Revisión y mejora de las prácticas de regulación automática para el aprendizaje del control discreto de un sistema térmico

Fco. Joel Auyanet[*a], José Juan Quintana[a], Moises Diaz[b,c]

[a]Departamento de ingeniería Electrónica y Automática, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria,
[b]Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones IDeTIC, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
[c]Universidad del Atlántico Medio, Las Palmas de Gran Canaria

email: francisco.auyanet101@alu.ulpgc.es, {josejuan.quintana, moises.diaz}@ulpgc.es

RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño de un controlador PID digital de bajo coste, para su implantación en un equipo térmico de prácticas del Laboratorio de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. La principal contribución de este trabajo es el uso de componentes de bajo coste y herramientas de código abierto en el diseño de prácticas de regulación automática. Dicho diseño se caracteriza por la flexibilidad del algoritmo de control debido a la capacidad de modificación del programa de control en función de las necesidades de los estudiantes. Los resultados experimentales en el sistema de control diseñado destacan la facilidad de uso del controlador PID y su versatilidad en la aplicación de diferentes tipos de control. Las pruebas experimentales demuestran la viabilidad del diseño para su uso en las clases prácticas, especialmente en el área didáctica de la ingeniería de control y la regulación automática.

Palabras clave: PID digital, Control discreto, Sistema térmico, Diseño experimental de bajo coste, Arduino.

1. INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria dispone de un equipo térmico sobre el que los alumnos realizan prácticas experimentales relacionadas con el control continuo y la regulación automática de un sistema térmico. Este sistema térmico está formado por un equipo modular del fabricante Leybold Didactic GmbH. Uno de los módulos del equipo térmico es un controlador PID continuo, el cual tiene un precio aproximado de 800 euros, por lo que se requiere especial cuidado a la hora de utilizarlo. Esta problemática hace que los alumnos no puedan realizar las prácticas cuando alguno de estos módulos presenta problemas.

Con el fin de mejorar el proceso de aprendizaje, en este trabajo se propone un nuevo módulo PID digital de bajo coste que se añade al actual sistema térmico.

Las principales contribuciones de este artículo son, el bajo coste y fácil adquisición de los componentes del nuevo módulo, y, además, se trata de un novedoso sistema de control digital para el sistema térmico actual. Además, el aprendizaje basado en proyectos por parte de los estudiantes hará que puedan aprender de manera más sencilla y prácticas los conceptos de la regulación automática y la ingeniería de control. Igualmente, se poden observar las mejoras del control digital propuesto frente al control continuo.

Este artículo se organiza como sigue: la sección 2 está dedicada a los materiales necesarios para llevar a cabo este trabajo. En la sección 3 se detalla el sistema de control propuesto. Posteriormente, en la sección 4 se explican los experimentos llevados a cabo. Finalmente, la sección 5 cierra el artículo con las discusiones y conclusiones.

ISBN: 978-84-697-7101-3

2. MATERIALES

Para realizar el diseño y la implementación del novedoso controlador PID digital, es preciso modelar el sistema térmico que deseamos controlar. Debido a ello, esta sección introduce el sistema térmico y el resto de materiales necesarios para llevar a cabo el presente trabajo.

2.1 Equipo previo de prácticas

El equipo de prácticas que se encuentra en el laboratorio está compuesto por los siguientes módulos [1]:

- **Fuente de alimentación de ±15V.** Este módulo se encarga de transformar los 230V eficaces de la red a niveles de ±15V de tensión continua. Estos niveles de tensión son necesarios para los operacionales que intervienen en los distintos módulos. Además, cuenta con un bus de 0V (conexión a masa) para disponer de una masa de referencia en todos los módulos que forman el equipo de prácticas. El interruptor de encendido-apagado controla la existencia o no de tensión en el resto de módulos. Por tanto, hay que prestar especial atención al estado del mismo antes de realizar cualquier ajuste.

- **Generador de la variable de referencia.** Con este módulo se puede seleccionar el valor de la variable de referencia. Dependiendo del modo de conexión, facilita una tensión ajustable entre [0, +10]V, o entre [-10, +10]V. En lo que concierne en este trabajo, solamente se utilizará el modo que permite una tensión entre [0, +10V]. El módulo cuenta con un potenciómetro para ajustar la variable de referencia y, además, tiene un interruptor que permite conectar la salida del generador con la variable de referencia. De esta manera, se puede realizar una variación en forma de escalón para observar la respuesta del sistema a controlar.

