

ESCUELA DE INGENIERIA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO (BMS AND ELECTRIC FOR AUV)

Titulación: Ingeniero de Telecomunicación

Autor: David Morales Ventura

**Tutores: Dr. Aurelio Vega Martínez
D. José María Cabrera Peña**

Fecha: Septiembre 2014

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO (BMS AND ELECTRIC FOR AUV)

HOJA DE FIRMAS

Alumno

Fdo.: David Morales Ventura

Tutor

Fdo.: Dr. Aurelio Vega Martínez

Tutor

Fdo.: D. José María Cabrera Peña

Fecha: Septiembre 2014

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO (BMS AND ELECTRIC FOR AUV)

HOJA DE EVALUACIÓN

Calificación: _____

Presidente

Fdo.:

Vocal

Fdo.:

Secretario

Fdo.:

Fecha: Septiembre 2014

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO

A mis padres,
Domingo y M^a Dolores

AGRADECIMIENTOS

Después de tantos años de estudios, por fin ha llegado el momento de dar las gracias a todas y cada una de las personas que han hecho posible la culminación de mi formación universitaria.

En primer lugar debo agradecer a mis padres, Domingo y M^o Dolores, todo el esfuerzo y sacrificio que han realizado para que tanto yo, como mis hermanos, hayamos tenido la posibilidad de estudiar y formarnos en aquello que hemos deseado sin presionarnos, y por haberme apoyado en cada una de las decisiones tomadas a lo largo de mi vida.

Especial mención a Aurelio Vega Martínez por haberme acogido como becario en el laboratorio de Servicio de Fabricación y Prototipado de circuitos del Instituto Universitario de Microelectrónica de Las Palmas de Gran Canaria, permitiéndome aprender muchísimo dentro de este mundo y posteriormente haciéndome integrante del equipo AVORA que participó en la competición SAUC-e 2012, hecho que me ha permitido realizar mi proyecto fin de carrera y su dedicación en él; a José María Cabrera por aportarme tanta información y dedicación en el mismo inclusive quitándole tiempo durante su doctorado y a Víctor Déniz González compañero/amigo en la etapa de becario por estar ahí todos los días, ayudarme en todo y a sus “temazos” musicales repetitivos en el momento del café matinal.

También debo agradecer todo el apoyo que me han prestado sobre todo en los momentos más difíciles, mis hermanos Oliver y Cesar, novia Estefanía, mis abuelos, tíos y primos por darme ese empujón que evitase que me cayera y no me levantara.

Por otro lado, he de expresar mi profunda gratitud a Alfredo y Dorita, padres de Estefanía y al resto de la familia López “Líos” que durante una gran parte del proceso universitario siempre me han animado a seguir hacia adelante.

Finalmente agradecer a todas las personas que me he ido encontrando en mi etapa universitaria tanto compañeros, algunos convertidos en amigos, como a profesores que han hecho más ameno y divertido todo este largo proceso.

Muchas gracias a todos de corazón

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO

INDICE GENERAL

ACRÓNIMOS	VII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	XI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Objetivo del proyecto.....	15
1.2. Trabajos relacionados	17
1.3. Peticionario	19
1.4. Estructura de la memoria	19
CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE	21
2.1. SAUC-e.....	23
2.1.1. Competición	24
2.1.2. Formación de los equipos y objetivos	25
2.2. Servicio de Fabricación de Prototipados del IUMA	26
2.2.1. Equipamiento del laboratorio del SFP	26
2.2.2. Proceso de Fabricación de PCB	30
2.3. Vehículos no Tripulados	34
2.3.1. Vehículos Submarinos Remotamente Operados ROV.....	36
2.3.2. Vehículos Submarinos Autónomos AUV	39
2.3.3. Gliders	41
2.4. Equipamiento de los UUV	43
2.4.1. Dispositivos sensoriales	44
2.4.2. Dispositivos de actuación.....	46
2.4.3. Dispositivos de comunicación.....	47
2.5. Baterías	49
2.5.1. Conceptos básicos	49
2.5.2. Clasificación de las celdas y baterías	51
2.5.3. Operación de una celda	53
2.5.4. Parámetros teóricos	54
2.5.5. Parámetros característicos	54
2.5.6. Estandarización	56

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO

2.6. Baterías Secundarias	59
2.6.1. Características generales baterías de Ion-Litio	61
2.6.2. Estructura de las baterías de Ion-Litio	63
2.6.3. Tipologías baterías Li-Ion	64
2.6.4 Resumen característico y elección baterías LI-Ion para AUV	71
2.7. Sistema de Gestión de Baterías, BMS	74
2.7.1. Definición	74
2.7.2. Funciones Principales	75
2.7.3. Tipos de Sistemas de Gestión de Baterías	77
2.7.4. Funciones del BMS	84
CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS	91
3.1. Equipamiento AUV AVORA	92
3.2. Preamplificador para los hidrófonos	100
3.3. Convertidor de DC-	102
3.4. Convertidor de Nivel	104
3.5. Corte de Potencia	106
3.6. Sistema de gestión de baterías, BMS	108
3.6.1. Estudio de las diversas etapas del BMS	111
3.6.2. Componentes	117
3.6.3. Diseño PCB's	121
3.6.4. Fabricación, montaje y revisión PCB's	129
3.6.5. Placa final	131
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	133
4.1. AVORA en SAUC-e	133
4.1.1. Miembros y estado del vehículo	134
4.1.2. Competición SAUC-e12	136
4.2. Test y análisis del Sistema de Gestión de Baterías	140
4.2.1. Test y análisis del proceso de descarga	141
4.2.1. Test y análisis del proceso de carga	142
CAPÍTULO 5. PRESUPUESTO	145
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	151
BIBLIOGRAFÍA	155

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Maquinaria del SFP	30
Tabla 2. Sensores según su finalidad.....	44
Tabla 3. Elementos físico empleados como sensores.....	44
Tabla 4. Actuadores según su finalidad.....	46
Tabla 5. Elementos físicos empleados como actuadores.....	47
Tabla 6. Características y aplicaciones de las baterías secundarias	60
Tabla 7. Ventajas/Desventajas de las baterías Li-Ion.....	62
Tabla 8. Características típicas de las baterías secundarias Li-Ion.....	64
Tabla 9. Características sobre las topologías de las baterías secundarias de Li-Ion	72
Tabla 10. Clasificación y comparativa del BMS según funcionalidad.....	78
Tabla 11. Clasificación y comparativa del BMS según topología	84
Tabla 12. Comparativa procesos de balanceado y redistribución	87
Tabla 13. Equipamiento del AUV de AVORA	95
Tabla 14. Comparativa de propulsores	98
Tabla 15. Comparativa de controladoras de propulsores	99
Tabla 16. Herramientas computacionales.....	109
Tabla 17. Resultados SUAC-e 2012.....	140
Tabla 18. Resultados prueba de descarga.....	142
Tabla 19. Resultados prueba de carga	144
Tabla 20. Presupuesto materiales Preamplificador de Hidrófonos.....	145
Tabla 21. Presupuesto materiales Convertidor DC-	145
Tabla 22. Presupuesto materiales Convertidor de Nivel	146
Tabla 23. Presupuesto materiales Corte de Potencia.....	146
Tabla 24. Presupuesto de fabricación	146
Tabla 25. Presupuesto final 1	147
Tabla 26. Presupuesto materiales BMS_6CELL.....	147
Tabla 27. Presupuesto materiales BMS_4CELL.....	148
Tabla 28. Presupuesto de fabricación	148
Tabla 29. Presupuesto final 2	149
Tabla 30. Presupuesto final	149

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Jacques-Yves Cousteau como anuncio del <i>AQUA-LUNG</i>	13
Figura 2. Ciencias en las que se apoya la Ingeniería Marina	14
Figura 3. Dario Sosa, fila inferior a la izquierda, en una rueda de prensa de AVORA	19
Figura 4. Entrada y vista aérea de las instalaciones del CMRE	23
Figura 5. Flujo de Fabricación PCB en el SFP	31
Figura 6. Tipos de AUVs	36
Figura 7. Glider	36
Figura 8. ROV	37
Figura 9. Movimiento y control de un Glider	41
Figura 10. Conexión de baterías	50
Figura 11. Procesos de una celda	53
Figura 12. Ejemplo de gráfica SOC	55
Figura 13. Normativa sobre terminales	56
Figura 14. Ejemplo de test normalizado de capacidad de batería	57
Figura 15. Estándar sobre etiquetado de batería	57
Figura 16. Referencias cruzadas ANSI/IEC	57
Figura 17. Correcta manipulación de baterías	58
Figura 18. Normativa sobre transporte de baterías	58
Figura 19. Proceso electroquímico en una celda de Ion-Litio	61
Figura 20. Corte transversal de una celda Li-Ion cilíndrica	63
Figura 21. Proceso de carga batería LCO de 0,120Ah bajo 1,3C, 1C y 0,7C	65
Figura 22. Proceso de descarga batería LCO	65
Figura 23. Proceso descarga y carga batería LMO 3Ah a 0.5C	67
Figura 24. Proceso de descarga batería LMO	67
Figura 25. Procesos de carga/descarga batería LFP	68
Figura 26. Proceso descarga batería LFP para diferentes A	69
Figura 27. Proceso descarga batería LFP para diferentes C	69
Figura 28. Estructura interna celda LiPo	70
Figura 29. Proceso de carga batería LiPo	70
Figura 30. Proceso de descarga batería LiPo	71
Figura 31. Esquemático del balanceo en la carga de la batería	76
Figura 32. Esquemático del balanceo en la descarga de la batería	76
Figura 33. Regulador analógico	77
Figura 34. Medidor digital	77
Figura 35. (a) Características cargador CCCV (b) Gráfica tensión/corriente	78
Figura 36. Estructura de un regulador (Celda tipo LiFePo_4)	79
Figura 37. Diagrama de bloques de un medidor	80
Figura 38. Diagrama de bloques de un monitor	80

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO

Figura 39. Diagrama de bloques de un balanceador o equilibrador	81
Figura 40. Diagrama de bloques de un protector.....	82
Figura 41. Topología centralizada	82
Figura 43. Topología distribuida	83
Figura 42. Topología modular	83
Figura 44. Diagrama de bloques de las funciones de un BMS.....	84
Figura 45. Proceso de equilibrado de una batería compuesta por 6 celdas	85
Figura 46. Proceso sin y con Distribución.....	87
Figura 47. Estudio de capacidad celda LiFePo ⁴	88
Figura 48. Diagrama de bloques de la electrónica del AUV de AVORA	92
Figura 49. Esquemático preamplificador para hidrófonos.....	101
Figura 50. Diseño físico virtual 2D preamplificador para hidrófonos.....	102
Figura 51. PCB preamplificador de hidrófonos	102
Figura 52. Esquemático Convertido_DC-	103
Figura 53. Diseño físico virtual 2D Convertidor_DC-	103
Figura 54. PCB Convertidor_DC-	103
Figura 55. DIP-16 y patillaje del integrado MAX232.....	104
Figura 56. Esquemático Convertidor de Nivel	105
Figura 57. Diseño físico virtual 2D Convertidor de Nivel	105
Figura 58. PCB Convertidor de Nivel	105
Figura 59. Esquemático Corte de Potencia.....	107
Figura 60. Simulación Corte de Potencia	107
Figura 61. Diseño físico virtual 2D Corte de Potencia.....	107
Figura 62. PCB Corte de Potencia.....	108
Figura 63. Esquema suministro de potencia en Y a los propulsores	108
Figura 64. Esquemático BMS.....	112
Figura 65. Esquemático balanceador	112
Figura 66. Esquemático quemador	113
Figura 67. Fase de carga.....	114
Figura 68. Fase de descarga.....	115
Figura 69. Balanceador.....	115
Figura 70. Quemador.....	116
Figura 71. Sensor de temperatura	117
Figura 72. Supervisor	117
Figura 73. SOT-363	118
Figura 74. Esquema carga/descarga	118
Figura 75. Mosfets de conmutación	119
Figura 76. Mosfet canal-N IRF-3205	119
Figura 77. Sensor de temperatura	120
Figura 78. Supervisor de tensión STM6717	120
Figura 79. Diagrama de bloques STM6717	120
Figura 80. Componente 4803A (Mosfet Canal-P).....	121
Figura 81. Resistencia de potencia SMD	121
Figura 82. Layer stack manager	122

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO

Figura 83. Dimensiones placa BMS y balanceador	123
Figura 84. Importación de componentes	123
Figura 85. Resultado importación de componentes	124
Figura 86. Electrical clearance	124
Figura 87. Routing width	125
Figura 88. Routing vías style.....	125
Figura 89. Design rule check.....	125
Figura 90. Placa ruteada BMS/Balanceador	126
Figura 91. Top layer BMS/Balanceador	126
Figura 92. Bottom layer BMS/Balanceador	127
Figura 93. Top serigrafía BMS/Balanceador	127
Figura 94. Placa ruteada Quemador	127
Figura 95. Top layer Quemador	128
Figura 96. Bottom layer Quemador.....	128
Figura 97. Top serigrafía Quemador	128
Figura 98. Resultado del proceso de metalización	129
Figura 99. Fallos comunes detectados en componentes smd tras inspección AOI.....	131
Figura 100. BMS resultante	131
Figura 101. Formación del equipo AVORA	134
Figura 102. AUV AVORA.....	134
Figura 103. Equipos y vehículos SAUC-Ee12.....	136
Figura 104. AVORA en las instalaciones del CMRE	137
Figura 105. Primer día de trabajo de AVORA en el CMRE.....	138
Figura 106. Pruebas de sonar y visión en modo ROV	138
Figura 107. Premio obtenido en SAUC-e	139
Figura 108. Conexión fase de descarga.....	141
Figura 109. Conexión fase de carga	143

ACRÓNIMOS

AUV	Autonomous Underwater Vehicle
ASV	Autonomous Surface Vehicle
AOI	Inspección Óptica Automática
BESS	Battery Energy Storage System
BMS	Battery Management System
CAD	Computer Aided Design
CMRE	Centre for Maritime Research & Experimentation
EV	Electric Vehicle
FULP	Fundación Universitaria de Las Palmas
IA	Inteligencia Artificial
IUMA	Instituto Universitario de Microelectrónica Aplica
LCROV	Low Cost Robotic Operation Vehicle
NURC	NATO Underwater Research Center
PCB	Printed Circuit Board
PFC	Proyecto fin de carrera
PHEV	Plug-in Electric Hybrid Vehicle
PLOCAN	Plataforma Oceánica de Canarias
ROV	Robotic Operation Vehicle
S.A.I.	Uninterruptible Power Supply
SAUC-e	Student Autonomous Underwater Challenge Europe
SFP	Servicio de Fabricación y Prototipado de circuitos impresos
SMD	Surface Mount Device
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UGV	Unmanned Ground Vehicle
ULPGC	Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
UUUV	Unmanned Untethered Underwater Vehicle
UUV	Unmanned Underwater Vehicle
UV	Unmanned Vehicle

RESUMEN

Este documento, Proyecto Fin de Carrera, detalla el diseño, creación y desarrollo de un vehículo submarino, en concreto, un vehículo autónomo, AUV (Autonomous Underwater Vehicle); centrándose en sus componentes electrónicos y en especial en el sistema de gestión de baterías BMS y el circuito de corte de potencia.

El proyecto surge gracias a la Plataforma Oceánica de Canarias, PLOCAN, que gestiona, dinamiza y patrocina el proyecto con la colaboración de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, ULPGC, en el marco de Campus de Excelencia Internacional y la Fundación Universitaria de Las Palmas, FULP. El objetivo global del proyecto es hacer que, agrupando los conocimientos de PLOCAN y los de las diversas facultades de Ingeniería de la ULPGC junto a sus institutos de investigación se cree un AUV para participar en la competición Student Autonomous Underwater Challenge Europe, SAUC-e, en el año 2012.

SAUC-e es una competición universitaria de vehículos autónomos submarinos, AUV's. Esta competición comenzó en 2006 en Reino Unido, posteriormente en 2008 se trasladó a Francia al IFREMER (Instituto Francés de Investigación para la explotación del Mar, siglas en Francés) en Issy-les-Moulineaux; y desde 2010 se lleva realizando en Italia, con sede en el NURC (Nato Underwater Research Center), actualmente denominado CMRE (Centre for Maritime Research & Experimentation), en La Spezia. La competición pretende conseguir que algunos de los futuros ingenieros se interesen por el medio marino para desarrollar tecnología capaz de estudiar este entorno; por esto plantea una competición en la que equipos universitarios formados por un máximo de 10 integrantes sean capaces de construir un AUV que logre superar una serie de misiones.

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera por un lado es conseguir diseñar y fabricar un AUV, centrándonos en la parte electrónica del AUV, y por otro implementar el diseño, fabricación, montaje y verificación del Sistema de Gestión de Baterías, BMS. Respecto a la parte electrónica del vehículo no sólo nos centraremos en cómo realizar el conexionado, sino también en implementar aquellos circuitos impresos que nos sean necesarios, como: preamplificador para hidrófonos, convertidores de tensión, corriente o puertos, circuito de corte de potencia, etc.

Se ha de planificar y esquematizar un conexionado compacto, pues el espacio que nos ocupa la electrónica está limitado. El vehículo dispone de hidrófonos para detectar el

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO

seguimiento de un vehículo de superficie, ASV; y para obtener una señal que pueda ser procesada, se ha de diseñar un circuito preamplificador.

Por otro lado, algunos de los elementos equipados requieren de alimentación negativa para operar, por ello se ha de realizar un convertidor de corriente continua negativa. También se necesita crear un convertidor de nivel para operar entre TTL y puerto serie RS-232, y realizar la comunicación entre la unidad de control y las controladoras de propulsores.

Respecto al circuito de corte de potencia, su complejidad radica en la tensión y corriente que debe soportar el interruptor, pues debe ser de pequeño tamaño y soportar una tensión y voltaje elevados. Su utilización es básica para proporcionar seguridad, cortando el suministro de alimentación a los motores si estos se descontrolan y también permite que un buzo pueda operar con el AUV sin riesgos personales.

El BMS es el circuito encargado de garantizar que las celdas de la batería se mantengan dentro de sus límites de tensión, corriente y temperatura en el proceso de la carga y descarga. Es de vital importancia cuando se dispone de una batería constituida por celdas individuales pues, una descompensación a la hora de cargar o descargar una de ellas podría provocar que se estropeará, quedando inservible ésta y por tanto también el pack porque dejaría de cumplir con las especificaciones técnicas para las que fue diseñado.

ABSTRACT

The present document is a Final Degree Project that outline the design, creation and development of a sub-marine vehicle specifically an autonomous vehicle, AUV (Autonomous Underwater Vehicle); focusing on electronics devices and especially in the battery management system, BMS and power cut off circuit.

The project emerges through the Canary Islands Oceanic Platform, PLOCAN, managing, stimulating and sponsoring the project in collaboration with the University of Las Palmas de Gran Canaria, ULPGC under Campus of International Excellence and the University Foundation of Las Palmas, and the Foundation University of Las Palmas, FULP. The overall project objective is combining PLOCAN's and other Engineering faculties knowledge to create one AUV to take part in Student Autonomous Underwater Challenge Europe competition, SAUC-e, in 2012.

SUAC-e is a university competition of Autonomous Underwater Vehicle, AUV's. This competition began in 2006 in the UK been moved in 2008 to IFREMER (French Research Institute for Exploitation of the Sea, acronym in French) in Issy-les-Moulineaux; since 2010 it has been settle in Italy, in the NURC (Nato Underwater Research Center), now called RSMC (Centre for Maritime Research & Experimentation) in La Spezia. The competition aims to get some of the future engineers interested in the marine environment to develop technology capable of studying this environment, where teams are establish by 10 college students maximum aiming to create an AUV capable of overcoming a series of missions.

The purpose of the Final Degree Project presented is designing, creating and developing all the electronics of the AUV, focusing especially on the BMS. Regarding the electronics of the vehicle will not only focus on how to make the connection but also implement those printed circuits that as needed, such as hydrophone preamplifier, voltage converters, current or port, power cut off circuit, etc.

The wiring must be planned and schematize compact and robust way according the narrow space where is going to be settle. The vehicle is equipped with hydrophones that allowed to detect an Autonomous Surface Vehicle, ASV; to obtain a signal that can be processed to design a preamp circuit.

According to negative power needed the elements required a negative DC converter. Furthermore it is also needed to create a level converter to operate between TTL

and RS-232 serial port to settle communication between the control unit and controllers thrusters.

Power cut off circuit complexity lies in the voltage and current that must be withstood by the switch. To maximize safety, supposing the vehicle loses control, the circuit will disconnect the power thrusters allowing the diver to recover the vehicle without any personal risk.

The BMS is the circuit responsible for ensuring that the battery pack cells are kept within the limits of voltage, amperage and temperature in the process of loading and unloading. It is vital when you have a battery made of individual cells, a decompensation while loading or unloading could cause any damage, unusable leaving an individual cell and therefore also all battery pack because it does not comply with the technical specifications for which was designed.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos, el ser humano se ha interesado por las tareas de observación y exploración oceánica, que se inician con el estudio sobre las olas, corrientes y las mareas. A finales del siglo XVIII surgen los primeros estudios sobre corrientes marinas documentados por James Rennell. En 1849 aparecen informes sobre lo que se escondía más allá de las plataformas continentales, hecho que se materializó en 1855 por Matthew Fontine Maury en la publicación del primer libro de oceanografía titulado *Physical Geography of the Sea*.

El estudio de los océanos es especialmente complejo y sólo en las últimas décadas hemos comenzado a sumergirnos en sus profundidades, debido a los avances tecnológicos impulsados por el interés científico, destacando al célebre Jacques-Yves Cousteau. Una de sus mayores aportaciones junto con Emile Gagnan fue en 1943, desarrollando el *aqua-lung*, primer prototipo de sistema de buceo autónomo, ello fue un gran avance para el estudio marino, pues dotaba al submarinista de libertad, ya que no necesitaba un tubo para el suministro de aire desde la superficie. A él se unen otros muchos investigadores e ingenieros que han participado en tareas de inspección oceánica desde diferentes enfoques, como diseño de torpedos, inmersiones con batiscafos, desarrollo de submarinos y sumergibles civiles o militares, etc., pero actualmente sigue siendo de especial dificultad el estudio de las profundidades marinas.

Debido a la adaptación de las tecnologías para la exploración oceanográfica, surge la Ingeniería Marina, que trata del análisis, diseño y la planificación operativa de los sistemas que desarrollan su labor en el entorno marino. Desde entonces se ha avanzado mucho tecnológicamente y se ha suscitado una gran preocupación por la biología marina.



Figura 1. Jacques-Yves Cousteau como anuncio del AQUA-LUNG

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

No es de extrañar, por tanto, que el estudio de la oceanografía se divida en múltiples campos como estudios climáticos, geología marina, topografía marina, investigación física y química, desarrollo y aprovechamiento de energías renovables, control de contaminantes, aplicaciones con fines militares, etc.

La forma tradicional de recogida de datos de este medio, es mediante campañas con buques oceanográficos, acción que resulta altamente costosa. Esto requiere un cambio, de ahí que nos encontremos ante una disciplina con un amplio margen de innovación para hacer frente a diversos y complejos problemas: autonomía, localización y navegación mediante cálculos de hidrodinámica, dificultades para la comunicación submarina, estructura física y durabilidad de los materiales bajo las adversas condiciones del medio

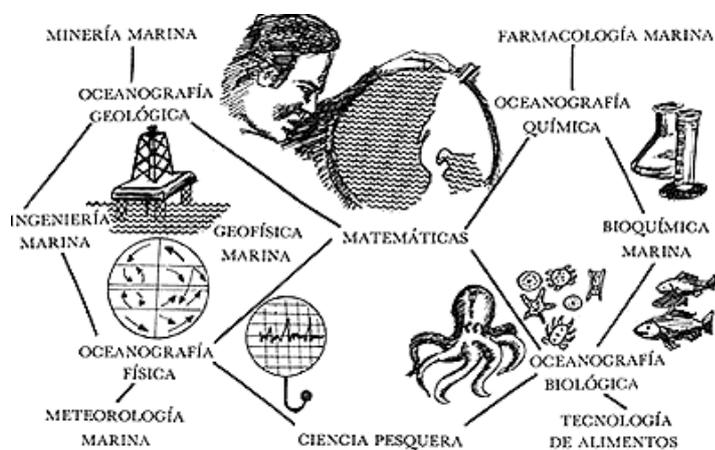


Figura 2. Ciencias en las que se apoya la Ingeniería Marina

acuático, etc. Todas estas complejidades han llevado a la Ingeniería Marina a apoyarse en otras ingenierías como son la Naval, Telecomunicaciones e Informática para conseguir llevar a cabo la exploración del medio marino reduciendo sus costes.

La exploración oceanográfica se ha basado en el

diseño de vehículos, hecho que no es en absoluto trivial, e incluye una tipología de sistemas muy heterogénea. Los primeros vehículos usados eran tripulados como los batiscafos, conectados mediante un cable umbilical a buques en superficie pero pronto fueron surgiendo alternativas en forma de vehículos no tripulados y autónomos. Uno de los primeros sistemas de exploración oceanográfico de esta opción lo constituyen las boyas oceanográficas, desarrollada en 1935 por los investigadores del *Coastal and Geodetic Survey*, dotándola de telemetría autónoma por radio. Las boyas permiten medir la meteorología en la superficie desde temperaturas del agua y viento, velocidad y dirección del viento, salinidad, etc. Hoy en día se usan para la monitorización de fenómenos meteorológicos en zonas puntuales, ejemplo destacado son las boyas perfiladoras de la red de muestreo global ARGO [1].

El principal problema de estas boyas es su cobertura de exploración, por ello se ha evolucionado hacia sistemas submarinos móviles no tripulados conocidos como *Unmanned Underwater Vehicle*, UUV. Este tipo de vehículos requiere un sistema de navegación

autónomo bastante complejo, lo cual motiva la apuesta por el control remoto desde buques oceanográficos en superficie. Se trata de los denominados *Remote Operated Vehicle*, ROV, vehículos conectados al buque mediante un cable umbilical a través del cual reciben los comandos de control remoto del piloto y envían información sensorial del entorno.

Gracias a la evolución de la Inteligencia Artificial, IA¹ [2] y a los avances en las arquitecturas de control de sistemas robóticos móviles, se empezaron a plantear diseños que pudieran operar autónomamente. Esto permitió cortar el umbilical que unía al ROV a los mandos del piloto que se encontraba en superficie, y aparecerán en escena los *Autonomous Underwater Vehicles*, AUV. Los primeros prototipos eran parte de proyectos de investigación como el Sea Grant's AUV Lab del Massachusetts Institute of Technology, MIT, a lo largo de la década de 1970, si bien el primer AUV propiamente dicho data de finales de la década de 1950, fruto del desarrollo de Stan Murphy, Bob Francis y Terry Ewart, conocido como Self Propelled Underwater Research Vehicle, SPURV [3]. Desde entonces se han desarrollado gran variedad de AUVs, pudiéndose establecer toda una tipología en función de la misión para la que estén diseñados.

Con la evolución de los sistemas submarinos vienen ligados sus componentes tanto electrónicos como estructurales, en función de la exploración a realizar las condiciones varían y sus estructuras con ellos. Un aspecto muy importante de estos vehículos es su autonomía, con ello sus baterías y sus sistemas de gestión, BMS. Una buena elección de la tipología de las baterías existentes en el mercado junto con su BMS, permiten dotar de mayor o menor autonomía a nuestros AUV.

1.1. Objetivo del proyecto

En esta andadura lo que se pretende es que el equipo AVORA [4] partiendo de cero consiga crear un vehículo submarino cuyo objetivo prioritario es llegar a la competición SAUC-e 2012 y pasar las diferentes pruebas. Para ello, hay que estructurar los diversos procesos a realizar y quién los llevará a cabo, aclarando que todos los miembros de AVORA deben comprender en mayor o menor medida los entresijos del proyecto global al que se enfrentan.

¹ **Inteligencia Artificial, IA.** Es un área multidisciplinar que a través de ciencias, tales como la informática, la lógica y la filosofía, estudia la creación y diseño de entidades capaces de razonar por sí mismas utilizando como paradigma la inteligencia humana.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El proyecto en sí tenía una duración estimada de 9 meses pero realmente se realizó en un tiempo de 5 meses, esto se debe a la constitución final del equipo AVORA, a la espera de que los materiales que componen el AUV llegasen a la isla de Gran Canaria y a que se consiguiese un perfecto entendimiento entre la Plataforma Oceánica de Canarias, la Universidad de las Palmas de Gran Canaria y a la Fundación Universitaria de Las Palmas, pues sin ellas este proyecto no se podría haber realizado.

Este proyecto se centra en el sistema BMS y eléctrico del AUV que pretendemos desarrollar, además de apoyar en las diversas tareas existentes que realizan otros miembros de AVORA, por esto, este PFC que nos ocupamos se plantea los siguientes objetivos:

1. Adquirir conocimientos para comprender el correcto funcionamiento y tipos de los sistemas de gestión de baterías.
2. Diseñar, fabricar y testear el correcto funcionamiento del BMS que no se pudo realizar durante la experiencia de SAUC-e12.
3. Proponer mejoras al prototipo y plantear cómo mínimo su diseño si no fuese posible fabricarse físicamente.
4. Fabricar todas aquellas PCB's que necesitamos para la gestión de la parte electrónica de nuestro AUV.
5. Estudiar los componentes y conexionado de los que se compone un AUV dentro del entorno correspondiente a la parte electrónica.
6. Interactuar con los compañeros de la parte de mecánica para saber las dimensiones físicas de las estructuras estancas donde irán alojadas las PCB's y conseguir que los circuitos impresos tengan unas dimensiones lo más cómodas posibles. Además de opinar sobre posibles recolocaciones de las mismas dentro del AUV.
7. Informar a los integrantes de la parte informática sobre cómo deben actuar para poder gestionar los drivers de aquellos elementos que vamos a crear y que necesitarán controlar posteriormente para la administración del AUV.
8. Controlar y manejar las infraestructuras softwares y hardwares disponibles en el laboratorio del SFP para el diseño, fabricación, montaje y verificación de los circuitos impresos.
9. Adquirir conocimientos sobre las pruebas que debe superar nuestro AUV dentro de la competición SAUC-e 2012 para ayudar a los compañeros una vez tengamos el AUV.
10. Ayudar en la medida que sea posible al resto de integrantes del AVORA para que este proyecto salga adelante en el tiempo estipulado para así optar a realizar un buen papel en SAUC-e12.
11. Adquirir conocimientos en la creación de vehículos y sensórica submarina.

1.2. Trabajos relacionados

Dentro del campo científico en el que nos encontramos, indicar que este proyecto final de carrera se podrá integrar dentro de un conjunto de PFC de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria que cubren la planificación, control, simulación, diseño e implementación de diferentes productos relacionados con los ROV's y AUV's. Reseñar que aunque este proyecto en sí se centra en el sistema de gestión de baterías y eléctrico del AUV hay que decir que se apoya en ellos puesto que existe un objetivo inicial que es el de crear la estructura, hardware y software de todo un AUV para poder llegar a la competición SAUC-e 2012 y superar las diversas pruebas que allí se nos presentan.

El compendio de estos proyectos al que hacemos referencia pretende ser:

- Planificador. Se engloban aquellos proyectos que tras definir el equipamiento y misiones a ejecutar por un vehículo submarino, se centran en una interfaz para la definición y validación de misiones. Mediante comunicaciones TCP/IP y protocolos de comunicación, como por ejemplo, XDR se pretenderá monitorizar y realizar el control remoto del vehículo.
- Control. Pretenden analizar arquitecturas típicas de robots submarinos para posteriormente diseñar arquitecturas propias definiendo el equipamiento y misiones que podría ejecutar dicho ROV's o AUV's. Para ello se hará uso de soportes y protocolos de comunicaciones como los mencionados anteriormente, entornos de simulación tipo HIL (Hardware In Loop), además de proporcionar soportes opcionales de interfaces de comunicación, supervisión del sistema, control de errores y planes de contingencia junto con sus algoritmos correspondientes.
- Simulador. Intentar recrear de forma virtual tanto el entorno como el vehículo para conseguir llevar a cabo la misión o misiones, consiguiendo así un ahorro económico ya que no se requerirá la compra de material ni fabricación del vehículo hasta conseguirlo, aunque se consigan buenos resultados mediante este procedimiento, mientras que no se verifiquen físicamente, nunca se les podrá dar la conformidad completa. También se pretenden dar opciones de interfaces gráficas para el control de ROV's o AUV's por el grupo de ingenieros que

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

trabaja con él o para un tercero, es decir, un operario que pueda controlar el ROV desde superficie, sabiendo en todo momento los datos del mismo.

- Dentro de todos estos proyectos existe una parte comunitaria para ellos que será la definición del equipamiento de los ROV's y AUV's junto con la definición de misiones.

Dentro del grupo de proyectos al que hacemos referencia destacamos tres debido a que pertenecen a miembros del equipo AVORA y un cuarto que nos explica la parte electrónica que pretendemos abordar, estos son:

- **Desarrollo de un Sistema de Telecontrol y Telepresencia**, de Aarón Martínez Romero, plantea el desarrollo de un sistema de telecontrol y telepresencia con la capacidad de transmitir al usuario la sensación de estar en otro sitio, desempeñando cualquier actividad que desee realizar o que los dispositivos presentes en el sistema le permitan hacer.
- **Sistema Integrado de Control para un Vehículo Submarino Autónomo**, de Enrique Fernández Perdomo, que consiste en diseñar un sistema integrado de control para un AUV, que incluye mecanismos para la definición del equipamiento disponible a bordo del vehículo y de la misión a desarrollar.
- **Diseño e Implementación de una Arquitectura de Control de un ROV**, de Anil Motilal Mahtani Mirchandani, que pretende desarrollar una arquitectura de control para un ROV y dotarla de una interfaz gráfica para la operación por parte de un operario humano.

La Plataforma Oceánica de Canarias también nos aportó bastante información para conseguir llevar a buen puerto este proyecto, abriéndonos las puertas de sus instalaciones en el muelle de Taliarte situado en Telde, Gran Canaria, para iniciarnos en este mundo de la robótica submarina e informarnos de sus avances, además de hacernos ver que el medio marino es un nuevo sector para las tecnologías. Destacar la labor de Darío Sosa Cabrera, miembro de PLOCAN, quién fomentó la creación inicial del proyecto y la unificación de las diversas instituciones para enrolarse en el mismo. Su mayor integración en el proyecto se debe a que él había sido juez en ediciones anteriores de SAUC-e, pudiéndonos aportar información del evento de primerísima mano, inclusive haciendo de puente entre AVORA y empresas canarias dentro de este sector para que se implicasen en la medida de sus posibilidades e intereses con el proyecto. Indicar que Darío Sosa participó como juez nuevamente en la edición de SAUC-e 2012.



Figura 3. Dario Sosa, fila inferior a la izquierda, en una rueda de prensa de AVORA

1.3. Peticionario

Este proyecto se realiza a petición del Servicio de Fabricación de Prototipos del Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria junto con la Plataforma Oceánica de Canaria, la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, en el marco del Campus de Excelencia Internacional y Fundación Universitaria de Las Palmas. Enmarcándose en el proyecto Europeo SAUC-e 2012, Student Autonomous Underwater Challenge Europe.

Con el presente proyecto se pretende dar cumplimiento al requisito académico de presentación del Proyecto de Final de Carrera en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica (EITE) para la obtención del título de Ingeniero de Telecomunicación y manifestar la capacidad del alumno para desempeñar su futuro profesional.

1.4. Estructura de la memoria

Este proyecto fin de carrera se estructura en los siguientes capítulos:

Capítulo 2. Capítulo con 7 apartados donde se explica cómo se inicia este proyecto, dónde se lleva a cabo, introducción y descripción de los vehículos no tripulados, el equipamiento del que disponen estos vehículos, conocimientos sobre baterías

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

y, en especial, lo que se refiere a las baterías secundarias destacando las de Ion de Litio y por último la necesidad de desarrollar el sistema de gestión de baterías.

Capítulo 3. Nos centramos en el equipamiento que lleva el AUV desarrollado, explicando no sólo los componentes que fueron comprados y su por qué. Se desglosan todos los circuitos impresos desarrollados para conseguir interconectar los elementos físicos con la unidad de control, pues no vienen con los dispositivos.

Por último implementamos el circuito BMS prototipo creado, explicando en profundidad todo su desarrollo software, fabricación y montaje.

Capítulo 4. Describimos los resultados obtenidos y la experiencia vivida en la competición SAUC-e.

A su vez se describen los pasos y resultados realizados para verificar el correcto funcionamiento del sistema de gestión de baterías implementado.

Capítulo 5. Presentamos el costo de los circuitos impresos realizados.

Capítulo 6. Indicación de las aportaciones que este proyecto ha generado tras su realización, exponiéndose de forma clara y concreta.

Descripción de trabajos futuros que se pueden desarrollar como continuación de éste tanto en lo referido al vehículo autónomo submarino como al prototipo BMS desarrollado.

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE

Las investigaciones en el campo de los AUVs son sólo una parte de los esfuerzos de investigación en el área de vehículos no tripulados en aire, tierra y mar. Los vehículos no tripulados, o Unmanned Vehicles, UV's, ya sean teleoperados o autónomos, eliminan la necesidad de la presencia física del hombre en el propio vehículo. Los UV's operados remotamente usan la telerobótica para la navegación y control, mientras que en los autónomos no interviene ningún operario humano, de modo que disponen de inteligencia y un sistema de control embebido.

El diseño del sistema y la arquitectura de control subyacente es el mayor problema que nos encontramos en el desarrollo de vehículos autónomos no tripulados, debido al manejo de datos sensoriales multidimensionales, el procesamiento computacionalmente intensivo y la ejecución de las limitaciones de potencia y comunicación [5]. Se remite al lector al Apartado 2.3 Vehículos No Tripulados, para la consulta de la clasificación de los vehículos de exploración submarina y estudio detallado de los mismos.

Asimilado las categorías de UV's y sus complejidades, habrá que conocer todos aquellos elementos que se integran en el vehículo para la realización de las misiones; entrando en profundidad en el 2.4_Equipamiento, donde definiremos los tipos de equipamiento que disponen estos vehículos con su definición y utilización de los mismos, además de indicar aquellos elegidos para nuestro AUV.

Por otro lado, está la gestión de la electrónica de potencia donde se deberá hacer un estudio de los tipos de baterías existentes en el mercado y en concreto las que se instalan en los UUV's, con su correspondiente sistema de gestión, BMS Battery Management System, que es el objetivo de este PFC. Estos dos puntos, el lector podrá profundizar en ellos en los apartados 2.5, 2.6 y 2.7 respectivamente e ir al Capítulo3 para conocer los elementos físicos empleados en el vehículo desarrollado junto a las diversas PCB's para finalizar y entrar en profundidad en cuanto a implementación del sistema de gestión de baterías.

