín Prades, Raul, 593  
 Marcano, Mauricio, 325  
 Marcos, Marga, 701, 709, 717  
 Marin, Raul, 66, 147  
 Martí, José Vicente, 66, 147  
 Martín, Cristian, 744



Martínez Mozos, Óscar, 632  
 Martínez-López, Nerea, 442  
 Martínez-Pascual, David, 126, 411, 419  
 Martínez, Santiago, 528  
 Masi, Alessandro, 593  
 Mena, Lisbeth, 499  
 Merchán García, María Pilar, 655, 671  
 Mesegué Basallo, Josep Eudald, 6, 13  
 Michelena, Álvaro, 259  
 Miguel-Escrig, Oscar, 210, 380  
 Monje, Concepción A., 499  
 Montes, Daniele, 403  
 Montoro Lendínez, Alicia, 282  
 Morales, Jesús, 686  
 Morales, Rafael, 45  
 Morales-Aragon, Isabel Pilar, 29  
 Moreno, Juan C., 91  
 Muñoz de la Peña Sequedo, David, 248, 254  
 Muñoz Torre, Raúl, 427  
 Muñoz, Asier, 606  
 Muñoz, Jorge, 499  
 Muñoz-bañón, Miguel Ángel, 588  
 M'Zoughi, Fares, 37, 54

## N

Nagua, Luis, 499  
 Narvaez, Marien, 168  
 Nuevo, Cristina, 160

## O

Oña Simbaña, Edwin Daniel, 528  
 Olaya Rúa, Laura, 469  
 Oliveira-Silva, Erika, 403  
 Orive, Adrián, 709  
 Orive, Darío, 709  
 Ortega Linares, Manuel Gil, 388  
 Ortiz Zaragoza, Francisco José, 632  
 Ortiz, Mario, 133, 140  
 Otálora, Pablo, 119  
 Otamendi, Janire, 111

## P

Pérez Hernández, Emiliano, 655, 671  
 Pérez Muñoz, Ángel Grover, 724  
 Pérez Soler, Emilio, 349, 395  
 Pérez Turiel, Javier, 152  
 Pérez, César, 611  
 Pérez, Joshué, 325, 435  
 Pajares, Alberto, 317  
 Pataro, Igor M. L., 294  
 Payá Castelló, Luis, 507, 640  
 Peñarocha-Alós, Ignacio, 210  
 Peidró, Adrián, 507  
 Peregrín-Rubio, Antonio, 617  
 Perez, Nerea, 75  
 Picó, Jesús, 485  
 Pina Pereira, Luana Barbosa, 593  
 Pitarch, José Luis, 403  
 Pont Esteban, David, 542, 599

Portalo, José María, 183, 190  
 Portela López, Bruno, 21  
 Portillo, Eva, 83, 111, 175  
 Posadas Yagüe, Juan Luis, 731  
 Poza Lujan, Jose Luis, 731  
 Prada Moraga, César, 403, 427, 450  
 Puente, Santiago, 535, 588, 695  
 Pulido-Calvo, Inmaculada, 617  
 Punzón Agudo, Samuel, 655, 671

## Q

Quiles, Vicente, 133  
 Quintián, Héctor, 259  
 Quispe Flores, Miguel A., 550, 557, 565, 573

## R

Ramos, Jose Mari, 606  
 Ramos-Teodoro, Jerónimo, 218  
 Reinoso, Oscar, 507, 640  
 Revestido Herrero, Elías, 1  
 Rico, Raul de Santos, 528  
 Rico-Azagra, Javier, 203, 275, 492  
 Rico-Azagra, Ramón, 492  
 Riveiro Fernández, Enrique, 21  
 Roca González, Joaquín, 632  
 Rocon, Eduardo, 91, 99  
 Rodríguez Miranda, Enrique, 301  
 Rodríguez, Francisco, 218  
 Rodríguez, Paloma, 160, 461, 663  
 Romero, Valentina, 226  
 Romero-Pérez, Julio-Ariel, 380  
 Ruano Ruano, Ildefonso, 282, 288  
 Rubio, Bartolomé, 744  
 Ruiz Alba, Antonio, 739  
 Ruiz Arahall, Manuel, 388  
 Ruiz, Ricardo, 542

## S

Sabater-Navarro, Jose Maria, 104  
 Sáez, Sergio, 739  
 Sánchez García, Alejandro, 288  
 Sánchez-Molina, Jorge Antonio, 218  
 Sánchez-Urán González, Miguel Ángel, 542, 599  
 Sainz Gutiérrez, José Joaquín, 1  
 Salamanca Miño, Santiago, 655, 671  
 Salas Gómez, Francisco, 248  
 Salichs, Miguel A., 550, 557, 565, 573  
 Salido, Jesús, 678  
 Samper Escudero, José Luis, 542, 599  
 Sanchis-Llopis, Roberto, 210  
 Santos Peñas, Matilde, 469  
 Santos, Matilde, 197  
 Sanz, Pedro J., 66, 147  
 Sarabia, Joseba, 325  
 Sarachaga, Isabel, 240, 701  
 Sastre Caballol, Joan Antoni, 13  
 Segado-Fernández, Maria Aranzazu, 333  
 Segarra Tamarit, Jorge, 349  
 Segura, Eva, 45

Serrano Barreto, Carlos Luis, 197  
Sevilla Salcedo, Javier, 550, 557, 565, 573  
Sharman, Khen, 739  
Sierra, David, 152  
Sierra-García, Jesús Enrique, 197, 469  
Silva Muñoz, Diego, 21  
Socas, Rafael, 341  
Solis, Alejandro, 66  
Somolinos, José Andrés, 45  
Soto-Valles, Fulgencio, 29, 477

**T**

Tagliamonte, Nevio L., 99  
Tapia, Santiago, 542  
Tejado, Inés, 160, 461, 663  
Tirado-Bou, Amparo, 147  
Toledano, Pablo T., 678  
Torres-Sánchez, Roque, 29, 333, 477  
Traver, José Emilio, 663

**U**

Uribe Chavert, Pedro, 731

**V**

Vállez, Noelia, 678

Vázquez Serrano, Francisco, 373  
Vázquez-Martín, Ricardo, 581, 686  
Valiente, David, 507  
van Asseldonk, Edwin H.F., 99  
Veiga Almagro, Carlos, 593  
Velasco González, Francisco Jesús, 1  
Velasco Sánchez, Edison Patricio, 588  
Vera Repullo, José Alfonso, 632  
Verdú-García, Francisco Javier, 126, 411, 419  
Vermander, Patrick, 75  
Viana, Kerman, 309  
Vignoni, Alejandro, 269  
Vilas, Carlos, 442  
Villota, David, 203  
Vinagre, Blas Manuel, 160, 461, 663  
Vivas Venegas, Carlos, 388

**Z**

Zamarreño Cosm, Jesús María, 403  
Zambrana, David, 104  
Zamorano Flores, Juan, 724  
Zayas-Gato, Francisco, 259  
Zubizarreta, Asier, 83, 111, 175, 309, 325, 435