- **Amplificador de potencia.** Debido al consumo de potencia de la lámpara, el sistema de temperatura requiere de un amplificador de potencia para operar correctamente. Además, este módulo está provisto de dos niveles simétricos de amplificación, con las ganancias de tensión +1 y -1, que permiten una operación individual de las etapas con una amplificación de 1 con respecto a masa.

- El **sistema térmico** contiene una lámpara halógena, junto con un disipador de calor y, un dispositivo de protección contra sobrecalentamientos (90-100°C) que consiste en un interruptor basado en una lámina metálica. Precisamente, la temperatura de esta lámpara es la que se pretende controlar. La temperatura del conjunto lámpara disipador es medida mediante un sensor PTC linealizado, y posteriormente es convertida mediante un transductor en dos magnitudes eléctricas: 2mA/10°C ó 1V/10°C. El modo de medida se selecciona mediante un interruptor. Sin embargo, solamente se utilizará el modo de 1V/10°C. Además, dicho módulo contiene un motor-ventilador ajustable mediante un potenciómetro, y una aleta ajustable. Asimismo, se garantiza que el lazo de control opera solamente con valores positivos de tensión y de corriente, lo que hace posible que la realimentación positiva no sea transformada en realimentación negativa en el controlador.

- **Controlador PID**. Este último módulo, alimentado con ±15V, es un controlador PID, el cual cuenta con una salida, un nodo sumador donde se generará la señal de error y tres potenciómetros con los que ajustar los parámetros del controlador. Como ya se ha dicho anteriormente, se ha diseñado un sistema de control discreto de bajo coste que pueda sustituir este módulo.

Finalmente, se ilustra en la Figura 1 los distintos materiales mencionados en esta sección. La Figura muestra además las conexiones de los distintos módulos, donde, los puntos de conexión más importantes son los siguientes:

- **Punto 1:** Salida del módulo generador de la variable de referencia. Este punto estará conectado a la entrada 0 del conversor analógico-digital del circuito de control diseñado.
- **Punto 2:** Entrada del módulo amplificador de potencia. Este punto estará conectado a la salida del amplificador inversor del circuito de control diseñado.
- **Punto 3:** Salida del sistema térmico. Este punto estará conectado a la entrada 1 del conversor analógico-digital del circuito de control diseñado.

 ISBN: 978-84-697-7101-3

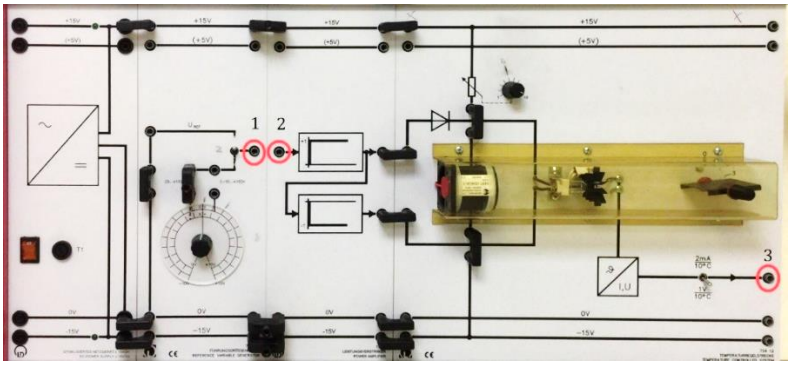


Figura 1: Equipo de prácticas conectado.

2.2 Equipo nuevo de prácticas

En la Figura 2 se muestra un diagrama de bloques del novedoso diseño del sistema de control que se propone. Este sistema está formado por los siguientes elementos:

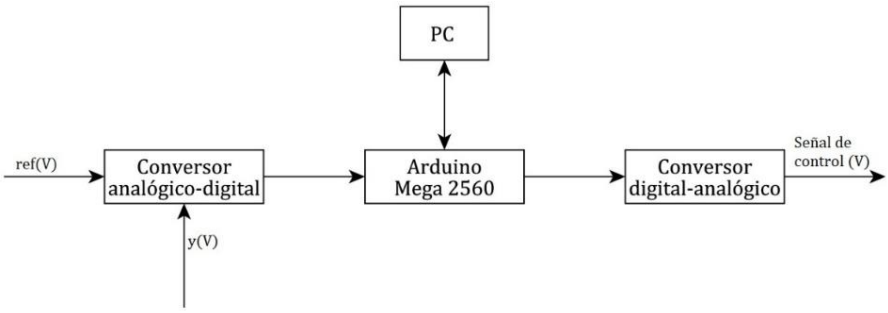


Figura 2: Diagrama de bloques del circuito de control diseñado.