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE

A su vez si se desean conocer los resultados obtenidos tanto en la competición SAUC-e como si el prototipo de BMS funciona correctamente le remitimos al Capítulo 4.

2.1. SAUC-e

SUAC-e [6] es una competición universitaria de vehículos autónomos submarinos. Esta competición comenzó su andadura en 2006 en Reino Unido, posteriormente en 2008 se trasladó a Francia al IFREMER (Instituto Francés de Investigación para la explotación del Mar, siglas en Francés) en Issy-les-Moulineaux; y desde 2010 se lleva realizando en Italia, con sede en el NURC (NATO Underwater Research Center), actualmente denominado CMRE (Centre for Maritime Research & Experimentation), en La Spezia.

La competición desafía a los futuros ingenieros para diseñar y construir un AUV capaz de realizar misiones reales, así se pretende fomentar el desarrollo e innovación de vehículos y sensorica submarina. En la figura 4 se puede ver en la parte superior la entrada de las instalaciones del CMRE y en la inferior una vista aérea de todo el completo, remarcada en negro.



Figura 4. Entrada y vista aérea de las instalaciones del CMRE

2.1.1. Competición

Durante el transcurso del año los equipos deberán ir documentando sus acciones, desarrollos y mejoras que pueden subir en redes sociales o páginas web; y se debe realizar un documento en el que se informe de todas las acciones realizadas, que se entregará a los miembros del jurado en una fecha anterior a la competición.

En las instalaciones de la NATO, en La Spezie, la competición se realiza en la arena², esta tiene unos 5 m de profundidad aproximadamente, con la casi inexistencia de corrientes y una visibilidad de 2 m.

Antes de iniciarse la competición los AUVs deberán superar un test de verificación donde se comprueba por parte de los jueces que el sistema es robusto y que cumple con las normas impuestas. Este testeo inicial se realiza en unas piscinas de agua salada dispuestas por la organización, que además sirven para que los equipos hagan a su vez un test, los vehículos llegan a la competición desmontados casi en su totalidad. Para poder competir los equipos deben clasificarse, superando una prueba inicial de validación, posteriormente en función del número de pruebas superadas y de lograrlo de forma consecutiva o no, obtienen su clasificación final.

El test de verificación consiste en revisar que el AUV disponga de un sistema de apagado de emergencia, dotarlo de flotabilidad positiva y luz estroboscópica. El objetivo de esto no es más que si el vehículo pierde el control en algún momento, dar seguridad a un buzo para que tras localizarlo gracias a la luz estroboscópica, accione el mecanismo de apagado y este emerja a la superficie por sí sólo. Otra aportación de la flotabilidad positiva es dotar al AUV de test de errores para que si transcurrido un determinado tiempo para realizar una misión este no vuelva a superficie, desconecte la acción de los motores y emerja.

Las pruebas a superar por los vehículos en 2012 fueron las siguientes, hay que indicar que actualmente han sufrido algún cambio pero siguen estas pautas:

1. Pasar a través de una puerta de validación realizada con dos boyas de tonos anaranjados ancladas al suelo, prueba clasificatoria para la final.
2. Buscar un objetivo desde media altura y girar alrededor de él.
3. Buscar un objetivo que está casi sumergido y hacer un círculo alrededor de él.

² **Arena.** Zona de pantanal/marisma en las instalaciones del NURC donde los equipos deberán sumergir sus AUVs para superar las diversas pruebas que serán validadas por los jueces de la competición.

4. Examinar un muro a una distancia de 2,4 m.
5. Seguimiento de un vehículo autónomo de superficie, ASV equipado con un pinger³ a 13 kHz, (10 ms longitud de pulso).
6. Detectar una zona delimitada por el ASV.
7. Prueba libre de impresionar al jurado: realizando una misión propia, muestra de sistemas o componentes del vehículo, etc.

2.1.2. Formación de los equipos y objetivos

SAUC-e está destinada a universitarios, estudiantes de grado o máster y doctorandos para fomentar el desarrollo e innovación de vehículos y sensórica submarina.

Los equipos participantes estarán constituidos por un máximo de diez componentes de los cuales el 75% han de ser universitarios y un 25% externo, permitiendo ir a la competición con el equipo a un supervisor. Los equipos competirán entre ellos, sin haber categorías ya sea de experiencia o de equipamiento; al igual que no es obligatorio que el equipo disponga de toda la sensórica necesaria para superar con éxito la totalidad de las pruebas.

El objetivo de este evento es que futuros ingenieros vean un nuevo sector en este campo, servir de enlace intercultural entre los miembros de los equipos participantes, pues aunque es una competición, pretende que todos adquieran conocimientos e ideas de las universidades que llevan más tiempo participando en eventos similares o de sensores específicos que aporten algunos de los equipos, además de recibir charlas sobre la actualidad de la robótica submarina.

³ **Pinger.** Aparato emisor de ultrasonidos.

2.2. Servicio de Fabricación de Prototipados del IUMA

El Servicio de Fabricación de Prototipos de Circuitos Impresos y Sistemas Electrónicos, SFP, del IUMA, localizado en Tafira, Las Palmas de Gran Canaria, dispone de un moderno laboratorio que permite la fabricación en pocas horas de circuitos impresos de 2, hasta 8 capas, así como el montaje, soldadura y test de estos circuitos.

El equipamiento empleado permite la obtención de los exigentes niveles de calidad que se requieren para el diseño electrónico actual. Pensado para la fabricación de prototipos y pequeñas series de circuitos impresos, además de incorporar la posibilidad de mecanización de materiales necesarios para el montaje de sistemas electromecánicos.

2.2.1. Equipamiento del laboratorio del SFP

El laboratorio del SFP dispone de tecnología y equipamiento actual, muy similar al que disponen las empresas del sector pero a menor escala, pues la maquinaria para producir en serie es superior en volumen y rapidez.

El servicio dispone de una línea de fabricación de circuitos impresos mediante fresado atacado químico; permitiendo dar un servicio de gran precisión y calidad en los acabados de las PCB's. Tiene la posibilidad de fabricar fotolitos positivos y negativos utilizando película fotosensible con una resolución máxima de 8000 dpi⁴ sobre una superficie de trabajo de 370x340 mm. En cuanto al montaje de componentes SMD⁵ se fabrican máscara de soldadura (stencil), permitiendo esto, que la pasta de soldadura quede dosificada y uniforme sobre los pads, en cuanto a la hora del montaje de estos componentes

⁴ **DPI.** Dots Per Inch, siglas en ingles de lo que se conoce como puntos por pulgadas, unidad de medida para resoluciones de impresión.

⁵ **SMD.** Surface Mount Component, tecnología de montaje superficial más conocida como SMT (Surface Mount Technology).

se utiliza maquinaria tipo “pick-and-place”; se dispone tanto de equipos semiautomáticos como automáticos, pudiendo llegar hasta footprint⁶ 0201.

Concluido el proceso de fabricación y montaje se pasa a la revisión óptica de las soldaduras obtenidas y componentes mediante microscopio, máquina AOI o máquina de rayos-X. Con todo el equipamiento descrito es normal que se pueda dar un servicio de calidad como se dijo al comienzo.

Aparte de lo descrito en la tabla 1, el laboratorio dispone de otros instrumentos como frecuencímetros, osciloscopios, estación de soldadura, tester y demás materiales básicos electrónicos para fabricación montaje y testeo.

EQUIPAMIENTO

  	<p>LPKF 93S. Máquina fresadora y taladradora específica para operar con paneles de circuitos impresos de gran tamaño y para la preparación de los paneles para circuitos multicapa. Tiene un área de trabajo de 380x420mm, permitiendo realizar taladros de 0.3mm, pistas de 0.1mm y separación entre pistas de 0.1mm.</p> <p>LPKF ProtoMat C100HF. Máquina fresadora y taladradora ideal para trabajar con sustratos flexibles como stencil y para RF. Dispone de una superficie de trabajo de 200x340mm, con sistema de inspección óptico QuickView además de realizar taladros de 0.2mm, pistas de 0.1mm y separación entre pistas de 0.1mm.</p> <p>Burgard CCD/2. Máquina fresadora de control en los tres ejes X/Y/Z, ideal para trabajos adicionales de mecanizado de materiales como aluminio necesarios para el montaje de sistemas electromecánicos.</p>
	<p>Photoplotter FP-8000. Pequeño fotoploter ideal para usuarios que necesitan autonomía e alta calidad, para uso instantáneo y a bajo coste. El film, se fija al tambor rotativo y su diodo láser se mueve paso a paso dejando la huella extraída del fichero Gerber.</p>

⁶ **Footprint.** Definición de la huella física del componente, donde se describe la forma física, patillaje, tipo de tecnología y dimensiones.

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE

	<p>LPKF Multipress II. Máquina de prensado para la realización de circuitos de 4 hasta 8 capas. Ejerce una presión de 15t y una temperatura de 210°C controlado por microprocesador. Posee un área de prensa de 420x360mm permitiendo fabricar circuitos de hasta 305x254mm.</p>
	<p>LPKF MiniContac II. Banco de metalización de taladros, dispone de control por microcontrolador y con capacidad de metalizar sustratos de 200x300mm.</p>
	<p>Unidad multipropósito PCB 500S. Unidad de procesamiento desarrollada para uso educativo e industrial. Dispone de 3 tanques, 2 zonas de lavado y 1 fregadero. Se utiliza para las distintas secuencias de atacado químico como por ejemplo eliminado de película fotosensible, lavado, eliminado de película dura, lavado, eliminado de pintura protectora de PCB.</p>
	<p>AZ-220. Insoladora con bomba de vacío diseñada para insolado a dos caras de materiales fotosensibles a la luz UV.</p>
	<p>Rota-Spray 1210. Grabadora por aspersion de pequeño tamaño y gran calidad, utilizado no sólo para atacado químico del cobre de las PCB's sino también para lavado o revelado de fotolitos. Permite realizar circuitos impresos de 254x305mm en un tiempo de 90 segundos. Incorpora control digital de temperatura, tanque integral por aspersion, carcasa transparente.</p>

	<p>LPKF-ProtoPlace. Máquina semiautomática que permite trabajar con PCB's de 400x300mm y colocar componentes hasta footprint 0201. Dispone de plato motorizado para almacenaje de componentes y alimentadores para bobinas. Gracias a su sistema neumático permite la colocación de los componentes.</p>
	<p>LPKF Zelplace BGA. Máquina semiautomática para el montaje de BGA, CSP, Flip Chip, componentes fine-pich y ultra fine-pitch. Dispone de alineación óptica con cámara CCD permitiendo colocar componentes desde 5x5mm.</p>
	<p>Philips CSM 84 III. Pick and place automática de última generación, dispone de 3 cabezales de alineamiento mecánico, con cámara para el correcto alineamiento de los componentes con precisión de micras de error y para detectar que el componente a montar es el correcto, de no serlo lo desecha. Permite acoplarlo a fabricación serie.</p> <p>El SFP dispone de otros modelos de pick-and-place pero destacamos esto porque son los más utilizados.</p>
	<p>Proto Flow S. Horno de refusión con microprocesador para programar diversos perfiles en función del tipo pasta de soldadura.</p> <p>Además de este horno se dispone de otro de ola de soldadura y otro para los procesos de fabricación de las PCB's.</p>
	<p>Sony TW-TLS1. Microscopio digital para detectar fallos evidentes o de mal montaje de los componentes o soldaduras.</p>

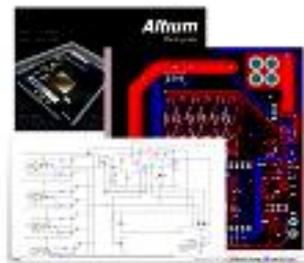
	<p>AOI Omron RS2. Máquina de inspección óptica automática. Sistema basado en varios métodos de contrastes de luz RGB para detectar posibles errores de montaje y soldadura. Dispone de 3 métodos de revisión, <i>Object Recognition</i>, <i>Blow Analysis</i> y <i>Template Matching with Normalized Gray Scale Correlation</i>.</p>
	<p>MCT225. Máquina de Rayos-X que permite hacer inspección de BGA, BGA, placas multicapa e inspección de soldaduras y aparatos electrónicos.</p>

Tabla 1. Maquinaria del SFP

2.2.2. Proceso de Fabricación de PCB

Como el laboratorio del SFP no se dedica a fabricación en serie si no de prototipos o fabricación de un número concreto de circuitos, no se puede seguir una metodología industrial pero no por ello se carece de proceso para diseñar, fabricar, montar y verificar sus circuitos impresos. Este hecho permite dar una máxima calidad a las PCB's que se fabrican, siendo la única instalación en Canarias capaz de dar este tipo de servicio a las empresas que los necesiten con un trato personalizado.

La metodología empleada en el SFP se muestra en la figura 5, donde se puede ver una primera fase software, posteriormente una fase hardware con el proceso de diseño y montaje de componentes y finalmente una fase de verificación, todo ello se explica con detalle a continuación.



Diseño Software



Fabricación PCB



Fabricación de Stencil



Revisión de Soldadura



Montaje de Componentes



Soldadura de Componentes



Revisión Óptica de la PCB



Figura 5. Flujo de Fabricación PCB en el SFP

- **Diseño Software.** Todo proceso de fabricación de PCB se inicia mediante el esquemático del circuito y posterior diseño de las pistas de cobre con los footprint de los componentes empleados. Para verificar que el diseño cumple, se revisan las reglas de diseño. El programa empleado para ello es el Altium Desinger. Comprobado que todo está correcto, exportamos del programa los diversos planos de las capas (top, bottom, taladros, serigrafía, contorno) de la PCB, ficheros gerber.
- **Fabricación de PCB.** Se crean los fotolitos importando los ficheros gerber a el photoploter, mientras esto se realiza se toma la plancha de vidrio y cobre donde se va a fabricar la PCB y la llevamos a la fresadora para realizar sus taladros. A continuación si operamos con un circuito de más de una cara deberemos realizar el proceso de metalización. Realizado todo esto, pasamos al laminado de la placa que nos permite transferir el patrón de las diversas capas mediante película fotosensible a la PCB y realizamos el proceso de atacado químico y pintado de protección para obtener finalmente nuestro circuito impreso.
- **Fabricación de stencil.** Cuando los componentes a montar son tipo SMD se deberá diseñar su máscara de soldadura, stencil, en el que se tiene el footprint de los pads para poder darles pasta y que esta quede uniforme y exacta.
- **Revisión óptica de pasta de soldadura.** Una vez se tiene la PCB con pasta, requiere de una revisión óptica con el microscopio para verificar que están perfectamente definidos los pads y que todos ellos tienen el mismo grosor. Con ello evitamos futuras malas soldaduras o cortocircuitos.
- **Montaje de componente.** Si operamos con componentes SMD estos se han de montar con las diversas pick and place mencionadas en la tabla 1. La utilización de unas u otras dependerá del tipo de componente a montar y de si es un prototipo único o una producción mayor para utilizar o no el modelo Philips CSM 84 III.
En caso de componentes de inserción estos se montan manualmente con la estación de soldadura y estaño sin plomo.

- **Soldadura de componentes.** Montado los componentes en la PCB sólo falta que estos queden soldados; para ello los llevamos al horno de refusión al que le hemos programado con el perfil de calor adecuado tanto para pasta sin plomo como la máxima temperatura que soportan los componentes en cada caso.
- **Revisión óptica de la PCB.** Sólo falta revisar que las soldaduras y los componentes estén correctos. Para ello se hace una inspección óptica manual mediante microscopio y a continuación una automática con la AOI. En casos especiales o para detectar errores en equipos montados se realiza inspección con la máquina de Rayos-X.

Una vez finalizado el proceso se realiza la verificación funcional del montaje.

2.3. Vehículos no Tripulados

La denominación vehículo no tripulado define a cualquier tipo de vehículo sin un tripulante humano en su interior, pudiendo establecerse una clasificación en función del medio en el que operan: *aéreo*, *terrestre* o *submarino*. A su vez, éstos pueden ser *teleoperados* o *autónomos*.

En el caso de ser operados remotamente, nos encontramos con vehículos controlados por un operador humano mediante un sistema de comunicación alámbrica, también denominado cable umbilical, que le permite realizar diferentes acciones sobre el vehículo y obtener información de su estado; o sin umbilical, cuya principal característica es que el control del vehículo se delega en la propia arquitectura de control interna; gracias a un sistema sensorial y un conjunto de actuadores, es capaz de tomar decisiones con el objetivo de completar una misión.

Aunque este proyecto se centra más en los vehículos submarinos, debido a su nacimiento; debemos indicar que en la actualidad, los proyectos con mayor impacto mediático son aquellos destinados a la exploración espacial o con fines militares. En cuanto al ámbito espacial podemos encontrar un gran número de proyectos destinados en el sistema solar y más allá. El desarrollo de vehículos no tripulados destinados a este campo nace en 1957 por la URSS con el lanzamiento del satélite Sputnik, destacando por su curiosidad y longevidad las misiones *Voyager 1* y *2* [7], consistente en dos sondas lanzadas en el año 1977 que se encuentran actualmente orbitando en los límites del sistema solar.

También existe una gran cantidad de proyectos de vehículos no tripulados aéreos o Unmanned Aerial Vehicle, UAV. La mayoría con fines militares tales como misiones de reconocimiento, bombardeos o económicas, como las prospecciones de petróleo o reservas de gas; en consecuencia la información relacionada con los proyectos es limitada. Ejemplo de este tipo de misiones son el *AAI RQ-7 Shadow* [8] cuyo primer vuelo fue en 1991, el *MQ-9 Reaper* [9] en 2007, y 2010 *Barnard* [10]. Por otro lado hay proyectos orientados a la investigación geofísica o meteorológica, y otros tantos dedicados a la creación de vehículos aéreos con diferentes características de maniobrabilidad y autonomía, ejemplo de esto último son los cuadracópteros.

Respecto a los vehículos no tripulados terrestres, Unmanned Ground Vehicle UGV, han evolucionado en los últimos años sobre todo aquellos cuyo control es autónomo. Comentar que son los más conocidos o comunes debido que están al alcance de todo el mundo en forma de juguetes teledirigidos pero como ocurre con la mayoría de los vehículos de los que venimos hablando, su mayor desarrollo se debe gracias al campo militar o espacial. Ejemplo actual de ello es la misión *Mars Exploration Rover* [11], programa de la NASA para la exploración del planeta Marte, o para construcción de mapas como SLAM, Simultaneous Localization and Mapping [12].

Centrándonos en los vehículos autónomos submarinos no tripulados, o Unmanned Underwater Vehicles, UUV's, que son los que nos ocupan, las dificultades de comunicación en el medio subacuático suelen motivar el uso de umbilical, dando lugar a los vehículos conocidos como ROV. Asumiendo el coste económico y el consumo de un modem acústico aparecen los vehículos submarinos sin umbilical no tripulado, o Unmanned Untethered Underwater Vehicles, UUV. Conseguir suprimir el umbilical implica por un lado la liberación de la conexión con el buque oceanográfico en superficie, además de evitar los problemas de arrastres, enredos, maniobrabilidad y las restricciones de profundidad; aunque implican una mayor complejidad de sensores de los que disponen.

Los UUV's, comprenden los AUV's que puede disponer de diferentes capacidades de maniobrabilidad, lo que permite una división en dos grandes grupos: *vehículos de crucero*, figura 6.a, y *vehículos de hovering*, figura 6.b, (capaces de mantenerse en una posición fija).

La maniobrabilidad del vehículo determina la tipología de misiones que éste puede realizar y con ello las aplicaciones prácticas del mismo. Así, los vehículos de crucero se usan en exploración, búsqueda, localización de objetos, etc., en mar abierto, donde hay grandes espacios y sólo se requiere de 3 grados de libertad para la navegación, es decir, avance longitudinal, control de rumbo y cabeceo. Por otro lado los vehículos de hovering se destinan a tareas de inspección detallada y trabajos físicos sobre objetos fijos, para lo que requieren de al menos 5 grados de libertad, avance en las direcciones ortogonales xyz del espacio, control de rumbo y cabeceo, en casos muy concretos.



Figura 6. Tipos de AUVs

A su vez, existe la clasificación de *Planeadores Submarinos*, más conocidos como *Gliders*, caracterizados por explorar amplias zonas oceánicas con sistemas de propulsión de muy bajo coste.



Figura 7. Glider

Los UUV se utilizan en una gran variedad de tareas tales como creación de mapas del fondo marino, estudio biológico de las fosas, visualización de los procesos volcánicos, estudio del medio para futuras construcciones. A continuación detallaremos más en profundidad los diversos UUV's así como destacar algunos proyectos relevantes relacionados con ellos.

2.3.1. Vehículos Submarinos Remotamente Operados ROV

Los ROV [13], figura 8, conforman uno de los tipos de UUV. Se caracterizar por disponer de un cable umbilical conectado a un sistema o software de operación, el cual se encargará de comandar al vehículo, ya sea mediante un sistema autónomo o un operador humano, esta segunda opción es la más utilizada.



Figura 8. ROV

Su estructura suele estar orientada para ofrecer una alta maniobrabilidad y disponer de una serie de herramientas para la percepción y control del entorno, como por ejemplo pinzas. En su mayoría disponen de una cámara para la visualización y sistema de iluminación. La variedad de misiones realizadas por los ROV es amplia, destacando aquellas de recolección de muestras, búsqueda, reparación o incluso prospecciones petrolífera.

En cuanto al diseño del software del vehículo, se centra en ofrecer una serie de servicios para el control del mismo con la mayor robustez y con el mayor tiempo de respuesta posible. En función de que el sistema requiere de un operador humano o no, tendrá unos requisitos u otros.

Los ROV se pueden clasificar en función del peso, tamaño, habilidades o potencia y en función de que sean electro-hidráulicos o completamente eléctricos. Normalmente se clasifican según las siguientes categorías:

- Mini/micro ROV: son los más pequeños en tamaño y peso, entre los 3 y 15 Kg. Utilizados en labores de inspección, visualización e investigación.
- Pequeños y de bajo coste: comprenden aquellos ROV's más pequeños y de menor peso, permitiendo operar hasta una profundidad de 300 metros. Dentro de este rango, se catalogan los de bajo coste o low cost, LCROV; en cuanto a bajo coste se dice a los que están en el rango de los 10.000 y 40.000 €.
- Prestaciones medias: comprenden los vehículos electro-hidráulicos con una potencia de 20 a 100 caballos, con capacidad de carga máxima aproximada a los 200 Kg y capaces de llegar a una profundidad de 1.000 m. Es la

categoría más común, desarrollada a partir de los vehículos *eye ball*, utilizados para inspecciones ya sea de estructuras o del trabajo de buzos.

- **Eléctricos de alta capacidad:** aquellos ROV eléctricamente operados con una profundidad máxima operativa de 6.000 m. Han ido ganando popularidad y mercado gracias a su utilización en el ámbito militar y científico, debido a que son silenciosos y que las misiones a realizar no requieren de trabajo pesado.
- **Trabajo pesado:** encargados de bajar hasta profundidades de 2.500 m con una potencia de 100 a 250 CV DIN. Utilizados para tareas de instalación submarina debido a su gran capacidad de carga y capacidad para levantar peso.
- **Gran profundidad:** vehículos con consumo energético bajo y limitado debido a la necesidad de reducir el tamaño y grosor del umbilical, con capacidad de profundidad hasta 4.000 m. Utilizados en misiones de búsqueda y rescate en el fondo marino.
- **Remolcados:** suelen operar remolcados en una embarcación, a una cierta profundidad y conectados mediante cables con propiedades electromecánicas capaces de soportar el arrastre del vehículo sin verse afectados por las condiciones marinas. Empleados para recolección de muestras, construcción de mapas topográficos, búsqueda y rescate.

Existen un gran número de proyectos en esta línea, unos destinados a exploraciones científicas, otros a aplicaciones industriales, desarrollo militar y una última línea desarrollados por aficionados. Describimos a continuación algunos de ellos que hemos ido encontrando para el estudio del proyecto y que se han considerado interesantes:

Liropus 2000

Es la contribución española a la flota de vehículos de la que dispone la oceanografía de la Unión Europea. Ha sido diseñado por la IEO, Instituto Español de Oceanografía, para realizar tareas de observación y recogida de muestras y datos hasta una profundidad de 2.000 metros, aunque puede llegar a los 3.000 m. Empleado en el proyecto INDEMARES y coordinado por la Fundación Biodiversidad, tiene como objetivo el estudio de 10 ecosistemas marinos como el cañón de Avilés, el banco de Galicia, los volcanes submarinos del golfo de Cádiz y algunas montañas submarinas de las islas Canarias. [14].

Scorpio ROV

Sumergible para Ocean Craft Repair, Position, Inspection and Observation, es una marca de vehículos remotamente operados que se utilizan por las industrias submarinas como la del petróleo. Han ido evolucionando a partir del modelo principal el Scorpio 45 hasta llegar al modelo actual adaptado a las nuevas tecnologías el Super Scorpio. [15] [16].

Ramses

ROV militar destinado a detección de minas, vigilancia de zonas portuarias, situaciones de emergencia submarina en aguas poco profundas. Se encuentra en la categoría de vehículos pequeños y de bajo coste, caracterizado por disponer de sistema de co-control para un fácil control y manejo, añadir que dispone de estructura esférica. [17].

2.3.2. Vehículos Submarinos Autónomos AUV

Los AUVs son la principal línea de investigación y en particular uno de los objetivos a realizar de este proyecto inicialmente. Existen una gran cantidad de proyectos sobre los AUVs, normalmente son pequeños vehículos dotados de sistemas de propulsión eléctrica, donde gran parte del volumen del submarino está ocupado por baterías que proporcionan la energía a los motores y el resto se destina a los sistemas de medición y navegación.

Hoy en día podemos encontrar AUVs con diseños muy representativos, así como proyectos de investigación, workshop, concursos, etc., que cada año proponen nuevos avances. Pero aún hay bastante margen de mejora en el afán por conseguir sistemas que satisfagan por completo las demandas de los oceanógrafos de todo el mundo. Es mucha la información demandada y muy compleja el entorno de actuación, donde las diversas restricciones van desde los condicionantes físicos hasta el propio software del sistema embebido como son estructura e hidrometría del vehículo, equipamiento de comunicación, consumo energético, disipación de calor, localización, navegación, almacenamiento de muestras, etc.

A continuación se comentan alguno de los diseños de AUVs más representativos a nivel mundial u organismos que se han considerado interesantes durante la búsqueda de información para este proyecto:

Bluefin

Empresa fundada por un grupo de ingenieros que formaban parte del MIT AUV Laboratory, dedicada al desarrollo, construcción y operaciones de vehículos autónomos submarinos y tecnologías relacionadas para la defensa e industria de todo el mundo. Fabrica y diseña AUVs de pequeño tamaño capaces de realizar inmersiones a gran profundidad caracterizados por la modularidad de sus componentes. [18]

Infante

El vehículo sale del rediseño del AUV Marius que se desarrollo en el ámbito del proyecto MAST-II SOUV de la Unión Europea coordinado por el Instituto de Sistemas y Robótica de Lisboa. El Infante ha sido diseñado como herramienta para el estudio del clima de las aguas costeras. [19]

El sistema de control proviene del Marius, sistema destacado por seguir una metodología de diseño basada en primitivas parametrizables; dichas primitivas se obtienen mediante la coordinación de tareas concurrentes, ejecutadas en función de los programas de la misión [20], sustentada en la teoría de las Redes de Petri⁷.

Gargi

El vehículo nace como ROV por la universidad de Girona, pero se ha transformado en AUV tras incorporarle un sistema de control basado en una arquitectura híbrida con aprendizajes por refuerzo y centrada en la coordinación híbrida de los diferentes comportamientos definidos en [21]. En Garbi se ha probado y estudiado diversas arquitecturas de control, destacando los esquemas motores, basados en campos potenciales para modelar el sistema de navegación [22].

AUVSI

La Association for Unmanned Vehicle Systems Internacional es una de las mayores organizaciones sin ánimo de lucro dedicada al avance de los sistemas no tripulados, promoviendo el desarrollo de sistemas y tecnologías relacionadas con el apoyo de organizaciones gubernamentales, industriales y académicas. [23].

⁷ **Red de Petri.** Es una representación matemática o gráfica de un sistema de eventos discretos en el cual se puede describir la tipología de un sistema distribuido, paralelo o concurrente. Son una generalización de la teoría de autómatas que permite expresar un sistema a eventos concurrentes.

2.3.3. Gliders

Existe una tercera tipología denominada Gliders [24-26], son AUVs que mediante pequeños cambios de su flotabilidad y utilizando unas alas, permiten convertir el movimiento vertical en horizontal, obteniendo así un sistema de propulsión de muy bajo consumo, llegando a una profundidad de 1.000 a 1.500 metros. Gracias a esta característica presentan una gran mejora en cuanto a la duración en tiempo y distancia comparados con los tipos crucero y hovering; esta mejora les permite realizar misiones de mediciones con duraciones de meses y longitudes de miles de kilómetros.

Los perfiles que traza un Glider tienen forma de diente de sierra debido a su mecanismo de propulsión, figura 9 parte superior, a lo largo de los cuales realiza mediciones de parámetros físicos-químicos del agua. Cuando el Glider emerge es cuando se realiza la operación de envío de información tanto del vehículo al centro de control como a la inversa mediante comunicación GPS más IRIDIUM⁸, figura 9 parte inferior.

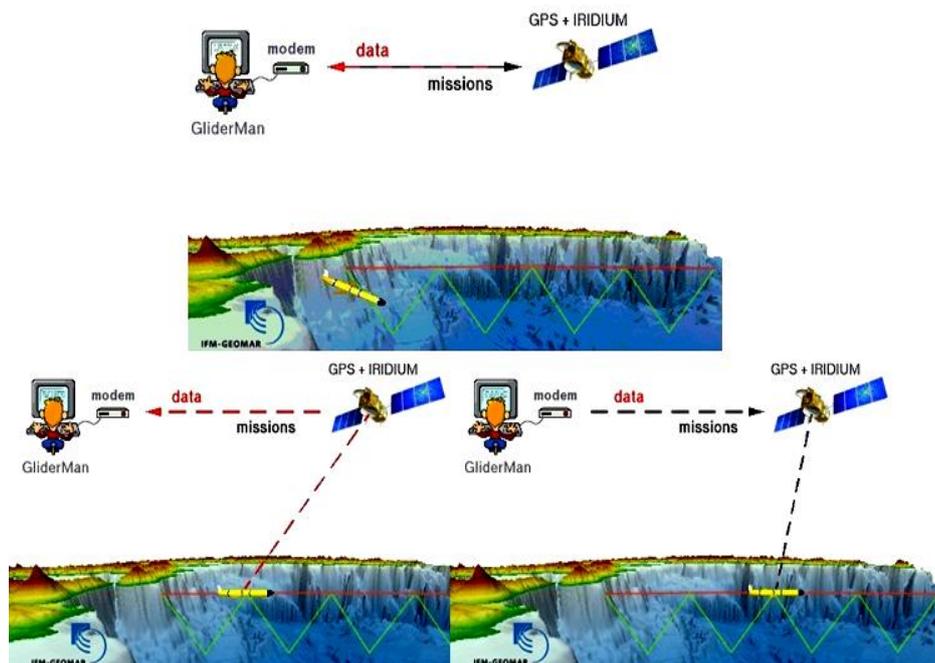


Figura 9. Movimiento y control de un Glider

Actualmente existen los siguientes modelos o clasificación de Gliders:

- **Slocum** [27], **Sea-Glider** [28], **Spray** [29]: vehículos con forma de torpedo con alas, fabricados en fibra de carbono y que pueden llegar hasta una

⁸ **IRIDIUM**. Son satélites de comunicaciones que orbitan la Tierra a baja altura, formando una red mundial de comunicaciones de voz y datos, asegurando una cobertura planetaria mediante un mínimo de 66 aparatos.

profundidad máxima los tipo Spray de 1.500 metros, con movilidad tanto horizontal como vertical debido al movimiento en forma de dientes de sierra que realizan.

- **Modern Glider:** engloban aquellos que no tienen estructura tipo torpedo como puede ser tipo planeador o que se impulsan sin un movimiento en forma de diente de sierra como puede ser gracias al movimiento de las olas. Dentro de esta categoría se añaden todos los glider que ofrecen algo distinto a los tradicionales. Como el Wave Glider [30].

2.4. Equipamiento de los UUV

Entendemos por equipamiento todos aquellos elementos que lleve el vehículo como apoyo a la realización de la misión. Generalmente habrá un equipamiento físico y otro lógico, hecho que diferencia los dispositivos físicos de la información. Primero se definirá el equipamiento lógico que define el conjunto de datos que se manejan en misiones de exploración oceanográfica que son:

- *Batimetría*. Información relativa a la profundidad del fondo oceánico para cada punto del mar. Se suele disponer de una rejilla de latitud y longitud con una resolución de muestreo. Existen fuentes que proporcionan batimetría gratuita de algunas zonas del mundo.
- *Meteorología*. Información de fenómenos meteorológicos como el viento, la temperatura o la lluvia por ejemplo. Útiles para saber las condiciones a las que se va a enfrentar el vehículo y dotarlo de equipamiento físico capaz de soportarlos y llevar con éxito la misión.
- *Corrientes Marinas*. Esta información es útil para que el vehículo navegue de forma correcta y llegue a su destino; empleándose para realizar correcciones en las ecuaciones hidrodinámicas. [31]

Indicar que este tipo de información viene en paquetes de datos muy grandes, por esto, se suele almacenar en ficheros con formato *netCDF*⁹, que ofrecen un almacenamiento binario vectorial de los diferentes parámetros de información que almacenen.

En cuanto al equipamiento físico del que disponen los vehículos autónomos submarinos disponen de una tipología común y son elementos orientados a la realización de la misión. Como norma general se catalogan en tres grandes grupos: *dispositivos sensoriales*, *dispositivos de actuación* y *dispositivos de comunicación*.

⁹ **NetCDF**. Network Common Data Form, es un conjunto de bibliotecas de software que ayudan a la creación, acceso e intercambio de datos científicos; destinados especialmente a la investigación atmosférica.

2.4.1. Dispositivos sensoriales

Todo vehículo autónomo dispone de una serie de sensores destinados a un fin los cuales se nombran a continuación y se muestran en la tabla 2.

SENSOR	FINALIDAD
Instrumentos de Navegación	Navegación
Sensores de Misión	Misión
Sensores Internos	Sistema Interno

Tabla 2. Sensores según su finalidad

Como se ve en la tabla 2, se distinguen tres grupos de sensores y actuadores en función de su finalidad, entrando en profundidad sobre ellos diremos:

- **Navegación.** Los sensores, se utilizan para determinar el posicionamiento.
- **Misión.** Empleados para cumplir las tareas, en ocasiones realizan fines de navegación.
- **Sistema Interno.** Empleados para detectar posibles problemas internos.

En la tabla 3 se definen los elementos físicos para sensores que por norma general incorporan los AUV.

SENSORES	Instrumentos de Navegación	GPS
		Brújula
		Giróscopo
		Profundímetro
	Sensores de Misión	Sonar
		Termómetro
		CTD
	Sensores Internos	IOPS
		Baterías
Termómetro interno		
Sensores de Estanqueidad		
	Profundímetro	

Tabla 3.Elementos físico empleados como sensores

Instrumentos de Navegación

- **GPS.** Global Position System, dispositivo que proporciona información sobre la posición global y la hora. Su utilidad es determinar la posición del vehículo para facilitar la navegación. Adicionalmente se puede corregir los

datos de posicionamiento del GPS con un *DGPS*, Defferencial GPS, al cual nos podremos conectar sobre TCP/IP o como servidores a través de Internet.

- **Brújula.** Dispositivo electrónico con inclinómetro. Empleada para determinar el rumbo y corregir las aceleraciones obtenidas con el giróscopo. Normalmente la brújula dispone de magnetómetro y termómetro interno.
- **Giróscopo.** También denominado *IMU*, Inertial Movement Unit, normalmente vertical y con 2 DOF (pan/guiñada y roll/balanceo), permite determinar las aceleraciones angulares. Usado para controlar la orientación del vehículo en los 3 ejes de revolución del espacio.
- **Profundímetro.** Dispositivo que determina la profundidad a partir de la presión de la columna de agua que hay sobre el vehículo, proporcionando la componente z, altitud.
- **Sonar.** Se utilizará para la detección de obstáculos, permitiendo corregir el waypoint a alcanzar o para implementar un mapa del entorno donde está el AUV en función de su barrido vertical u horizontal.

Sensores de Misión

- **Termómetro.** Empleado para medir la temperatura del entorno.
- **CTD.** Conductivity, Temperature, Depth, dispositivo empleado para obtener muestras de salinidad-conductividad, temperatura y profundidad.
- **IOPS.** Inherent Optical Properties Sensor, elemento utilizado para medir las propiedades inherentes ópticas del entorno, en misiones de contaminación o biología submarina.

Sensores Internos

- **Baterías.** Determinar el consumo de los elementos instalados en el vehículo y en función de ello dotarlas para la cantidad de amperios-hora que necesitamos. Además se dispondrá como mínimo de dos pack de baterías uno para la parte de potencia (propulsión) y otro para la electrónica.
- **Termómetro.** Empleado para medir la temperatura interior del AUV, ya sea de la propia estructura o de algún elemento en concreto así evitar daños.

- **Sensor de estanqueidad.** Sensor empleado para detectar posibles vías de agua o humedades. En el caso de que ocurriese se correría un grave riesgo y por ello se debería abortar la misión y hacer que emerja el vehículo.
- **Profundímetro.** Colocado internamente se emplea para detectar la profundidad del AUV para no superar la presión máxima soportable por la estructura.

2.4.2. Dispositivos de actuación

Al igual que ocurre con los sensores, se disponen de actuadores para determinadas finalidades como se observa de forma resumida en la tabla 4 y se explica a continuación:

ACTUADOR	FINALIDAD
Sistema de Impulsión	Navegación
Actuadores de Misión	Misión
Actuadores Internos	Sistema Interno

Tabla 4. Actuadores según su finalidad

- **Navegación.** Empleados para conseguir llegar al siguiente waypoint, punto de paso.
- **Misión.** Los actuadores para este fin no son muy empleados como norma general, son empleados de forma puntual y su control se realiza con el software de control de los mismos desacoplado del sistema del vehículo.
- **Sistema Interno.** Encargados de realizar tareas internas, como puede ser el sistema de evacuación de agua.

En la tabla 5 se muestra de forma resumida los elementos físicos empleados como actuadores, los cuales serán detallados seguidamente.