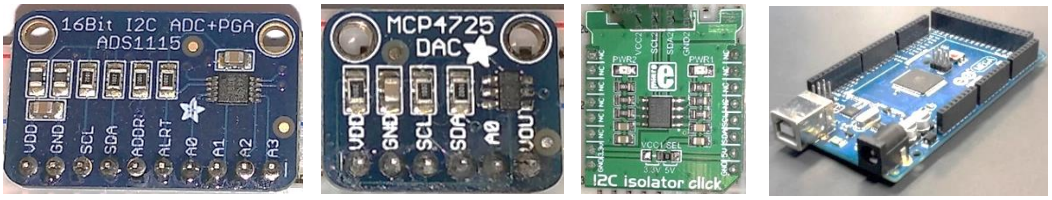
1. **Conversor analógico-digital ADS1115** con una resolución de 16 bits. Dicho conversor está montado en una placa de Adafruit Industries, la cual se muestra en la Figura 3.a. El ADS1115 es utilizado para convertir la tensión de referencia y de salida del sistema térmico a digital para que puedan ser muestreadas por el microcontrolador por medio del bus I2C.

2. **Conversor digital-analógico MCP4725** con una resolución de 12 bits. Dicho conversor está montado en una placa de Adafruit Industries, la cual se muestra en la Figura 3.b. El MCP4725 es utilizado para convertir los valores discretos de la señal de control, proveniente del microcontrolador por medio del bus I2C, a valores analógicos para poder actuar sobre el sistema térmico a controlar.
3. **Un aislador del bus I2C.** La Figura 3.c muestra dicho aislador, el cual es usado para aislar el microcontrolador de los conversores ADS1115 y MCP4725.

4. Una placa microcontroladora **Arduino Mega 2560**, la cual incorpora un microcontrolador ATmega2560, Figura 3.d. Este microcontrolador es utilizado para implementar el algoritmo de control, muestrear las señales provenientes del ADS1115 y de actuar sobre el sistema a través del MCP4725, utilizando para ello el bus I2C.

5. Un **PC**, con el cual se pueden modificar los parámetros del PID digital implementado en el microcontrolador. Además, mediante el PC se pueden monitorizar el valor de la tensión de referencia y la respuesta del sistema térmico.

ISBN: 978-84-697-7101-3



(a) ADS1115. *(b) MCP4725.* *(c) Aislador I2C.* *(d) Arduino Mega 2560.*

Figura 3: Componentes del diseño experimental propuesto.

Finalmente, la Figura 4 muestra un prototipo del circuito de control completo:

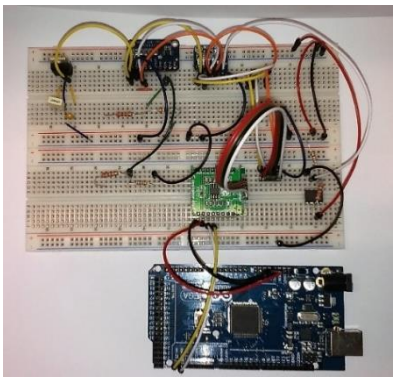


Figura 4: Diseño del sistema de control propuesto.

3. SISTEMA DE CONTROL PROPUESTO

Existen cinco etapas consecutivas antes de realizar la puesta en marcha del nuevo equipo diseñado. La primera consiste en el modelado del sistema de control y del sistema a controlar, la segunda consiste en obtener la respuesta del sistema en lazo abierto, en la tercera etapa se aproxima la respuesta obtenida de la etapa anterior a una función matemática en el dominio de Laplace, el penúltimo paso consiste en calcular los parámetros del controlador PID, y finalmente, a partir de los parámetros del controlador obtenido, se elige la configuración del controlador PID para obtener las ecuaciones a programar en el microcontrolador. A continuación, se comenta cada una de las etapas.

3.1 Modelado del sistema de control y del sistema a controlar

Para conseguir el control de la planta es necesario realimentar la salida de la misma. Asimismo, el sistema de control mostrado se corresponde con un controlador PID digital, el cual se ha implementado en un microcontrolador. En la Figura 5 se muestra el modelo del sistema de control y de la planta a controlar:

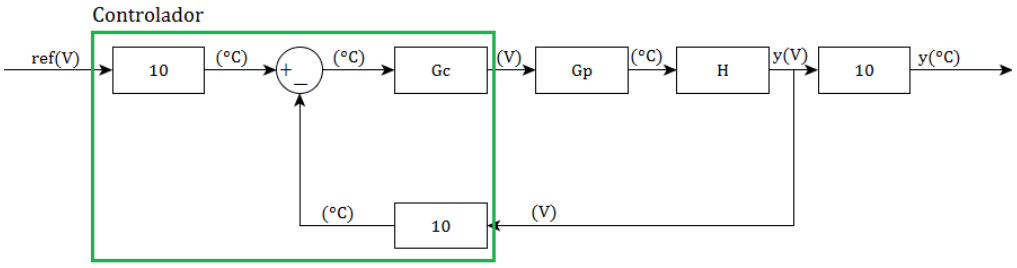


Figura 5: Modelado del sistema de control y de la planta.

ISBN: 978-84-697-7101-3

3.2 Obtener la respuesta del sistema en lazo abierto

El primer paso, para encontrar los parámetros para sintonizar el controlador, es medir la respuesta del sistema a controlar ante una señal de prueba [2, 3]. En este caso, el sistema térmico a controlar se trata de un sistema no lineal, debido a que la temperatura de la planta depende de muchos factores, como por ejemplo, la temperatura ambiente. Por este motivo, se ha realizado este experimento aplicando un escalón de 5V como señal de prueba. Sin embargo, debido a que la temperatura ambiental afecta en la medida, interesa modelar del incremento de temperatura que se ha producido en la lámpara halógena. Restando el valor inicial de la temperatura se obtiene la siguiente gráfica, Figura 6:

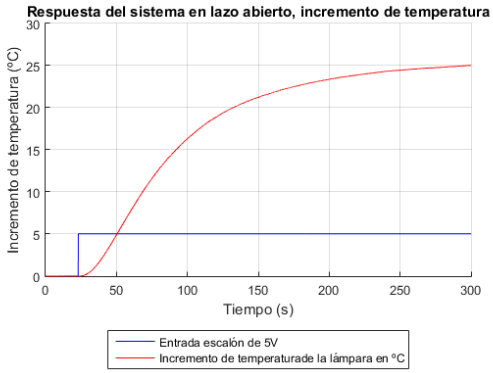


Figura 6: Respuesta del sistema en lazo abierto. Incremento de temperatura.

3.3 Identificación de la función de transferencia del sistema a controlar

Después de obtener la respuesta del sistema en lazo abierto, se aplicó el método de Ziegler-Nichols [4], ya que nos da los datos para calcular los parámetros del PID. Para ello, se aproximó el conjunto de datos a una función de transferencia de primer orden con un retardo:

$$G_p(s) = \frac{K}{(T_s \cdot s + 1)} \cdot e^{-T_d \cdot s} \qquad (1)$$

3.4 Cálculo de los parámetros del controlador

A partir de la curva de la figura 6, se obtienen tres parámetros, Figura 7, t_0, t_1, y t_2, a partir de los cuales se calculan los parámetros K, Ts y T_d de la ecuación 1. Posteriormente, se obtienen los parámetros del controlador PID mediante las reglas de Ziegler-Nichols, consiguiendo los siguientes resultados, Tabla 1:

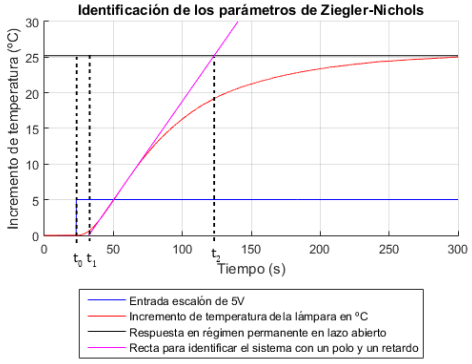


Figura 7: Parámetros de la función de transferencia.