ACTUADORES	Propulsores Sistema de Impulsión Superficies de control
	Actuadores de Misión Dispositivos prensiles
	Actuadores Internos

Tabla 5. Elementos físicos empleados como actuadores

Sistema de Impulsión

- **Propulsores.** La tarjeta de control con sus motores permitirán la navegación del vehículo. El sistema de impulsión define el tipo de motores y su ubicación, determinando las entradas que éstos deben recibir.
- **Superficie de control.** Se definen aquí las aletas, alerones, timón de cola, etc, que proporcionan al AUV la posibilidad de navegar cambiando de rumbo u orientación.

Actuadores de Misión

- **Dispositivos prensiles.** Engloban todas aquellas herramientas que posibilitan recoger o interactuar con el medio para cumplir la misión, ejemplo de ello son brazos robóticos, pinzas, recipientes para recolección de muestras, etc.

Actuadores Internos

- De forma general no hay actuadores internos, pues se suele aplicar comportamientos para ello sin llegar a la necesidad de incluir actuadores.

2.4.3. Dispositivos de comunicación

En este apartado nos centramos en describir los elementos físicos destinados a las comunicaciones del AUV.

- **Ethernet.** Tarjeta de red Ethernet para comunicación en tierra.

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE

- **Módem Acústico.** Elemento importante para comunicaciones bajo el agua de forma fiable.
- **WiFi.** Tarjeta de red inalámbrica, dotar de este tipo de sistema es opcional ya que sólo es útil mientras el vehículo esta en superficie.
- **Radiofrecuencia.** Instalar emisor/receptor de RF dependerá de las necesidades de la misión porque sólo tendremos comunicación mientras el vehículo no se sumerja.
- **Vía Satélite.** Al igual que ocurre con los dos tipos de comunicaciones anteriores dependerá de las condiciones y necesidades donde se realice la misión, dado que sólo funcionará cuando el AUV este emergido.

2.5. Baterías

Descrito los componentes que por norma general disponen los vehículos autónomos no tripulados, debemos dotar a nuestro AUV de autonomía. Para ello, una vez elegido los componentes del vehículo a diseñar descritos en el apartado 2.4.4, pretendemos a grandes rasgos explicar qué es y cómo están constituidas las baterías, hacer una clasificación de las mismas, definir y explicar los procesos que disponen y presentar sus parámetros característicos.

Partiendo de los informes presentados por los equipos participantes previamente en SAUC-e y en competiciones similares, se detecto que todos ellos optaron por baterías LiPo, Litio-Potasio; por ello, en el Capítulo 3_Baterías Secundarias, nos centraremos en ellas para así saber todas sus características, para posteriormente implementar el diseño y fabricación del BMS, objetivo prioritario de este proyecto. Indicar que las baterías que llevará nuestro AUV son tipo LiFePo⁴.

2.5.1. Conceptos básicos

Una batería [32] -[34] es un dispositivo que convierte energía química contenida en materiales activos en energía eléctrica por medio de una reacción electroquímica de oxidación-reducción, denominada *redox*. En este proceso uno de los componentes se oxida, pierde electrones, y el otro se reduce, gana electrones; en este proceso no se consumen ni se pierden electrones, sino que cambian su estado y que a su vez pueden retornar a su estado original en circunstancias adecuadas.

Tras esto, una batería es un dispositivo que contiene *celdas electroquímicas* que pueden convertir la energía química almacenada en electricidad. En función del conexionado entre celdas, tendremos baterías de altas corrientes si se conectan en paralelo, parte superior figura 10, o altos voltajes conectadas en serie, parte inferior figura 10. Indicar que en la figura se asume que cada celda produce 1.5 voltios, de ahí que conectadas en paralelo se tenga 1,5 V y un ampareje de 4 veces el de una celda, mientras que en serie

se tiene tensión de una celda y un voltaje correspondiente a la suma de cuatro celdas, es decir, 6 V.

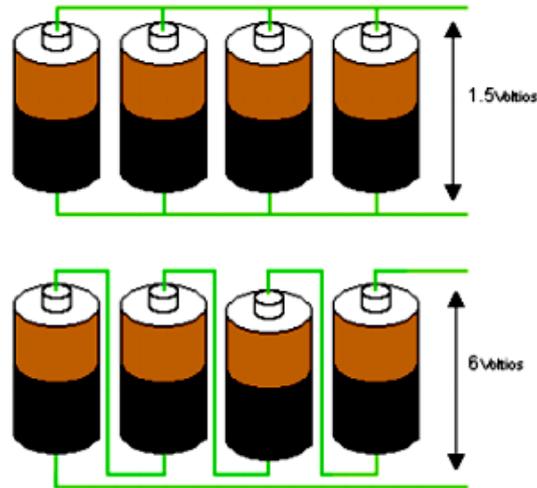


Figura 10. Conexión de baterías

Una celda está constituida por tres partes principalmente:

1. **Ánodo**, es el electrodo de oxidación o electrodo negativo.
2. **Cátodo**, es el electrodo de reducción o electrodo positivo.
3. **Electrolito**, medio para la transferencia de carga.

Las combinaciones de ánodo y cátodo más ventajosas son aquellas que ofrecen mayor ligereza, alto voltaje y capacidad. Estas combinaciones no son posibles de realizar a nivel práctico, debido a la reactividad, polarización, dificultad en la manipulación de los componentes de la celda, alto coste, etc. A continuación se describe la selección del ánodo, cátodo y electrolitos para un sistema práctico:

- **Ánodo.** Este debe tener eficiencia como agente oxidante, buena conductividad, estabilidad, alta salida culómbica Ah/g, bajo coste y fácil de fabricar. Los materiales más empleados como ánodo son zinc, litio, carbonos litios.
- **Cátodo.** Debe tener alta eficiencia como reductor, estable con el electrolito y poseer una tensión de trabajo conveniente. El material más común empleado son los óxidos metálicos, pero también se utilizan halógenos, oxihaluros y sulfuros en baterías con características especiales.
- **Electrolito.** Se emplea elementos con buena conductividad iónica pero no pueden ser electrónicamente conductivos, pues ocasionarían corto circuitos internos; tienen que presentar no reactividad con los materiales de los

electrodos, seguros para la movilidad y de bajo coste. Los electrolíticos más frecuentes son soluciones acuosas pero también las hay no acuosas, (empleadas en el caso de ánodos de litio por ejemplo).

En cuanto a la fabricación de las celdas, éstas tienen diferentes formas y configuraciones: *cilíndricas, botón, planas*, etc, incluso pueden disponer de ventilación u otros medios para el escape de los gases acumulados. En ellas, los electrodos de ánodo y cátodo se encuentran eléctricamente aislados en la celda para prevenir corto circuitos, aunque están envueltos por el electrolito. Esto implica la utilización de un material separador entre electrodos y como norma general el electrolito es inmovilizado por un diseño antivertido.

2.5.2. Clasificación de las celdas y baterías

Existen diversas clasificaciones de las baterías o celdas, pero en este proyecto nos centraremos en la clasificación de las celdas según sean *primarias, secundarias, reserva* o de *combustible* [32]-[35].

Celdas Primarias

Son baterías cuya carga no es recargable cuando se agota, excepto reponiendo las sustancias químicas que la componen, es decir, cuando su carga se consume no pueden reutilizarse debido a que las reacciones químicas que han provocado la corriente son irreversibles. Aquellas en las cuales el electrolito se encuentra contenido por un absorbente o material separador, no hay electrolito líquido, se denominan *celdas secas* [36].

Este tipo de baterías se caracterizan principalmente por ser económicas y estables; empleándose por ello como fuente de energía en dispositivos portátil como cámaras digitales, juguetes y otras numeras aplicaciones.

Celdas Secundarias

Son aquellas celdas que son susceptibles de reactivarse, sometiéndola al paso más o menos prolongado de una corriente eléctrica, en sentido inverso a aquél que la corriente de la celda fluye normalmente. Su coste inicial es mayor pero a la larga al poder reutilizarse

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE

compensa. Las aplicaciones de este tipo de baterías se clasifican en dos categorías principalmente:

- I. Aplicaciones en las cuales son usadas como dispositivos de almacenamiento de energía, generalmente se encuentran conectadas y cargadas mediante una fuente primaria de energía y entregada esta para carga o demanda. Usados en S.A.I. y BESS's principalmente.
- II. Aplicaciones en las cuales son usadas esencialmente como batería primaria, pero que serán recargadas. Empleadas en dispositivos portátiles de consumo como teléfonos móviles, ordenadores portátiles o en EV's o PHEV's.

En relación a su capacidad para ser descargadas, estas baterías se caracterizan por una alta densidad de potencia, alta tasa de descarga, curvas planas de descarga y buen funcionamiento a baja temperatura.

Existe un tipo especial de celdas secundarias, denominadas *baterías recargables mecánicamente*, caracterizadas por recargarse reemplazando el electrodo agotado, normalmente el ánodo; ejemplo de ello son las baterías metal-aire [37].

Baterías de Reserva

Baterías caracterizadas porque uno de sus tres componentes principales es separado del resto antes de la activación. El proceso de deterioro químico es eliminado y la batería es capaz de un almacenamiento a largo plazo. Se suele aislar el electrolito, pero en las baterías térmicas, se funde el electrolito sólido cuando la celda se calienta convirtiéndose en conductor.

Son diseñadas para necesidades de largo almacenaje en el tiempo y soportar condiciones medioambientales extremas, además de proporcionar una gran potencia en un corto periodo de tiempo; usadas en misiles y torpedos.

Celdas de Combustible

Son celdas galvánicas electroquímicas que convierten la energía química en energía eléctrica y no están sujetas a las limitaciones del ciclo de Carnot para las máquinas de calor. Las celdas de combustible producen electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno en contraposición a la capacidad limitada de almacenamiento de energía que posee una batería. Además, los electrodos en una batería reaccionan y cambian

según cómo esté de cargada o descargada; en cambio, en una celda de combustible los electrodos son catalíticos¹⁰ y relativamente estables.

Los materiales empleados normalmente son hidrógeno como ánodo y oxígeno como cátodo, aunque actualmente están apareciendo otras combinaciones. La aplicación más conocida de esta celda de combustible son como fuente de energía en vehículos espaciales y para ciertos usos militares.

2.5.3. Operación de una celda

Las operaciones de una celda son la *descarga* y la *carga*, procesos que se pueden observar en la figura 11.

Descarga. En este proceso la corriente fluye a través de la batería, produciéndose una reacción de oxidación en el ánodo y una reducción en el electrodo positivo. La reacción oxidante desprende electrones al circuito externo y el proceso de reducción se encarga de atraerlos, donde el electrolito juega el papel de medio de transferencia de iones.

Carga. En una celda recargable, durante este proceso, la corriente fluye de forma invertida y el electrodo positivo pasa a ser de oxidación y el negativo de reducción, es decir, el electrodo positivo es el ánodo y el negativo el cátodo, justo al contrario que por definición.

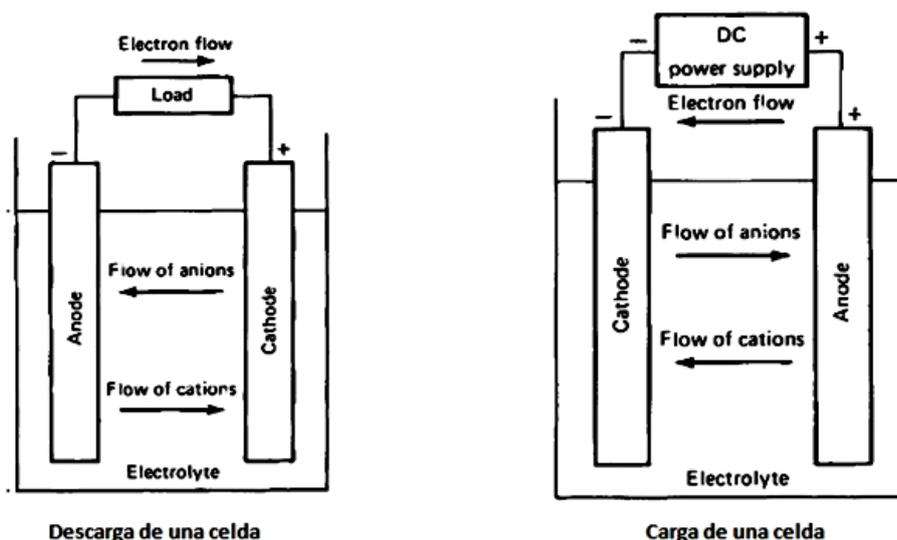


Figura 11. Procesos de una celda

¹⁰ **Catálisis.** Transformación química motivada por sustancias que no se alteran en el curso de la reacción. El elemento activante es el catalizador y el que desactiva la catálisis se denomina inhibidor.

2.5.4. Parámetros teóricos

El voltaje teórico y capacidad de una celda, se encuentran en función de los materiales de ánodo y cátodo.

Cuando una reacción ocurre, hay una disminución en la energía libre del sistema, denominado *liberación de energía*, que es expresada como:

$$\Delta G^0 = -nFE^0 \quad (2.1)$$

F = constante de Faraday ($\approx 96,5$ C o 26,8 Ah)

n = número de electrones involucrados en la reacción estequiometría.

E⁰ = potencial estándar, V.

El **voltaje teórico** o **potencia estándar** de una celda es determinado por el material activo contenido en la celda. Puede ser calculado desde datos, de la liberación de energía producida u obtenida experimentalmente.

La **capacidad teórica**, *Culombica*, de una celda es determinada por la cantidad de material activo de dicha celda. Esto se expresa como la cantidad total de energía eléctrica, involucrada en la reacción electroquímica y es definida en términos de culombios o amperios/hora. La capacidad amperio/hora de una batería está directamente asociada con la cantidad de energía eléctrica obtenida de los materiales activos. Teóricamente, un gramo de peso de material entregará 96,487 C o 26,8 Ah.

La capacidad de una celda, puede ser considerada en base a la energía, *energía teórica*. Este valor es el máximo que puede ser entregado por un sistema específico electroquímico:

$$Vatio/hora (Wh) = Voltaje(V) \times Amperio/hora (Ah) \quad (2.2)$$

2.5.5. Parámetros característicos

Será necesario conocer las diversas magnitudes fundamentales que caracterizan una celda, pues el correcto entendimiento de ellos, nos proporcionará saber el campo de aplicación de la batería. Las magnitudes más representativas son:

- **Capacidad, Q.** Indica la cantidad de electricidad que puede almacenar una celda, en términos técnicos, proporciona el número de electrones que

circulan por el circuito externo. La capacidad se expresa tanto en culombios como en amperios/hora. Para obtenerlo está la siguiente expresión:

$$Q = nzF \quad (2.3)$$

n = número de electrones transferidos por cada mol

z = número de moles de la especie activa que participa en la reacción

F = constante de Faraday (96.487 C/mol o 26.800 mAh/mol)

- **Estado de carga, SOC.** Describe la cantidad residual de carga que puede restituir la batería en relación a la cantidad nominal que puede almacenar. El SOC se expresa en porcentaje y es del 100% cuando la batería está cargada al máximo.

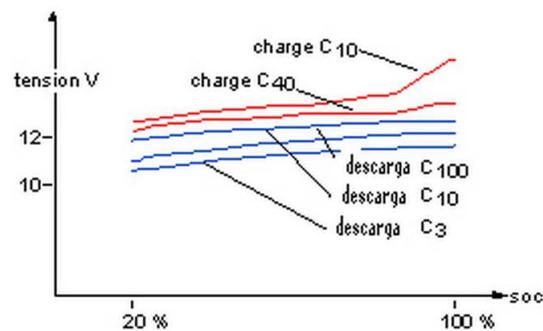


Figura 12. Ejemplo de gráfica SOC

- **Profundidad de descarga, DOD.** Relación entre la capacidad en Ah entregada por una batería durante su descarga y la capacidad nominal de la misma. El DOD se expresa en porcentajes y es el contrario al SOC.
- **Máxima corriente de descarga continua.** Máxima corriente que la batería puede descargar de forma continuada. Este límite lo proporciona el fabricante para evitar la posible reducción de la capacidad de la celda.
- **Máxima corriente en intervalos.** Corriente máxima a la que la batería puede ser descargada en intervalos de tiempo, ≈ 10 ms, límite que viene estipulado por el fabricante. Su valor suele ser superior al parámetro anterior.
- **Vida media.** Representa el número de ciclos carga/descarga a los que puede ser sometida la celda antes de que la capacidad, energía u otros parámetros decaigan significativamente. Es un parámetro que se determina experimentalmente.

2.5.6. Estandarización

La estandarización de las baterías empezó en 1912, cuando la Sociedad Americana Electroquímica recomendó métodos de estandarización y testeo de las celdas primarias. Esto llevó a la primera publicación nacional en 1919, emitido como un apéndice a la circular de Oficina Nacional de Estándares, National Bureau Standar. Así mismo, evolucionó al Instituto Nacional Americano de Estándares, ANSI. Desde entonces, otras sociedades profesionales, han desarrollado los estándares relativos a las baterías.

En esta documentación se especifican datos estándares y condiciones para las baterías como son valores, tamaños, voltajes y terminales. Debido a que utilizaremos baterías recargables, centraremos la estandarización en ellas.

El comienzo de las baterías recargables fue principalmente con baterías grandes, baterías de plomo-ácido para fabricantes de automoción; de ahí que los estándares fueron desarrollados por la Sociedad para Ingeniería de Automóvil, SEA, el consejo Internacional de Baterías, BCI, y la Asociación de Baterías de Almacenamiento de Japón. Más recientemente, las baterías recargables han sido desarrolladas para aplicaciones portátiles, con reducido tamaño y similares a las baterías primarias.

Entre los muchos estándares que podemos encontrar destacamos el correspondiente a los terminales, figura 13; a la capacidad de las baterías bajo una serie de parámetros como son temperatura, velocidad de descarga, ciclos de trabajo, etc, ejemplo de ello la figura 14; formato de etiquetado que debe llevar la batería, figura 15, se pueden ver los estándares de batería ANSI y las referencias cruzadas para las publicaciones internacionales estándar para baterías en la figura 16; y finalizamos con los estándares de seguridad en cuanto a manipulación y transporte de baterías, figura 17 y 18 respectivamente.

Cap and base	Terminals that have the cylindrical side of the battery insulated from the terminal ends
Cap and case	Terminals in which the cylindrical side forms part of the positive end terminal
Screw types	Terminals that have a threaded rod and accept either an insulated or a metal nut
Flat contacts	Flat metal surfaces used for electrical contact
Springs	Terminals that are flat metal strips or spirally wound wire
Plug-in sockets	Terminals consisting of a stud (nonresilient) and a socket (resilient)
Wire	Single or multistranded wire leads
Spring clips	Metal clips that will accept a wire lead
Tabs	Metal flat tabs attached to battery terminals

Figura 13. Normativa sobre terminales

Application	Load, Ω	Daily period	End point	Minimum average duration [†]		
Portable lighting (1)	2.2	*	0.9	320 min	100 min	810 min
Tape recorders	3.9	1 h	0.9	11 h	4 h	11 h
Radios	10	4 h	0.9	32 h	18 h	81 h
Toys	2.2	1 h	0.8	5 h	2 h	15 h
Portable lighting (2)	1.5	**	0.9	135 min	32 min	450 min

*4 min beginning at hourly intervals for 8 h/day; **4 min/15 min, 8 h/day.
[†]For LR20: portable stereo test.

Figura 14. Ejemplo de test normalizado de capacidad de batería

Marking information	Primary batteries	Primary small batteries	Rechargeable round batteries
Nomenclature	×	×	×
Date of manufacture or code	×	×	×
Polarity	×	×	×
Nominal voltage	×	×	×
Name of manufacturer/supplier	×	×	×
Charge rate/time			×
Rated capacity			×

×—on battery.
 ××—on battery or package.

Figura 15. Estándar sobre etiquetado de batería

ANSI	IEC
1.2H1	HR03
1.2H2	HR6
1.2H3	HR14
1.2H4	HR20

Figura 16. Referencias cruzadas ANSI/IEC

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE

Publication	Title
American Standards Institute	
ANSI C18.1M, Part 2	American National Standard for Portable Primary Cells and Batteries with Aqueous Electrolyte—Safety Standard
ANSI C18.2M, Part 2	American National Standard for Portable Rechargeable Cells and Batteries—Safety Standard
ANSI C18.3M, Part 2	American National Standard for Portable Lithium Primary Cells and Batteries—Safety Standard
International Electrotechnical Commission	
IEC 60086-4	Primary Batteries—Part 4: Safety for Lithium Batteries
IEC 60086-5	Primary Batteries—Part 5: Safety of Batteries with Aqueous Electrolyte
IEC 62281	Safety of Primary and Secondary Lithium Batteries During Transport
IEC 62133	Safety for Portable Sealed Alkaline Secondary Cells and Batteries
Underwriters Laboratories	
UL1642	Standard for Lithium Batteries
UL2054	Standard for Household and Commercial Batteries

Figura 17. Correcta manipulación de baterías

Organization	Title
Department of Transportation (DOT)	Code of Federal Regulations—Title 49 Transportation
Federal Aviation Administration (FAA)	TSO C042, Lithium Batteries (referencing RTCA Document DO-227 “Minimum Operational Performance Standards for Lithium Batteries”)
International Air Transport Association (IATA)	Dangerous Goods Regulations
International Civil Aviation Association (ICAO)	Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods
United Nations (UN)	Recommendations on the Transportation of Dangerous Goods Manual of Tests and Criteria

Figura 18. Normativa sobre transporte de baterías

2.6. Baterías Secundarias

Las baterías secundarias [34]-[36] se llevan empleando desde hace más de 100 años. En 1859, Plante desarrollo las baterías de Plomo-Ácido, posteriormente Edison en 1908 desarrolla las baterías alcalinas de Níquel-Cadmio. Un año después debido al desarrollo de la industria pesada, aparece la batería de Níquel-Cadmio de bolsillo. El desarrollo de esta tipología de batería abrieron el mercado para utilizarse en los motores de arranque de los motores de aviones y aplicaciones de comunicaciones en la década de 1950 para seguir avanzando hacia aplicaciones portátiles con baterías de iones de litio que nos proporcionan densidades de energía específica elevadas entre otros muchos aspectos. En la tabla 6, definimos las principales características y aplicaciones de este tipo de baterías.

Las aplicaciones de las baterías secundarias se dividen en dos categorías principales: a) utilización de dicha batería como batería primaria pero que se recarga tras utilizarla, b) empleadas como dispositivos de almacenamiento de energía, cargándose con una fuente primaria de energía y suministrando su energía a la carga cuando hay demanda.

El desarrollo de este tipo de baterías se debe a su capacidad para recargarse, elevada densidad de potencia, elevado régimen de descarga, curva de descarga plana y buen funcionamiento a bajas temperaturas. Indicar que inicialmente presentaban la desventaja de que su densidad de energía era menor que las de las baterías primarias. Pero gracias a la tipología de litio esto ya no es un inconveniente, de ahí que esta tipología y sus combinaciones en función del material del cátodo sean las que ocupen nuestro estudio, para llegar finalmente a la decisión de emplear la tipología LiFePo_4 y desarrollar nuestro BMS para ellas.

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE

SYSTEM	CHARACTERISTIC	APPLICATIONS	
<i>Lead-acid:</i>	Automotive	Popular, low-cost secondary battery, low specific-energy, high-rate, and low-temperature performance; maintenance-free designs	Automotive SLI, golf carts, lawn mowers, tractor, aircraft, marine, micro-hybrid vehicle
	Traction (motive power)	Designed for deep 6-9 h discharge, cycling service	Industrial trucks, materials handling, electric and hybrid electric vehicles, special types for submarine power
	Stationary	Designed for standby float service, long life, VRLA designs	Emergency power, utilities, telephone, UPS, load leveling, energy storage, emergency lighting
	Portable	Sealed, maintenance-free, low cost, good float capability, moderate cycle life	Portable tools, small appliances and devices, portable electronic equipment
<i>Nickel-cadmium:</i>	Industrial and FNC	Good high-rate, low-temperature capability, flat voltage, excellent cycle life	Aircraft batteries, industrial and emergency power applications, communication equipment
	Portable	Sealed, maintenance-free, good high-rate, low-temperature performance, good cycle life	Consumer electronics, portable tools, pagers, appliances photographic equipment, standby power, memory backup
<i>Nickel-metal hybride</i>		Sealed, maintenance-free, higher capacity than nickel-cadmium batteries, high energy density and power	Consumer electronics and other portable applications, hybrid electric vehicle
<i>Nickel-iron</i>		Durable, rugged construction, long life, low-specific energy	Materials handling, stationary applications, railroad cars
<i>Nickel-zinc</i>		High specific energy, very good high-rate capability, low cycle life, high cost	Bicycles, scooters, consumer electronics such as power tools
<i>Silver-zinc</i>		High specific energy, very good high-rate capability, low cycle life, high	Training targets, drones, submarines, other military equipment, launch vehicles and space power
<i>Silver-cadmium</i>		High specific energy, good charge retention, moderate cycle life, high cost	Portable equipment requiring a lightweight, high-capacity battery, space satellities
<i>Nickel-hydrogen</i>		Long cycl life under shallow discharge, long life	Primarily for aerospace applications such as LEO and GEO satellites
<i>Ambient-temperature rechargeable "primary" types (Zn/MnO₂)</i>		Low cost, good capacity retention, sealed and maintenance-free, limited cycle life and rate capability	Cylindrical cell applications, rechargeable replacement for zinc-carbon and alkaline primary batteries, consumer electronics (ambient-temperature systems)
<i>Lithium-ion</i>		High specific energy and energy density, long cycle life, high-power capability	Portable and consumer electronics, HEVs, PHEVs), space applications, electrical energy storage

Tabla 6. Características y aplicaciones de las baterías secundarias

Podríamos hacer esto muy extenso y describir todas las baterías secundarias explicando desde sus características generales hasta las curvas de carga/descarga, pero debido a que deseamos crear un BMS para la gestión de las baterías de un AUV, hemos descrito en apartados anteriores que la tipología empleada es de iones de litio, por este motivo nos centraremos específicamente en ellas.

2.6.1. Características generales baterías de Ion-Litio

Las baterías de Ion-Litio, Li-ion, emplean compuestos de litio en los electrodos positivo y negativo. En el ciclo de carga o descarga, los iones de litio se insertan o se extraen desde el espacio intersticial entre las capas atómicas de los materiales activos. Además, es necesario que uno de los materiales activos de electrodo contenga litio en su composición inicial.

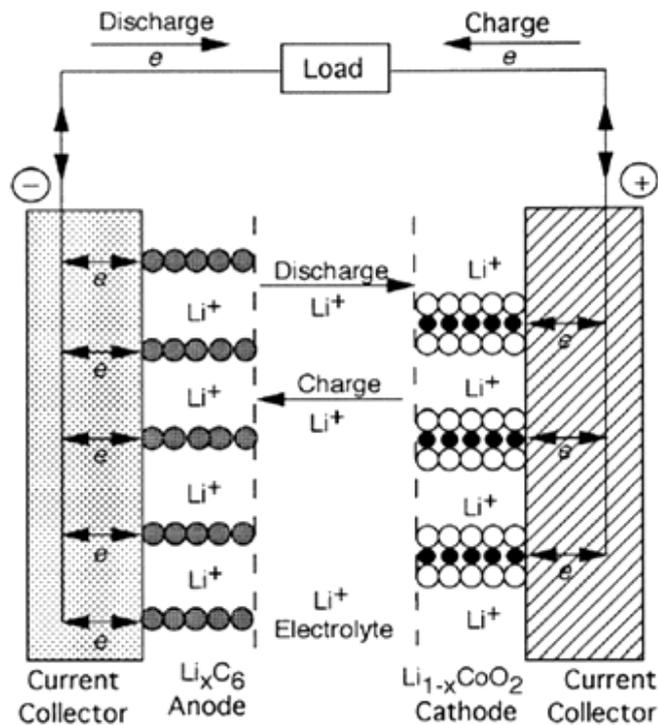


Figura 19. Proceso electroquímico en una celda de Ion-Litio

El material del electrodo positivo es típicamente un óxido de metal con una estructura en capas empleándose típicamente óxido de cobalto y litio, LiCoO_2 , también se emplean estructuras tipo túnel como óxido de manganeso y litio, LiMn_2O_4 , con corriente de

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE

aluminio de colector. Respecto al material del electrodo negativo suele emplearse grafito de carbón, material en capas, con corriente de cobre de colector.

Las primeras baterías comerciales de estas características, las lanzó al mercado la empresa Sony en 1991 y eran de óxido de cobalto y litio, LCO. Esta clase proporciona un buen rendimiento eléctrico, facilidad de construcción, buenas propiedades de seguridad e insensibilidad a las variaciones de temperatura. Las baterías secundarias de litio han seguido evolucionando y se han desarrollado con electrodos positivos de otros materiales como LiFePO_4 (LFP), LiMn_2O_4 que ofrecen mayores ventajas de capacidad, estabilidad, vida útil y empleo en dispositivos.

Como toda batería, ésta presenta desventajas y ventajas que las hace útiles para determinadas aplicaciones y no tanto para otras, las cuales se describen en la tabla 7.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Ciclo de vida elevado Larga vida útil Celdas compactas y ligeras con recubrimiento de plástico aluminizado y sin necesidad de mantenimiento Amplio rango operacional de temperatura Alta capacidad de carga rápida Efecto de autodescarga baja Sin efecto memoria Alta capacidad de potencia de descarga Alta capacidad culómbica y energía específica Amplia flexibilidad de materiales de diseño No contaminantes	Costes iniciales moderados Degradación a altas temperaturas Necesidad de un circuito de protección Pérdida de capacidad y potencia tras una sobrecarga o sobredescarga Posible escapes de material si se aplasta la celda Peligrosidad en el caso de cargarse a temperaturas bajas

Tabla 7. Ventajas/Desventajas de las baterías Li-Ion

Empezando por las desventajas diremos que estas baterías se degradan cuando se descargan por debajo de 2 V, a diferencia de la mayoría de las celdas químicas acuosas. Por lo tanto, deben disponer de circuitos de protección para desconectarlas antes de llegar a estos niveles de tensión. Otro inconveniente es que pueden perder capacidad de energía a temperaturas superiores a los 65 °C, aunque a un ritmo más bajo que la mayoría de NiCd o NiMH, y puede llegar a ser peligrosas si se las carga rápidamente a temperaturas por debajo de los 0 °C.

Respecto a las ventajas indicar que ofrecen una tasa de autodescarga baja (entre el 2% y el 8 % por mes), gran cantidad de ciclos de vida (> 1000 ciclos), y un amplio rango

de temperatura de operación (para la carga de 0 a 45 °C y para la descarga a -40 65 °C), lo que permite su uso en una amplia variedad de aplicaciones. Respecto a la alta energía específica, nos permiten disponer de hasta 240 Wh/Kg y de una densidad de energía hasta 640 Wh/L. Actualmente se disponen de celdas individuales que funcionan entre los 2,5 V y los 4,3 V, cosa que es aproximadamente tres veces la de las células de NiCd o NiMH. La combinación de estas cualidades dentro de un costo efectivo, paquete hermético ha permitido diversa aplicación de la tecnología.

2.6.2. Estructura de las baterías de Ion-Litio

Existen varias estructuras de celdas de Li-Ion tipo cilíndricas, prisma o petaca. Su construcción es muy similares por ello sólo nos centraremos en describir las tipo cilíndricas, la cual se muestra en la figura 20.

El electrodo positivo consiste en una lámina de aluminio recubierta con material activo, mientras que el electrodo negativo suele ser una lámina de cobre revestida con material activo típicamente grafito, ambos electrodos están separados de un polímero poroso. En los extremos de las células disponen de cabezales para poder realizar el conexionado entre los electrodos internos y el exterior de forma rápida y fácil. Actualmente incorporan uno o más dispositivos de desconexión que se activan por la temperatura o la presión, ventana de seguridad y PTC. En función del grosor del revestimiento del ánodo y cátodo este proporcionará unas capacidades mayores o menores.

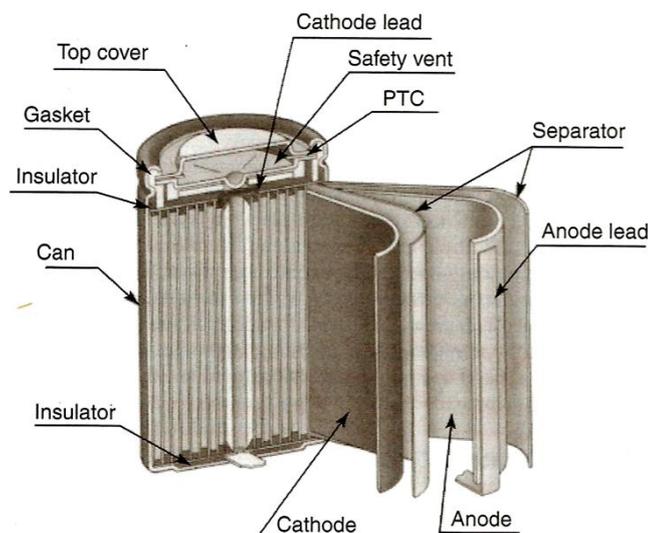


Figura 20. Corte transversal de una celda Li-Ion cilíndrica

A continuación en la tabla 8, se describen los principales valores de características de las baterías secundarias de ion-litio.

CHARACTERISTIC	PERFORMANCE RANGE
Operational cell voltaje	4,2 to 2,5 V
Specific energy	100 to 158 Wh/Kg
Energy density	245 to 430 Wh/L
Continuous rate capability	Typically: 1 C High rate: 5C
Pulse rate capability	Up to 25C
Cycle life at 100% DOD	Typically 3.000
Cycle life at 20 to 40 % DOD	Over 20.000
Calendar life	Over 5 years
Self discharge rate	2 to 10% month
Operable temperature range	-40°C to 65°C
Memory effect	None
Power density	2.000 to 3.000 W/L
Specific power	700 to 1.300 W/Kg

Tabla 8. Características típicas de las baterías secundarias Li-Ion

2.6.3. Tipologías baterías Li-Ion

LiCoO2

El potencial de la cobaltita de litio como material catódico fue demostrado en 1980 por Mizushima Goodenough. La estructura del LCO se describe como láminas de octaedros entre las cuales se sitúa el Li⁺. En esta estructura abierta, los iones de litio pueden moverse con libertad y ser fácilmente extraídos/insertados según la reacción:



La cobaltita de litio tiene una capacidad de 274 Ah/Kg y su potencia varía sensiblemente durante los procesos de carga/descarga siendo su valor ≈3,9 V. Realmente tras muchos estudios la capacidad nominal se estable 137 Ah/Kg debido a restricción que hay que poner en los procesos de extracción/inserción de Li⁺ en el LiCoO. Un factor importante en este tipo de estructuras de baterías para su desarrollo, investigación y comercialización ha sido por un lado la seguridad, para ello se ha incrementado el tamaño

de partículas de materiales de electrodo; y por otro el calentamiento descontrolado, *thermal runaway*, que experimentan estas baterías.

Las limitaciones más importantes que presentan las baterías LCO son que el cobalto es un material poco abundante en la corteza terrestre por lo que su precio es elevado, y que proporcionan una capacidad de descarga muy baja.

En la figura 21, se muestra el proceso de carga de este tipo de baterías usando un cargador de corriente constante y tensión constante, CCCV. El estudio se realizó sobre una batería con un rango de 0,120 Ah sometida a 1,3C, 1C y 0,7C; se observa una primera etapa donde se carga constantemente hasta alcanzar los 4,2 V y a partir de ese instante la corriente se redujo, hasta llegar a un 10% de la inicial, momento en que se corta automáticamente.

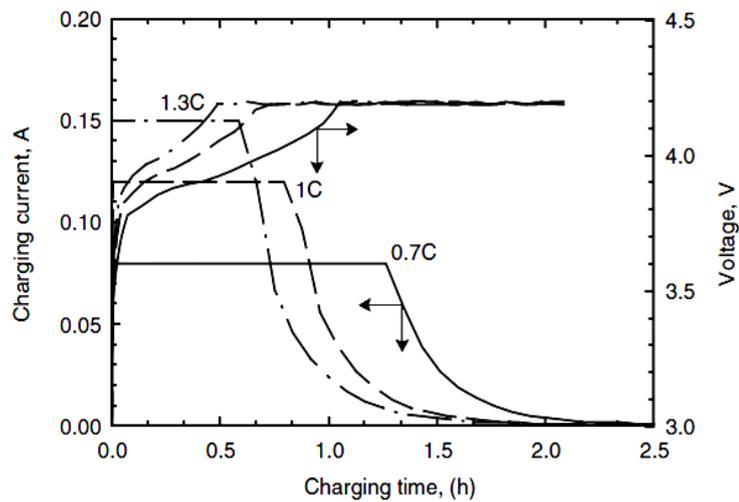


Figura 21. Proceso de carga batería LCO de 0,120Ah bajo 1,3C, 1C y 0,7C

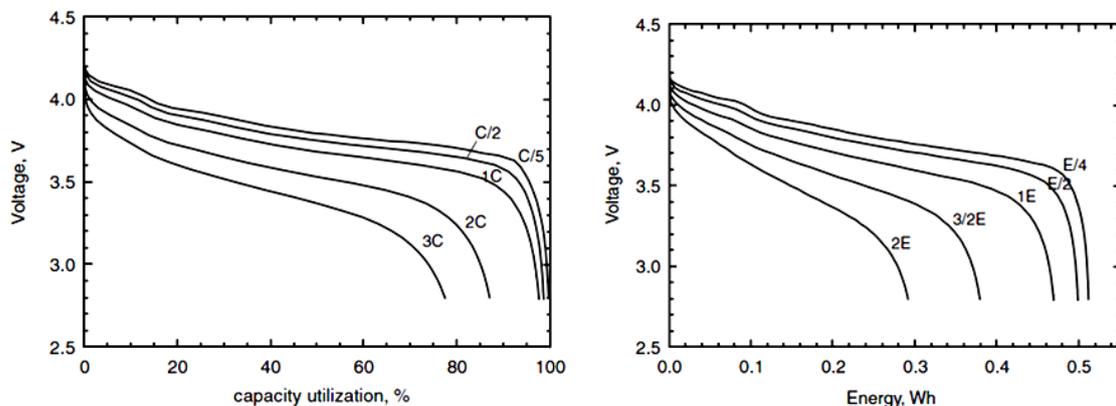


Figura 22. Proceso de descarga batería LCO

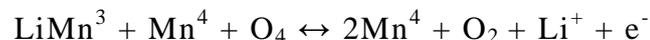
CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE

Si nos fijamos en el proceso de descarga de baterías LCO, figura 22, veremos en la parte izquierda la descarga porcentual en tasas que van de los 3C a los 0,2C. Observando que la batería presenta una capacidad del 95% a 1C, 87% a 2C y 77% a 3C, mientras que a menor solicitud proporciona una tensión media de 3,8 V frente los 3,45 V a 3C. En la misma figura, parte derecha, se muestran las curvas de descarga referidas a potencia, donde se observa que a solicitud de E bajos suministra mayor potencia a la vez, efecto similar ocurre con la tensión media en la que podemos operar, 3,5V a 2 E mientras que a 0,5E tenemos 3,75 V.