ISBN: 978-84-697-7101-3

Tabla 1: Parámeros del controlador PID. Ziegler-Nichols.

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T_s}{T_r \cdot K} = 2{,}01$	∞	0
PI	$0{,}9 \cdot \frac{T_s}{T_r \cdot K} = 1{,}8$	$\frac{T_r}{0{,}3} = 30$	0
PID	$1{,}2 \cdot \frac{T_s}{T_r \cdot K} = 2{,}41$	$2 \cdot T_r = 18$	$0{,}5 \cdot T_r = 4{,}5$

3.5 Configuración y ecuaciones del PID digital

Finalmente, se elige la configuración del controlador PID [5], figura 8. Posteriormente se plantean las ecuaciones del controlador y obtienen las ecuaciones en tiempo discreto, las cuales se programan en el microcontrolador:

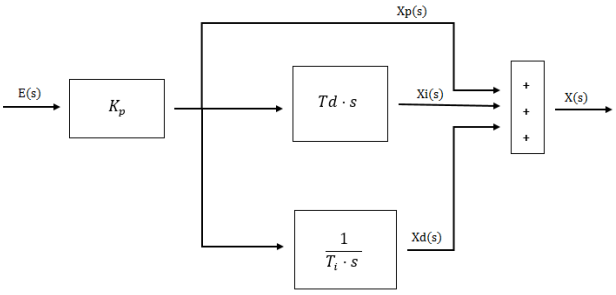


Figura 8: Configuración del controlador PID.

$$x_p(k) = K_p \cdot e(k) \tag{2}$$

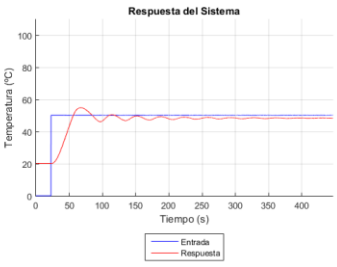
$$x_i(k) = \frac{K_p \cdot T}{T_i} \cdot e(k) + x_i(k-1) \tag{3}$$

$$x_d(k) = \frac{K_p \cdot T_d}{T} \cdot (e(k) - e(k-1)) \tag{4}$$

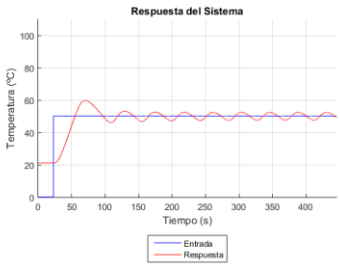
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para realizar la puesta en marcha del diseño propuesto, se realizaron dos experimentos. En el primero, se implementan las diferentes combinaciones del controlador PID, y en el segundo, se muestra un caso real en el que el sistema térmico es sometido a diferentes perturbaciones. A continuación, se comenta cada uno de los experimentos.

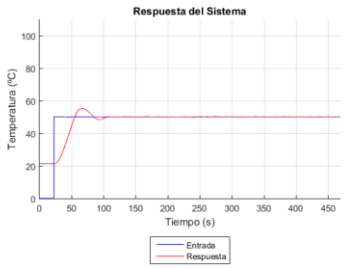
4.1 Experimento 1: Análisis básico del controlador digital



(a) Control proporcional (P). Ziegler-Nichols.



(b) Control proporcional e integral (PI). Ziegler-Nichols.



(c) Control proporcional, integral y derivativo (PID). Ziegler-Nichols.

Figura 9: Análisis básico del controlador digital.

ISBN: 978-84-697-7101-3

- **Control P**, Figura 9.a. Se observa que la respuesta del sistema, ante un controlador proporcional, presenta un error en régimen estacionario. Esto se debe a que el término proporcional es directamente proporcional al error, por lo que siempre tiene que existir la señal de error para que el controlador pueda proporcionar una respuesta.
- **Control PI**, Figura 9.b. Se puede apreciar que el efecto de la acción integral hace que la respuesta del sistema alcance el valor de la consigna en régimen permanente. Sin embargo, la respuesta del sistema queda oscilando entre un rango próximo al valor de la referencia. Esto se debe a que se está controlando solamente la temperatura de la lámpara halógena, pero no se controla la disipación del calor que genera la misma. Por tanto, el término integral hará que la señal de error siga sumando hasta que este sea negativo.
- **Control PID**, Figura 9.c. Puede observarse que debido a la acción integral se consigue alcanzar el valor de la consigna de referencia y eliminar el error en régimen permanente. Además, la acción derivativa proporciona una acción correctiva frente a las variaciones del error, haciendo que el sistema no oscile demasiado en el régimen permanente

4.2 Experimento 2: Control PID con perturbaciones

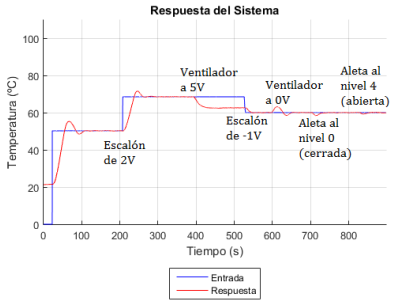


Figura 15: Control PID con perturbaciones. Ziegler-Nichols.

Este último experimento consistió en someter el sistema térmico, con el controlador PID del apartado anterior, a perturbaciones, con el objetivo de terminar de validar la viabilidad de este diseño novedoso para el aprendizaje de los conceptos de regulación automática.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se muestra el diseño experimental de un controlador en tiempo discreto, específicamente un controlador PID digital. Se espera que el uso del presente controlador, además de desarrollar las competencias requeridas en la asignatura de regulación automática, los estudiantes puedan aprender los diferentes componentes necesarios en el uso de un sistema de control discreto. Asimismo, las contribuciones principales que aporta este trabajo son, el diseño de bajo coste, ya que el módulo PID que vende el fabricante del equipo de prácticas tiene un precio aproximado de 800 euros, mientras que el diseño propuesto presenta un presupuesto aproximado de 80 euros. Además, este diseño resulta versátil a la hora de mostrar a los alumnos el efecto que producen los parámetros del controlador en la respuesta del sistema a controlar, originando un interés en la asignatura por parte de los estudiantes [6, 7]. Igualmente, los materiales para el desarrollo del sistema de control propuesto son de fácil adquisición, por lo que son fácilmente asequibles por los alumnos y por los docentes, aumentando de esta manera la viabilidad para el desarrollo del circuito propuesto.

Finalmente, como líneas futuras, principalmente se pretende realizar una prueba piloto con los estudiantes de regulación automática con el fin de realizar una presentación práctica en el aula. Asimismo, como complemento de la idea anterior, se desea realizar un manual de prácticas para que los alumnos de ingeniería puedan realizar pruebas experimentales con el nuevo módulo. Además, cualquier alumno o docente puede modificar el algoritmo de control, dando lugar a diferentes tipos de controladores en tiempo discreto, y surgiendo la posibilidad de controlar otro tipo de sistemas.

ISBN: 978-84-697-7101-3

REFERENCIAS

[1] Iván González Tavío...[et al.]. Manual de prácticas básicas para el control continuo de un sistema térmico. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2011.
[2] Oscar Barambones Caramanzana. Sistemas digitales de control. Bilbao: Universidad del País Vasco, 2004.
[3] Benjamin C. Kuo. Sistemas de control automático. México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1996.
[4] Aidan O'Dwyer. Handbook of PI and PID controller tuning rules. New Jersey; London: World Scientic: Imperial College Press, 2003.
[5] Katsuhico Ogata. Problemas de ingeniería de control utilizando Matlab. Madrid: Prentice Hall, 1999.
[6] M. J. W. Lee, S. Nikolic, P. J. Vial, C. H. Ritz, W. Li and T. Goldfinch, "Enhancing Project-Based Learning Through Student and Industry Engagement in a Video-Augmented 3-D Virtual Trade Fair," in *IEEE Transactions on Education*, vol. 59, no. 4, pp. 290-298, Nov. 2016.
[7] S. Nikolic, C. Ritz, P. J. Vial, M. Ros and D. Stirling, "Decoding Student Satisfaction: How to Manage and Improve the Laboratory Experience," in *IEEE Transactions on Education*, vol. 58, no. 3, pp. 151-158, Aug. 2015.

 ISBN: 978-84-697-7101-3