LiMn₂O₄

Thackeray, Goodenough y col., demostraron en 1984 que era posible extraer iones de litio de la espinela de LiMn₂O₄, LMO, en una celda electroquímica. Pero no sería hasta 1992, cuando por primera vez ensamblaron y caracterizaron una celda de Li-Ion formada por coque de petróleo como ánodo y LMO como material activo del cátodo.

La manganita de litio tiene una estructura cúbica tipo espinela, con canales en las tres direcciones del espacio en los que se sitúan los iones de litio, dando lugar a la siguiente reacción electroquímica que tiene lugar en el cátodo de LMO:



La capacidad teórica del LMO es de 148 Ah/Kg, aunque los valores nominales son de 120 Ah/Kg. Ésta proporciona mayor voltaje promedio 3,8 V, aunque su energía específica y densidad de energía son peores que las tipo LCO. Además, el manganeso se encuentra con mayor abundancia que el Co y es más benigno con el medio ambiente. El principal problema de esta clase es que a lo largo de su vida útil y del número de ciclos que vaya teniendo la batería, su capacidad va disminuyendo y llega a ser muy preocupante cuando se opera con baterías LMO a temperaturas próximas a los 50°C.

En la figura 23, se muestra la descarga de una batería de 3 Ah a 0.5C y luego como se cargó en un régimen CCCV. Respectivamente en la figura 24, se describe la descarga, observándose que proporciona el 98% de su capacidad a 0,5C y el 85% a 1C. A la vez que se observa un perfil de tensión plano, valor medio de 3,8 V, a velocidades bajas mientras que si son elevadas, 1C, la tensión media es de 3,6 V.

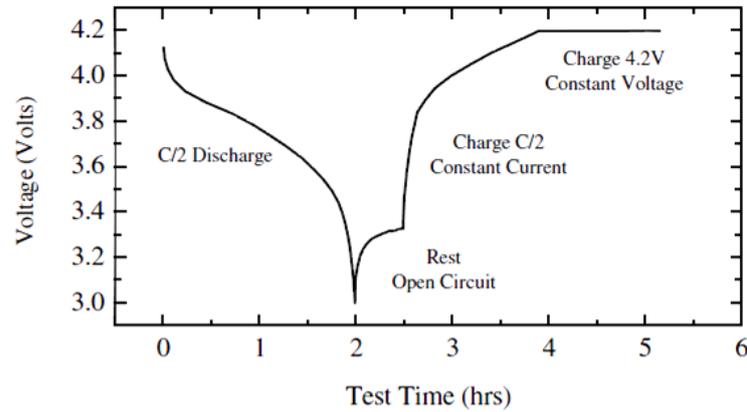


Figura 23. Proceso descarga y carga batería LMO 3Ah a 0.5C

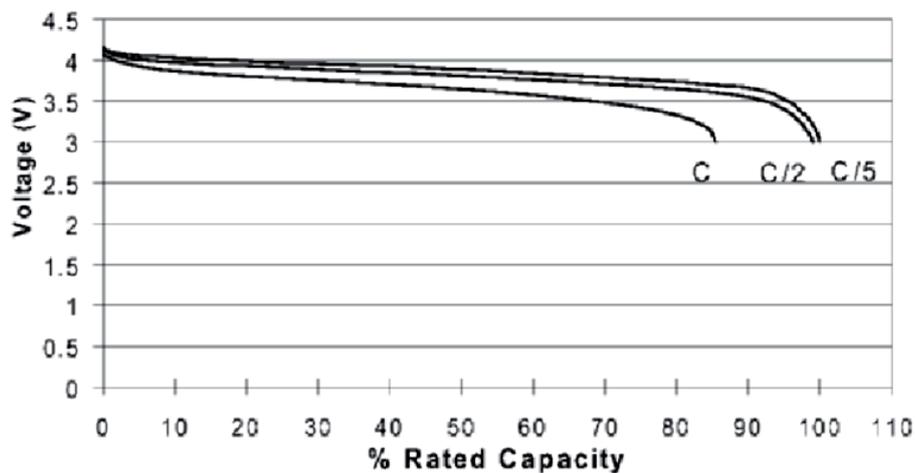
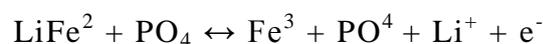


Figura 24. Proceso de descarga batería LMO

LiFePo⁴

En 1997, Padhi demostró la capacidad de insertar/desinsertar iones de Li⁺ en el material activo del electrodo de LiFePo⁴, LFP. Desde que se consiguió demostrar, despertó un gran interés este tipo de batería, debido a sus notables prestaciones y trabajar con hierro, elemento abundante en la corteza terrestre.

El LiFePo⁴ se describe como un empaquetamiento hexagonal compacto de aniones de O²⁻ en el cual el Li⁺ y el Fe²⁺ ocupan posiciones octaédricas y el P5 posiciones tetraédricas. Los iones son extraídos/insertados según la siguiente reacción electroquímica:



La capacidad teórica de la LFP es de 170 Ah/Kg y su potencial de trabajo de 3,4V. Comparadas con las anteriores presenta el menor valor de tensión, hecho que confiere a

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE

esta tipología una mayor seguridad y poder realizar mayor cantidad de ciclos de trabajos antes de comenzar a ver reducida la capacidad de la celda. En cuanto a la capacidad, disminuye bastante a altas intensidades de corriente.

La principal aplicación y por la cual están ganando tanto mercado las baterías LiFePo_4 es porque se emplean en vehículos eléctricos (como ejemplo más puntero el KERS), debido a que son las más convenientes para exigencias de altos rendimientos, respeto por el medio ambiente, mayor seguridad y bajo coste.

En la figura 25, se muestra las curvas de carga/descarga para 0,5C viendo como la tensión media de carga es de 3.15 V y en descarga es de 2.75. Por su parte en la figura 26 apreciamos que en el proceso de descarga de una celda LFP bajo un rango de petición de 1 A y 40 A la tensión media es de 0,7 V de ahí que la resistencia efectiva DC sea de 0.0017Ω ($0.7 \text{ V}/39 \text{ A}$). Por último, figura 27, presentamos la descarga a diferentes rangos de C observando que a mayor petición de esta la diferencia de amperaje es mínimo y los valores de tensión se mantienen en los rangos mínimos/máximo, indicando la validez de estas celdas para exigencias de altos rendimientos.

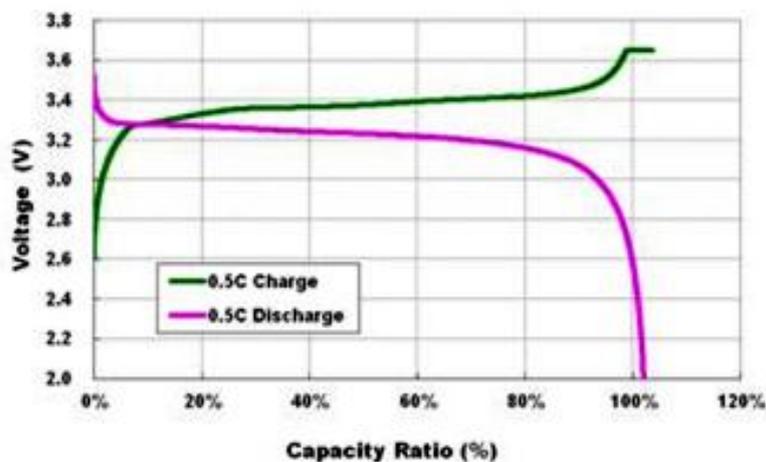


Figura 25. Procesos de carga/descarga batería LFP

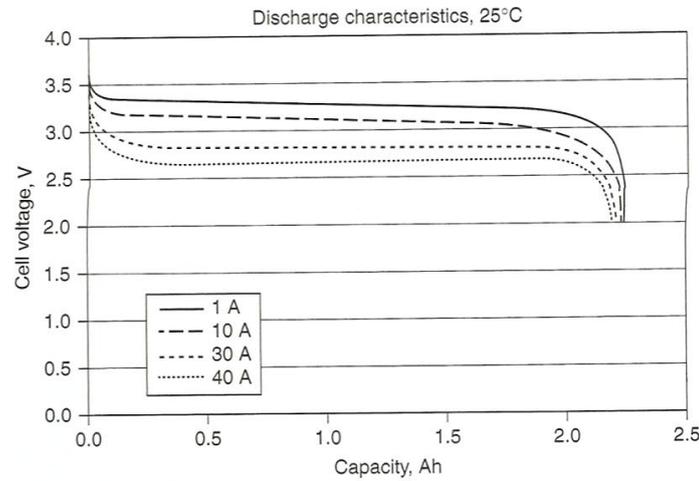


Figura 26. Proceso descarga batería LFP para diferentes A

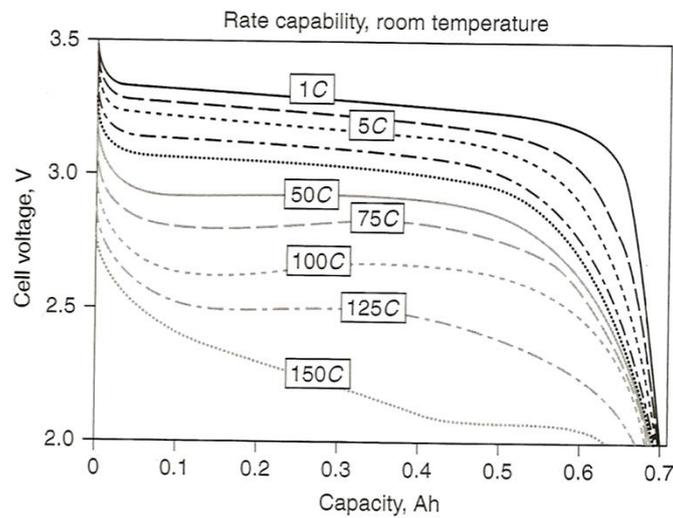


Figura 27. Proceso descarga batería LFP para diferentes C

LiPo

El diseño original de las baterías LiPo data de los años 70, cuando el profesor francés M. Armand propone utilizar un electrolito de polímero sólido líquido. Éstas no son más que una variación de las baterías de Li-Ion, cuyas características son muy similares, pero estas permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga superior, además de poseer un tamaño físico más reducido.

Cada celda tiene un voltaje nominal de 3,7 V, un voltaje mínimo y máximo de 3 V y 4,2 V respectivamente. Se debe tener mucho cuidado con no superar los valores de tensión máxima y mínimo, ya que la celda se dañará irreparablemente.

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE

La nomenclatura empleada para decir cómo está constituida una batería de celdas LiPo es $XSYP$, donde X se corresponde con el número de celdas en serie e Y con el número en paralelo de celdas. Ejemplo de esto sería 3S2P, batería con 2 baterías en paralelo donde cada una tiene 3 celdas.

La construcción de estas celdas es similar a las de Li-Ion con la diferencia principal de que el electrolito empleado es un polímero de litio. El electrolito de polímero reemplaza el separador poroso tradicional, que se empapa con electrolito tradicionalmente en las baterías de Li-Ion. Este electrolito es ensamblado en un recipiente plástico que no conduce la electricidad, pero que permite el intercambio de iones.

Las características de esta batería la aporta el grosor del polímero, alcanza el milímetro, hecho que permite crear baterías con el espesor de una tarjeta de crédito. El inconveniente de este polímero sólido es que no puede ofrecer grandes capacidades de descarga además de aumentar su temperatura hasta casi los 60 °C, siendo inviable para ciertas aplicaciones.

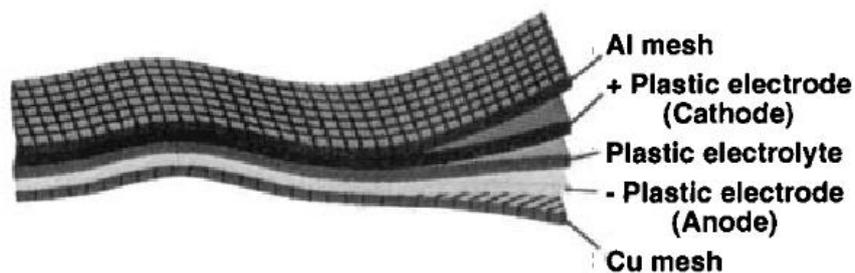


Figura 28. Estructura interna celda LiPo

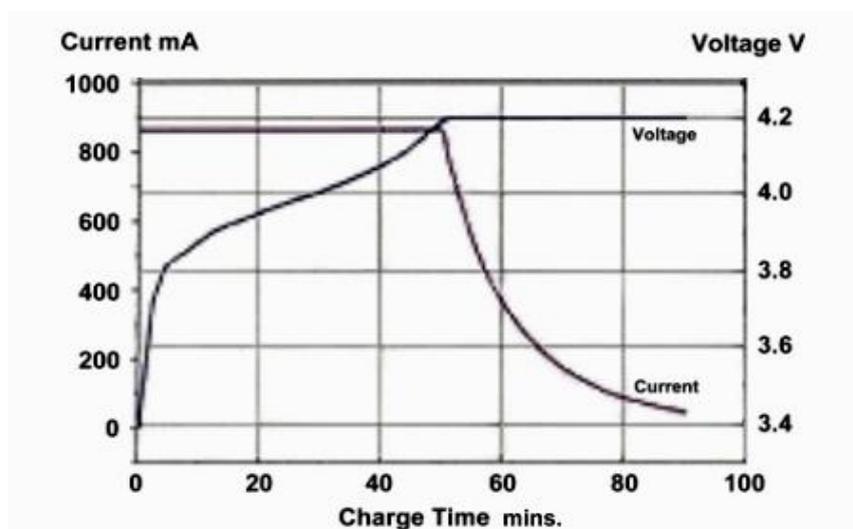


Figura 29. Proceso de carga batería LiPo

En la figura 29, representamos el proceso de carga típico de una batería LiPo de 850 mAh de capacidad durante el proceso de carga CC/CV a 4,2 V, 1C; como era de esperar se ve la primera fase de carga rápida 80% y posteriormente la fase de mantenimiento, el proceso completo duro sobre las 4 horas. A continuación, figura 30, se representa el proceso de descarga CC a 3 V con diferentes valores de peticiones de C para la batería LiPo anteriormente descrita.

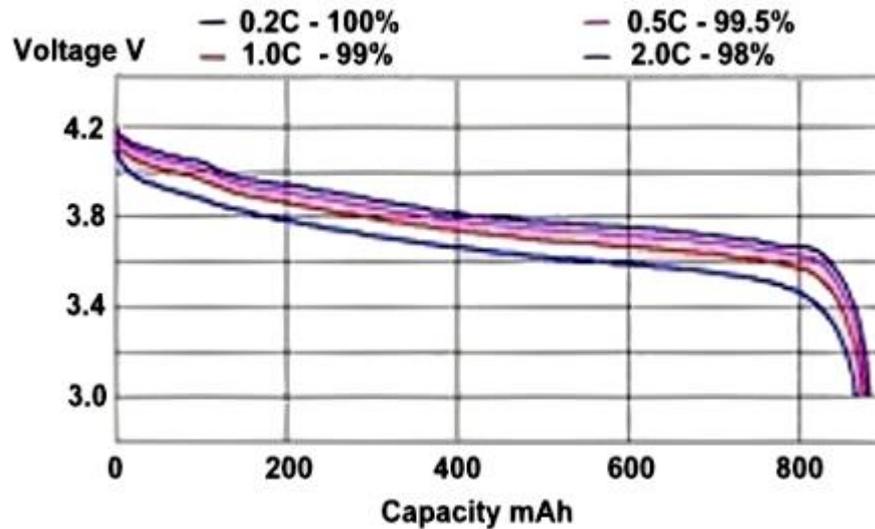


Figura 30. Proceso de descarga batería LiPo

2.6.4 Resumen característico y elección baterías LI-Ion para AUV

A continuación deberemos decidir qué tipología de baterías de litio se empleará, en función de la elección diseñaremos el BMS. Indicar que para la elección no sólo debe cumplir con los consumos de nuestro AUV sino contar con el problema de la estabilidad y seguridad de la clase de baterías de Li-Ion escogida. Esto último cobra tanta importancia como la potencia que necesitamos, pues el AUV será transportado por diversos medios y las baterías sufrirán variaciones de temperatura, presión y manejabilidad.

En la tabla 9 se muestran las características que debemos tener en cuenta para decantarnos definitivamente por una de ellas, para que posteriormente se realice la implementación del BMS.

Características	LiCoO₂	LiMo₂O₄	LiFePo⁴	LiPo
<i>Rango de Voltage</i>	2,5 - 4,2 V	2,5 - 4,2 V	2,5 - 3,6 V	2,5 - 4,2 V
<i>Voltaje medio</i>	3,7 V	3,7 V	3,3 V	3,7 V
<i>Energía Específica (Wh/Kg)</i>	175 – 240	100 – 150	90 - 110	130 - 200
<i>Densidad de Energía (Wh/L)</i>	400 – 640	250 – 350	125 - 250	300
<i>Rango de capacidad continua (C)</i>	2 – 3	➤ 30	10 – 125	➤ 45
<i>Rango de capacidad por pulsos (C)</i>	5	➤ 100	➤ 250	90
<i>Ciclo de vida al 100% DOD (C)</i>	500+	500+	1000+	1000+
<i>Vida útil (Años)</i>	➤ 5	➤ 5	➤ 5	➤ 5
<i>Tasa de autodescarga (%/mes)</i>	2 – 10	2 – 10	2 – 10	2 – 10
<i>Rango de temperatura de carga (°C)</i>	0 - +45	0 - +45	0 - +45	0 - +45
<i>Rango de temperatura de descarga (°C)</i>	-20 - +60	-30 - +60	-30 - +70	-30 - +60
<i>Efecto Memoria</i>	No	No	No	No
<i>Densidad de Potencia (W/L) (pulse)</i>	~2.000	~10.000	~10.000	~10.000
<i>Potencia Específica (W/Kg) (pulse)</i>	~1.000	~4.000	~4.000	~4.000
<i>Seguridad</i>	Inestable	Buena	Muy Buena	Buena
<i>Tolerancia a sobrecarga</i>	Muy Mala	Muy Mala	Mala	Muy Mala
<i>Robustez a impactos</i>	Muy Mala	Mala	Media	Mala

Tabla 9. Características sobre las topologías de las baterías secundarias de Li-Ion

Observando los datos aportados podemos concluir que:

- La tipología LiPo son las que mejores prestaciones aporta a vehículos eléctricos de competición, debido a que proporcionan el mayor voltaje por celda, junto a la mayor capacidad de descarga. Por el contrario, son las baterías más delicadas, además de necesitar un sistema de ecualización para su funcionamiento, pudiendo llegar a ser inseguras.
- Las LiFePo_4 proporcionan buenas prestaciones, no excelentes, para aplicaciones tipo herramientas como vehículos eléctricos, pero dando prioridad a la seguridad, al rendimiento y sobre todo a la durabilidad.
- Respecto a las otras dos tipologías no son viables para vehículos electrónicos debido a su escasa capacidad de descarga, que es el objetivo que nos ocupa.

Tras lo puntualizado, la tipología escogida para las baterías de nuestro AUV tanto para la parte de potencia como para la parte electrónica es tipo LiFePo_4 , pues cumplen con los requisitos en cuanto a prestaciones de carga y descarga además de proporcionar la mayor seguridad, rendimiento y durabilidad de todas las tipologías expuestas.

2.7. Sistema de Gestión de Baterías, BMS

Pretendemos hacer un estudio y definición del sistema de gestión de baterías, BMS, con el objetivo de comprender qué es, qué funciones realiza, cómo se clasifican, qué tipologías emplean, etc.

Comprendido todo ello, en el Capítulo 3, se detallará todo el proceso empleado para obtener el circuito impreso junto con el análisis en la fase de descarga/carga, balanceo y quemado. A su vez se explicará el proceso de diseño detallado en el apartado 2.2 pero centrándose en este circuito, cuya complejidad es elevada ya que es a doble cara y con un elevado número de componentes. Esto permitirá comprender mejor el resto de circuitos impresos desarrollados, de las cuales sólo se describe su utilidad y funcionalidad.

2.7.1. Definición

Battery Management System [38]-[40] es un sistema de gestión y control inteligente que permite realizar el proceso de descarga y carga de un par de celdas o batería de forma segura, a la vez que proporciona un alto rendimiento y larga vida de las celdas de litio. En ocasiones es conocido como *Voltaje Management System*, *VMS* o *Protection Circuit Module*, *PCM*.

Las funciones que debe cumplir un BMS son las siguientes:

1. Monitorización de baterías.
2. Protección de baterías.
3. Estimación del estado de las celdas que forman la batería.
4. Maximización del rendimiento y funcionamiento de la batería.
5. Información a usuarios y/o dispositivos externos.

2.7.2. Funciones Principales

Anteriormente se puntualizaron las funciones principales del sistema de gestión de baterías y, a continuación, serán detalladas para que el lector tenga claro que acciones debe cumplir:

- Evitar que la tensión de la celda supere el límite permitido, deteniendo la corriente de carga o solicitando la detención. Esto es un problema que ocurre con frecuencia en las baterías de litio.
- Eludir que la corriente de carga de carga supere el límite solicitando que la corriente sea reducida o deteniéndola directamente; dicho límite varía con la tensión de la celda, temperatura y nivel de carga.
- Rehuir que la temperatura de alguna celda o del pack supere una temperatura determinada. Las baterías de litio son propensas a este tipo de fugas térmicas.
- Proteger la celda para que el voltaje no caiga por debajo de la tensión límite, deteniendo la corriente de carga o dando la orden de parada.
- Evitar que la corriente de descarga sobrepase un límite, descrito en el punto anterior.

A la hora de cargar y descargar baterías tipo Li-Ion es esencial emplear un BMS, para que en el instante que alguna celda alcance su máximo/mínimo voltaje o su capacidad, se produzca la desconexión del cargador. Por otro lado, en el proceso de descarga, cuando alguna celda alcance la tensión mínima de corte permitida, se ha de desconectar. Estos dos fenómenos los podemos visualizarlos de forma esquematizada en la figura 31 y figura 32 respectivamente.

El proceso de balanceo en carga se realiza desactivando la carga de la celda más cargada hasta que el voltaje es suficientemente bajo para que el cargador vuelva a suministrar corriente. En la figura 31 se describe todo ello, a) cargando; b) la carga se detiene cuando la tensión alcanza el valor de corte superior; c) reinicio de la carga reducido el voltaje de la celda; d) repetición del proceso; e,f) pack de batería equilibrado, *carga completa*.

Si nos refiriésemos al proceso inverso, figura 32, es idéntico pero se produce la desconexión cuando se llega al mínimo valor de la celda, *descarga completa*; a,b) descargando; c) la descarga se detiene cuando una celda llega a valor de corte inferior.

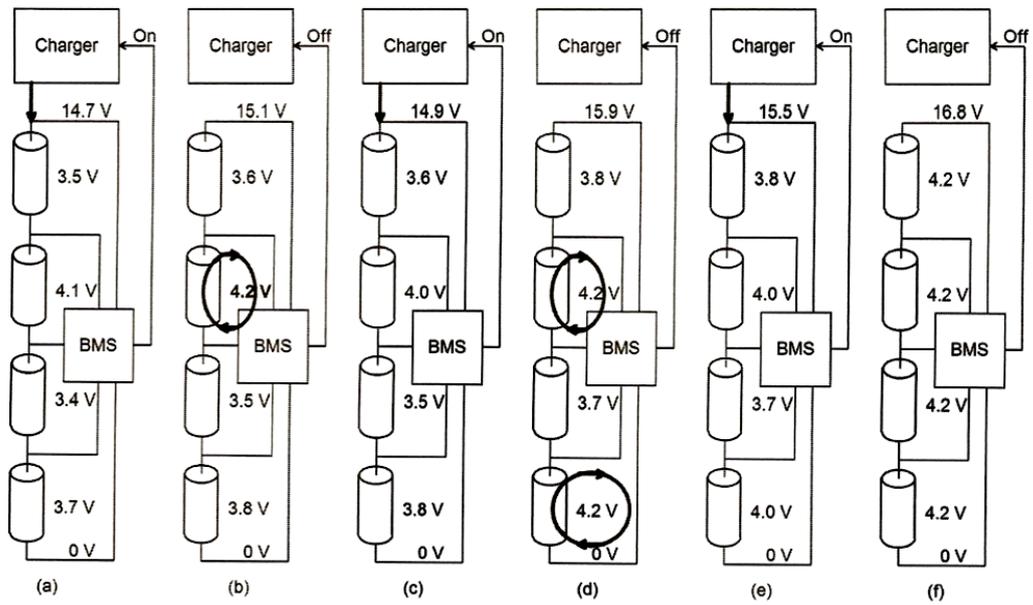


Figura 31. Esquemático del balanceo en la carga de la batería

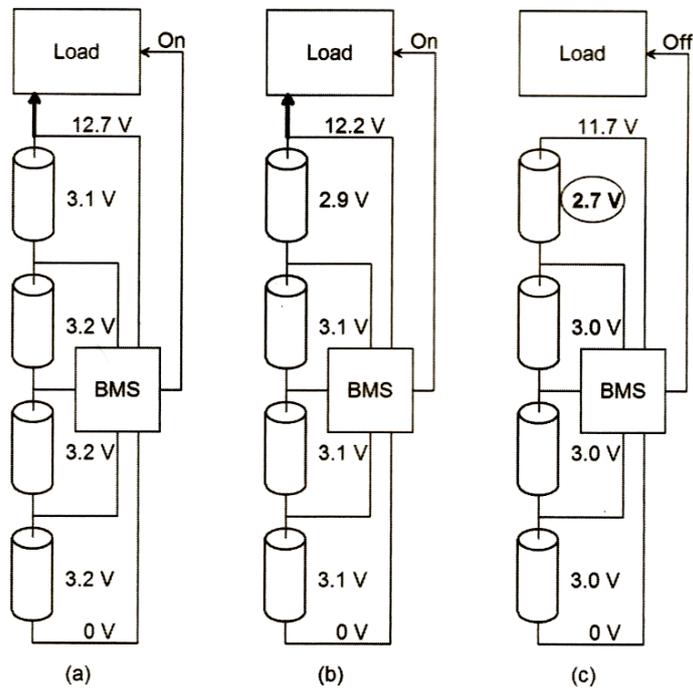


Figura 32. Esquemático del balanceo en la descarga de la batería

2.7.3. Tipos de Sistemas de Gestión de Baterías

A la hora de definir los tipos de BMS no hay una única clasificación debido a que se pueden catalogar según su *tecnología*, *funcionalidad* o *topología*.

Tecnología

A la hora de catalogar los BMS's según esta categoría existen dos divisiones los *BMS Analógicos* y los *BMS Digitales*.

La diferencia entre ellas radica en cómo se procesa la información de las celdas. Por tanto, aquellos BMS que procesan los valores de las celdas con circuitería analógica como comparadores analógicos, amplificadores, circuitos diferenciales, etc, pertenecerán al primer grupo dentro de esta categoría; en caso contrario, es decir, que gestionen los valores de las celdas de manera digital pertenecerán a la segunda categoría. En las figuras 33 y 34 puede verse un ejemplo de ambas tecnologías.

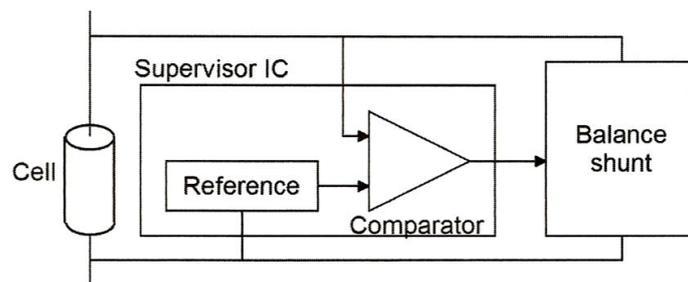


Figura 33. Regulador analógico

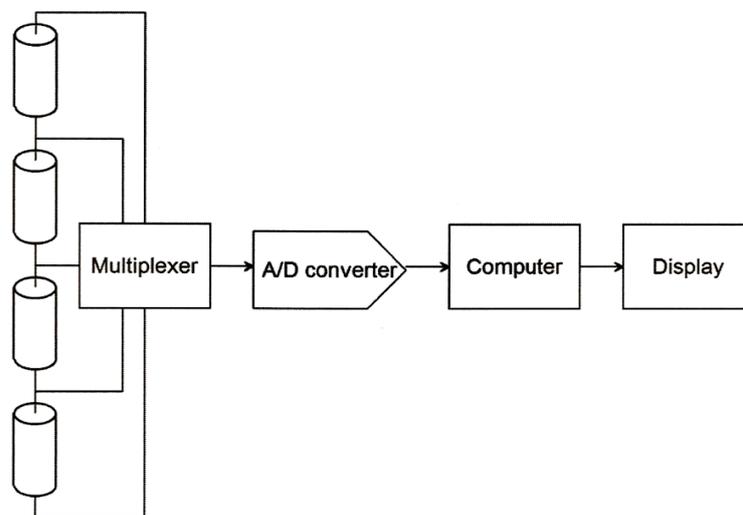


Figura 34. Medidor digital

Funcionalidad

A la hora de clasificar los sistemas de gestión de baterías dentro de este apartado nos encontramos con varias tecnologías. A continuación describiremos aquellas que fueron estudiadas para este proyecto ordenándolas de menor a mayor complejidad a la vez que incluimos una comparativa de ellas en la tabla 10.

	Measure	Compute	Report	Balance	Protect	
					Charge	Discharge
CCCV Chargers						
Regulators				✓		✓*
Meters	✓	(✓)	✓			
Monitors	✓	(✓)	✓		✓*	✓*
Balancers	✓	(✓)	(✓)	✓	✓*	✓*
Protectors	(✓)	(✓)	(✓)	✓	✓	✓

(✓) = Some may provide this feature
 ✓* = Requires additional measures.

Tabla 10. Clasificación y comparativa del BMS según funcionalidad

- **Cargadores de corriente constante y tensión constante, CCCV.**

Los CCCV's son fuentes reguladas estándar, las cuales se usan para cargar baterías. Algunos usuarios las emplean como BMS, acción incorrecta debido a que solamente suministran alimentación a las celdas sin controlar como estas se cargan o sobrecargándolas con el deterioro o inutilización a la larga de las mismas. Los CCCV's están limitados en dos tipos:

- CC:** Desde el inicio de la carga, generan una corriente constante permitiendo que el voltaje del pack de celdas aumente a medida que se carga.
- CV:** Cuando el pack está casi lleno y el voltaje alcanza una tensión constante, el cargador mantiene esta tensión y la corriente del pack decrece exponencialmente, la carga finaliza cuando la batería está completamente cargada.

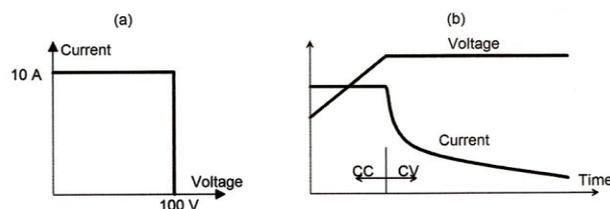


Figura 35. (a) Características cargador CCCV (b) Gráfica tensión/corriente

- **Reguladores**

Es una derivación colocada a través de la celda para desviar parte o toda la corriente de carga cuando la celda se encuentra totalmente cargada, llega a su máximo valor de carga, a partir del cual el regulador intenta mantener esta tensión. Los reguladores son económicos y simples de entender, hecho que los hace muy conocidos en el mundo de los aficionados, pero que por sí mismos no proporcionan protección a las celdas del pack.

En la figura 36, se observa el diagrama de bloques de un regulador, indicar que se corresponde para celda tipo LiFePo_4 . En caso de trabajar con otra tipología de celda sólo tendríamos que regular a la tensión máxima de carga de esa celda.

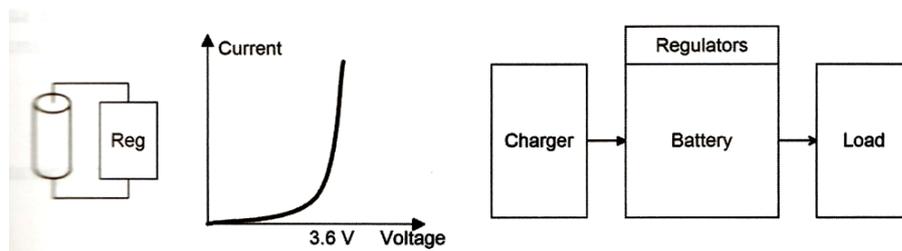


Figura 36. Estructura de un regulador (Celda tipo LiFePo_4)

- **Medidores**

Son empleados por aficionados o investigadores para saber el estado individual de cada celda. Los medidores, monitorizan determinados parámetros de la celda sin realizar un control activo en los procesos de carga/descarga, de ahí que no sea suficiente para ejercer como BMS dado que no evitan la sobrecarga, sobredescarga, ni balanceado del pack. Como norma general nos informan de los siguientes aspectos:

- Medir la tensión de cada celda principalmente, aunque pueden hacerlo de otros parámetros como la temperatura del pack.
- Recopilación de datos.
- Dar información del SOC.
- Estará dotado de led o zumbador para informar de anomalías de la batería al usuario.

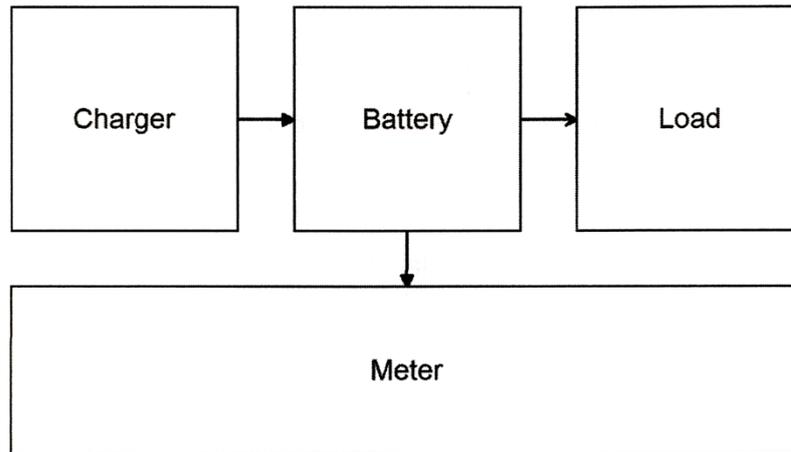


Figura 37. Diagrama de bloques de un medidor

- **Monitores**

Son similares a los medidores con la diferencia que no requieren de que el usuario esté controlando el pack, pues son capaces de tomar decisiones de forma autónoma sobre el cargador y la carga. La diferencia principal entre un medidor y un monitor es que estos últimos cierran el lazo de control, como se puede ver en la figura 38.

Considerar que un monitor funcione como BMS no es correcto debido a que no realiza el equilibrado del pack de celdas, aunque si proporciona protección a las celdas, no permite que superen sus valores críticos de carga, respecto al resto de los sistemas descritos anteriormente.

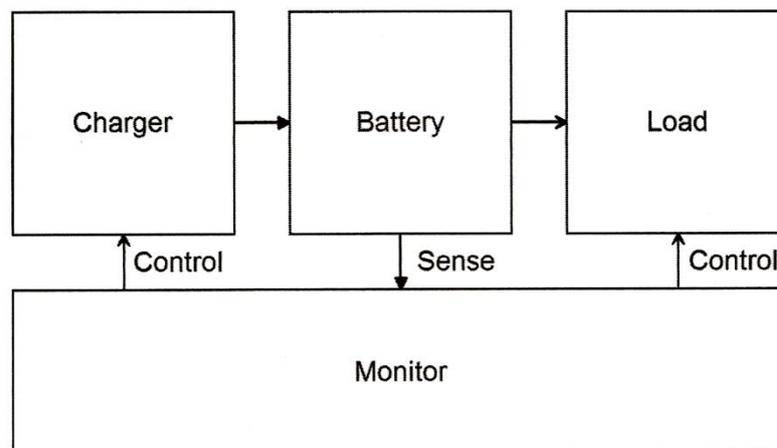


Figura 38. Diagrama de bloques de un monitor

- ***Balancedores o Equilibradores***

Son como los monitores pero nos permiten maximizar el rendimiento de la batería. La mayoría incluyen enlace de comunicaciones para exportar información del pack al resto del sistema. Son la mejor opción para baterías constituidas por un gran número de celdas. Por ello, podemos decir que un equilibrador puede funcionar como BMS mientras permita el control de la fuente de carga y la descarga.

Los balanceadores suelen estar montados sobre las celdas de forma directa, en muy pocas ocasiones son independientes, debido a requerimientos físicos; y existen varias tecnologías para implementar un equilibrador.

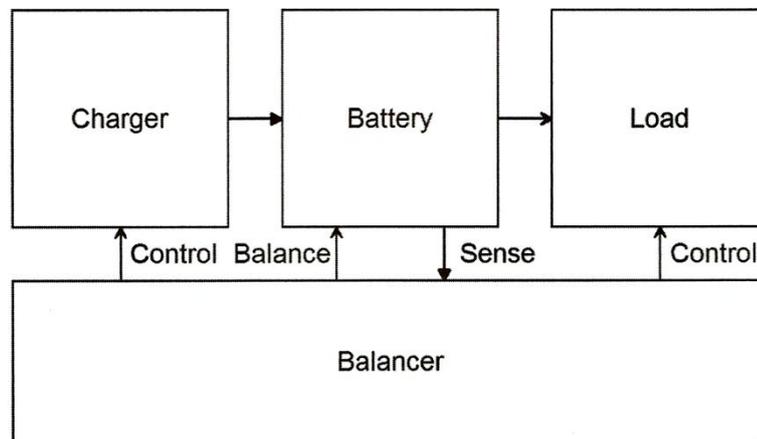


Figura 39. Diagrama de bloques de un balanceador o equilibrador

- ***Protectores***

Se asemejan a los balanceadores con la diferencia de incluir un conmutador de desconexión de la corriente de la batería. Como norma general se integra con el pack de celdas, localizándose dentro de la misma carcasa, permitiendo así que al exterior sólo salgan dos terminales con la facilidad que ello implica para su conexión.

Empleados para pequeños packs de celdas debido a que el conmutador no trabaja eficientemente cuando opera con grandes cargas, de ahí el uso del equilibrador para estos casos. Estos conmutadores trabajan en un rango de corriente comprendido entre los 5-50 A y 50 V. Tras lo dicho, los protectores pueden utilizarse como BMS en el caso de operar dentro de estos valores de corriente y voltaje.

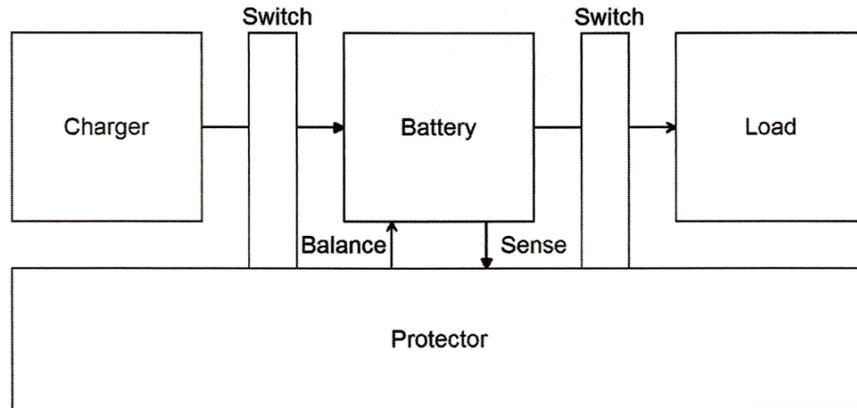


Figura 40. Diagrama de bloques de un protector

Topología

Dentro de esta clasificación podemos indicar que existen tres estructuras principales. La diferencia entre ellas radica en cómo el BMS está instalado con respecto a la celda, es decir, separados de ellas o unidos a ellas. Esta clasificación tiene mucha relevancia a la hora de elegir o diseñar un BMS ya que afecta al costo, a la fiabilidad, mantenimiento y exactitud de la medición.

- **Centralizada**

En esta estructura un único controlador está conectado a las celdas a través de una multitud de cables, es decir, $N + 1$ para cables con disposición de N celdas en serie.

Se caracteriza por ser compacta, económica, fácil de reparar y separadas de las celdas.

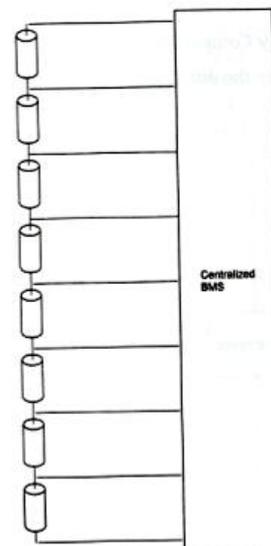


Figura 41. Topología centralizada

- **Modular**

Disponen de una estructura similar a la anterior con la diferencia de disponer de varios controladores que agrupan las celdas por módulos de igual cantidad a la vez que se conectan entre controladoras. Uno de estos módulos tendrá asignada la controladora maestro que se comunicará con el resto del sistema mientras que las restantes actúan como simples dispositivos remotos de medida.

Se caracteriza por ser una topología de compromiso entre las centralizadas y las distribuidas.

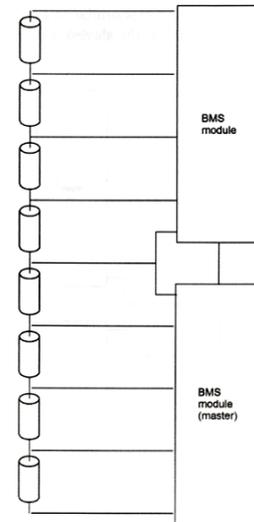


Figura 42. Topología modular

- **Distribuida**

A diferencia de las anteriores la parte electrónica va unida a la celda que están midiendo. Se caracterizan por tener un elevado costo, ser las más fáciles de instalar y ofrecer el conjunto más limpio.

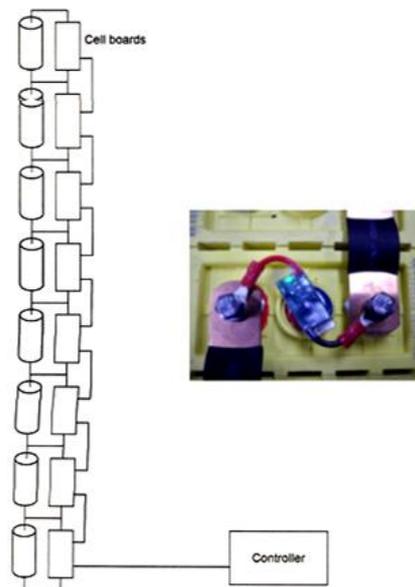


Figura 43. Topología distribuida

En la tabla 11 se expone una comparativa indicando las prestaciones de los BMS's según esta clasificación:

	Measurement Quality	Noise Immunity	Versatility	Safety	Electronics Cost	Assembly Cost	Maintenance Cost
Centralized	✓✓	✓✓✓	✓	✓	✓	✓✓	✓
Modular	✓✓	✓✓✓	✓✓	✓	✓✓✓	✓✓	✓
Distributed	✓✓✓	✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓	✓✓

✓✓✓ = Best; ✓✓ = Better; ✓ = Good

Tabla 11. Clasificación y comparativa del BMS según topología

2.7.4. Funciones del BMS

Pretendemos enumerar y definir las funciones que realiza el BMS. Las funciones son: *medición, gestión, evaluación, comunicaciones y registro o logging.*

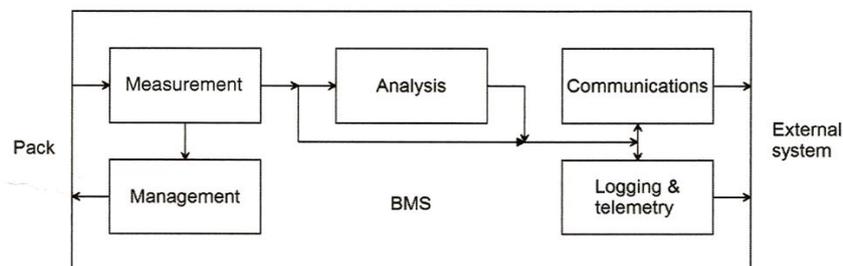


Figura 44. Diagrama de bloques de las funciones de un BMS

Medición

Esta función no la suele incluir el BMS analógico pero es la primera de las funciones del BMS digital; consiste en reunir datos sobre el pack de celdas que constituye la batería. Los datos a obtener son:

- Tensión de la celda. El BMS puede medir la tensión directamente a través de una celda, también puede medir el voltaje de diferentes bornes en una batería y calcular la tensión de una celda como la diferencia de voltaje entre dos bornes, o bien, tomando dos mediciones simultáneas entre bornes de una celda y calcular la diferencia como el voltaje de la celda.
- Temperatura de la celda o, por lo menos, temperatura de la batería. Esta medición es relevante para que las celdas no se carguen/descarguen fuera de su rango de temperatura o para detectar problemas de calentamientos internos que pueden estar relacionados con celdas defectuosas o con un conexionado mal hecho.

- Corriente del pack. Tener conocimiento de este parámetro mediante la corriente de derivación o por el sensor de efecto Hall; permite a un BMS realizar funciones adicionales como evitar que las celdas estén operando fuera de su área de operación segura, calcular el DOD para implementar consumo, calcular la resistencia interna de las celdas DC, realización de la compensación IR de la tensión en bornes de celdas.

Gestión

El BMS puede gestionar el pack de celdas según los siguientes aspectos:

- Protección. No permite que se dañe la batería manteniéndola en el estado de seguridad, SOA. Para ello el BMS interrumpirá la corriente o la restablecerá en función del valor en el que se encuentre, para evitar que se sobrepasen los valores máximo y mínimos que puedan soportar las celdas.
- Gestión térmica. Actúa activamente llevando al pack al área de seguridad. En ocasiones se requiere el uso de operar bajo condiciones extremas de calor o frío y es ahí cuando esta gestión es de vital importancia para que no se estropeen las celdas, ejemplo las celdas de ión-litio operan entre los -20°C a $+60^{\circ}\text{C}$ mientras que las tipo LiFePo^4 tienen un rango de -40°C a $+60^{\circ}\text{C}$.
- Equilibrado. Permitiendo maximizar la capacidad del pack. El objetivo es llevar a todas las celdas al mismo estado de carga, SOC este proceso se puede visualizar en la figura 45. Se observa en la imagen (a) como las celdas tienen valores superiores de las tensiones mínima/máxima y en la imagen (b) tras realizarse el proceso de equilibrado.

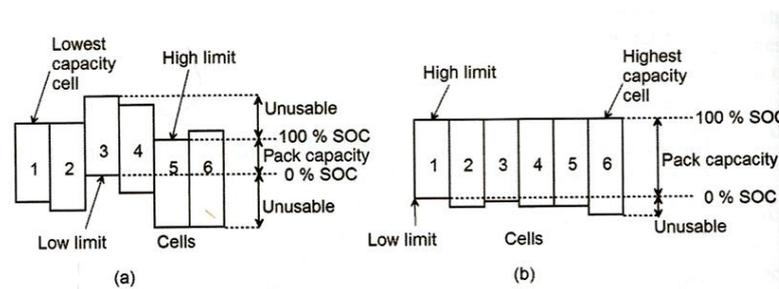


Figura 45. Proceso de equilibrado de una batería compuesta por 6 celdas

Un BMS equilibrado puede ser *pasivo* (disipando la energía en forma de calor) o *activo* (la energía se transfiere entre las celdas). En la tabla 11, se puede ver un resumen y comparativa de los procesos de equilibrado.

Sin un equilibrado, todas las celdas, o bloques de celdas en paralelo, en serie en un pack reciben la misma corriente y su profundidad de descarga, DOD, cambia exactamente en el mismo periodo. Existen tres modos de equilibrado:

- I. Desconectar aquella celda que está más cargada para que la celda con menor carga perciba más corriente durante el proceso de carga.
 - II. Recircular parte de la corriente de carga de la celda más cargada para que la corriente de carga se transfiera a la celda con menor carga.
 - III. Suministrar una corriente extra sólo a las celdas con menor carga.
- *Redistribución*. Permite estudiar de que forma la capacidad de la celda puede ser empleada. Durante la descarga, la energía adicional se toma de las celdas con la mayor capacidad, así que las celdas con poca capacidad no suponen un factor limitador para la batería. Un efecto de esta acción es que el estado de la carga del pack siempre es el mismo, durante la descarga todas comienzan al 100% y todas finalizan al 0% del SOC.

Ejemplo de ello, figura 46, se observan dos celdas, la capacidad de una de ellas supera un 20% su SOC mientras que la otra está un 20% por debajo. Sin redistribución, la capacidad del pack lo limitaría el valor de la celda de menor SOC y la batería se descargaría en 48 minutos; en cambio, si hay redistribución el exceso de energía es entregado para compensar la otra celda, así la batería tardaría en descargarse por completo 60 minutos.

En la tabla 12 se presenta una comparativa entre BMS no balanceado, balanceado, procedo de distribución en carga y redistribución.

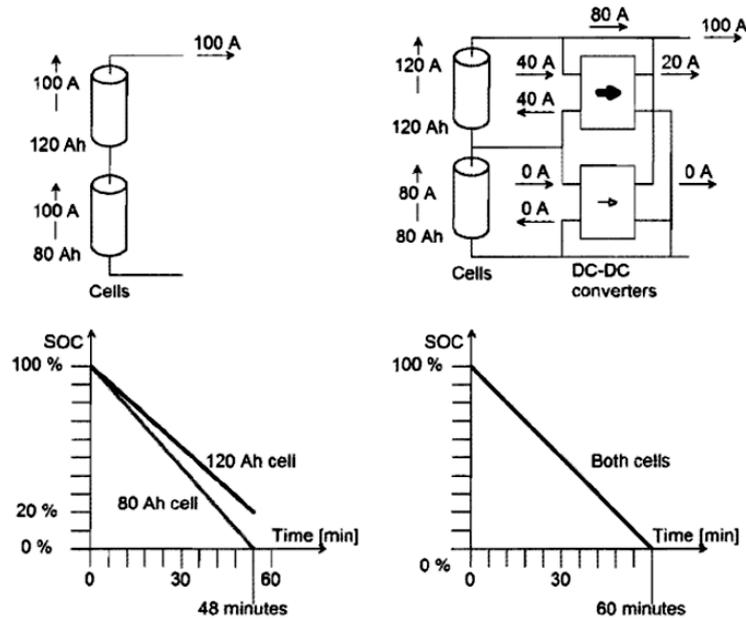


Figura 46. Proceso sin y con Distribución

	None	Balancing	Distributed Charging	Redistribution
Method	N/A	Passive	Active	Active
Current Transferred	None	Low: 10mA to 1A	Medium: 100mA to 10A	High: 1A to 100A
Battery Energy Utilized	0 - 90%	≈ 90%	100%	
Battery Capacity	Reduced over time	Minimum cell capacity	Average cell capacity	
Pack SOC	Unrelated to cell SOC	SOC of cell with least capacity	SOC of all cells	
Cells SOC	All over the place	At 100% all cell have same SOC	All cell always at same SOC	
Duration	N/A	Top end: at end of charge. SOC history: may be at any time	During charging	Whenever in use

Tabla 12. Comparativa procesos de balanceado y redistribución

Evaluación

A partir de los datos que el BMS puede obtener del pack de celdas, este puede estimar ciertos parámetros que informen del estado de la batería como:

- Estado de carga, SOC, y profundidad de descarga, DOD.
- Resistencia.
- Capacidad.
- Estado de salud, SOH.

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL ARTE

Normalmente un BMS digital puede llegar a implementar varias de estas funciones mientras que si el BMS es analógico no lo podría hacer. Si se desea que se implementasen todas, estaríamos tratando con un BMS digital sofisticado. Que el BMS sea capaz de estimar estas acciones no implica que se realice una protección de la batería, pero si proporciona información al usuario para que este realice las acciones de mantenimiento oportunas.

Para controlar el SOC y el DOD por parte del usuario no hay un método directo a donde ir sino que se realiza por procesos indirectos. Para el caso del SOC por ejemplo, se puede saber mediante la translación de voltaje o la integración de la corriente, contador culómbico.

En cuanto a la resistencia de las celdas, por sí misma, no es algo que el usuario quiere conocer constantemente pero gracias a ella, se puede hacer el cálculo del SOC y el SOH. Gracias a este parámetro, realizando la compensación IR de la tensión de la celda y obtener la tensión a circuito abierto, OCV, para estimar el SOC. En el caso de aumentar el valor de la resistencia de la celda nos proporcionará información del SOH del pack.

La capacidad es medida observando cuánta carga sale del pack desde que se encuentra lleno hasta que se vació. Con este parámetro se obtendrá información del SOC y del SOH. En la figura 47, se muestra el estudio de capacidad de una celda LiFePo_4 .

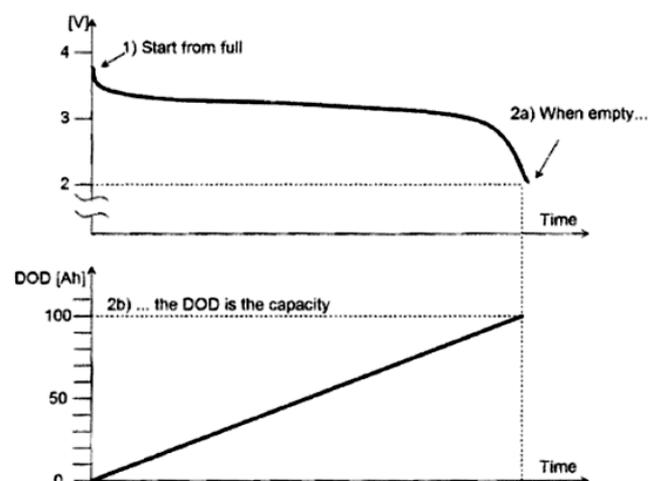


Figura 47. Estudio de capacidad celda LiFePo_4

Si el parámetro que el BMS desea estimar del pack es el estado de salud de la batería, este lo puede obtener a partir del aumento de la resistencia de la celda respecto a su valor nominal o a través de la capacidad con respecto a su valor nominal.

Comunicaciones

El BMS puede comunicarse tanto él con el exterior, como el exterior con él. Cuando la comunicación es desde el BMS este puede solicitar al sistema que reduzca o detenga la corriente de la batería y dar datos del pack o de él mismo. Cuando la

comunicación la recibe el BMS se corresponde con acciones de configuración del sistema y de informarle de datos de sensores externos.

Por general, las comunicaciones se pueden dividir en dos:

- I. Conexión dedicada. Empleo de una conexión específica, la cual puede ser analógica o digital.
- II. Enlace de datos. Esta se puede realizar por *salida digital* mediante: RS232, bus CAN, Ethernet; *enlace de radio* por medio de Wifi o Bluetooth; como última opción existe el *enlace óptico* realizado por medio de Fibra óptica, Infrarrojos.

Registro

Es una función que gestiona de manera muy eficiente el registro de los datos, data logger. Un logger permite gravar los datos del sistema tanto del BMS como del resto de sensores y actuadores. En el caso del BMS el log puede contener los valores de los siguientes parámetros:

- Tensión del pack.
- Tensión máxima y mínima de las celdas.
- Corriente de la batería.
- Resistencia del pack.
- SOC y SOH.
- Límite de corriente de carga y de descarga, CCL y DCL.
- Temperatura máxima de las celdas.
- Aviso de errores.

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

Tras haber realizado el estudio del arte del equipamiento que requiere un vehículo autónomo submarino, es momento de detallar aquellos elementos que se solicitaron y se instalaron en nuestro vehículo.

El empleo de los mismo se debe al interés del equipo AVORA por intentar superar la totalidad de las pruebas que se nos plantean en la competición; de ahí que aunque se dispongan de dispositivos de mayor calidad en el mercado se haya valorado un compromiso entre calidad/precio. Por tanto, se detallará el equipamiento del AUV de AVORA, explicando la necesidad de la utilización de cada dispositivo y añadiendo tablas comparativas.

Algunos de los elementos físicos seleccionados para el AUV, requieren de conexión auxiliar para relacionarse con la unidad de control o para amplificar su señal y poder trabajar con ella. Ya que se dispone de las instalaciones del SFP, lo más rápido, cómodo y eficiente es diseñar un circuito impreso para ello.

Los circuitos impresos implementados para este fin, serán descritos desde el punto de vista funcional y posteriormente mostrando sus esquemáticos y diseño físico tanto virtual como real. Para comprender los circuitos impresos que fueron diseñados para ello, que son un preamplificador para los hidrófonos, un convertidor de corriente continua negativa, un convertidor de nivel, circuito de corte de potencia y el sistema de gestión de baterías, presentamos en la figura 48 el diagrama de bloques de los componentes y conexionado electrónico de nuestro AUV.

Como el circuito más complejo en cuanto diseño y componentes corresponde con el que nos ha hecho realizar este proyecto fin de carrera; a la hora de describir todos los

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

circuitos creados, hablaremos exclusivamente de la funcionalidad de los que dieron tiempo de fabricar e instalar para la competición. Centraremos toda nuestra atención en lo que respecta a diseño software, fabricación, montaje de componentes y verificación, al sistema de gestión de baterías.

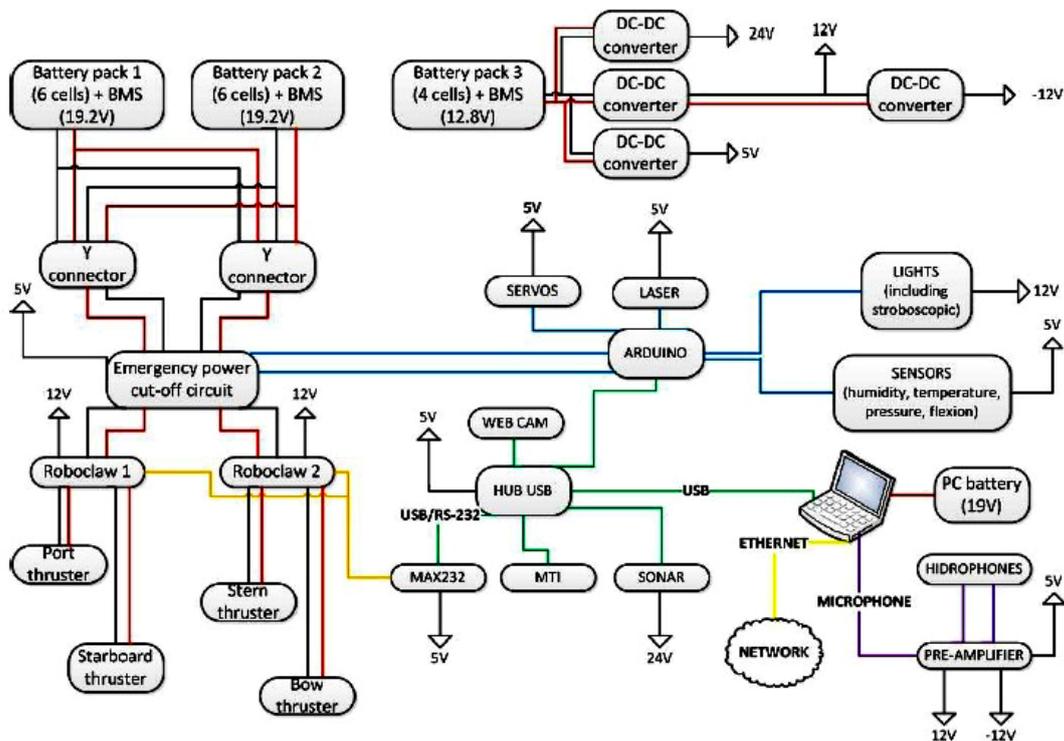


Figura 48. Diagrama de bloques de la electrónica del AUV de AVORA

3.1. Equipamiento AUV AVORA

Tras haber realizado un desglose de los dispositivos sensoriales y actuadores básicos que constituyen por norma general un AUV, vamos a proceder a definir y explicar el equipamiento que dispone el vehículo diseñado por AVORA, englobándolos dentro de las categorías descritas en las secciones 2.4.1 y 2.4.2.

Para que el lector tenga una visión global de los componentes escogidos y que dispone el vehículo junto con sus cantidades le remitimos a la tabla 13.

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

COMPONENTES	CANTIDAD
	<p>Sensor Xsens XS-MTi-DK 1</p>
	<p>Sensor Bendshort v2.0 1 Sensor Bendmini v2.0 1</p>
	<p>Sonar Imagenex 852 Ultra-Miniature 1</p>
	<p>Hydrofonos H2b Aquarian Audio 2</p>
	<p>Logitech webcam C120 1</p>
	<p>Green laser (20-30 mW) 1</p>
	<p>MR 16 5W 5-LED7500K 4</p>
	<p>Servo Futaba s3001 3</p>

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

	Sensor de presión U5100 Serie Transducer	1
	H-38120S LiFePo ⁴ H-38140S LiFePo ⁴	12 4
	Acer Aspire One D270	1
	Arduino Mega 2560	1
	DUB-H7 port USB 2.0 Hub	1
	DC-DC USB, Intelligent buck-boost DC-DC	3
	Roboclaw 2x15	2
	Seabotix BTD150	4
	Y-PWR-b	2



Conectores Buccaneer serie 900

9

Tabla 13. Equipamiento del AUV de AVORA

Instrumentos de Navegación

XS-MTi-DK. El sensor Xsens es un dispositivo de pequeño tamaño que contiene acelerómetro, giróscopo y magnetómetro en 3D, IMU. Al disponer de un dispositivo que contiene tres sensores en uno, el equipo ahorró costes, e implementación de drivers.

Sensores Bendshort v2.0 y Bendmini v2.0. Al no disponer de un presupuesto elevado y con ello no optar a un DVL, el equipo ha empleado estos dos sensores para detectar la velocidad del vehículo. Estos dispositivos tienen una resistencia que aumenta según la deflexión y al ser bipolares, podemos saber aparte de la velocidad, el sentido de movimiento del vehículo.

Sonar Imagenex 852 Ultra-Miniature. Sonar empleado por su pequeño tamaño, bajo coste y características. AVORA implementó el sonar con un servo para realizar tanto barrido horizontal como vertical, permitiendo detectar objetos y hacer mapeado del entorno.

Sensores de Misión

Hydrofono H2b Aquarian Audio. Elemento diseñado para trabajar con cualquier dispositivo de grabación con entrada de 3.5 mm. Se empleó para la detección del pinger que se debía seguir en la competición SAUC-e y optamos por este elemento y no otro debido a su bajo coste, bajo ruido interno, alta durabilidad, no necesidad de alimentación, entre otros aspectos. Dispone de un rango útil entre los 10 Hz y los 100 KHz y una respuesta polar omnidireccional en el eje horizontal.

Logitech webcam C120. Se dotó al AUV de una cámara para la visualización del entorno submarino, detección de objetos y combinándola con el sonar para poder realizar una navegación más fácil. Se optó por este modelo debido al bajo coste, imagen de 1.3 mega píxeles y fácil conexión por medio de USB, aparte de aportarnos de fábrica drivers y software. Indicar que como había que hacerla estanco se eliminó su carcasa obteniendo unas dimensiones muy pequeñas.

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

Green laser (20-30 mW). En el mismo plano de la cámara se incluyó un laser para así mediante triangulación detectar distancias. El hecho de elegir color verde se debe a que su longitud de onda es la más visible en el medio acuático.

MR 16 5W 5-LED7500K. El AUV dispone de 4 dispositivos de luz tipo LED. Tres de ellos son empleados para dar mayor visibilidad a la cámara y un cuarto empleado como luz estroboscópica. Estos dispositivos fueron estanqueizados por los miembros de AVORA ya que comprar dispositivos que vinieran con esta característica elevaba en exceso su coste.

Servo Futaba s3001. Como el equipo desea dotar de movilidad a parte del equipamiento que va a emplear en el AUV es necesaria la utilización de servos. Debido a que algunos de los miembros del equipo había trabajado con este modelo, con el único problema de que había que hacerlos estanco, fueron los empleados.

Sensores Internos

U5100 Serie Transducer. Sensor de presión, empleado para detectar posibles fisuras o vías de agua en el AUV además de profundímetro. Antes de introducir el vehículo en el agua el equipo introducía aire en la estructura, para en el caso de producirse una vía de agua, la presión interna evitará que entrase agua en la estructura a la vez que esta pérdida de presión es detectada por el control de AUV y se procederá a un apagado eléctrico del vehículo y su correspondiente emersión. También se implementó como profundímetro.

Baterías. Nuestro vehículo submarino disponía de tres packs de baterías, dos para la gestión de los motores (cada pack constituido por 6 celdas tipo **H-38120S**) y otro para la electrónica (formado por 4 celdas tipo **H-38140S**), las celdas son tipo LiFePo_4 . La utilización de este tipo de celdas respecto a otras se debe principalmente a que no explotan ni se incendian por sobrecarga aparte de ser internamente sólidas y no líquidas; características fundamentales para poder ser transportadas por avión hasta la competición.

Acer Aspire One D270. Se utilizó un portátil como unidad central de procesamiento implementado por ROS¹¹ [41] para gestionar el control completo del vehículo. El portátil cuenta con 2 GB de memoria y un disco duro de 320 GB.

¹¹ **ROS.** Robot Operating System, es un marco flexible para la escritura de software de robot. Colección de herramientas y bibliotecas cuyo objetivo gestionar de forma robusta las tareas de control de una plataforma robótica.

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

Arduino Mega 2560. Utilización de un Arduino como plataforma para facilitar la gestión de la electrónica. Se utiliza el modelo Mega debido a la cantidad de dispositivos de entrada que se utilizan.

DUB-H7 port USB 2.0 Hub. Fue necesario emplear un Hub para poder conectar los elementos con dispositivo USB y el portátil.

DC-DC USB, Intelligent buck-boost DC-DC. Necesidad de utilizar dispositivos de conversión DC-DC para gestionar las tensiones de los dispositivos empleados ya que no todos funcionan con la misma alimentación, necesitamos 5v, 24v, 12v y -12v.

Sistema de Impulsión

Propulsores. El vehículo dispone de 4 propulsores **Seabotix BTD150** y dos controladoras modelo **Roboclaw 2x15**. Se optó por este tipo de propulsores porque eran los empleados por la mayoría de los equipos que habían participado en ediciones anteriores, dicha marca era patrocinador de la competición, ofertando sus productos a costes muy económicos y la relación coste-prestaciones es más que aceptable. Respecto a las controladoras se empleó este modelo debido a los requisitos de potencia de arranque de los motores empleados y a los diversos modos de control que proporcionaban (radio control, analógico, serial tipo simple y paquete). En la tabla 14 se puede ver una comparativa de propulsores y en la tabla 15 la respectiva de las controladoras, estudio que se realizó antes de decantarnos por las que se equiparon finalmente.

Y-PWR-b. Circuito empleado para que la capacidad de los packs de las baterías pueden ser consumidos de forma equitativa por los motores y evitar que un pack se descargue antes que otro. Indirectamente es un método de seguridad para que los motores funciones todos o ninguno, evitando movimientos incontrolados del vehículo.

Tabla 14. Comparativa de propulsores

MODELO	SEABOTIX BTD150	SEAMOTOR	TSL TECHNOLOGY	INUKTUN	CYVECT 1-HP
RANGO DE PROFUNDIDAD	150 m	300 m	-	300 m	3.500 m
VOLTAGE	+19,1 DC +10%	-	24 DC	-	-
POTENCIA	110 W (depende RPW)	90/150 W	80 W	90/150 W	-
ELECTRONICA	5,8 AMPS (30 s duración)	-	-	-	-
MAX. AMPERAGE	4,25 AMPS	-	-	-	-
MAX. AMPERAGE CONTINUO	39 hilos (1 m)	24 hilos (0,5 m)	-	-	-
CABLE	-	1,75 cm	9,5 cm	-	6,858 cm
DIAMETRO DEL CUERPO	9,33 cm	4,4 cm	7 cm	10,2 cm	18,03cm
DIAMETRO DE LA BOQUILLA	17,6 cm	9,72 cm	10,8 cm	24,8 cm	36,32 cm
LONGITUD TOTAL	-	-	-	-	< 65 Libras
EMPUJE	705 gr	1 Kg	1,6 Kg	1,2 Kg	Fuerza
PESO	350 gr	-	1 Kg	730 gr	< 5 Kg
AGUA	-	-	-	-	< 3 Kg

Tabla 15. Comparativa de controladoras de propulsores

MODELO	MD22	Sabertooth 2x12	ROBO_CLAW B0097	ROBO_CLAW B0099	POLOLU TReX Jr DMC02	POLOLU TReX Jr DMC01
Nº Canales	2	2	2	2	3	3
Minimum operating voltage	5 V	6 V	6 V	6 V	5 V	6 V
Maximum operating voltage	24 V	24 V	21 V	21 V	24 V	16 V
Continuous output current per channel	5 A	-	-	-	2.5 A	13 A
Peak output current per channel	-	12 A	10 A	5 A	5 A	-
Continuous paralleled output current	-	-	-	-	5 A	25 A
Maximum PWM frequency	-	32 KHz	Different resolutions	Different resolutions	10 KHz	19.5 KHz
Minimum logic voltage	0 V	0 V	3 V	3 V	2.7 V	2.7 V
Maximum logic voltage	5 V	5 V	5.12 V	5.12 V	5.5 V	5.5 V
BEC (Battery Eliminator Circuit)	NO	NO	SI	SI	NO	NO
Control Interface	RC servo I2C PICAXE OOPic BS2p PIC'S AVR'S 8051'S	Analog input mode RC input mode TTL level RS-232 serial	Hobby RC Radio Compatible Serial mode TTL Input Analog Mode	Hobby RC Radio Compatible Serial mode TTL Input Analog Mode	Non-inverted TTL serial (2-way) RS-232 serial (1-way) RC servo pulses	Non-inverted TTL serial (2-way) RS-232 serial (1-way) RC servo pulses
Precio	46.82 €	59.76 €	67.2 €	52.26 €	59.95 €	99.95

Dispositivos de comunicación

Conectores Buccaneer serie 900. Se emplean conectores para relacionar los elementos internos con los externos. Estos conectores sirven para conectar señales de datos, de electrónica y de comunicación. En nuestro caso la comunicación se hará mediante Ethernet. La elección de estos conectores frente a otros del mercado se debe principalmente a su bajo coste y que cumplen los requisitos de estanqueidad para la profundidad a la que se va a llegar, aunque el conexionado habrá que hacerlo en seco.

Por ello, se planificó un procedimiento para realizar el conexionado de los mismos cada vez que se tuviera que realizar algún tipo de desconexión, el cual consistía en recubrir la unión del conector con un producto aislante y una doble revisión del correcto conexionado por parte de dos miembros diferentes del equipo. Un mal cierre en la conexión o una junta tórica mordida implicaba que entrara agua al compartimento en el momento de introducir el vehículo en el agua.

3.2. Preamplificador para los hidrófonos

Para realizar el seguimiento del ASV en movimiento y para detectar el emisor de ultrasonidos, nuestro AUV está equipado con dos hidrófonos modelo Aquarian Audio “H2b”.

Para disponer de una recepción clara y directa del sonido emitido, los hidrófonos han de estar colocados en la parte superior del vehículo. A la hora de estimar el ángulo de llegada de la señal de audio, la distancia entre los hidrófonos tiene que ser la mitad de la longitud de onda del tono del pinger.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.1)$$

λ = longitud de onda

v = velocidad del sonido en el medio.

f = frecuencia de la señal.

Para el caso que nos ocupa, detectar una señal de 13 KHz, emitido en agua de mar, la distancia entre cada hidrófono, $\lambda/2$, debe ser de 5,8 cm. Los hidrófonos se comportan como un micrófono de condensador, tenemos que dotarlos de *Phantom Power* o *Alimentación Fantasma* para que funcionen correctamente, además de amplificar la señal recibida de ellos antes de ser procesada.

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

Los micrófonos de condensador requieren de alimentación externa para funcionar; la forma más fácil de hacerlo es por el mismo cable que transporta la señal de audio, proceso Phantom Power, y recibe este nombre debido a que si se conecta un cable con Phantom Power activo a un micrófono dinámico, el voltaje de alimentación no tendrá ningún efecto; sin embargo, al conectar el mismo cable a un micrófono de condensador, éste activa su circuito condensador y funcionará perfectamente.

Todos estos detalles han sido abordados en el siguiente circuito impreso que aparte de tener en cuenta la corriente fantasma proporciona una ganancia de 53 dB a la señal de salida, además conseguimos reducir espacio, claridad de montaje y disponer de una única señal resultante a la salida amplificad. En la figuras 51, 52 y 53 se muestra el esquemático, diseño virtual 2D a simple cara y resultado final de la PCB.

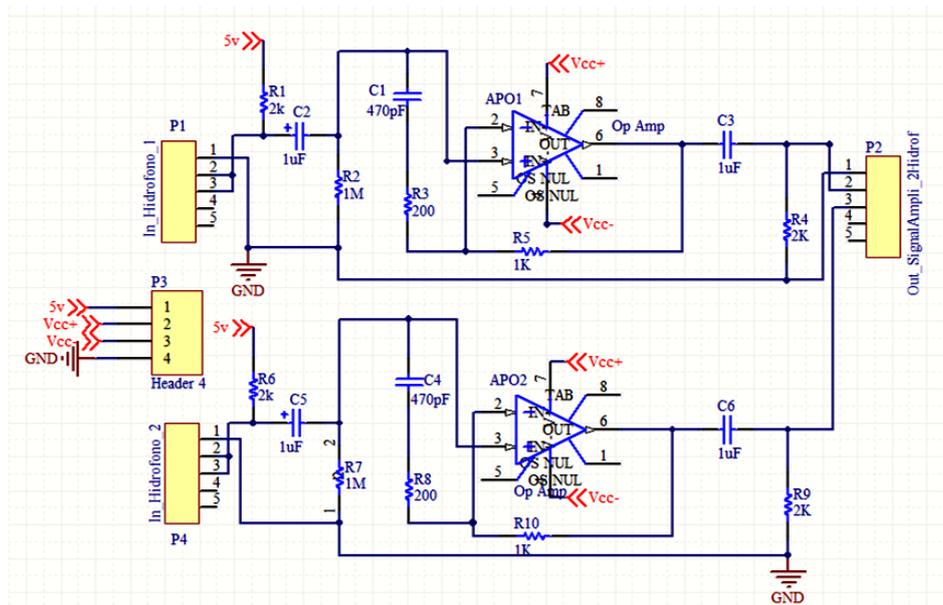


Figura 49. Esquemático preamplificador para hidrófonos

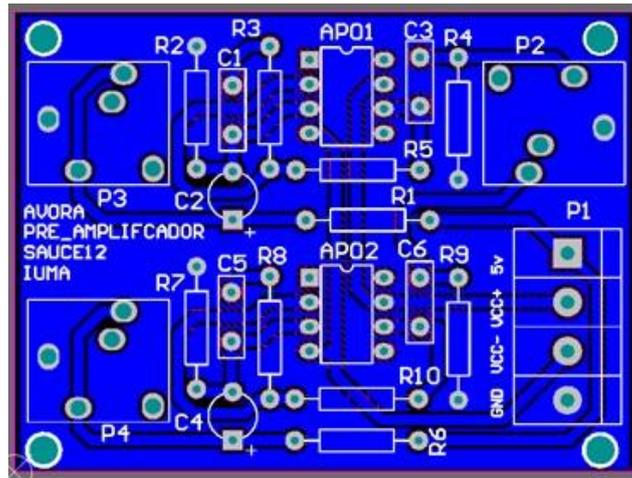


Figura 50. Diseño físico virtual 2D preamplificador para hidrófonos



Figura 51. PCB preamplificador de hidrófonos

3.3. Convertidor de DC-

Existe la necesidad de alimentar con corriente continua negativa algunos elementos electrónicos de nuestro AUV, como es el caso del preamplificador de hidrófonos, para ello se ha de diseñar y fabricar un circuito que a partir del voltaje positivo haga la transformación.

Esta acción la realizamos con este circuito impreso, al que denominamos Converter_DC-, que nos permite trabajar con -12V a partir de 12V. Para ello empleamos el integrado NE555 al que habrá que añadir dos diodos para conseguir ciclos de trabajo inferiores al 50%, para obtener una señal de salida lo más continua posible a valor

negativo. A continuación se muestra el esquemático, diseño virtual 2D a simple cara y circuito impreso resultante en las figuras 54, 55 y 56 respectivamente.

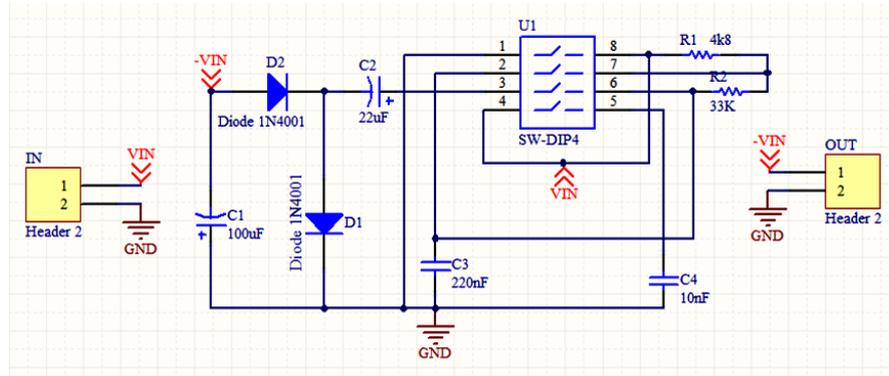


Figura 52. Esquemático Convertido_DC-

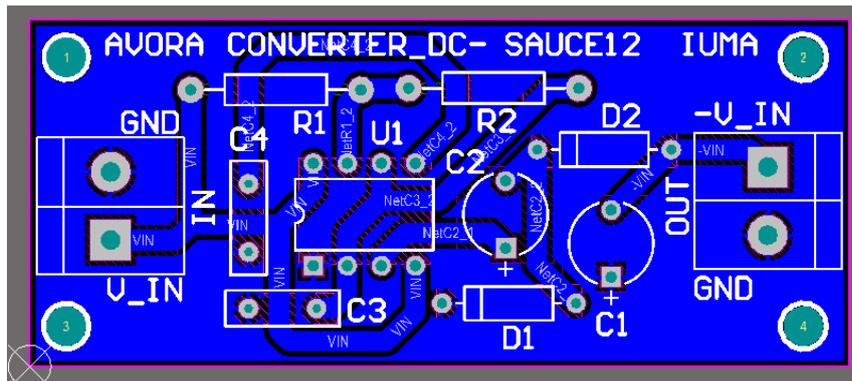


Figura 53. Diseño físico virtual 2D Convertidor_DC-



Figura 54. PCB Convertidor_DC-

3.4. Convertidor de Nivel

A la hora de comunicarnos con los propulsores se hace a través de las controladoras. Cada controladora gestiona dos propulsores, uno de movimiento en el eje X y otro en el eje Y. El modo de trabajo que vamos a operar con las controladoras es serie, pero necesitamos compatibilidad TTL, por tanto se requiere de un circuito que nos haga dicha conversión de nivel de tensión. Por ello necesitamos el circuito convertidor de nivel para convertir de nivel serie a TTL y lo podemos lograr con la ayuda del circuito integrado MAX232.

El MAX232 permite convertir las señales de un puerto serie RS-232 a señales compatibles con los niveles TTL de circuitos lógicos, haciendo de interfaz de transmisión y recepción para las señales RX, TX, CTS y RTS. El circuito integrado tiene salidas para manejar niveles de voltajes del RS-232 (aprox. $\pm 7,5$ V) que las produce a partir de un voltaje de alimentación de +5 V utilizando multiplicadores de voltaje internamente en el MX232 con la adición de condensadores externos. Esto es de mucha utilidad para la implementación de puertos serie RS-232 en dispositivos que tengan una alimentación simple de +5 V.

Como cada controladora gestiona dos motores debemos duplicar la señal RX que las controla, dado que si queremos gobernar el movimiento del vehículo dicha señal debe ir a ambas. En la figura 57, se muestra el encapsulado DIP-16 que tiene el Max232 junto al patillaje. A continuación, figuras 58, 59 y 60 presentamos el esquemático del circuito convertidor de nivel, diseño virtual 2D a simple cara y resultado final de la PCB.

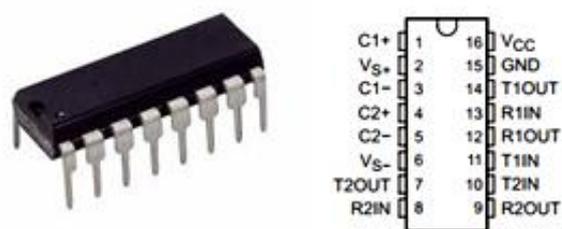


Figura 55. DIP-16 y patillaje del integrado MAX232

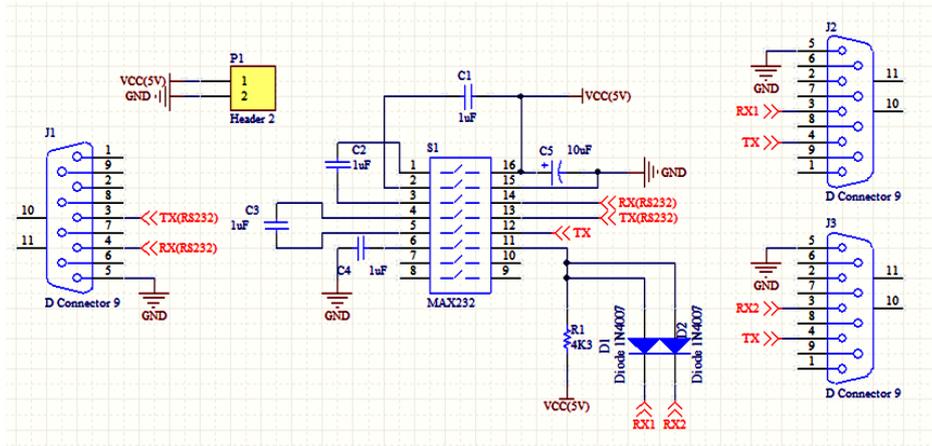


Figura 56. Esquemático Convertidor de Nivel

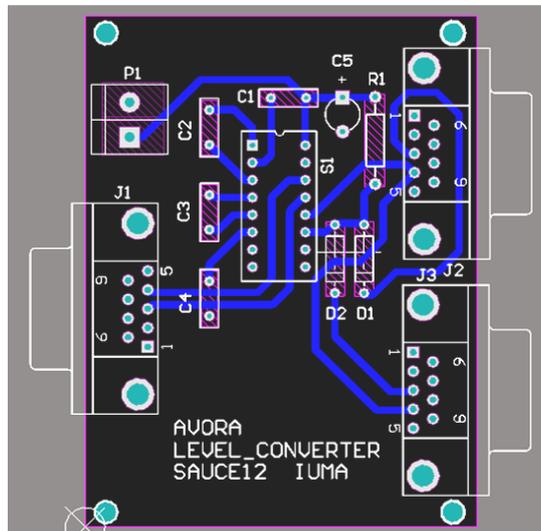


Figura 57. Diseño físico virtual 2D Convertidor de Nivel

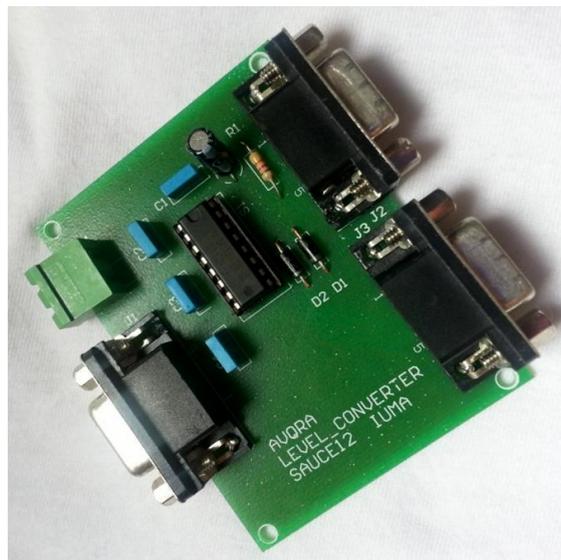


Figura 58. PCB Convertidor de Nivel

3.5. Corte de Potencia

Una de las normas de la competición es que el vehículo tiene que tener un sistema de parada de emergencia. Este sistema lo que proporciona es que tras accionarse se deja de suministrar energía a los motores, proporcionando seguridad en caso de un fallo eléctrico o recuperación por parte de un buzo del AUV.

En un primer momento crear este circuito parecía obvio pero la complejidad radica en disponer de mecanismos tipo interruptores que soporten el amperaje y voltaje de los propulsores y que sus dimensiones sean reducidas.

Para solucionar este problema y poder operar con interruptores de pequeño tamaño y con intensidades bajas, diseñamos un circuito impreso donde tenemos dos circuitos conectados por medio de un optoacoplador. Por un lado estará la señal de control procedente del Arduino que mediante un pulso de arranque nos permitirá saber el estado del interruptor, zeta, a la vez que activaba el optoacoplador y permitirá que el otro circuito, electrónica de potencia [42], suministre o no alimentación a los propulsores.

El optoacoplador o aislador óptico empleado era el 4N35 en el que un diodo emisor de infrarrojos conduce un fototransistor. Estos se utilizan para dos circuitos sin ningún contacto óhmico. El primer circuito, circuito del Arduino o circuito eléctrico está conectado al diodo IR mientras que el otro circuito, circuito de potencia con el fototransistor; esto garantiza que no se produzcan daños en cualquiera de los circuitos, mientras que el otro tiene un fallo.

En la parte del circuito de potencia se operó con transistores rectificadores de potencia mosfet tipo IRF3205, que nos permiten disminuir la resistencia; además se utilizaron fusibles rearmables modelo MF-R600 para evitar que un pico de tensión llegase al resto de componentes electrónicos y se estropeen.

En las figuras 59,61 y 62 se muestra el esquemático, diseño virtual 2D a simple cara y resultado final de la PCB. En la figura 60, se observa una simulación del proceso cuando desde la etapa de control, Arduino, se envía un pulso de arranque, en el caso que la zeta este desactivada, el conjunto queda anclado y hay corriente en los motores; si la zeta se acciona se produce el corte de potencia y aunque se vuelve al estado inicial se ha de proceder con un nuevo pulso desde la unidad de control para realimentar al vehículo. Indicar que en la simulación se observa el pulso en color negro y la respuesta del circuito en color rojo.

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

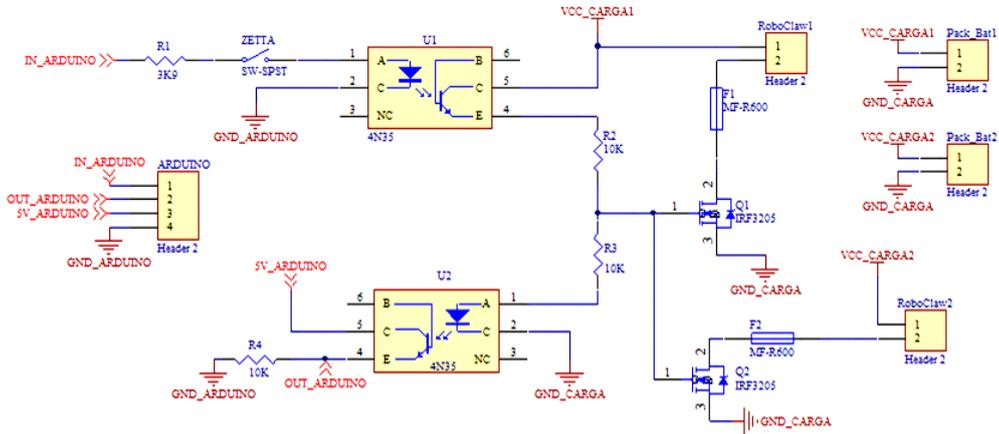


Figura 59. Esquemático Corte de Potencia

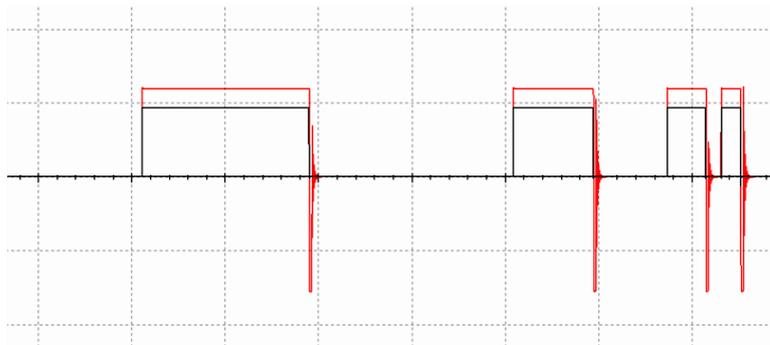


Figura 60. Simulación Corte de Potencia

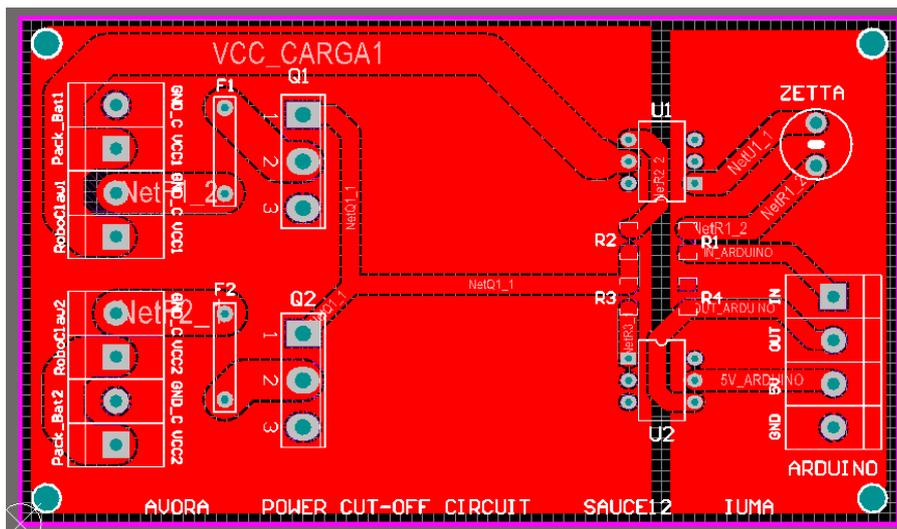


Figura 61. Diseño físico virtual 2D Corte de Potencia

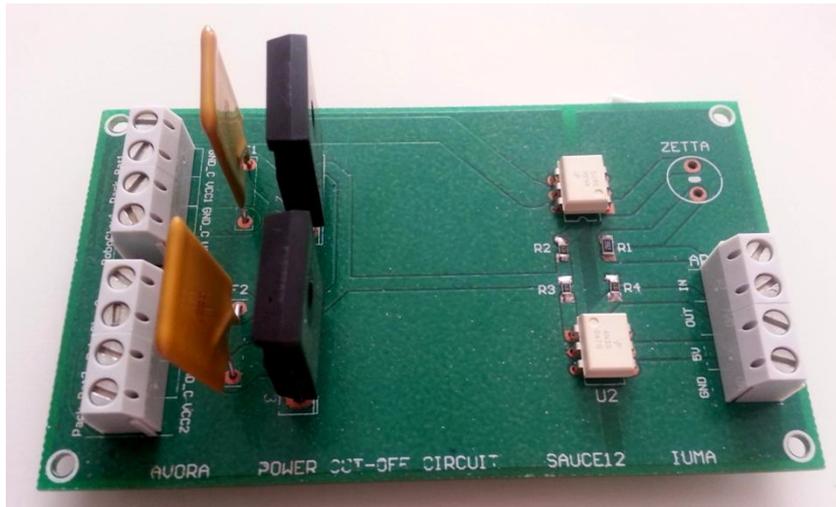


Figura 62. PCB Corte de Potencia

3.6. Sistema de gestión de baterías, BMS

Comentada la tipología que se va a emplear para la batería del AUV, LiFePo₄, ahora se necesita crear el sistema de gestión de baterías. El AUV dispone de dos packs de baterías de 6 celdas para la gestión de los propulsores, figura 63, y un tercer pack de 4 celdas para la electrónica. La capacidad de la batería de la electrónica en un principio se planteó idéntica y sobredimensionada, pero en el transcurso del proyecto del AUV se observó que no se necesitaba tanta capacidad sino 12,8 V, 10 Ah, (4S1P), acción que permitía ahorrar dinero al comprar menos celdas.

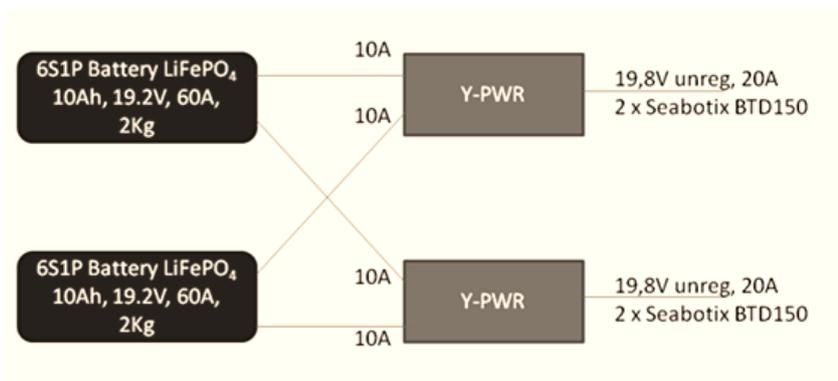


Figura 63. Esquema suministro de potencia en Y a los propulsores

Como se comentó en apartados anteriores debido al tiempo para llevar a cabo la creación del AUV desde cero para la competición, no se pudo desarrollar el BMS propio y se optó por comerciales. Este hecho fue lo que hizo que se desarrollara este proyecto como proyecto fin de carrera.

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

Se ha creado un diseño de BMS cuya principal característica es la modularidad, es decir, que sea adaptable el número de celdas que requiere la batería para cumplir las prestaciones. Debido a que se requiere BMS's para gestionar 6 y 4 celdas, y ambos diseños son idénticos pero con la diferencia de la cantidad de celdas del pack, la descripción del diseño del BMS se hará para la batería de mayor capacidad. El diseño será explicado según lo expuesto en el apartado 2.2.

El proceso de diseño es asistido por ordenador, conocido por sus siglas en inglés, CAD. Una vez se realizado el esquemático y el diagrama de conexiones que formarán las pistas de cobre sobre la placa se obtienen los diversos planos que constituyen las placa impresa, máscaras de la PCB, y que se emplearán en las diversas máquinas de las que dispone el SFP como photoplotter, fresadores, etc., para pasar de una plancha de material rígido, fibra de vidrio o baquelita, cubierto de cobre por ambas caras a un circuito impreso.

Para realizar un circuito electrónico, el diseñador requiere de documentación, hojas técnicas de fabricación y apoyo de herramientas computacionales que orienten en cuanto a las variables, parámetros y componentes se van a emplear, ejemplo de ellos se muestra en la tabla 16. Indicar que es recomendable la elaboración y simulación del esquemático antes de la elaboración de la PCB, el diseñador dispone de una amplia gama de posibilidades como Cadense, National Instruments, MicroSim Corporation, etc, nosotros empleamos el Altium Designer que permite hacer esto junto con las máscaras.

Herramientas Computacionales	Descripción
SwitcherCAD BodeCAD FilterCAD	Realiza esquemáticos, simulación, análisis en tiempo/frecuencia y diseño de filtros electrónicos
SciLab	Conjunto científico para realización de cálculos numéricos y análisis en tiempo/frecuencia (parecido a MatLab ¹²)
SAPWIN	Esquemático y analizador de circuitos. Obteniéndose expresión matemático del circuito
CircuitCalculator	Calcula el ancho de pista, encuentra los valores de resistencias y condensadores comerciales

Tabla 16. Herramientas computacionales

¹² **MatLab**. Lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico y técnico, la visualización y la programación. Sus capacidades son cálculo numérico, análisis y visualización de datos, programación y desarrollo de algoritmos, desarrollo y distribución de aplicaciones.

Además se debe tener en cuenta una serie de técnicas y consideraciones del diseño como son los efectos resistivos de las pistas, el efecto térmico, el efecto capacitivo e inductivo, entre otros.

- **Efectos resistivos de las pistas.** Se debe tener consideraciones con las longitudes, grosor y corriente máxima que deben tener las pistas del circuito impreso, para evitar aumentos de resistencias no deseadas o causar problemas de caídas de tensión. En la ecuación se expresa como se calcula dicho efecto.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.2)$$

R = Resistencia eléctrica, [Ω].

ρ = Resistividad del material, [Ωm].

l = Longitud, [m].

A = Área transversal [m^2].

- **Efecto térmico.** Saber cómo ubicar los componentes respecto a la temperatura que crean o soportan en función de sus interconexiones, interferencias térmicas y electrónicas es importante para evitar variaciones en el valor de resistencia, dado que la resistividad del material se ve afectada por la temperatura.

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha (T - T_0)) \quad (3.3)$$

α = Coeficiente de temperatura.

ρ_0 = Resistencia respecto de una temperatura de referencia.

T = Temperatura.

T_0 = Temperatura de referencia.

- **Efecto capacitivo e inductivo.** Para evitar estos efectos se deben distanciar los circuitos de potencia de los circuitos de control, sabiendo que la capacidad para placas paralelas viene dado por la ecuación 4.3.

$$C = \epsilon_0 \frac{\epsilon_r A}{d} \quad (3.4)$$

ϵ_0 = Constante dieléctrica en el vacío.

ϵ_r = Constante dieléctrica o permitividad del material dieléctrico entre las placas.

A = Área efectiva de las placas.

d = Distancia entre las placas o espesor del dieléctrico.

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

- En circuitos de alta frecuencia, se recomienda que las pistas no presenten ángulos superiores a 45°, debido al riesgo de auto-inducciones sobre las pistas y con ello deformaciones de la señal.
- Se debe separar los planos de tierra analógica y digital o utilizar acoplamientos, transformador, optoacopladores, aisladores de radio frecuencia, etc, para evitar interferencias electromagnéticas en el circuito impreso.
- A modo de evitar ruido de conmutación en los circuitos digitales se deben utilizar condensadores entre fuente y tierra lo más cerca posible a cada integrado. Intercalar un condensador cada 10 integrados o por cada tarjeta electrónica.

3.6.1. Estudio de las diversas etapas del BMS

Comentados las características que debe cumplir y realizar un sistema de gestión de baterías, apartado 2.7, a continuación se va a desglosar y describir nuestro diseñado.

Dicho diseño tiene cuatro partes a analizar, por un lado la carga, la descarga, la fase de balanceador/quemador y por último una protección frente excesos de temperatura. Para que quede claro se muestra en las figuras 64, 65 y 66 el esquemático completo del BMS.

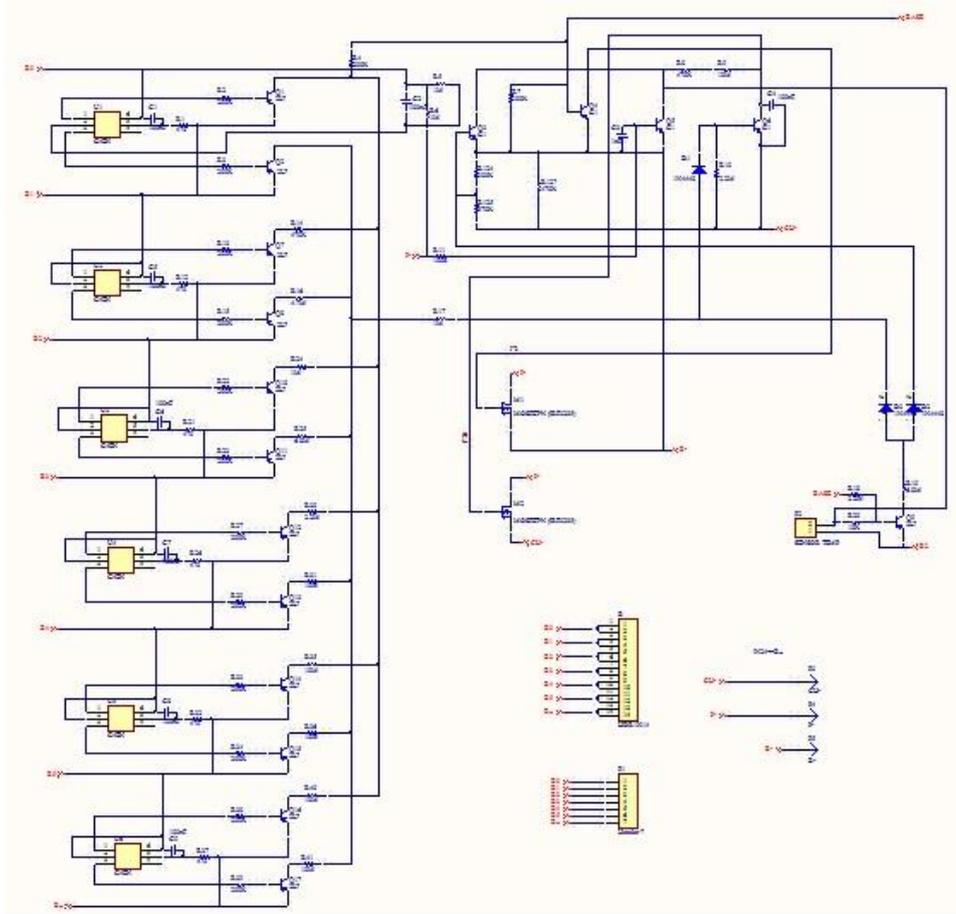


Figura 64. Esquemático BMS

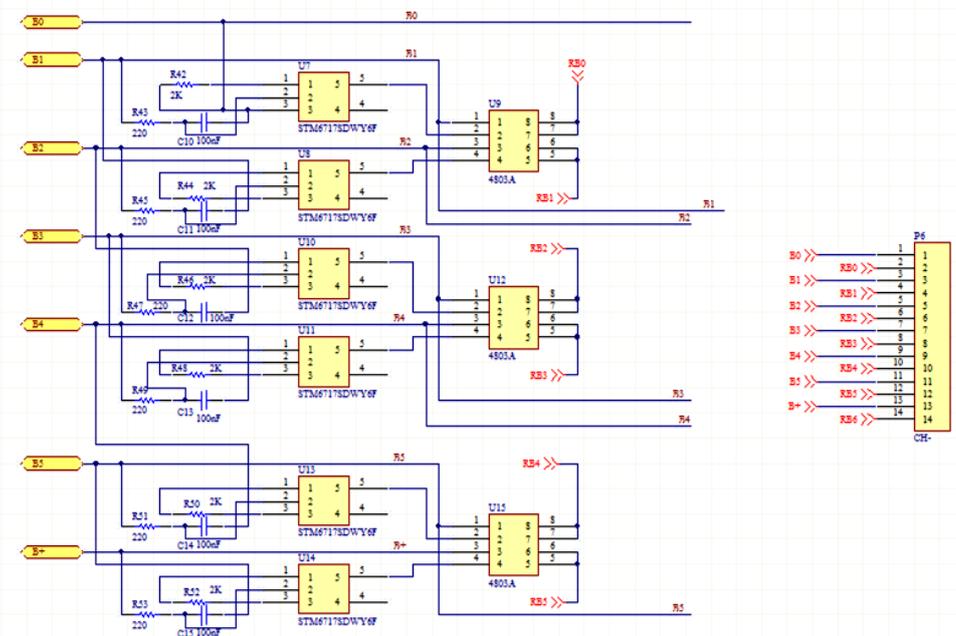


Figura 65. Esquemático balanceador

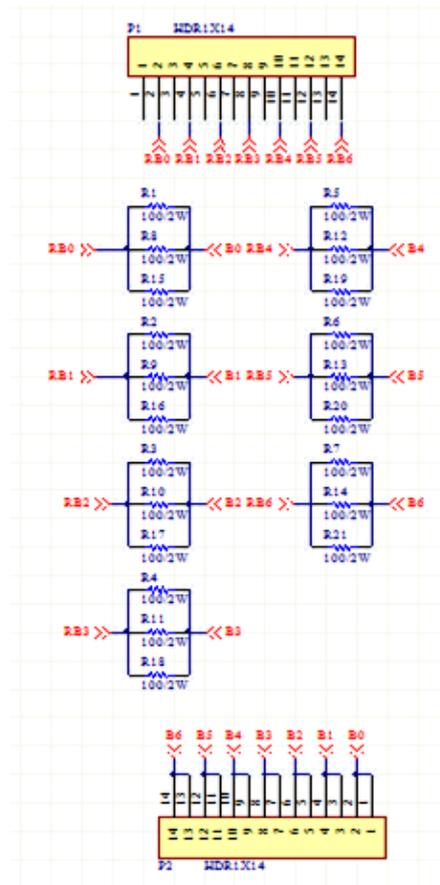


Figura 66. Esquemático quemador

Fase de carga

Haciendo un zoom de la figura 64 hemos obtenido esta nueva, figura 67, donde se ha remarcado en color rojo los componentes que trabajan en el proceso de carga. Indicar que en la parte izquierda de la figura se debería remarcarse todos los transistores de la parte inferior que están entre los bornes de 2 celdas y el integrado, pero para que quede más clara la explicación nos centramos en las celdas B0 y B1.

El integrado G4EN (detallado en la sección 4.2.1), es el encargado de monitorizar las tensiones de la celda, en el momento en que la tensión de la celda llegue a los 4 V cortará la carga de la misma y activará la fase de quemado que se explicará a continuación, 4.2.3.

La carga de la celda se detendrá mediante el transistor “Q6” que es controlado por los transistores asociados a la tensión a supervisar, en este caso, “Q2”. El transistor “Q6” pone en el transistor mosfet “M2”, la señal “CH” que tiene en este instante el valor $V_g = V_s$, ($V_{GS} = 0 \text{ V}$), cortando de esa manera la conducción de corriente desde el drenador a la

fuente (P-/CH). En el momento que la tensión de 4 V decaiga volverá a existir paso de corriente, haciendo $P = CH$ ($V_g > V_s$).

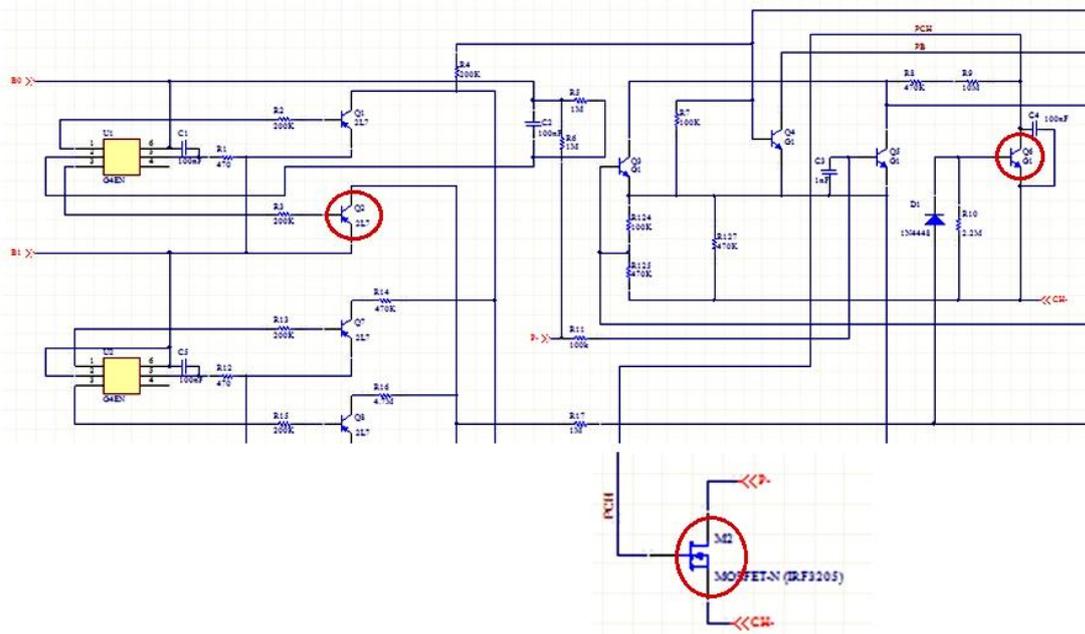


Figura 67. Fase de carga

Fase de descarga

El proceso es análogo al anterior pero ahora se han resaltado en rojo los componentes que trabajan en el proceso de descarga, centrándonos para la explicación en los que están en bornes de las celdas B0 y B1, figura 68.

Este proceso tiene lugar cuando el BMS se encuentra conectado a una carga, propulsores para el caso que nos ocupa, produciéndose la descarga de las celdas. El objetivo es monitorizar constantemente la tensión de cada celda evitando que alguna caiga por debajo de los 2 V.

Observamos que para el caso a estudio el transistor “Q4” es controlado por los transistores asociados a la tensión de 2 V del G4EN, “Q1”. Cuando la tensión baja al valor umbral mínimo de peligro, “Q4” pone en la puerta del mosfet “M1” la señal “B-”, siendo en este instante $V_g = V_s$, ($V_{GS} = 0$ V), cortando de esta manera la conducción de corriente entre “P-“ y “B-“.

En el momento que la celda tenga una tensión por debajo de 2 V se desconectará la carga de la batería de manera instantánea evitando así el posible mal funcionamiento de la

carga asociado y reduciendo el peligro de que se estropee irreparablemente alguna de las celdas del pack.

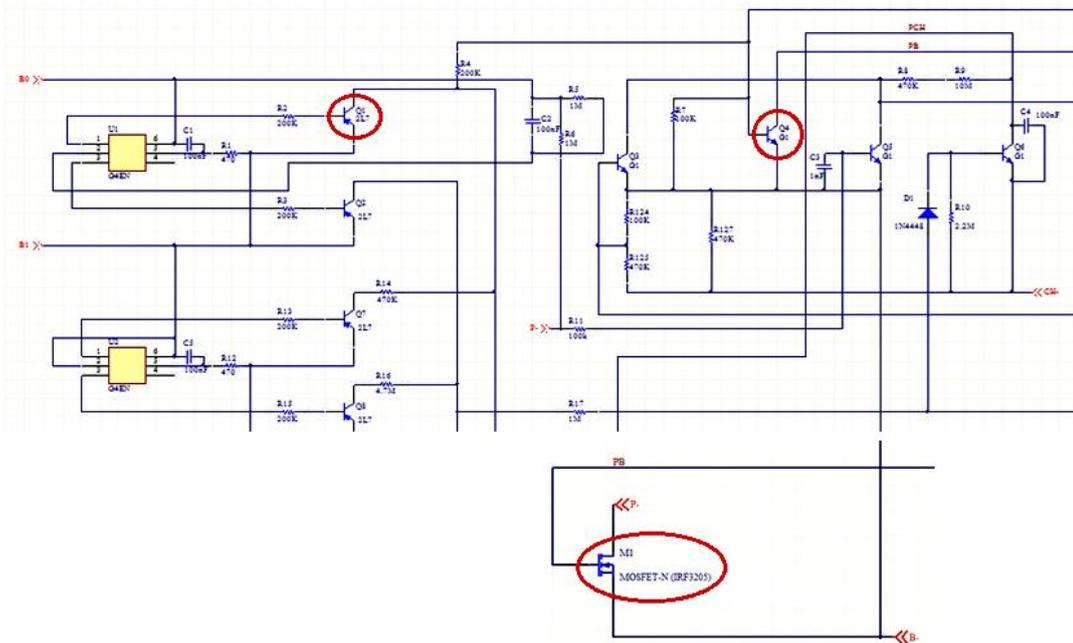


Figura 68. Fase de descarga

Fase de balanceador/quemador

En esta fase se realiza la detección de la tensión de 3,6 V de cada celda, es decir, se realiza una de las funciones principales que debe realizar el BMS como es el balanceo, proceso explicado en el apartado 2.7.2. En nuestro diseño se corresponde con las figuras 65 y 66 a las que aplicaremos zoom para explicar ambos procesos figuras 69 y 70.

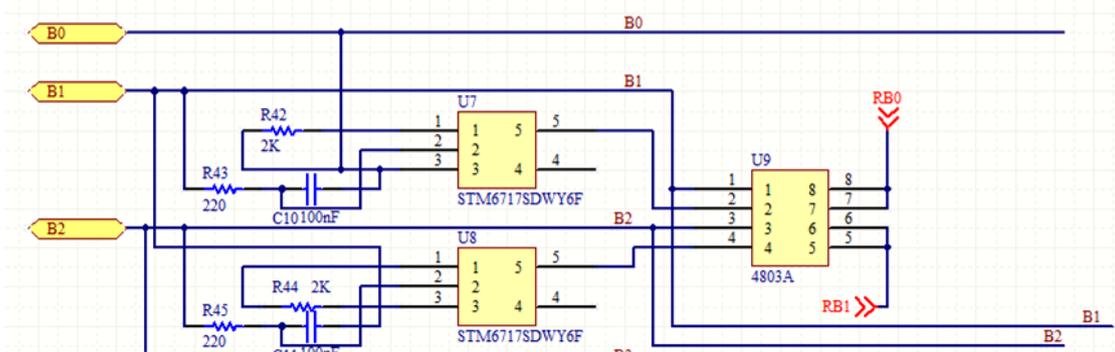


Figura 69. Balanceador

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

La tensión de referencia, $V_{cc1} = 3,6 \text{ V}$, es comparado con la tensión de la celda, esto se hace mediante el circuito integrado STM6717, encargado de controlar la conmutación de los Mosfet de canal-P encapsulados en el circuito integrado 4803A, que será el encargado de derivar el exceso de carga de las celdas a las resistencias de potencia, circuito quemador, figura 72. Este circuito, posee resistencia de 100Ω y 2 W de potencia, colocadas en paralelo de 3 en 3, formando una resistencia total de 33Ω para cada celda.

Mientras que la tensión de la celda supervisada sea superior a la $V_{ref} = 3,6 \text{ V}$, estará quemando el exceso de carga. En el instante que $V_{ref} > V_{celda}$, la tensión de puerta V_g será mayor que la tensión de surtidor V_s y dejará de realizarse el proceso de quemado. En el momento que la tensión de una celda supere el valor de V_{ref} ésta comienza a quemar el exceso de su propia carga a través de sus resistencias de quemado y las celdas que no hayan llegado a esa tensión continuarán cargándose.

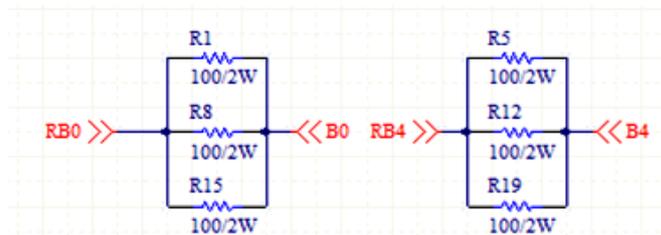


Figura 70. Quemador

En el momento que la tensión de la celda que superó los $3,6 \text{ V}$ vuelva a estar por debajo de dicha tensión dejará de realizarse la fase de quemado y reinicia el proceso de carga.

La necesidad de emplear un balanceador/quemador de las celdas se debe a que aunque todas las celdas son exactamente iguales, pues proceden del mismo fabricante y se realizan con el mismo proceso, no se cargarán ni descargarán a la misma velocidad, ni su vida útil será la misma. Con esto controlamos el estado de carga, el estado de salud de las celdas, es decir, alargamos la vida útil de las celdas que forman la batería.

Protección frente excesos de temperatura

La temperatura del sistema, concretamente la de los mosfets de conmutación canal-N es controlado por un termostato. El circuito asociado, figura 71, le permite actuar tanto en la fase de carga como descarga de la batería. La temperatura del termostato viene fijada de fábrica, en nuestro caso debido a la temperatura máxima que pueden soportar las celdas de LiFePo_4 es de 80°C .

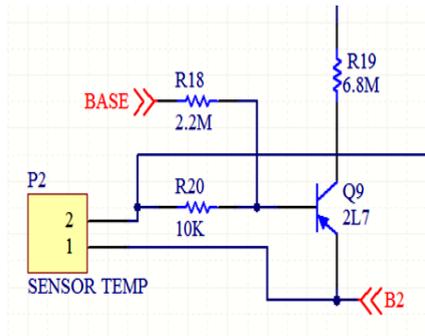


Figura 71. Sensor de temperatura

3.6.2. Componentes

Explicadas las etapas que tiene nuestro BMS figuras 64, 65 y 66 y cómo se han estructurado, toca hablar de los componentes más destacados empleados, indicando sus características.

Como hicimos antes, para que quede todo más claro y que el lector tenga una visión exacta de donde se emplean cada componente, los vamos a comentar a partir de su localización en los esquemáticos realizados, BMS o balanceador/quemador.

BMS

Supervisor de doble tensión G4EN

Elemento empleado para realizar la supervisión de la doble tensión de operación de las celdas del pack de batería. En la figura 72, se puede ver cómo va intercalado entre los bornes positivo y negativo de dos celdas.

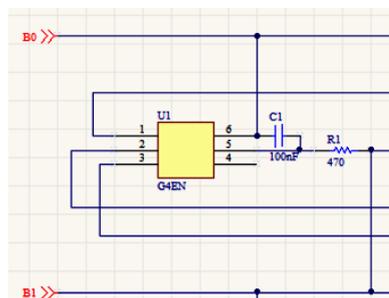


Figura 72. Supervisor

Este componente viene programado con unos umbrales establecidos por el fabricante, estos umbrales dependerán del tipo de tipología empleada en la

fabricación de las celdas y tiene un encapsulado tipo SOT-363, figura 73. Como operamos con celdas LiFePo_4 , los umbrales de tensión mínimos y máximos que nos fija este componente son 2 V y 3.6 V respectivamente.



Figura 73. SOT-363

Etapas de conmutación. Mosfet canal-N

Componente empleado en el ciclo de carga y en el de descarga para realizar la conmutación entre la carga y las resistencias de quemado respectivamente. Debido a que operamos con una batería de poca capacidad sólo será necesario un mosfet de canal-N para cada proceso.

En la figura 74, se muestran los esquemas a seguir en el proceso de carga, (carga de las baterías), y el proceso de descarga (alimentación al propulsor). A continuación, figura 75, se muestra la conexión realizada para el circuito impreso.

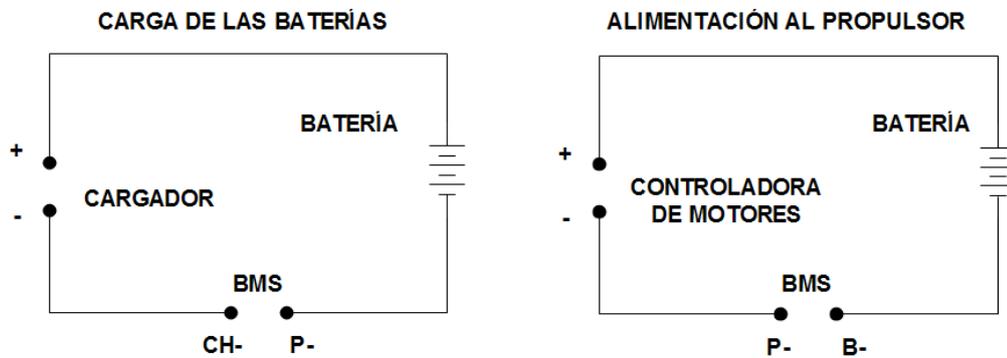


Figura 74. Esquema carga/descarga

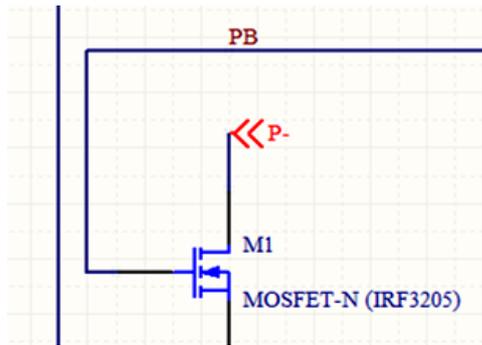


Figura 75. Mosfets de conmutación

Estos mosfet soportan una corriente de drenador de hasta 110 A y una tensión de drenador-fuente de hasta 55 V a temperatura ambiente. Tienen un encapsulado TO-220AB al que se les podría acoplar un disipador estándar si fuese necesario, observándose en la figura 76, su patillaje e imagen real.

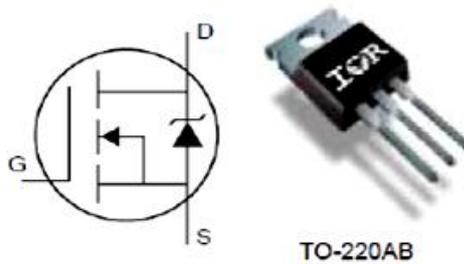


Figura 76. Mosfet canal-N IRF-3205

En el caso de tener una batería de mayor capacidad, se incorporan mosfet en paralelo a éste en ambas etapas, hecho que hace que la corriente se distribuye entre ellos, reduciendo las pérdidas por conducción, mejorando así las características térmicas de los mismos.

Sensor de temperatura

Se ha implementado como medida de seguridad para el BMS incorporar un sensor de temperatura, para realizar el corte de energía por exceso de temperatura en las etapas de conmutación, como se comento anteriormente con el título “*Protección frente excesos de temperatura*”. En la figura 77 se muestra el patillaje y la forma física del componente al uso.

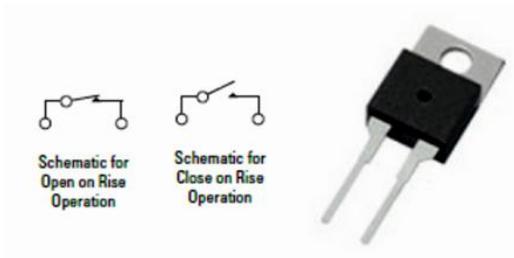


Figura 77. Sensor de temperatura

Balancedor/Quemador

Supervisor de tensión

El componente STM6717 es empleado para supervisar/comparar el sobrevoltaje de la celda en la etapa de carga, con ello se evita el funcionamiento de la celda a un valor de tensión de 4 V, evitando que opere fuera de la zona de seguridad.

En la figura 78, se muestra su patilla junto a su encapsulado tipo SOT23-5, además para que se tenga una mejor comprensión de su funcionamiento, en la figura 79 se muestra mediante un diagrama de bloques.

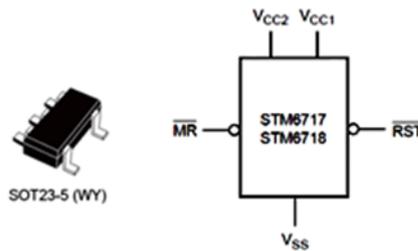
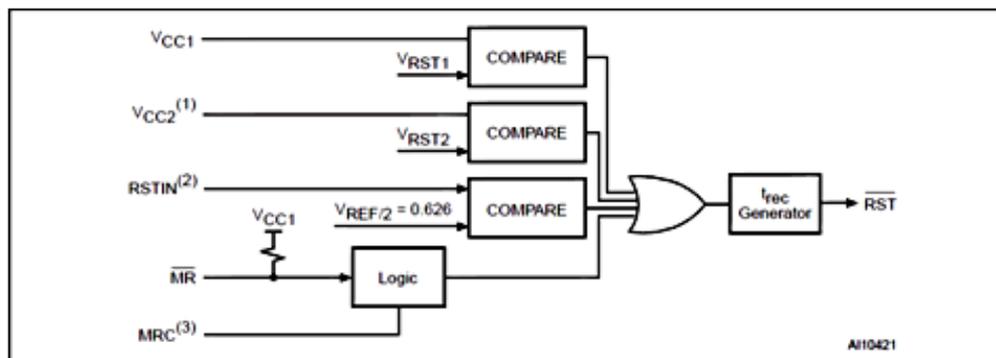


Figura 78. Supervisor de tensión STM6717



Note: 1. VCC2 Input is available on STM6717/18/19/20/77/78.
 2. RSTIN available only on STM6719/20/79/80.
 3. MRC available only on STM6777/78/79/80.

Figura 79. Diagrama de bloques STM6717

Conmutación Mosfet canal-P

El componente 4803A está compuesto por dos mosfets canal-P dentro de un encapsulado SOIC-8, que se emplea como elemento conmutador hacia el quemador en el momento que sea necesario eliminar el exceso de carga de la celda. En la figura 80 se muestra la imagen del componente junto a su estructura interna.

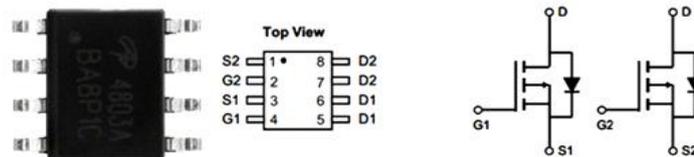


Figura 80. Componente 4803A (Mosfet Canal-P)

Resistencia de potencia

Las resistencias de potencias empleadas en el quemador son las encargadas de disipar el exceso de energía de aquellas celdas que sobrepasen los 4 V en el proceso de carga, tienen un valor de 100 Ω y 2 W de potencia, con encapsulado de montaje superficial 2512, figura 81.



Figura 81. Resistencia de potencia SMD

3.6.3. Diseño PCB's

A la hora de diseñar el circuito impreso tenemos que tener en cuenta que nuestro diseño cuanta con dos PCB's por un lado tenemos la estructura del BMS y por otro el balanceador/quemador.

A la hora de comenzar el diseño hay que tener en cuenta las dimensiones de la placa, nos podríamos decantar por tarjetas estándar pero debido al uso que va a recibir nuestro BMS, sus proporciones vienen fijadas por su ubicación en el AUV y ésta es el diámetro del tubo de pvc donde irá la batería. Indicar que se realizará de menor tamaño que dicho diámetro pues en el futuro se pretenderá tener un vehículo de menores dimensiones, más compacto y robusto además de bajo coste, medidas que caracterizan el diseño del vehículo autónomo creado por el equipo AVORA.

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

Realizados los esquemáticos, nos toca la creación de la placa de circuito impreso, a la que además de darle tamaño debemos indicar si es de simple o doble capa de cobre (trabajos con paneles de fibra de doble capa), esto se indica en el panel de Altium denominado *Layer Stack Manger*. A partir de los footprint de cada componente indicado en el esquemático, se importan las conexiones y las nets pertenecientes al esquemático, que aparecerán en el contorno de la placa junto con sus conexiones. Es ahora cuando el diseñador bajo su experiencia y cumpliendo las reglas de diseño deberá realizar la colocación y conexionado de los componentes, para finalmente realizar el chequeo de las mismas, cuyo resultado de errores debe ser nulo. El programa permite realizar auto-ruteado o ruteado manual, en circuitos mediados o grandes es recomendable hacerlo de forma manual, de realizarse de forma automática es muy probable que aparezcan fallos en las reglas de diseño o que no se logre completar el ruteado.

Todo lo comentado en el párrafo anterior, se puede ver a continuación desde la figuras 82 a la figura 85, indicar que tendremos dos placas y que las imágenes corresponden al proceso de diseño del BMS junto al balanceador dado que el diseño del quemador va en otra placa. Además, se explican las reglas de diseño que se impusieron y un sumario con el resultado final de errore, figura 89.

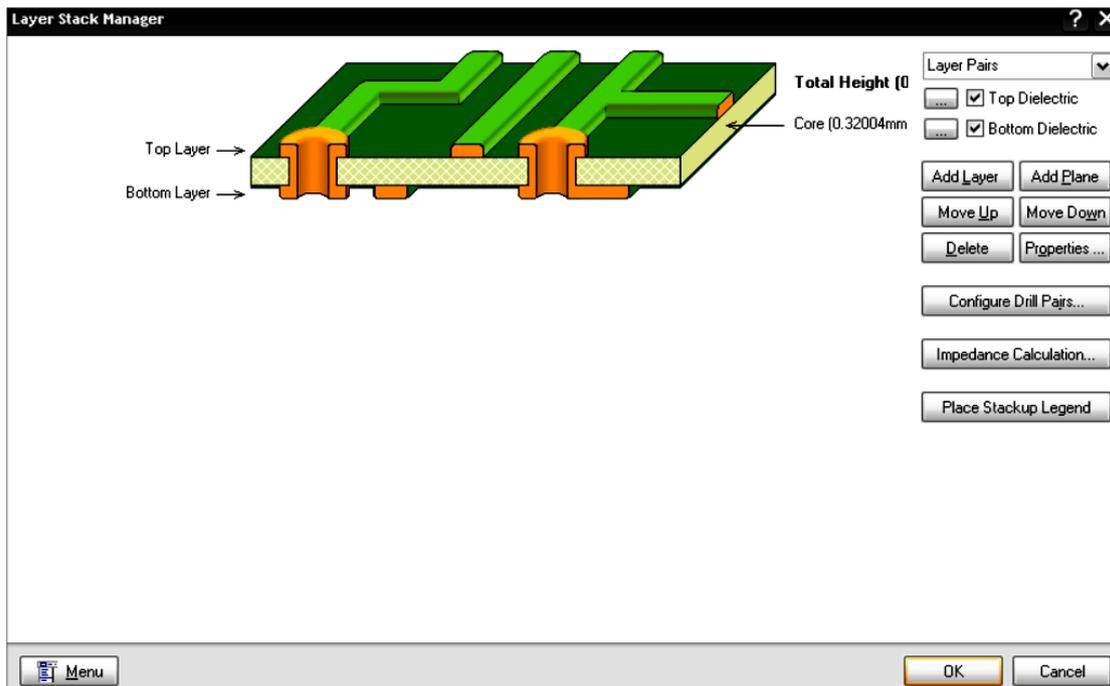


Figura 82. Layer stack manager

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

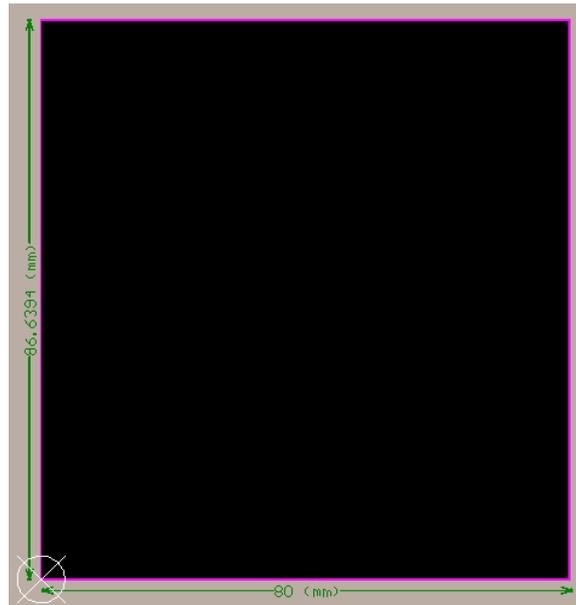


Figura 83. Dimensiones placa BMS y balanceador

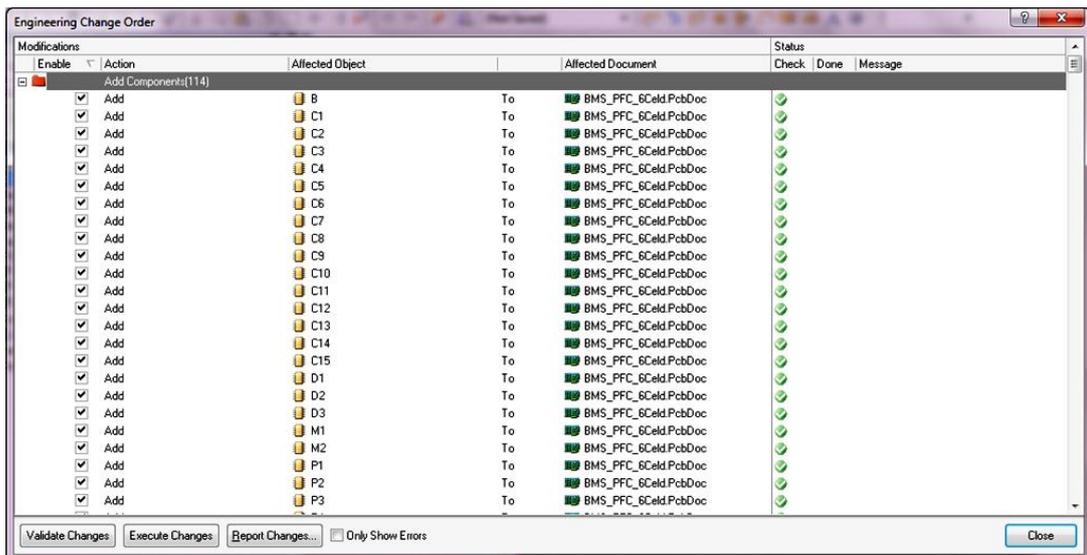


Figura 84. Importación de componentes

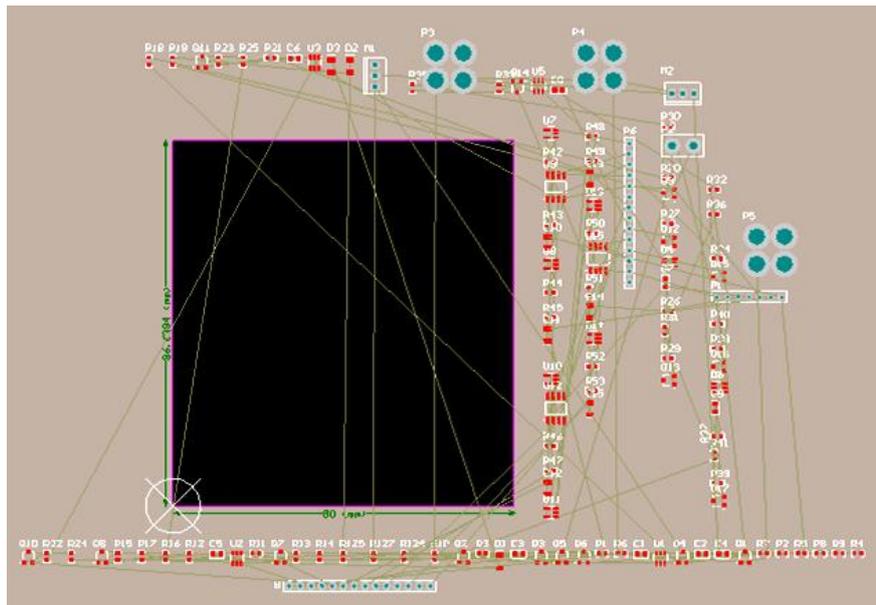


Figura 85. Resultado importación de componentes

Como se ha comentado a la hora del diseño de la placa de circuito impreso éstas deben seguir unas reglas, dentro de las diversas y variadas que existen destacamos las siguientes:

- Electrical clearance. Se debe definir la distancia mínima que tiene que haber entre pistas, debido a la maquinaria existente en las instalaciones del SFP podemos llegar a una separación mínima de 0.2 mm para obtener PCB de máxima calidad.



Figura 86. Electrical clearance

- Routing width. Establece el tamaño máximo, mínimo y preferente con el que se podrá realizar el ruteado de las pistas. Debido a las necesidades de dimensiones, efectos resistivos, capacitivos, etc, en nuestro caso podemos operar con un tamaño mínimo de 0,2 mm y máximo de 6 mm.

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

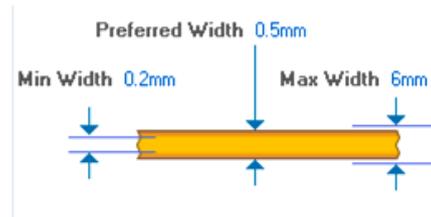


Figura 87. Routing width

- Routing vías style. Determina el tamaño de las vías empleadas tanto el diámetro interno/externo como mínimo/máximo. Nosotros lo determinamos en función de los taladros de nuestras CNC y requerimientos, trabajando con vías de 0,3 mm y corona de 0,6 mm tamaños mínimos y máximo de 1 mm y 2 mm respectivamente.

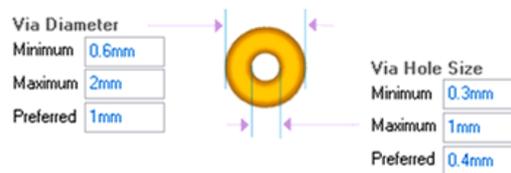


Figura 88. Routing vías style

Colocados los componentes, realizado el ruteado con las reglas de diseño impuestas, es hora de realizar el chequeo del diseño de la placa impresa y corregir todos los posibles fallos hasta obtener cero errores.

Summary	
Warnings	Count
Total	0
Rule Violations	Count
Short-Circuit Constraint (Allowed=No) (All),(All)	0
Un-Routed Net Constraint ((All))	0
Height Constraint (Min=0mm) (Max=25.4mm) (Preferred=12.7mm) (All)	0
Hole Size Constraint (Min=0.3mm) (Max=5mm) (All)	0
Hole To Hole Clearance (Gap=0.254mm) (All),(All)	0
Net Antennae (Tolerance=0mm) (All)	0
Width Constraint (Min=0.2mm) (Max=6mm) (Preferred=0.5mm) (All)	0
Clearance Constraint (Gap=0.2mm) (All),(All)	0
Power Plane Connect Rule(Relief Connect)(Expansion=0.508mm) (Conductor Width=0.254mm) (Air Gap=0.254mm) (Entries=4) (All)	0
Total	0

Figura 89. Design rule check

Planos obtenidos

En este apartado se expondrán los diversos planos que se obtuvieron tras el diseño final de los circuitos impresos necesarios para el diseño final del sistema de gestión de baterías.

Las dos primeras figuras se corresponden con el resultado completo de ambas placas de circuito impreso y en las restantes se muestran los planos top, bottom y serigrafía de ambas.

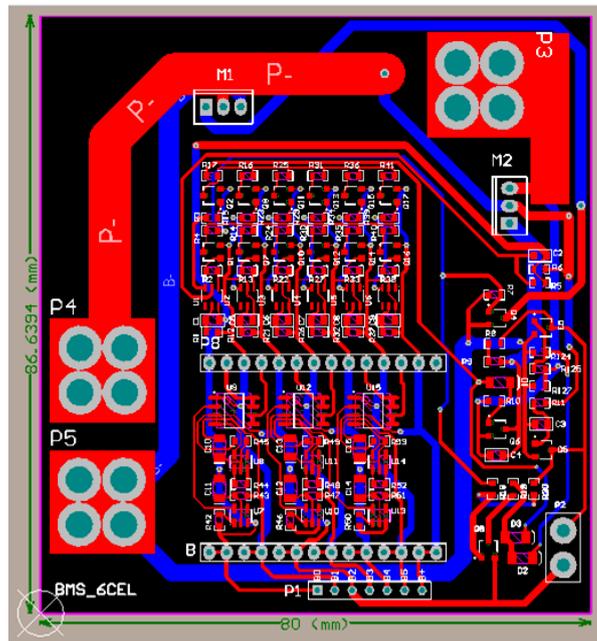


Figura 90. Placa ruteada BMS/Balancedor

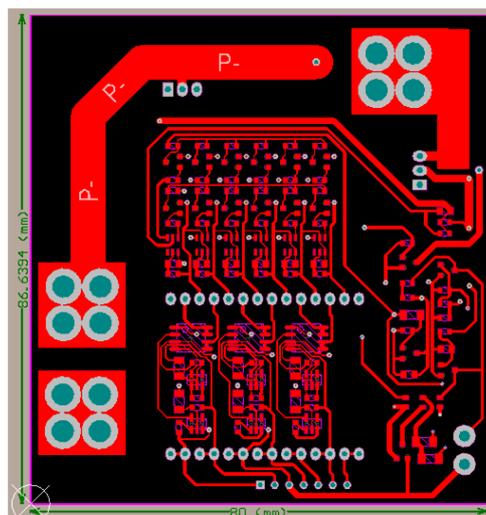


Figura 91. Top layer BMS/Balancedor

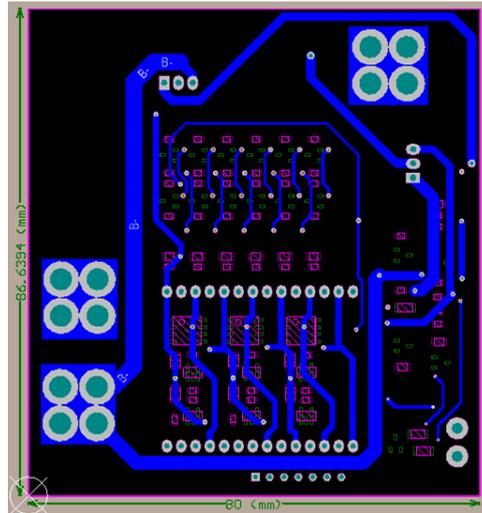


Figura 92. Bottom layer BMS/Balanceador

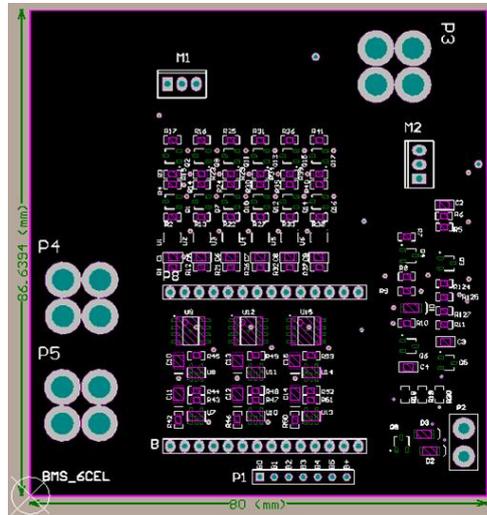


Figura 93. Top serigrafía BMS/Balanceador

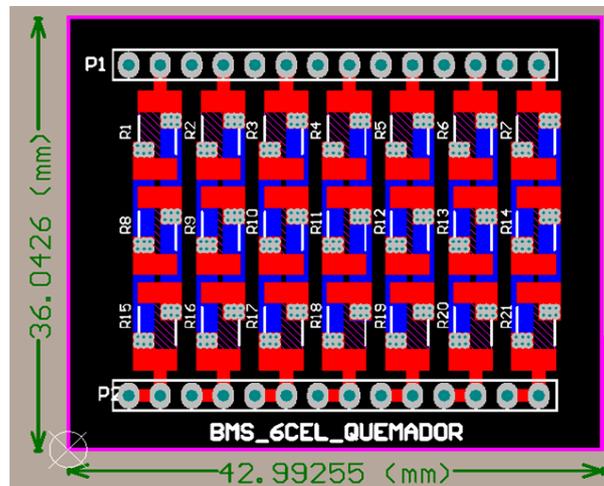


Figura 94. Placa ruteada Quemador

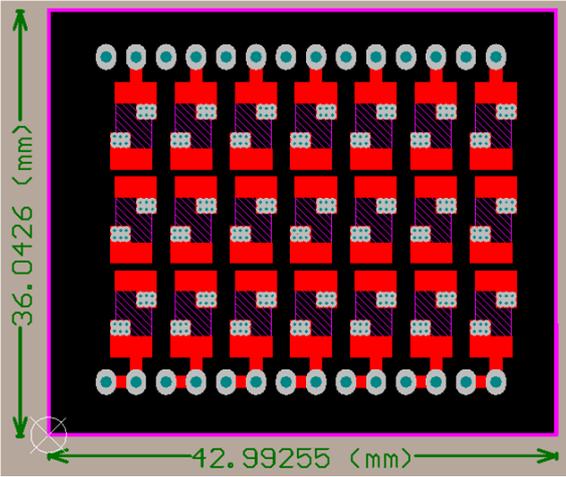


Figura 95. Top layer Quemador

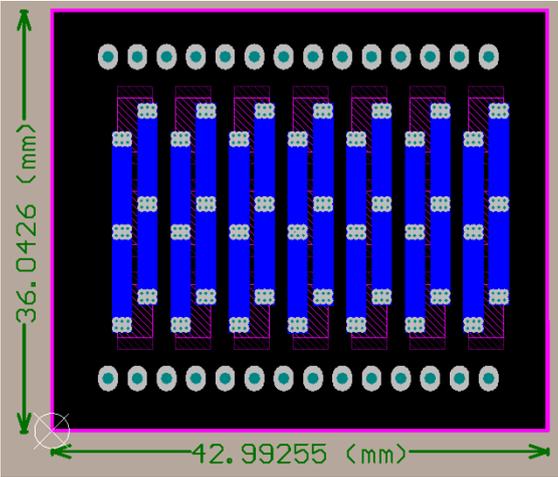


Figura 96. Bottom layer Quemador



Figura 97. Top serigrafía Quemador

3.6.4. Fabricación, montaje y revisión PCB's

Realizado el diseño software del circuito impreso del sistema de gestión de baterías propuesto, toca realizar los procesos para obtener la placa de forma física. Para ello se comienza con la realización de los fotolitos que obtendremos a partir de exportar las diversas capas del circuito impreso del Altium. Un fotolito es un negativo fotográfico en blanco y negro que se emplea como plantilla para el circuito impreso.

Posteriormente llevaremos la plancha de fibra de vidrio virgen laminada y revestida de cobre, para nuestra PCB por ambos lados, de sustrato de FR4 (Epoxy/Fibra de vidrio), a la máquina de control numérico computarizado para realizar las perforaciones requeridas que serán las vías y pads de la placa.

Tenemos el panel taladrado, es momento de realizar el proceso de metalización para tener conectividad entre ambas caras, resultado figura 98. En la parte interior de los orificios se aprecia la deposición de cobre.



Figura 98. Resultado del proceso de metalización

El proceso continua laminando la placa para transferir el patrón de las diversas capas a la PCB. Al circuito impreso se le aplica una película fotosensible, dry film, a la que le ponemos el fotolito para llevarlo a insolar y revelar. Seguidamente se realiza el revelado en la unidad multipropósito, para quedarnos con un panel con la imagen del circuito. Este paso se realizará en varias ocasiones, procesos de máscaras antisoldante, solder mask, y la máscara de serigrafía, top/bottom overlay.

Pasamos al atacado químico donde se eliminará todo el cobre de la placa que este sin dry film, quedando definido así el layout de la PCB. A continuación se realiza el proceso de solder mask, donde se aplica un polímero en forma de pintura que proporciona tanto protección a las pistas de cobre como prevención sobre cortos de soldadura entre vías próximas. Para concluir con la serigrafía.

Se inicia el proceso de montaje de los componentes del circuito impreso. Se inicia con el montaje de los componentes smd, para ello se crea una máscara de soldadura,

CAPÍTULO 3. EQUIPAMIENTO DEL AUV Y DESARROLLO DE CIRCUITOS IMPRESOS

stencil, que se alinearla con la placa y a la que se aplica pasta de soldadura, quedando ésta únicamente en los pads. Los componentes smd se montan con las diversas pick and place de las que dispone el SFP, debido a que es un prototipo emplearemos la gran mayoría excepto el modelo Philips CSM 84 III.

Se han de soldar los componentes smd montados, para ello se emplea el horno de refusión, el cual ha sido programado bajo un perfil de soldadura para pasta sin plomo. Sólo nos queda el montaje de los componentes de inserción para concluir con la fabricación del circuito.

Antes de comenzar a testear el circuito impreso y ver que cumple con su fin se ha de realizar una inspección óptica. Ésta se realiza en dos pasos, la primera mediante un microscopio digital donde se analizan fallos evidentes o de mal montaje, y la segunda es mediante un sistema de inspección óptica automática, AOI, que se basa en varios métodos para detectar posibles errores de montaje y soldadura, los cuales se describen a continuación.

- I. Object Recognition. Se encarga de identificar los patrones de la imagen que corresponden a los objetos físicos en una vista. Realiza una comparación entre la imagen del componente montado con una ideal del objeto y nos informa de cualquier diferencia.
- II. Blow Analysis. Empleando una imagen basada en pixels, agrupamos los pixel del componente, se forma un patrón previa separación del objeto del fondo y con esta geometría se detecta cambios de rotación y tamaño.
- III. Template Matching with Normalized Gray Scale Correlation. Se inicia entrenando al sistema con una imagen pixelada ideal para cada componente. Posteriormente se escanea la PCB para encontrar las imágenes que se asemejan a la imagen pixelada. Para ello utilizan sistemas de correlación con escalas de grises o color normalizadas como medida de comparación.

Indicar que la máquina puede proporcionar muchos falsos errores debido a que los patrones ideales que tiene almacenados fueron realizados en condiciones óptimas de luz y puede que no sean las mismas en el momento del estudio, de ahí que haya que saber interpretar los fallos que nos proporcione, para saber que es un error y que no lo es. A continuación mostramos los fallos más comunes en el montaje de componentes smd detectados, figura 99. De izquierda a derecha vemos la falta de un componente, la no existencia de pasta de soldadura en un pad, un componente rotado y un efecto Manhattan en la soldadura.

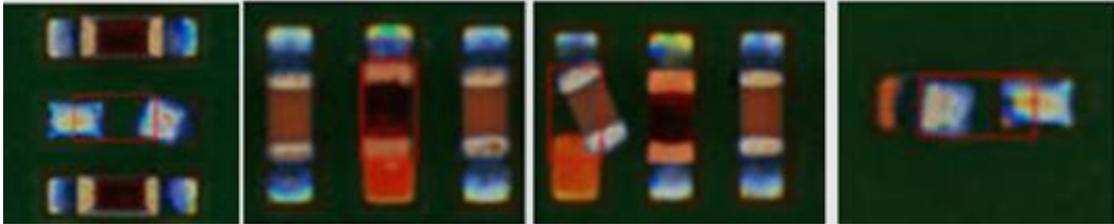


Figura 99. Fallos comunes detectados en componentes smd tras inspección AOI

3.6.5. Placa final

Realizado el diseño, fabricación, montaje de componentes e inspecciones oportunas, podemos ver en la figura 100, el resultado final de nuestro circuito impreso del BMS.

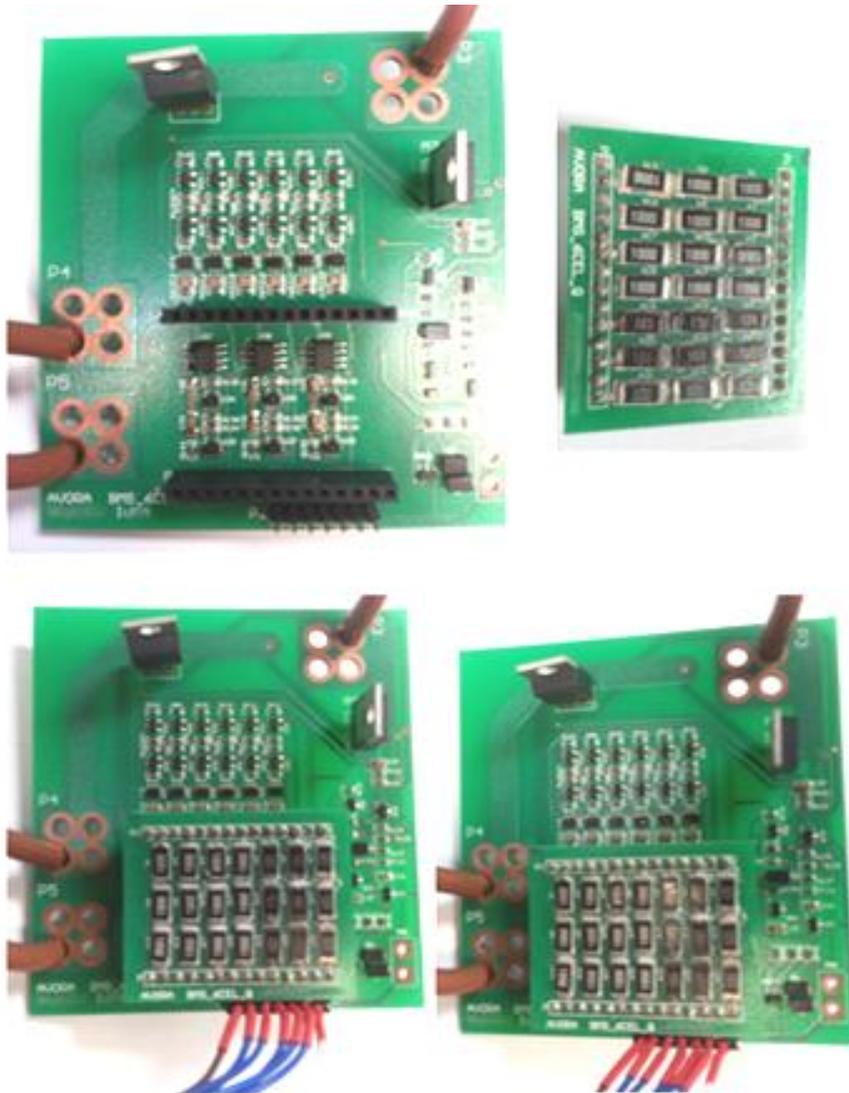


Figura 100. BMS resultante

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A la hora de realizar los análisis y resultados de lo implementado tendremos que hablar desde dos aspectos por un lado los obtenidos en la competición SAUC-e, en donde se llevo el vehículo autónomo indicando toda la experiencia y resultados.

Dentro de esto, indicaremos qué miembros de AVORA fueron a la competición, qué aportaciones realizaron y como transcurrieron los días en el evento.

Por otro lado, se muestran los diversos análisis y tests para comprobar el correcto funcionamiento del BMS. Para ellos primero se ha de descargar el pack de celdas de baterías a través de una resistencia de potencia, para verificar que cuando uno de las celdas alcance los 2 V el sistema debe desconectarse y no volverá a activarse hasta que todas las celdas sobrepasen los 2,2 V.

También se hará una prueba de carga de la batería, para verificar que en el instante que una de las celdas del pack llegue a una tensión de 3,6 V se inicie el proceso de quemado para eliminar dicho exceso. Este proceso se repetirá durante el proceso de carga de la batería cuando una celda exceda su tensión, comprobando así el correcto funcionamiento del sistema del balanceo.

4.1. AVORA en SAUC-e

En este apartado se contará la experiencia del equipo AVORA en su primera participación en la competición SAUC-e que se celebro en 2012. Se explicará cómo el equipo llegó a la competición tanto sus miembros como el AUV, qué resultados se obtuvieron en la competición y los contactos o aportaciones que se recogieron de esta aventura.

4.1.1. Miembros y estado del vehículo

En la evolución de crear un AUV para participar en la competición europea de robótica submarina SAUC-e muchos fueron los interesados pero sólo unos pocos los agraciados.

Al inicio, este proyecto despertó gran interés dentro el colectivo universitario de la ULPGC, pero debido a diversos factores, algunos miembros fueron dejando de colaborar en el proyecto de desarrollo del vehículo. A continuación detallamos los miembros y las funciones principales desempeñadas, anotando que directa o indirectamente todos participamos en las tareas del resto y en ocasiones se invirtieron responsabilidades para que el proyecto llegara a buen puerto.



Figura 101. Formación del equipo AVORA



Figura 102. AUV AVORA

- **Aarón Martínez.** Responsable del diseño y construcción del AUV. Es el fundador de un start-up, *Biomecan*, dedicado al desarrollo de prototipos personalizados.
- **Anil Mahtani.** Team leader del equipo AVORA. Responsable de la gestión interna del equipo y de la arquitectura software del AUV.
- **Daniel García.** Responsable del diseño de la arquitectura hardware, e integración electrónica. Debido a que le surgió una oferta de trabajo justo antes de la partida de AVORA a la competición no pudo estar insitu, fue un miembro muy activo durante todo el proceso del proyecto.
- **David Morales.** Responsable del diseño y fabricación de circuitos impresos para el vehículo.
- **Enrique Fernández.** Responsable del desarrollo de software y la integración. Durante el desarrollo del proyecto y tras su finalización tenía una instancia en el CIRS, departamento del VICOROB en el parque científico y tecnológico de la Universidad de Girona, debido a que estaba haciendo el doctorado cuyo proyecto era “Test and Evaluation of the FastSLAM Algorithm in a Mobile Robot”. (En la figura 101 no está debido a que se encontraba realizando su doctorado en Girona).
- **Federico Maniscalco.** Desarrollador de software.
- **Luis Sánchez.** Responsable del sistema acústico y visión del vehículo.

Antes de realizar el desplazamiento a la competición el equipo ya había enviado el documento informativo, paper [43]. En él se describió todo lo realizado incluyendo algunas acciones que por falta de tiempo no se pudieron realizar pero que se indicaron porque se habían tenido en cuenta y sólo faltaban su implementación. Aclarar que AVORA realizó alguna inmersión en Gran Canaria, ya fuese en el muelle de Taliarte o en la piscina de la que se disponía, pero eran acciones puntuales sin tener todo el AUV montado.

En cuanto al vehículo, éste llegó a Italia, sin estar completamente testado debido a que el proyecto se realizó en tiempo record, 5 meses. Tiempo empleado en realizar la construcción, comprobación de estanqueidad, desarrollo software y hardware y control de movilidad. Esto implicó que el AUV era un ROV y que en la semana que se disponía en el NURC, debíamos conseguir desconectar el cordón umbilical y que navegara por sí sólo integrando por completo a la unidad de control los sistemas de sonar, visión y realización de pruebas que se tenían funcionando correctamente de forma independiente. Estos

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

dispositivos funcionaban correctamente ya que se habían implementado sus drivers a la vez que se habían simulado con datos muy parecidos a los que nos íbamos a encontrar en la arena de la competición. Quedaba introducir el vehículo en el agua de la Spezia y ver como se comportaba antes de dejar que se moviese de forma autónoma.

4.1.2. Competición SAUC-e12

Llegados a Italia, quedaba una dura semana de trabajo para poder conseguir que en los 3 últimos días (1 para pre-clasificar, 1 para clasificar y 1 para la final) realizar un buen resultado frente al resto de equipos, de los cuales algunos tenían una experiencia de hasta 12 años como el caso del SONIA TEAM¹³ o equipos de primer año como el Turtle.

En la figuras 103 se pueden ver los 14 equipos participantes en SAUC-e 2012 y sus vehículos submarinos autónomos respectivamente, los cuales, se nombran a continuación: Aquatis, ESIEA Paris; AVALON, Universidad de Bremen; AVORA, Universidad Las Palmas de Gran Canaria; Barracuda, Universidad de Cambridge; Cissau, ENSTA Bretagne; Hanse, Universidad de Lübeck; Nautilux, École Polytechnique; Nessie, Universidad de Heriot-Watt; Ryujin, ESIEA Paris; Saucisse, ENSTA Bretagne; Smarte, Universidad de Lübeck; Sonia, École de Technologie Supérieure du Quebec; Turle, Universidad de Florencia; UWESub, Universidad de West England.



Figura 103. Equipos y vehículos SAUC-Ee12

Para AVORA, el mero hecho de estar rodeado de los mejores estudiantes de todas partes de Europa y Canadá, además de poder intercambiar conceptos y visiones sobre

¹³ SONIA TEAM. <http://sonia.etsmtl.ca/en/>

vehículos autónomos submarinos y robótica, cuando unos meses atrás parecía imposible llegar al evento, ya era todo un sueño hecho realidad.

La arena se dividía en dos partes idénticas, para que así el obtener datos antes de la clasificación se pudiese hacer de forma fluida. Observamos que las condiciones de poca visibilidad y corrientes superficiales eran mayores a las estimadas. Además la organización proporcionó dos espacios de trabajo, uno interior para poder soportar las elevadas temperaturas y otro exterior pegado a las piscinas saladas y la arena, figura 104.

En los primeros 5 días, los equipos tienen sesiones de prácticas y recogida de datos de la arena, pero algunos equipos en realidad utilizan este tiempo para la construcción de sus vehículos, como fue nuestro caso.

En el primer día, miembros de AVORA tomaron una cámara submarina e hicieron una grabación de la arena para posteriormente ver como actuaban con ellas nuestros algoritmos; mientras otros terminaban la construcción del vehículo para finalmente hacer pruebas preliminares en la piscina, como se puede ver en la figura 105. Concluyendo la jornada, cuando ya el vehículo estaba a un paso de pasar el test de verificación por parte de los jueces y saltar el día siguiente a la arena, debido a un descuido a la hora del cierre de conectores, entró agua en él. Ahora tocaba iniciar todo lo avanzado y analizar componente a componente si estaba estropeado o no y con ello verificar si podíamos seguir en la competición.



Figura 104. AVORA en las instalaciones del CMRE



Figura 105. Primer día de trabajo de AVORA en el CMRE

Se inició el proceso de verificación de los componentes y se comprobó que los componentes electrónicos no habían sufrido daños, ahora tocaba instalarlos nuevamente, trimar el vehículo para que flotase de la forma más estable posible y finalmente superar el test de verificación. Durante este proceso, el periodo de calificación empezó, así que estábamos a contrarreloj si queríamos clasificarnos y pasar a la final.

Pasado el test de verificación del vehículo con éxito, se procedió a ajustar los algoritmos de navegación y con la falta de tiempo tocaba hacerlo directamente en la arena, pero éstas estaban ocupadas por los equipos en sus correspondientes ventanas de clasificación, concluyendo el día de pre-clasificación sin poder lanzarnos a la mar.

Al día siguiente, día de clasificación, se realizaron simulaciones de la primera prueba descrita en el apartado 2.1.1, y reajustes de la programación; pero al final, debido a que no teníamos suficientes test y tras el percance inicial, se decidió no poner en riesgo nuevamente el vehículo, optamos por no utilizar nuestra ventana clasificatoria para tal fin sino emplearla para seguir realizando pruebas de sonar, visión y navegación en modo ROV.



Figura 106. Pruebas de sonar y visión en modo ROV

Tras no optar a la final, los ánimos se vinieron un poco abajo, pero no estaba todo perdido aún, podíamos tener nuestra oportunidad en la categoría de “impresionar a los jueces” y no irnos con uno de los premios de consolación por haber participado. Reutilizando el proyecto fin de carrera de Aarón Martínez que trabajó con un par de gafas de realidad virtual nos pusimos manos a la obra. Gracias a que nuestro vehículo disponía de un sistema de cámara pan-tilt, y giróscopo se desarrollo un software que combina estos dos elementos con las gafas a las que se les incorporó una unidad inercial externa, así el usuario una vez colocado el casco podía mover su cabeza arriba-abajo/izquierda-derecha, visualizando a través de las gafas esos mismos moviendo pero desde la perspectiva de la cámara del vehículo sumergido. Todo esto se preparó durante la noche y el mismo día de la gran final.

Cuando llegó el momento de esta competición, los jueces quedaron impresionados con nuestro sistema de telepresencia y fue curioso observar como hacían turnos para jugar con nuestro sistema. Al final del día se procedió a la entrega de premios y sorprendidos nos quedamos cuando nos otorgaron el primer premio de impresión al jurado, figura 107. Se puede ver un resumen de las clasificaciones y premios otorgados en SAUC-e 2012 en la tabla 17.



Figura 107. Premio obtenido en SAUC-e

El hecho de participar en este evento nos permitió conocer algunos vehículos increíbles, como el sorprendente diseño en forma de disco con tres propulsores con eje de rotación adicional para lograr movimiento vertical y luz estroboscópica que simulaban a un OVNI pero submarino. Por otro lado estaba la experiencia y horas dedicadas en el desarrollo del SONIA, diseño robusto y flexible implementado con un software

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

extraordinario, primer clasificado aquí y terceros en la RoboSub del mismo año. En definitiva que SAUC-e fue una gran experiencia que no dejó a nadie indiferente.

EQUIPOS	CLASIFICACIÓN GENERAL	CLASIFICACIÓN IMPRESIÓN AL JURADO	PREMIO OBTENIDO
<i>SONIA</i>	1º Clasificado		
<i>HANSE</i>	2º Clasificado		
<i>SAUCISSE</i>	3º Clasificado		
<i>AVORA</i>		1º Clasificado	
<i>NAUTILUX</i>		2º Clasificado	
<i>CISSAU</i>		3º Clasificado	
<i>AVALON</i>			Best Qualifier
<i>SMARTE</i>			Innovation
<i>BARRACUDA</i>			Engineering
<i>NESSIE</i>			Multinational
<i>AQUATIS</i>			Best Use of Resources
<i>RYUJIN</i>			Affordability
<i>TURTLE</i>			Rookie of the Year

Tabla 17. Resultados SUAC-e 2012

4.2. Test y análisis del Sistema de Gestión de Baterías

Realizado el diseño, fabricación y montaje es momento de verificar el correcto funcionamiento del mismo. Como se comentó al inicio de este capítulo se ha de realizar dos pruebas una en carga y otra en descarga, para corroborar que el circuito impreso funciona y cumple con su fin.

Para que se queden claros los valores obtenidos en las pruebas y que el lector no tenga que subir a la tabla 9 para ver las características de las baterías LiFePo⁴ empleadas, las indicamos a continuación:

Voltaje nominal	3,6 V	Protección sobrevoltaje	4±0,05 V
Capacidad	10 Ah	Protección subvoltaje	2 V
Corriente de carga máxima	5 C (5 A)	Ciclos de vida	2.000 ciclos
Máxima descarga continua	10 C (10 A)	Impedancia	≤10 mΩ

4.2.1. Test y análisis del proceso de descarga

El objetivo de este test es verificar que cuando la batería suministra potencia al elemento físico que la demande, en la prueba en el laboratorio una resistencia de potencia y en la realidad los propulsores, el sistema de gestión de batería verifica la descarga de cada celda del pack y cuando observa que una de las celdas alcanza una tensión en sus bornes de 2 V el sistema se desconecta y no vuelva a activarse hasta que todas las celdas sobrepasen los 2,2 V.

En la figura 108, se muestra el conexionado empleado para llevar a cabo esta prueba, una vez se ha implementado y con el detalle de que cada cable sea de igual longitud iniciamos el proceso de monitorizar la tensión en bornes de cada celda así como la del pack de baterías cada 10 minutos. Los resultados obtenidos se recogen en la tabla 18.

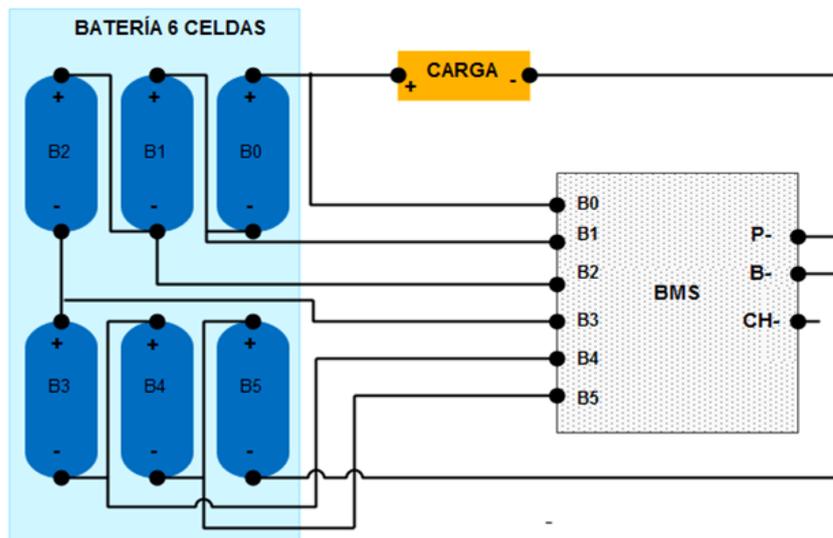


Figura 108. Conexionado fase de descarga

Tiempo: 0 min BMS: ON		Tiempo: 10 min BMS: ON		Tiempo: 20 min BMS: ON	
CELDA	Vcelda (V)	CELDA	Vcelda (V)	CELDA	Vcelda (V)
B0	3,6	B0	3,42	B0	3,25
B1	3,5	B1	3,32	B1	3,15
B2	3,5	B2	3,3	B2	3,14
B3	3,6	B3	3,45	B3	3,28
B4	3,45	B4	3,40	B4	3,23
B5	3,6	B5	3,42	B5	3,25
V Pack	21,25	V Pack	20,31	V Pack	19,3

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Tiempo: 30 min BMS: ON		Tiempo: 40 min BMS: ON		Tiempo: 50 min BMS: ON	
CELDA	Vcelda (V)	CELDA	Vcelda (V)	CELDA	Vcelda (V)
B0	3,08	B0	2,94	B0	2,72
B1	2,99	B1	2,86	B1	2,64
B2	2,97	B2	2,84	B2	2,62
B3	3,10	B3	2,97	B3	2,75
B4	3,06	B4	2,93	B4	2,70
B5	3,08	B5	2,95	B5	2,72
V Pack	18,28	V Pack	17,49	V Pack	16,15

Tiempo: 60 min BMS: ON		Tiempo: 70 min BMS: OFF	
CELDA	Vcelda (V)	CELDA	Vcelda (V)
B0	2,50	B0	2,30
B1	2,43	B1	2,23
B2	2,41	B2	1,99
B3	2,53	B3	2,32
B4	2,49	B4	2,29
B5	2,50	B5	2,30
V Pack	12,36	V Pack	13,43

Tabla 18. Resultados prueba de descarga

De los datos obtenidos en la prueba se observa que la tensión de cada celda cae aproximadamente un 5% de media cada 10 minutos y que transcurridos 70 minutos desde que se inicia la prueba el BMS se desconecta debido a que la celda “B1” ha decaído por debajo de los 2 V. Como era de esperar, las celdas no se descargan al mismo ritmo debido como ya se habló durante este documento que las celdas no son exactamente iguales aunque se fabrican con el mismo proceso y tienen SOH diferente.

4.2.1. Test y análisis del proceso de carga

El objetivo es comprobar que el BMS en el proceso de carga de las celdas de la batería, suministrando una corriente de 2 A a las mismas, es capaz de detectar cuando una celda alcanza los 3,6 V y en ese instante se inicie el proceso de quemado del exceso de

energía de tal celda. Este proceso se realiza repetitivamente hasta que el pack de batería quede balanceado.

Cuando alguna de ellas llegue a los 4 V se desconectará su carga y en el momento que baje de los 3,6 V se volverá a activar. La comprobación del buen funcionamiento del BMS en este proceso se dará por finalizado cuando todas las celdas alcancen los 3,6 V.

En la figura 109, se muestra el conexionado empleado para llevar a cabo esta prueba, cuyos resultados obtenidos se recogen en la tabla 19, tras haber monitorizado cada 10 minutos.

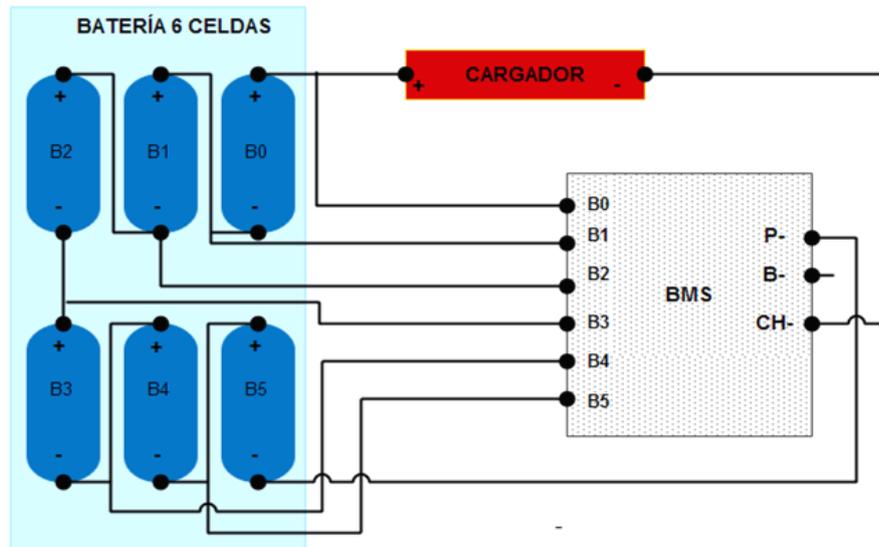


Figura 109. Conexionado fase de carga

Tiempo: 0 min		Tiempo: 10 min		Tiempo: 20 min	
CELDA	Vcelda (V)	CELDA	Vcelda (V)	CELDA	Vcelda (V)
B0	2,30	B0	2,47	B0	2,67
B1	2,23	B1	2,40	B1	2,60
B2	1,89	B2	2,46	B2	2,26
B3	2,32	B3	2,60	B3	2,88
B4	2,29	B4	2,47	B4	2,66
B5	2,30	B5	2,42	B5	2,67
V Pack	13,33	V Pack	14,82	V Pack	15,74

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Tiempo: 30 min		Tiempo: 40 min		Tiempo: 50 min	
CELDA	Vcelda (V)	CELDA	Vcelda (V)	CELDA	Vcelda (V)
B0	2,82	B0	2,98	B0	3,19
B1	2,75	B1	2,91	B1	3,12
B2	2,41	B2	2,57	B2	2,78
B3	3,18	B3	3,46	B3	3,74 √
B4	2,81	B4	2,97	B4	3,18
B5	2,82	B5	2,98	B5	3,19
V Pack	16,79	V Pack	17,87	V Pack	19,20

Tiempo: 60 min		Tiempo: 70 min		Tiempo: 80 min	
CELDA	Vcelda (V)	CELDA	Vcelda (V)	CELDA	Vcelda (V)
B0	3,39	B0	4,01 OFF	B0	3,85 √
B1	3,32	B1	3,52	B1	3,59
B2	2,98	B2	3,18	B2	3,61 √
B3	4,02 OFF	B3	3,90 √	B3	3,60
B4	3,38	B4	3,58	B4	3,63 √
B5	3,39	B5	4,01 OFF	B5	3,90 √
V Pack	20.48	V Pack	22.20	V Pack	22.18

Inicia el proceso de quemado. √ Desconexión de la celda. OFF

Tabla 19. Resultados prueba de carga

De los datos obtenidos en la prueba se observa que la primera celda que supera los 3.6 V es la celda “B3” a los 45 minutos aproximadamente, iniciándose el proceso de quemado. A los 60 minutos la celda “B3” debe ser desconectada del sistema, pues supera los 4 V de tensión y es a partir de este valor cuando las celdas LiFePo⁴ pasan a ser inestables. A partir de la hora de prueba, se observa que hay varias celdas que superan los 3,6 V, iniciando el BMS los procesos de balanceado y quemado correctamente. Se considera que transcurridos 80 minutos del inicio del test, el pack de baterías está completamente cargado.

CAPÍTULO 5. PRESUPUESTO

En la siguiente tabla se muestra el presupuesto detallado relativo a los componentes y el material empleado en la fabricación y montaje de las diferentes placas de circuitos impresos realizadas.

Primeramente, se realiza el desglose correspondiente a los circuitos realizados para la competición SAUC-e y a continuación el correspondiente del sistema de gestión de baterías.

COMPONENTES	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	TOTAL (€)
Conector Macho 4 PIN	1	0,64	0,64
Condensador Polarizado	2	0,07	0,14
Condensador	4	0,02	0,08
Mini-Jack	3	2,55	7,65
OPA37GP	2	3,58	7,16
Resistencias	10	0,08	0,80
TOTAL			16,47 €

Tabla 20. Presupuesto materiales Preamplificador de Hidrófonos

COMPONENTES	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	TOTAL (€)
Conector Macho 2 PIN	2	0,32	0,64
Condensador Polarizado	2	0,07	0,14
Condensador	2	0,02	0,04
Diodo 1N4001	2	0,18	0,36
NE555	1	0,49	0,49
Resistencias	2	0,08	0,16
TOTAL			1,83 €

Tabla 21. Presupuesto materiales Convertidor DC-

CAPÍTULO 5. PRESUPUESTO

COMPONENTES	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	TOTAL (€)
Conector Macho 2 PIN	1	0,32	0,32
Condensador Polarizado	1	0,07	0,07
Condensador	4	0,02	0,08
Diodo 1N4007	2	0,12	0,24
MAX232	1	1,16	1,16
Resistencias	1	0,08	0,08
RS232 Hembra	3	1,42	4,26
TOTAL			6,21 €

Tabla 22. Presupuesto materiales Convertidor de Nivel

COMPONENTES	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	TOTAL (€)
Conector Macho 4 PIN	3	0,64	1,92
Fusible Autoreseteable	2	0,26	0,52
Mosfet Canal-N	2	1,86	3,72
Resistencias 1206	4	0,08	0,32
Optoacoplador 4N35	2	0,61	1,22
Pulsador IP69	1	17,30	17,30
TOTAL			25,00 €

Tabla 23. Presupuesto materiales Corte de Potencia

MATERIAL	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO (€)
Placa circuito impreso 1.6 mm	2	9,08	18,16
Productos químicos	-	-	20,00
Pintura	-	-	20,00
Materiales varios	-	-	25,00
Mano de obra	-	-	75,00
TOTAL			158,16 €

Tabla 24. Presupuesto de fabricación

La duración real de esta parte del proyecto fue de unos cinco meses, de los cuales a la fabricación de las PCB's descritas se les dedicó unos dos meses de lo que se deduce un total de 240 horas. En la tabla 25, se muestra el presupuesto final del coste de los circuitos impresos montados en el AUV para la competición SAUC-e.

FASES	PRECIO
Componentes	16,47 €
	1,83 €
	6,21 €
	25,00 €
Fabricación	158,16 €
Mano de obra	4.320,00 €
IGIC	7%
TOTAL	4.844,61 €

Tabla 25. Presupuesto final 1

Detallamos a continuación el coste de fabricación de los sistemas de gestión de baterías:

COMPONENTES	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	TOTAL (€)
Conector Hembra	6	1,32	7,92
Conector Macho	4	1,32	5,20
Condensadores 0805	18	0,01	0,18
Condensadores 1206	12	0,01	0,12
Diodo 1N4448	6	0,26	1,56
Mosfet Canal-N	4	2,19	8,76
Mosfet Canal-P	6	0,69	4,14
Resistencias 0603	110	0,08	8,80
Resistencias 2512	42	0,67	28,02
Sensor Temperatura	2	8,06	16,12
Supervisor G4EN	12	0,55	6,60
Supervisor STM6717	12	0,83	9,96
Transistor PNP	26	0,36	9,36
Transistor NPN	8	0,36	2,88
TOTAL			109,62 €

Tabla 26. Presupuesto materiales BMS_6CELL

CAPÍTULO 5. PRESUPUESTO

COMPONENTES	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	TOTAL (€)
Conector Hembra	3	1,32	3,96
Conector Macho	2	1,32	2,64
Condensadores 0805	7	0,01	0,07
Condensadores 1206	4	0,01	0,04
Diodo 1N4448	3	0,26	0,78
Mosfet Canal-N	2	2,19	4,38
Mosfet Canal-P	2	0,69	1,38
Resistencias 0603	41	0,08	3,28
Resistencias 2512	15	0,67	10,05
Sensor Temperatura	1	8,06	8,06
Supervisor G4EN	4	0,55	3,30
Supervisor STM6717	4	0,83	4,98
Transistor PNP	9	0,36	3,24
Transistor NPN	4	0,36	1,44
TOTAL			47,60 €

Tabla 27. Presupuesto materiales BMS_4CELL

MATERIAL	UNIDADES	PRECIO UNITARIO (€)	PRECIO (€)
Placa circuito impreso 1.6 mm	1	9,08	9,08
Productos químicos	-	-	20,00
Pintura	-	-	20,00
Materiales varios	-	-	25,00
Mano de obra	-	-	75,00
TOTAL			149,08 €

Tabla 28. Presupuesto de fabricación

En la tabla 29 se presenta el presupuesto total del sistema de gestión de baterías, indicando que este proceso ha tenido una duración de cuatro meses de los que se deduce un total de 480 horas.

FASES	PRECIO
Componentes	109,62 €
	47,60 €
Fabricación	149,08 €
Mano de obra	8.640,00 €
IGIC	7%
TOTAL	9.572,54 €

Tabla 29. Presupuesto final 2

Se representa el coste total de fabricación de todos los circuitos implementados durante este proyecto en la tabla 30:

	PRECIO
Presupuesto final 1	4.844,61 €
Presupuesto final 2	9.572,54 €
TOTAL	14.417,15 €

Tabla 30. Presupuesto final

El presupuesto total del proyecto asciende a **14.417,15 €**.

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍA Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Tras la experiencia adquirida y el buen resultado obtenido por AVORA, contando con un escaso presupuesto y tiempo respecto al resto de participantes y proyecto de esta magnitud, tanto la ULPGC como PLOCAN se comprometieron a que este proyecto submarino no sea olvidado y proponer la unión de ambas entidades para intentar apoyar las futuras participaciones de AVORA en diversas competiciones de robótica submarina.

Por su parte, los miembros aquí citados de AVORA, se comprometieron a ayudar a las futuras generaciones de alumnos interesados, documentar el estado actual de los componentes y conexionado actual e intentar promover junto con los nuevos miembros la búsqueda de sponsor y capital externo.

Respecto al Sistema de Gestión de Baterías, es un elemento de vital importancia si se desea no estropear la batería de un dispositivo electrónico, de ahí el interés tras no poder implementarse en un primer momento y luchar por ello hasta conseguirlo.

Al haber conseguido un primer prototipo funcional todas aquellas acciones que se plantean como futuras para el mismo, serían de interés que se pudiesen llevar a cabo, y por qué no, desarrollarlas en el caso de realizar algún máster o estudio de este tipo, pues se tocaría más lo correspondiente a software y menos el hardware que ya está funcionando y que en caso de cambiar de tipología a analógica, se podría decir que es cambiar elemento a elemento.

También se ha adquirido conocimiento respecto a las baterías, tanto en lo referido a su funcionamiento como en su composición, centrándonos sobre todo en las de Litio y en particular las de tipo Litio-Hierro-Potasio, LiFePo_4 debido a que son las más empleadas en vehículos autónomos por el conjunto de características que poseen.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En cuanto a trabajos futuros, se describen según hagan referencia al vehículo submarino o al sistema de gestión de baterías.

Centrándonos en las acciones que afectan al vehículo tenemos los siguientes puntos:

- Tras volver de la competición el primer objetivo es conseguir definitivamente que el vehículo funcione de forma autónoma por completo.
- Tras los conocimientos adquiridos en SAUC-e realizar modificaciones al AUV para conseguir que se pueda sumergir a mayor profundidad, diseñar aquellos componentes que no dio tiempo a fabricar y equiparlos, motivar al alumnado universitario a participar en este proyecto e intentar captar capital privado.
- Crear una línea de investigación y desarrollo en este campo que se ha generado, como pueden tener la universidad de Girona o la de Quebec, y por qué no, optar a crear un start-up y luchar por proyectos europeos.
- Conseguir que AVORA siga participando en eventos nuevos sobre robótica, y en especial robótica submarina, además de ir a futuras ediciones de SAUC-e.
- Los buenos resultados de AVORA obtuvieron un gran impacto mediático en diversos medios publicitarios e institucionales [44]-[46], hecho que hizo que fuera invitada a participar en charlas, conferencias, congresos y ferias como por ejemplo FIMAR [47], PechaKucha [48], Eurocast, EduRov o Ciberlandia. Otras entidades vinieron a visitarnos y a interesarse por lo realizado, como fue el caso de la empresa española Tecnobit (<http://www.tecnobit.com/es/web/guest/inicio>) [49].
- Miembros de SAUC-e, gracias a los conocimientos obtenidos y finalización de sus carreras y doctorados, han conseguido puesto de trabajo en importantes empresas del sector del software y hardware submarino como Seebyte [50], Pal-Robotics [51] y TEMS [52].
- Desarrollo y creación de un libro sobre ROS, “Learning ROS for Robotics Programming” por parte de miembros del equipo [53].

Respecto al sistema de gestión de baterías, se describen las siguientes acciones:

- Monitorizar la tensión de cada celda, del pack, del SOC, del SOH y la capacidad de la batería. Para ello, es necesario procesarla mediante un microcontrolador en el BMS.
- Hacer un estudio del microcontrolador para que cumpla con las especificaciones deseadas y a ser posible que tenga capacidad para gestionar no sólo las celdas iniciales del pack sino también un posible aumento de éstas pero bajo el compromiso de prestaciones & beneficios & costo.
- Proponer un protocolo/driver para que se pueda leer y analizar la monitorización de las celdas. Para esto se tendrá que realizar un estudio de los buses de datos en función de una serie de parámetros, como pueden ser: serie o paralelo, tiempos de latencia, control en tiempo real, capacidad de detención y señalización de errores, robustez, facilidad de implementación, etc.
- Posibles propuesta de protocolos cableados: CAN (Controller Area Network), LIN (Local Interconnect Network), MOST (Media Oriented Systems Transport), FlexRay; también puede ser un protocolo no cableado como el Bluetooth.
- Planteamiento de un software para que todo esta información pueda ser entendible desde el exterior por el usuario mediante un entorno gráfico sencillo a la vez que eficiente.
- Posibilidad de que dicho software sea escalable a diversos sistemas operativos como ROS, Linux o Windows.
- Realización de un diseño de BMS completamente digital, así la supervisión de las tensiones del pack se hará directamente sobre un microcontrolador.
- Conmutación automática entre las fases de carga/descarga, evitando la intervención del usuario.

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULOS SUBMARINO AUTÓNOMO

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Díaz A. A., “Tecnologías marinas para la exploración del océano”, IMEDEA, 2007.
- [2] Palma Méndez José y Marín Morales Roque, “Inteligencia artificial”, Ed. McGraw Hill, 2008, ISBN-13: 978-8-44815-618-3
- [3] Rudnick D. and Perry M., “Autonomous and lagrangian platforms and sensor”, alps workshop report, 2003. Website: <http://www.geo-prose.com/ALPS>
- [4] AVORA website:
https://www.facebook.com/avorasauce2012?ref=stream&hc_location=timeline
- [5] Valavanis K., Gracanin D., Matijasevic M., Kolluru R., and Demetriou, G., “Control architectures for autonomous underwater vehicles”, Ed. IEEE, Control Systems, 1997
- [6] SAUC-e website: <http://www.sauc-europe.org>
- [7] Voyager Interstellar Mission website: <http://voyager.jpl.nasa.gov/>
- [8] AAI RQ-7 Shadow website:
http://www.olive-drab.com/idphoto/id_photos_uav_rq7.php
- [9] MQ-9 Reaper website:
<http://www.af.mil/AboutUs/FactSheets/Display/tabid/224/Article/104470/mq-9-reaper.aspx>
- [10] Barnard website: <http://www.barnardmicrosystems.com>
- [11] Mars Exploration Rover website: <http://marsrovers.nasa.gov/overview>
- [12] Newman P. and Leonard J., “Pure range only sub sea slam”, Massachusetts Institute of Technology.
- [13] Wernli, Robert L., “The ROV manual: a user for observation-class remotely operated vehicles”, Ed. Oxford, Burlington: Butterworth-Heinemann, 2007, ISBN-13: 978-0-7506-8148-3
- [14] Liropus 2000 website:
<http://www.ba.ieo.es/presentacion/equipamiento/equipamiento-cientifico/664-liropus-2000-el-nuevo-rov-del-ieo>
- [15] Scorpio ROV website: http://en.wikipedia.org/wiki/Scorpio_ROV

- [16] Super Scorpio ROV website:
<http://tamboritha.com.au/our-rovs/super-scorpio/>
- [17] Ramses website:
<http://www.tecnalia.com/es/defensaseguridad/robot-submarino-teleoperador-ramses.htm>
- [18] Bluefin Robotics website: <http://www.bluefinrobotics.com>
- [19] Infante AUV website: <http://auvac.org/configurations/view/41>
- [20] Ramalho Oliveira P., Pascoal A., Silva V. y Silvestre C., “Design, development and testing of a mission control system for the maries auv”, Department of Electrical Engineering. Institute for Systems and Robotics, Instituto Superior Técnico (IST), Av. Rovisco Pais, 1096, Lisboa Codex, Portugal, 1996
- [21] Carreras Pérez M., Batlle J., and Ridao P., “Reactive control of an auv using motor schemas. Computer Vision and Robotics Group”, Institute of Informatics and Applications (of Gerona), Edifici Politècnica II, Campus Montilivi, 17071 Girona, Spain, 2003
- [22] Garbi website: <http://eia.udg.es/~pere/airsub/robots.htm>
- [23] AUVSI website: <http://www.auvsi.org/home>
- [24] Gliders website: <http://www.ioos.noaa.gov/glider/welcome.html>
- [25] Gliders website: <http://noc.ac.uk/research-at-sea/nmfss/nmep/gliders>
- [26] Gliders website: http://es.wikipedia.org/wiki/Glider_Submarino
- [27] Slocum website: <http://www.webbresearch.com/slocumglider.aspx>
- [28] Sea-Glider website: <http://seaglider.washington.edu/>
- [29] Spray website: http://spray.ucsd.edu/pub/rel/info/spray_description.php
- [30] Wave Glider website: <http://liquidr.com>
- [31] Thor I. Fossen, “Guidance and control of ocean vehicles”, ed. John Wiley & Sons Inc, ISBN-10: 0-47-194113-1/ ISBN-13: 978-0-47-194113-2, 1994
- [32] David Linden, Thomas B. Reddy, “Handbook of batteries”, Ed: McGraw-Hill, 3^o Edition, ISBN-10: 0-07-135978-8, 2001
- [33] Reddy, Thomas B. y Linden David, “Linden’s handbook of batteries”, Ed: McGraw-Hill, ISBN-13: 978-0-07-162421-3, MHID: 0-07-162421-X, 2011
- [34] Donal G. Fink, H. Wayne Beaty, John M. Crroll, “Manual práctico de electricidad para ingenieros”, Tomo III, Ed: Reverte S.A., ISBN-10: 84-291-3026-7, ISBN-10 (Obra completa): 84-291-3035-8, 1981

- [35] Juan Carlos Viera Pérez, “Carga rápida de baterías de ni-cd y ni-mh de media y gran capacidad. Análisis, síntesis y comparación de nuevos métodos”, Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, 2003.
- [36] Celda Seca website: http://es.wikipedia.org/wiki/Pila_seca
- [37] Batería Metal-Aire website:
http://es.wikipedia.org/wiki/Celda_electroquímica_metal-aire
- [38] Davide Andrea, “Battery Management Systems for large lithium-ion battery pack”, Ed: Artech House, ISBN-10: 1-60-807104-9, ISBN-13: 978-1-60-807104-3, 2010
- [39] John Chatzakis, Kostas Kalaitzakis, Nicholas C. Voulgaris and Stefanos N. Manias, Senior Member, “Designing a new generalized Battery Management System”, IEEE Transactions on industrial electronics, Vol: 50, N°: 5, ISSN: 0278-0046, October 2003
- [40] Antoni Szumanowski and Yuhua Chang, “Battery Management System based on battery nonlinear dynamics modeling”, IEEE Transactions on vehicular technology, Vol: 57, N°: 3, ISSN: 0018-9545, May 2008
- [41] ROS website: www.ros.org
- [42] Muhammad H. Rashid, “Power electronics handbook”, Ed: Academic Press, ISBN-10: 0-12-581650-2, ISBN-13: 978-0-12-581650-2, 2001
- [43] Paper AVORA website:
<http://thecontinuum.files.wordpress.com/2012/07/avora-paper.pdf>
- [44] Impacto mediático AVORA website:
http://www.ulpgc.es/index.php?pagina=notica&ver=avora_26072012
- [45] Impacto mediático AVORA website:
http://www.eldigital.ulpgc.es/index.php?option=com_content&task=view&id=1053&Itemid=1&ed=56
- [46] Impacto mediático AVORA website:
<http://www.abc.es/agencias/noticia.asp?noticia=1219891>
- [47] FIMAR, Feria Internacional del Mar Las Palmas website:
<http://fimar.laspalmasgc.es/>
- [48] Pechakucha website:
http://www.pechakuchalaspalmas.com/index.php?option=com_content&view=article&id=201:speaker-avora-robotics-innovacion-y-robotica-submarina&catid=65:pkn-las-palmas-vol8&Itemid=213

- [49] TecnoBit en las instalaciones de AVORA website:
<https://www.facebook.com/avoraauv/photos/a.177560212349541.30819.154337641338465/382913945147499/?type=1>
- [50] Seebyte website: <http://www.seebyte.com>
- [51] Pal-Robotic website: <http://pal-robotics.com/en/>
- [52] TEMS website: <http://www.temsubacuaticos.com/>
- [53] Aarón Martínez y Enrique Fernández, “Learning ROS for Robotics Programming”, Ed: Packt Publishing, ISBN-10: 1-78-216144-9, ISBN-13: 978-1-78-216144-8, Septiembre 2013

SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS Y ELÉCTRICO PARA VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO