

Una década de experiencias enseñando electrónica y control con un levitador magnético.

Édgar Ramírez Laboreo^{a,b,*}, Antonio Bono Nuez^{a,c}, Eduardo Montijano Muñoz^{a,b}, Carlos Sagüés Blázquez^{a,b}

^aInstituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza, Calle Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, España

^bDepartamento de Informática e Ingeniería de Sistemas (DIIS), Universidad de Zaragoza, Calle María de Luna 1, 50018, Zaragoza, España

^cDepartamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones (DIEC), Universidad de Zaragoza, Calle María de Luna 1, 50018, Zaragoza, España

To cite this article: Ramírez Laboreo, É., Bono Nuez, A., Montijano Muñoz, E., Sagüés Blázquez, C. 2024. A decade of experiences teaching electronics and control with a magnetic levitator. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 21, 318-327. <https://doi.org/10.4995/riai.2024.20971>

Resumen

Los sistemas de levitación magnética han sido utilizados en la enseñanza de determinados conceptos de electrónica y control automático. Son dispositivos con un evidente atractivo para los estudiantes, que permiten ilustrar los efectos de las no linealidades presentes en la realidad, tanto aquellas debidas a la física del problema como las asociadas al uso de *hardware* electrónico. En la Universidad de Zaragoza utilizamos uno de estos sistemas en una asignatura multidisciplinar de máster, en la que trabajamos coordinadamente profesores del área de Tecnología Electrónica y de Ingeniería de Sistemas y Automática. Aunque el levitador magnético se ha mostrado como una herramienta muy útil en el proceso de aprendizaje del estudiantado, su uso como hilo conductor de una asignatura presenta numerosos desafíos, especialmente en lo relativo a la carga de trabajo y el sistema de evaluación. En este artículo plasmamos nuestras experiencias tras una década, describiendo en detalle el sistema y sus componentes, el modelo dinámico que utilizamos en la asignatura, los problemas encontrados en su uso como herramienta docente, las soluciones que hemos adoptado y las lecciones aprendidas.

Palabras clave: Aprendizaje basado en proyectos, Estimación de parámetros, Modelado, Sistemas mecatrónicos.

A decade of experiences teaching electronics and control with a magnetic levitator

Abstract

Magnetic levitation systems have been used in the teaching of specific concepts of electronics and automatic control. These devices are clearly attractive to students, and they allow to illustrate the effects of the nonlinearities present in reality, both those due to the physics of the problem and those associated with the use of electronic hardware. At the University of Zaragoza we use one of these systems in a multidisciplinary master's degree course, in which professors from the Electronic Technology and Systems and Automation Engineering areas work together. Although the magnetic levitator has proved to be a very useful tool in the students' learning process, its use as the central element of a course presents many challenges, especially in terms of workload and the evaluation system. In this article we report our experiences after a decade, describing in detail the system and its components, the dynamic model that we use in the course, the problems encountered in its use as a teaching tool, the solutions that we have adopted, and the lessons learned.

Keywords: Mechatronic systems, Modeling, Parameter estimation, Project-based learning.

1. Introducción

El aprendizaje basado en proyectos (Kokotsaki et al., 2016) es una metodología docente que en las dos últimas décadas ha

sido estudiada y aplicada en prácticamente todos los niveles educativos, desde la educación primaria hasta la universitaria. El principio fundamental de este enfoque consiste en “aprender haciendo”, en lugar del más tradicional “aprender para hacer”.

*Autor para correspondencia: ramirlab@unizar.es

La idea es que los estudiantes se enfrenten a un proyecto de cierta envergadura para el que, al menos inicialmente, no disponen de todos los conocimientos o habilidades necesarias. Mediante la exploración, el descubrimiento y el trabajo colaborativo, los alumnos se convierten en agentes activos del proceso de aprendizaje, lo que en principio resulta en una mayor motivación y una mejor adquisición de competencias y contenidos.

En la literatura se pueden encontrar numerosos ejemplos de aplicación del aprendizaje basado en proyectos en enseñanzas de ingeniería, especialmente en asignaturas de informática, electrónica, control automático, mecatrónica y otras materias relacionadas. En Macías-Guarasa et al. (2006), por ejemplo, se propone un currículo completo para la enseñanza de electrónica basado en esta metodología. No resulta complicado encontrar ejemplos más concretos aplicados a la docencia de electrónica de potencia (Zhang et al., 2015), robótica (Behrens et al., 2009), redes inteligentes (Hu et al., 2014) o sistemas embebidos (Kumar et al., 2013), entre otros.

Uno de los sistemas aplicables a la enseñanza de ciertos conceptos de electrónica o control automático son los sistemas de levitación magnética (Wong, 1986; Hurley et al., 2004; Yu and Li, 2014). Estos sistemas, que hacen levitar un objeto gracias a la acción de uno o varios electroimanes, presentan un claro atractivo visual para el alumnado. Su dinámica es no lineal, lo que permite observar las limitaciones de las técnicas lineales de estimación y control, invitando por tanto a la aplicación de técnicas avanzadas. El sistema también es útil a la hora de ilustrar una gran cantidad de efectos relacionados con el control digital, como aquellos asociados al muestreo, la cuantificación, las latencias o la gestión de tareas en tiempo real, entre otros.

En este artículo relatamos nuestra experiencia tras casi una década utilizando un levitador magnético en la docencia de una asignatura de máster en la Universidad de Zaragoza. Creemos firmemente que el aprendizaje que aporta la realización del proyecto es irremplazable, pero su uso como hilo conductor de una asignatura presenta numerosos desafíos, especialmente en lo relativo a la carga de trabajo y el sistema de evaluación. En la Sección 2 presentamos el sistema, describiendo los distintos componentes que lo forman. A continuación, las Secciones 3 y 4 describen, respectivamente, el modelo dinámico del sistema que usamos en la asignatura y el procedimiento recomendado para determinar el valor de sus parámetros. Después, en la Sección 5, describimos la asignatura de máster en la que utilizamos el levitador, explicando sus particularidades y la forma en la que el proyecto se integra en la misma. La Sección 6 detalla los distintos mecanismos de evaluación que hemos utilizado a lo largo de los años, indicando los problemas detectados y las soluciones adoptadas. Finalmente, en la Sección 7 incluimos las conclusiones y lecciones aprendidas a lo largo de estos cursos.

2. El levitador magnético

Nuestro levitador magnético es, salvo por algunas modificaciones menores realizadas con posterioridad, el presentado en Montijano et al. (2017). En las Figuras 1 y 2 se pueden ver algunas imágenes del mismo. El objetivo en este sistema es conseguir controlar el movimiento de un imán de neodimio que levita en el interior de un tubo transparente de metacrilato. Para ello, el prototipo cuenta con un segundo imán fijado en la

base del tubo (no visible en las imágenes). Este imán tiene la polaridad invertida con respecto al primero, por lo que genera una fuerza de repulsión que lo hace levitar incluso aunque el sistema no tenga alimentación. Para poder controlar la posición de levitación, se cuenta también con un electroimán, formado por una bobina de cobre y un núcleo ferromagnético, que permite aumentar o reducir el flujo magnético que actúa sobre el imán. Esta configuración, distintiva de este levitador frente a otros de la literatura, hace que el sistema sea estable en lazo abierto, lo que facilita su caracterización, así como el diseño y ajuste de controladores. El sistema incluye un sensor Hall (Allegro A1324LLHLT-T), que convierte en una tensión la densidad de flujo magnético generado por el imán que levita. A mayor altura, más cerca está el imán del sensor y mayor es la tensión generada. Tras una correcta caracterización de la relación posición-tensión, este sensor permite realimentar la posición y controlar el movimiento.

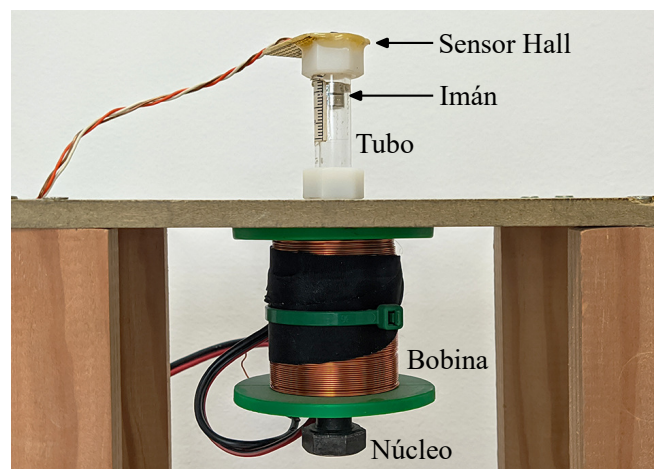


Figura 1: Prototipo de levitador magnético. El imán levita en el interior de un tubo transparente de metacrilato. El movimiento del mismo se puede controlar actuando con el electroimán formado por la bobina y el núcleo ferromagnético.

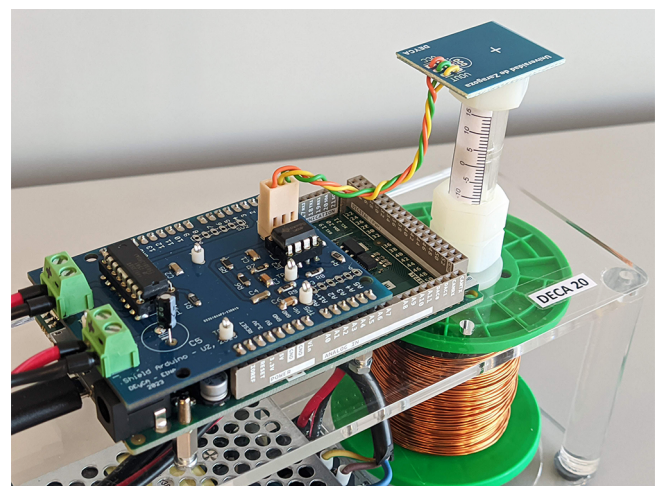


Figura 2: Componentes electrónicos del sistema. La base es la placa de desarrollo Arduino Due. Encima, la PCB que aloja las etapas electrónicas de sensado y de potencia. A la derecha se puede ver el imán levitando en el interior del tubo.

El sistema se controla mediante una placa de desarrollo Arduino Due que incluye un microcontrolador ARM Cortex-M3 de 32 bits, en concreto el modelo SAM3X8E de Atmel. El mo-

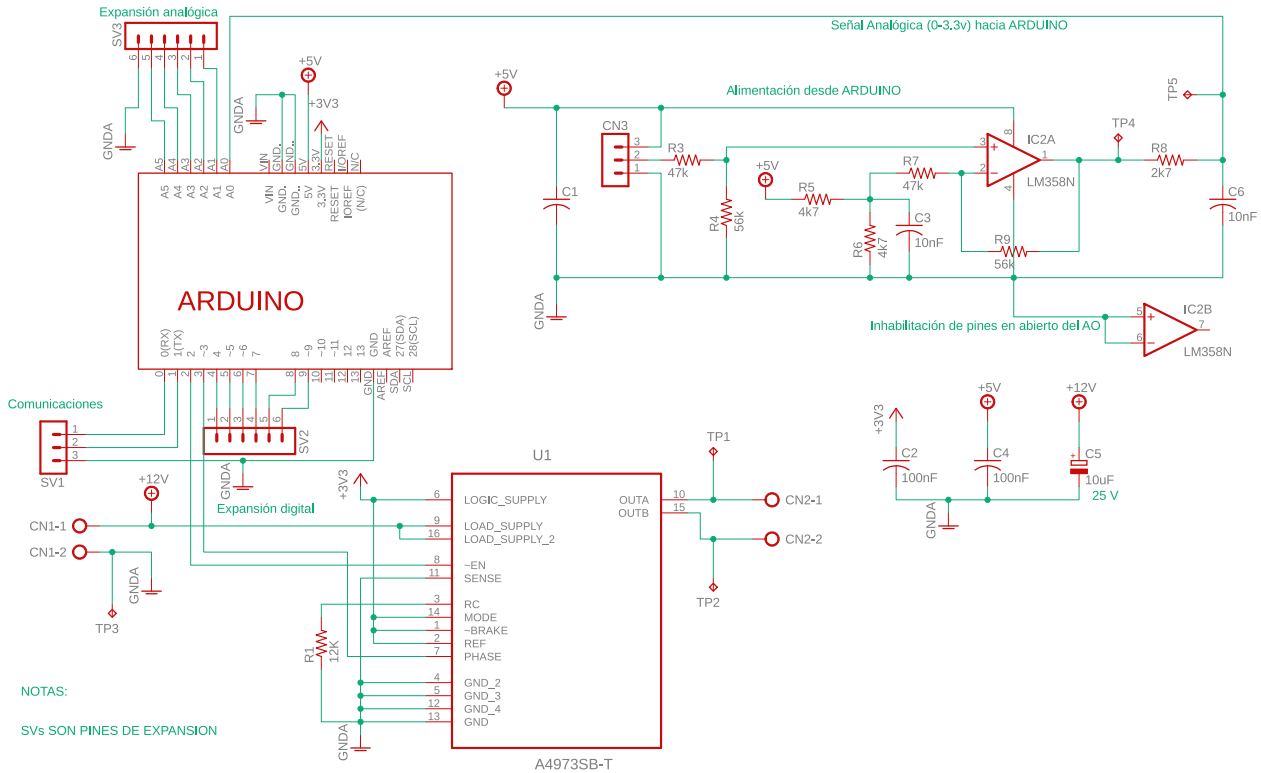


Figura 3: Esquemático de los componentes electrónicos del sistema. El amplificador operacional IC2B va incluido en el integrado LM358N pero no se usa en el diseño. El bloque ARDUINO es un bloque auxiliar que indica el conexionado con la placa Arduino Due comercial.

tivo fundamental de su elección es la sencillez que presenta el entorno de programación de Arduino. Esta se complementa con una placa de circuito impreso diseñada *ad hoc* en el típico formato *shield* de Arduino que incluye dos etapas electrónicas. Por un lado, una etapa de amplificador diferencial que se encarga de filtrar y acondicionar la señal del sensor Hall al rango dinámico del convertor ADC del microcontrolador. Por otro, un convertidor DC-DC basado en el integrado A4973 de Allegro, que incluye una estructura de puente en H, controlado mediante el módulo PWM del microcontrolador y que permite actuar sobre la bobina con tensiones bipolares de $\pm V_{cc}$, donde V_{cc} es la tensión de alimentación. Esta etapa permite frecuencias de modulación de hasta 70 kHz y tensiones de alimentación hasta 50 V. La citada placa *shield*, que forma parte del proyecto y que todos los estudiantes deben diseñar, puede verse en la Figura 2 junto a la placa comercial de Arduino. Por otro lado, la Figura 3 muestra el esquemático con todos los componentes electrónicos del sistema.

3. Modelado dinámico

Todas las técnicas de control que se dan en la asignatura son técnicas basadas en modelo. Por ello, los profesores facilitamos a los estudiantes una serie de ecuaciones, que posteriormente deben manipular y, en función de la técnica de control empleada, linealizar en torno a un punto de trabajo para poder usarlas en su diseño. En esta sección presentamos dichas ecuaciones.

3.1. Modelado del sistema electromecánico

En primer lugar presentamos las ecuaciones del sistema electromecánico, es decir, las que describen cómo varía la po-

sición del imán en función de la tensión de alimentación de la bobina. La dinámica de esta parte del sistema se puede describir mediante dos ecuaciones diferenciales. La primera es la ecuación eléctrica de la bobina,

$$v(t) = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt}, \quad (1)$$

en la que v es la tensión de alimentación, i es la corriente y R y L son la resistencia e inductancia de la bobina, que se asumen constantes. Somos conscientes de que en un sistema electromecánico de este tipo se pueden producir grandes variaciones de la inductancia (Ramírez-Laboreo and Sagues, 2018), pero por cuestiones docentes resulta ventajoso asumirla constante. La segunda ecuación diferencial es la segunda ley de Newton, que describe el movimiento del imán en el interior del tubo,

$$M \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = F(i(t), z(t)) - M g - C_f \frac{dz(t)}{dt}, \quad (2)$$

donde z es la posición del imán, M es su masa, g es la gravedad y C_f es un coeficiente de fricción viscosa. La fuerza F es la fuerza magnética generada conjuntamente por el imán inferior y el electroimán, y se ve afectada tanto por la corriente i como por la posición z . En la literatura se pueden encontrar numerosas expresiones para dicha fuerza, pero en la asignatura utilizamos actualmente el siguiente modelo empírico:

$$F(i, z) = K_F \left(\frac{i(t) + I_0}{z(t) + D_0} \right)^2, \quad (3)$$

donde K_F , I_0 y D_0 son parámetros a determinar. Esta expresión es suficientemente precisa y no presenta grandes incoherencias con la física del problema siempre y cuando $z(t) + D_0$ sea la distancia entre los centros de los dos imanes: el que levita y el

fijado en la base del tubo. Así, dado que los dos imanes no se pueden solapar, se evita la asíntota que existe en la expresión. Dicho de otra forma, el valor de D_0 quedará fijado cuando se seleccione el origen de referencia para la posición z , que en principio puede ser arbitrario. Por simplicidad, es recomendable elegir como origen de z la posición de levitación del imán cuando no hay alimentación. Es decir, interesa tomar como $z = 0$ la posición a la que levita el imán en régimen permanente cuando $v = 0$. En ese caso, el parámetro D_0 representa la distancia a la que se sitúan los imanes en esa situación de reposo.

3.2. Modelado de las ramas de actuación y de sensado

Para poder actuar sobre el sistema electromecánico y recibir información del mismo, el prototipo del levitador incorpora una serie de componentes electrónicos que también deben ser modelados. Como ya se ha indicado, la tensión de la bobina se suministra por medio de un puente en H utilizando una modulación por anchura de pulso (PWM). Teniendo en cuenta que el rizado en la corriente es bajo, se puede utilizar el modelo promediado del convertidor y, por tanto, la tensión en la bobina se puede describir aproximadamente como

$$v(t) \approx (2d_k - 1) \cdot V_{cc}, \quad kT \leq t < (k+1)T, \quad (4)$$

donde $d_k \in [0, 1]$ es el *duty*, o ciclo de servicio, expresado en tanto por uno, del k -ésimo periodo de control y T es el periodo de muestreo. Considerando que el módulo PWM del microcontrolador tiene una resolución de n bits, la forma en la que realmente se actúa sobre el sistema es por medio de una variable de tipo entero, $u_k \in \mathbb{Z}$, tal que $0 \leq u_k \leq 2^n - 1$. La relación entre el ciclo de servicio y dicha variable es la siguiente:

$$d_k = \frac{u_k}{2^n - 1}. \quad (5)$$

Por otro lado, la rama de sensado del prototipo está formada por el sensor Hall y una etapa de acondicionamiento. Conjuntamente, estos elementos convierten la posición z en una tensión v_{adc} , que gracias al diseño estará comprendida entre V_{rl} y V_{rh} , las tensiones de referencia baja y alta, respectivamente, del ADC del microcontrolador.

$$v_{adc}(t) = f_{sensado}(z(t)) \quad (6)$$

El sensor Hall genera una tensión que es proporcional a la densidad de flujo magnético que lo atraviesa, pero en este caso se utiliza para medir la posición del imán que levita. Esto hace que modelar teóricamente la función $f_{sensado}$ sea una tarea compleja, así que en la asignatura proponemos utilizar un modelo empírico ajustado por medio de ensayos experimentales. En concreto, nuestra propuesta al estudiantado es usar un polinomio de como máximo cuarto grado. Es decir, aproximamos dicha función como

$$f_{sensado}(z) \approx \sum_{i=0}^4 p_i z^i, \quad (7)$$

donde p_i , $i = 0, \dots, 4$ son los coeficientes a estimar. En cualquier caso, también sería adecuado ajustar las medidas a otras funciones, como una exponencial, si así se considerase.

La señal $v_{adc}(t)$ es la que captura el convertidor analógico-digital del microcontrolador. Este tiene la misma resolución que

el módulo PWM, es decir, n bits, así que la señal finalmente obtenida se almacena en una variable de tipo entero, $y_k \in \mathbb{Z}$, tal que $0 \leq y_k \leq 2^n - 1$. La relación entre ambas variables es por tanto

$$y_k = \frac{2^n - 1}{V_{rh} - V_{rl}} \cdot v_{adc}(kT), \quad (8)$$

donde $t = kT$ es el instante temporal en el que se captura la k -ésima muestra.

4. Caracterización y estimación de parámetros

Una vez presentadas las ecuaciones dinámicas, en esta sección se describe el procedimiento explicado en clase para estimar los parámetros del modelo y caracterizar correctamente el sistema. Además, presentamos como ejemplo práctico algunos resultados de la caracterización de uno de nuestros levitadores.

4.1. Descripción del procedimiento

Para poder completar el modelo, es necesario dar valor a todos los parámetros involucrados. La resistencia R , la inductancia L y la masa M se pueden medir directamente con equipo de laboratorio: las dos primeras con un analizador de impedancias y la última con una báscula de precisión. La distancia entre imanes en reposo, D_0 , también se puede medir con aceptable precisión utilizando una regla.

Para estimar los parámetros K_F e I_0 , nuestra propuesta consiste en realizar una serie de experimentos en régimen estacionario. A partir de (2) puede deducirse que el equilibrio se alcanza cuando la fuerza magnética iguala al peso, es decir,

$$K_F \left(\frac{i_{eq} + I_0}{z_{eq} + D_0} \right)^2 = M g, \quad (9)$$

donde el subíndice “eq” se ha utilizado para enfatizar valores de variables en situación de equilibrio. Si se elige el origen de referencia previamente recomendado en la Sección 3.1, la posición del imán en equilibrio al aplicar corriente nula deberá ser la de reposo, *i. e.*, $z_{eq} = 0$. De ahí, se obtiene la siguiente relación entre K_F e I_0 :

$$K_F \left(\frac{I_0}{D_0} \right)^2 = M g. \quad (10)$$

Manipulando algebraicamente (9) y (10), se puede llegar a la conclusión de que la relación entre la posición y la corriente en cualquier situación de equilibrio debería ser estrictamente proporcional:

$$z_{eq} = \frac{D_0}{I_0} i_{eq}. \quad (11)$$

Por tanto, para obtener I_0 basta con realizar una serie de medidas de z_{eq} e i_{eq} , alimentando el sistema con distintas entradas hasta alcanzar distintas situaciones de equilibrio, y ajustar a continuación la expresión anterior a los datos registrados. El valor de K_F se puede obtener posteriormente despejando en (10).

Con respecto al valor de la constante de fricción C_f , lo más sencillo es realizar un ajuste iterativo, ya sea manual o automatizado, con el objetivo de que la respuesta del modelo frente a una entrada escalón se parezca lo máximo posible a la observada en el sistema real.

4.2. Ejemplo práctico: caracterización de un levitador

Como demostración práctica, a continuación presentamos algunas imágenes y resultados de la caracterización de uno de los levitadores magnéticos usados en la asignatura, resaltando algunos aspectos relevantes que deberían ser tenidos en cuenta durante el proceso. Es importante destacar que el uso de componentes de bajo coste y el montaje manual del sistema hacen que cada levitador presente ciertas particularidades. Esto, que en un producto comercial podría resultar problemático, es interesante de cara a la docencia, pues obliga a que cada equipo de estudiantes haga su propia caracterización. Por cuestiones docentes relacionadas con la evaluación de la asignatura, en la sección no se muestra el valor concreto de ninguno de los parámetros.

En primer lugar, la Figura 4 muestra una fotografía del proceso de medida de la resistencia y la inductancia usando un medidor de impedancias. Debido al modo de funcionamiento de estos medidores, basado en analizar la respuesta frecuencial de la carga conectada, resulta imprescindible seleccionar correctamente la frecuencia de medida. Considerando que la respuesta típica de nuestros levitadores magnéticos está en las decenas o centenares de milisegundos, en este caso se ha usado la frecuencia más baja disponible en el equipo (100 Hz). Por otro lado, la Figura 5 muestra una imagen del proceso de medida de la masa del imán móvil. Si la báscula utilizada tuviera una resolución demasiado baja para medir con precisión el peso de un imán, entonces sería recomendable medir la masa conjunta de varios imanes y posteriormente dividir la medida entre el número total de unidades. Este es el caso mostrado en la figura, donde se ha medido la masa conjunta de doce imanes.

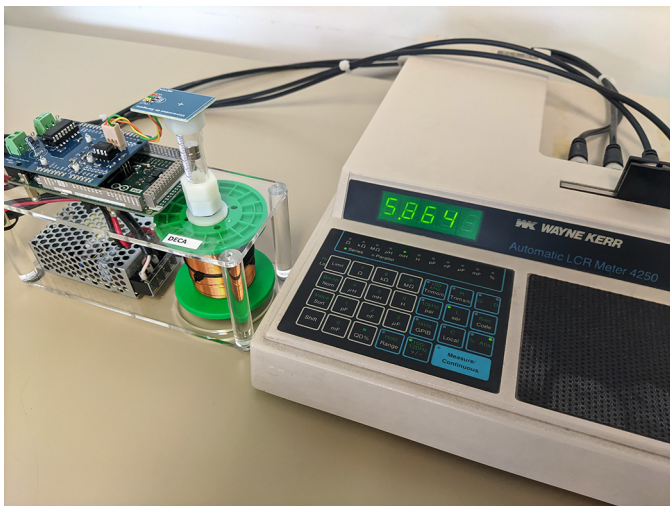


Figura 4: Caracterización del levitador. Proceso de medida de la resistencia y la inductancia con un medidor de impedancias.

Una vez obtenidos los valores de la resistencia, la inductancia y la masa, el siguiente paso es estimar los parámetros de la expresión (3) de la fuerza magnética, siguiendo el procedimiento descrito en el apartado anterior. Para ello es necesario realizar una serie de ensayos en los que se registren las medidas en régimen estacionario de la corriente que circula por la bobina, i_{eq} , y la posición, z_{eq} , del imán en levitación. La forma más simple de realizar estos ensayos es conectando directamente la bobina a una fuente de alimentación de laboratorio funcionando en modo de control por corriente. De este manera, la corriente

actúa como entrada controlada del sistema, permitiendo obtener de forma precisa tantas parejas de datos $i_{eq}-z_{eq}$ como se desee. En estos mismos ensayos se puede registrar también la tensión de entrada al convertor analógico-digital, v_{adc} , lo que permitirá caracterizar posteriormente la rama de sensado.



Figura 5: Caracterización del levitador. Proceso de medida de la masa del imán móvil. Para mejorar la precisión se miden varios imanes al mismo tiempo.

La Figura 6 muestra el conjunto de datos $i_{eq}-z_{eq}$ obtenidos en la caracterización de uno de los levitadores, así como el ajuste de los mismos a la expresión (11), la cual había sido obtenida a partir del modelo en régimen estacionario. Las medidas se han obtenido en orden, realizando primero un barrido desde $z_{eq} = -10$ mm hasta $z_{eq} = +10$ mm (puntos de la zona inferior), seguido de otro barrido equivalente en dirección contraria (puntos de la zona superior). Se puede observar que las posiciones alcanzadas en equilibrio son distintas para corrientes ascendentes y descendentes, lo que evidencia que el núcleo de hierro de la bobina (ver Figura 1) sufre histéresis magnética. Aunque el ciclo de histéresis es considerablemente estrecho, la existencia de este fenómeno hace que sea conveniente tomar datos en ambas direcciones antes de ajustar el modelo (11). De esta forma se consigue un comportamiento más equilibrado, evitando un sobreajuste a corrientes ascendentes o descendentes.

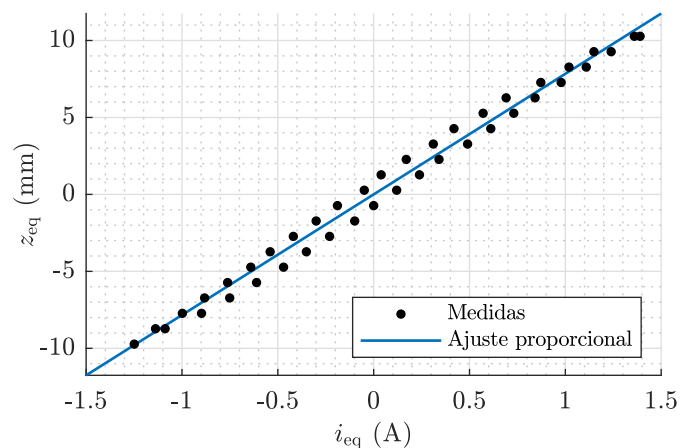


Figura 6: Caracterización del levitador. Medidas de corriente y posición en distintas situaciones de equilibrio y ajuste por mínimos cuadrados al modelo (11). Las medidas evidencian la presencia de histéresis magnética en el núcleo.

Por otro lado, la Figura 7 muestra la caracterización de la función f_{sensado} de la rama de sensado. Las medidas de esta gráfica se corresponden exactamente con los mismos ensayos que los de la Figura 6 y, como puede comprobarse, en este caso la relación $z-v_{\text{adc}}$ es biyectiva (no hay histéresis) y monótonamente creciente. Se observa claramente el comportamiento no lineal de dicha rama. Cuando el imán está muy alejado del sensor Hall (ver Figura 1), el flujo magnético que alcanza a este último es débil y la sensibilidad de la rama de sensado es baja. Esta sensibilidad, no obstante, aumenta con la posición, pues el imán se sitúa cada vez más cerca del sensor y este recibe una mayor proporción del flujo magnético. Tal como se ha indicado, en la asignatura se recomienda ajustar las medidas $z-v_{\text{adc}}$ a una expresión polinómica de cuarto grado como máximo. La Figura 7 muestra dos de estos ajustes, a polinomios de segundo y cuarto grado, como justificación de esta propuesta. Se puede comprobar que, mientras que el polinomio de segundo grado presenta errores apreciables en gran parte del dominio, el de cuarto grado consigue un ajuste muy superior. Es importante destacar que estos ajustes, que se pueden obtener rápidamente por medio de una hoja de cálculo, solo deben usarse a modo de interpolante. De hecho, en la gráfica se ve que ambos modelos polinómicos fallan para posiciones por debajo de $z = -10$ mm, pues toman una pendiente negativa que no encaja con la realidad física del problema. En caso de tener pocas medidas o querer realizar alguna extrapolación, podría ser más conveniente ajustar los datos a otra expresión que sea intrínsecamente monótona. En la figura se muestra, como ejemplo, el ajuste a la función exponencial $a \exp(bz) + c$, donde a , b y c son parámetros positivos.

Finalmente, la Figura 8 ilustra un posible método para estimar el coeficiente de fricción viscosa, C_f , del imán en el interior del tubo. En este caso se ha aplicado una señal cuadrada sobre el levitador, de periodo 2 segundos y valor $u = 511 \pm 50$, cuyo objetivo es desplazar ligeramente el imán alrededor de su posición natural de levitación. La señal aplicada y la respuesta medida se muestran en las dos primeras gráficas de la citada figura, donde se puede observar que este levitador en concreto presenta un comportamiento subamortiguado. También se aprecia que el sobrepasamiento de la salida del sistema cuando el imán se desplaza hacia arriba es mayor que al moverse hacia abajo, lo cual no es más que la distorsión introducida por el comportamiento no lineal de la rama de sensado (ver Figura 7). Por otro lado, esta misma entrada se ha aplicado sobre un modelo no lineal de simulación, basado estrictamente en las ecuaciones no lineales presentadas en la Sección 3 e implementado en Simulink. La tercera y última gráfica de la Figura 8 muestra la respuesta de dicho modelo para tres valores diferentes del coeficiente de fricción viscosa, ilustrando de este modo diversas situaciones que se podrían dar en los sistemas reales. Para este levitador en concreto, el valor que minimiza el error cuadrático medio, que es el que da lugar a la simulación representada en color azul, se ha obtenido gracias a la *Parameter Estimator app* del propio Simulink. En cualquier caso, es importante resaltar que la fricción cambia con la temperatura y no es uniforme a lo largo del tubo, así que no tiene demasiado sentido pretender estimar un valor extremadamente preciso del coeficiente. Debe recordarse que el modelo se usará para diseñar controladores y estimadores, y que será la realimentación y las acciones de tipo integral las que se encarguen de corregir los posibles errores de modelado.

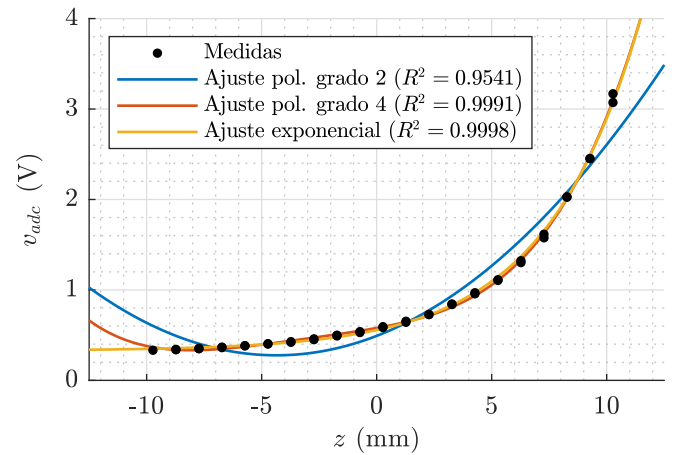


Figura 7: Caracterización del levitador. Medidas de posición y tensión de entrada al conversor analógico-digital en distintas situaciones de equilibrio. Se muestran ajustes polinómicos (de segundo y cuarto grado) y también a la función exponencial $a \exp(bz) + c$.

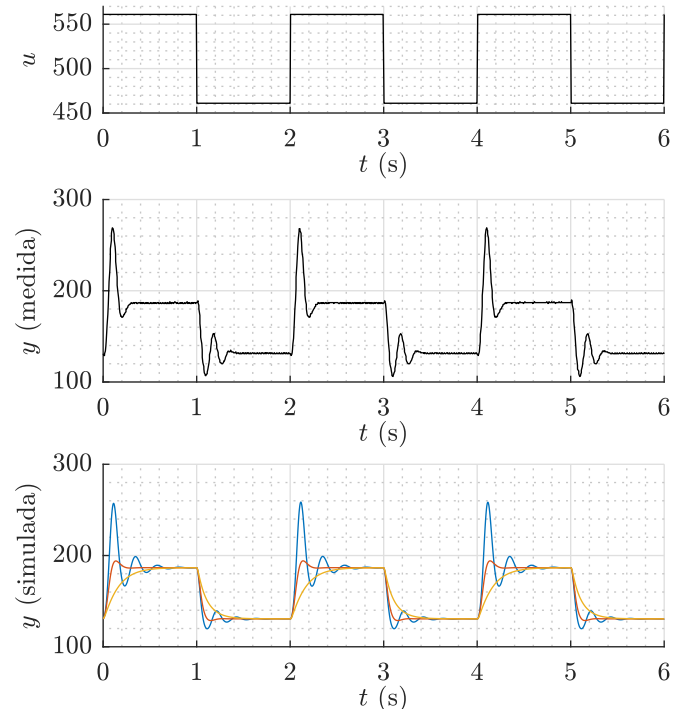


Figura 8: Caracterización del levitador. Entrada aplicada sobre el sistema (arriba), respuesta medida (centro) y respuesta simulada para tres valores distintos del coeficiente de fricción viscosa, C_f . La simulación en línea azul se corresponde con el valor de C_f que minimiza el error cuadrático medio.

5. La asignatura Diseño Electrónico y Control Avanzado

La asignatura en la que utilizamos el levitador magnético descrito anteriormente se denomina Diseño Electrónico y Control Avanzado. Es una asignatura multidisciplinar en la que colaboran de forma coordinada profesores de dos áreas de conocimiento: Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas y Automática. Se imparte actualmente en dos titulaciones de la Universidad de Zaragoza: el Máster en Ingeniería Industrial y el Máster en Ingeniería Electrónica. Aunque las diferencias en

contenidos son menores, sí existen ciertos factores diferenciadores entre los estudiantes de los dos títulos. Por un lado están los estudiantes del Máster en Ingeniería Electrónica, que en promedio han recibido más formación en electrónica y control, lo que hace que ciertos conceptos se puedan dar por asumidos. Además, al ser este un máster de investigación que no concede atribuciones profesionales, el número de estudiantes suele ser reducido y estos suelen estar fuertemente interesados en la temática. En el otro lado están los estudiantes del Máster en Ingeniería Industrial, que en su mayoría cursan la titulación por las competencias profesionales que este otorga. Esto provoca que los grupos sean más numerosos y que una parte de los estudiantes no estén tan interesados en la electrónica o el control.

5.1. Contenidos de teoría

El objetivo fundamental que persigue la asignatura es que los alumnos aprendan a diseñar, implementar y depurar un sistema de control implementado electrónicamente. En las clases de pizarra, no obstante, también se imparten contenidos teóricos, acompañados de ejemplos de aplicación. Los contenidos asociados al área de Tecnología Electrónica son los siguientes:

- Diseño de PCBs (problemas de parásitos, impedancia común y diafonía).
- Acondicionamiento de señales (sensores, amplificadores y conversores ADC).
- Convertidores de potencia DC-DC y su control mediante PWM.
- Diseño de sistemas en tiempo real (tareas y prioridades).
- Aritmética de computación (problemas de cuantificación *hardware* y de representación numérica).
- Microcontroladores (programación y bloques *hardware*).

Por otro lado, los contenidos asociados al área de Ingeniería de Sistemas y Automática son:

- Modelado de sistemas SISO y control clásico (repaso).
- Discretización, control digital por emulación (repaso).
- Modelado de sistemas mediante descripción interna.
- Control por realimentación del estado.
- Observadores de estado y perturbación.
- Técnicas avanzadas (filtros estocásticos, control óptimo LQR, linealización por realimentación).

5.2. Prácticas de laboratorio

Las clases de pizarra se complementan con cinco prácticas de laboratorio de tres horas de duración cada una, todas ellas asociadas al proceso de diseño, implementación y depuración del levitador magnético. Sus contenidos se presentan a continuación de forma resumida:

- Práctica 1: Diseño del PCB con la etapa de acondicionamiento y la etapa de potencia (convertidor DC-DC).

- Práctica 2: Programación de microcontroladores. Muestreo de señales y procesamiento en tiempo real.
- Práctica 3: Estimación de parámetros mediante caracterización experimental. Gestión multitarea en tiempo real. Se realiza ya con el levitador concreto con el que se harán las siguientes prácticas y, en su caso, el trabajo práctico.
- Práctica 4: Diseño e implementación en el prototipo de controladores clásicos (P, PI, PID).
- Práctica 5: Diseño e implementación de un observador determinista (Luenberger) de estado y perturbaciones.

Por su temática, las dos primeras sesiones son impartidas por el profesorado del área de Tecnología Electrónica, mientras que las dos últimas las imparten profesores del área de Ingeniería de Sistemas y Automática. La tercera, por su temática mixta, ha sido impartida indistintamente por profesores de las dos áreas a lo largo de los cursos académicos.

5.3. Trabajo práctico

Las prácticas de la asignatura están planteadas para que los estudiantes adquieran soltura con el sistema y la electrónica de control y lleguen a implementar al menos los controladores más elementales. A partir de ahí, el trabajo de la asignatura se plantea como una continuación de las mismas y consiste en el diseño y puesta a punto de varios controladores adicionales. En concreto, en el trabajo se deben implementar obligatoriamente varios controladores lineales por realimentación del estado y, además, una serie de optativos a decisión del propio estudiante. Puesto que en la quinta práctica ya se aborda el diseño e implementación de un observador de Luenberger, imprescindible para poder realimentar el estado, la puesta a punto de los controladores obligatorios no requiere un excesivo trabajo añadido. Como optativos, se plantea la implementación de observadores estocásticos, controladores LQR o ciertas técnicas no lineales de modelado, estimación y control.

Un aspecto característico del trabajo, ya decidido desde su concepción, es que su evaluación se fundamenta en una entrevista oral. Los estudiantes entregan una memoria con los resultados principales, pero son convocados al laboratorio a una sesión de defensa en la que los profesores comprobamos el funcionamiento del levitador y les realizamos una serie de preguntas. El objetivo fundamental es determinar si han adquirido las competencias necesarias para diseñar e implementar un prototipo electrónico de control de un sistema, pues este es el fin último del trabajo, y no simplemente verificar el correcto funcionamiento de los controladores programados. Entre otras, les hacemos preguntas sobre sus decisiones al diseñar los controladores o la forma de implementar el código, planteando escenarios hipotéticos para comprobar si serían capaces de replicar el procedimiento en un sistema diferente. Además, puesto que el trabajo se realiza por parejas, las entrevistas también permiten determinar el grado de contribución de cada componente, así como prevenir prácticas fraudulentas. Para garantizar una evaluación objetiva, así como el derecho a revisión, las respuestas proporcionadas se registran y archivan por escrito o en formato de grabación de audio, de tal forma que en caso de necesidad se puedan revisar e identificar los aciertos y errores.

6. Sistema de evaluación: desafíos y soluciones adoptadas

La asignatura descrita tiene un marcado carácter práctico desde su concepción y puesta en funcionamiento en el curso 2014-2015. Por ello, el sistema de evaluación ha otorgado desde el inicio un peso importante al proyecto de diseño, construcción y depuración del prototipo del levitador magnético. No obstante, la experiencia adquirida con los cursos ha llevado a introducir algunos cambios, dando lugar en la actualidad a un sistema de evaluación que difiere en gran medida del original. En esta sección contamos nuestra experiencia, explicando los distintos sistemas utilizados y los motivos que llevaron a introducir los correspondientes cambios.

En los cinco primeros cursos, del 2014-2015 al 2018-2019, todos los estudiantes tuvieron que realizar obligatoriamente el trabajo práctico. La asignatura había sido concebida con el proyecto de construcción del prototipo como eje central, así que no se contemplaba ninguna otra alternativa. En este sentido, los profesores éramos plenamente conscientes de que esto suponía una considerable inversión de tiempo, pues había que evaluar individualmente, mediante el sistema de entrevistas, a más de cien estudiantes por curso académico. De hecho, a un promedio de 20 minutos por entrevista, la carga docente de este proceso llegó a ser superior a 40 horas por año. A pesar de ello, se hizo una apuesta firme por el proyecto, pues se percibió desde el principio que el proceso de aprendizaje de la mayoría de los estudiantes se veía beneficiado. Las prácticas de laboratorio en esos cursos no contaron por sí solas para la calificación, pero los estudiantes asistieron de forma generalizada porque permitían avanzar en el proyecto hasta casi finalizarlo.

Durante esos cursos, y con el objetivo de fomentar el trabajo continuado, el trabajo práctico se evaluó mediante tres “hitos” repartidos durante el cuatrimestre. El primero, con un peso del 10 % de la calificación, era el diseño de la placa de circuito impreso, que debía entregarse después de la primera práctica de la asignatura. El segundo, con un peso del 20 %, un examen parcial realizado a mitad del cuatrimestre, con contenidos sobre el modelado teórico del levitador magnético y el diseño de controladores clásicos. Y el tercero, con un peso del 30 %, la entrega final con su correspondiente entrevista, ya descrita en la sección anterior. En total, el trabajo práctico suponía el 60 % de la calificación, quedando el 40 % restante para una prueba escrita (examen) con contenidos teóricos y de resolución de problemas.

En el curso 2019-2020 se decidió hacer el primer cambio importante en el sistema de evaluación. Este vino motivado por la elevada carga de trabajo que suponía el proyecto de la asignatura. Por un lado, una parte importante del estudiantado manifestaba que el proyecto suponía dedicar muchas horas, más incluso que las correspondientes a los créditos de la asignatura. Por otro, las entrevistas individuales de evaluación también conllevaban demasiadas horas para el profesorado, por encima de las reconocidas en el plan de ordenación docente. Como resultado, se decidió que la entrega final del trabajo pasaría a ser optativa. Se pensó que de esta forma solo los alumnos realmente motivados por la materia la harían y la carga docente se reduciría en gran medida. En cualquier caso, se continuaría utilizando el proyecto del levitador como hilo conductor de las clases de pizarra y las prácticas de laboratorio, y se mantendrían los dos primeros “hitos” para garantizar que todos los estudiantes alcanzaban unas competencias mínimas.

Como consecuencia del cambio, se tuvo que reformular el sistema de evaluación. Los dos primeros “hitos”, *i. e.*, el diseño de la PCB y el examen parcial, siguieron pesando respectivamente un 10 % y un 20 % de la nota. El examen final, no obstante, pasaría a valer el 70 % restante. Para tratar de fomentar la realización voluntaria del proyecto, incluyendo la entrega final y la entrevista, se diseñó e implantó un innovador sistema de calificación. El trabajo, en lugar de contar explícitamente como un porcentaje de la calificación, actuaría como modulador, penalizando a aquellos estudiantes que no lo hicieran (la nota máxima en ese caso saturaría en 7 puntos sobre 10) y beneficiando en gran medida a los que sí (la entrega del trabajo eliminaba la saturación y permitía obtener hasta 4 puntos “extra”).

Los resultados obtenidos con este nuevo sistema no fueron del todo los esperados. En primer lugar, porque el número de estudiantes que decidía realizar el proyecto completo era bastante reducido. De hecho, menos del 20 % de los estudiantes matriculados durante los cursos 2019-2020, 2020-2021 y 2021-2022 presentaron el trabajo práctico. Esto permitió reducir la carga docente y dar una mejor atención a los estudiantes interesados, pero los profesores esperábamos un porcentaje mayor. El principal problema, no obstante, no es que hubiera estudiantes que renunciaban a hacer el trabajo, sino que muchos de estos perdían completamente el interés por la asignatura, lo que en definitiva afectaba a su proceso de aprendizaje. Uno de los efectos indeseados es que los alumnos dejaron de asistir mayoritariamente a las últimas prácticas de laboratorio. Desde su punto de vista, el único objetivo de las prácticas era avanzar con el proyecto y, como la entrega final había pasado a ser voluntaria, los estudiantes no tenían ningún incentivo para asistir una vez superados los dos “hitos” de evaluación. Tras tres cursos con ciertas modificaciones menores, finalmente llegamos a la conclusión de que este sistema necesitaba de nuevo una profunda reforma.

Por este motivo, en el curso 2022-2023 decidimos realizar una completa renovación del sistema de evaluación. Los principios seguidos fueron los siguientes:

1. El proyecto del levitador magnético seguiría siendo el hilo conductor de la asignatura.
2. La entrega final sería optativa, pero todos los estudiantes deberían alcanzar unas competencias mínimas en el desarrollo del prototipo.
3. Debería fomentarse el seguimiento continuado de la asignatura, mediante la asistencia tanto a clase de teoría como a las prácticas de laboratorio.

El nuevo sistema, que podría ser calificado como de evaluación continua, cuenta con tres pruebas parciales de teoría y problemas que suponen el 80 % de la calificación. En ellos se incluyen cuestiones teórico-prácticas y pequeños problemas, relacionados bien con el levitador magnético o con sistemas afines. El 20 % restante lo otorgan unos cuestionarios realizados en las prácticas de laboratorio, cuyo objetivo es fomentar la asistencia a las mismas y evaluar unas competencias y contenidos mínimos. Para minimizar la carga docente, todos estos exámenes y cuestionarios han sido diseñados y realizados a través del campus virtual de nuestra universidad, y en su concepción se ha procurado que la corrección fuera prácticamente automática. Hay que indicar que, para la implementación de este cambio,

el profesorado estableció la premisa de no rebajar el nivel de exigencia en las pruebas de evaluación; se trataba de repartir la evaluación para fomentar el seguimiento de la asignatura, no de hacerla más fácil. Finalmente, el trabajo, que continúa siendo voluntario, se evalúa mediante entrevista individual, y su efecto en la calificación es el descrito con el sistema anterior. Aquellos estudiantes que no quieran optar por la evaluación continua disponen de un examen global al final del cuatrimestre.

Para evaluar el rendimiento del nuevo sistema, durante este primer curso de implantación se evaluaron diversos índices. La asistencia promedio a clases de pizarra fue del 60 % de los matriculados, mientras que la asistencia a prácticas de laboratorio fue “plena”, *i. e.*, solo hubo ciertas faltas justificadas por situaciones sobrevenidas. El porcentaje de estudiantes que decidió hacer la entrega final fue del 17 %, muy similar a los tres cursos anteriores. El 82 % de los estudiantes optó por el sistema de evaluación continua, el 6 % por la prueba global y el 13 % no se presentó (la suma es superior al 100 % porque algún estudiante se presentó por los dos procedimientos disponibles). La evaluación continua dio una tasa del 92 % de aprobados con respecto al número de presentados, mientras que en la prueba global esta tasa fue de solo un 14 %. Por ahora, los resultados nos parecen moderadamente satisfactorios, aunque esperaremos a próximos cursos para evaluar el sistema con una muestra mayor de estudiantes.

7. Conclusiones y lecciones aprendidas

A continuación se resumen las principales conclusiones y lecciones aprendidas tras una década de utilización del levitador magnético en la enseñanza de diseño electrónico y control avanzado en la Universidad de Zaragoza:

- El proyecto de diseño, construcción y depuración del levitador se ha mostrado como una herramienta muy útil en el proceso de aprendizaje de los alumnos. A diferencia de las asignaturas previas de grado, nuestra asignatura de máster aborda conceptos mucho más cercanos a la implementación. Por ello, consideramos indispensable que los estudiantes experimenten con un sistema real y se enfrenten cara a cara con los problemas que aparecerán en su futuro profesional.
- Para reducir la extensión temporal del proyecto o evitar problemas asociados al *hardware*, es posible convertir algunas de las tareas de implementación en meros ejercicios académicos. Este es el caso, *e.g.*, del diseño y montaje de la PCB, que en los primeros cursos eran realizados de forma íntegra por los estudiantes. Actualmente, las placas se diseñan en la primera sesión práctica y son evaluadas como si fueran las definitivas, pero no se llegan a fabricar. En su lugar, los prototipos incorporan PCBs diseñadas por el profesorado y soldadas por personal técnico, lo que garantiza su buen funcionamiento.
- La evaluación del trabajo práctico debería incluir obligatoriamente una entrevista individual que garantice la validez y fiabilidad de la calificación. Debemos ser conscientes de que el estudiantado cada vez dispone de más medios donde compartir soluciones a los problemas y trabajos propuestos, ya sean estas correctas o incorrectas. Por

ello, resulta indispensable utilizar sistemas fiables que permitan evaluar objetivamente la adquisición de los conocimientos y competencias planteados. En nuestro caso, creemos que la entrevista es la mejor opción para evaluar adecuadamente la realización del trabajo. Si la carga de trabajo de este método resultase inasumible, una alternativa a contemplar sería incluir en los exámenes de la asignatura preguntas directamente vinculadas con las tareas del proyecto, diseñadas de tal forma que solo se pudieran resolver correctamente si este hubiera sido realizado.

- El proyecto, en caso de desarrollarlo completamente, conlleva una elevada carga de trabajo para el alumnado. El profesorado debe analizar si el número de horas necesario para completarlo corresponde con los créditos docentes de la asignatura y, en caso contrario, plantear la opción de desarrollar solo partes del mismo. Otra alternativa para reducir la carga de trabajo sería su realización en grupos más numerosos, donde cada estudiante adquiriera un determinado rol con responsabilidades asociadas, aunque en este caso la evaluación debería garantizar que todos los miembros del grupo hayan adquirido las competencias exigidas.
- Asimismo, el proyecto también conlleva una elevada carga de trabajo para el profesorado. En particular, la tutorización y la realización de las entrevistas individuales para evaluar los trabajos implica un elevado número de horas, probablemente por encima de las reconocidas. Esta carga de trabajo puede ser reducida eliminando la obligatoriedad de la entrega final, a riesgo de que esto suponga una pérdida de interés por el resto de la asignatura, o bien desarrollando el proyecto únicamente en aquellas asignaturas que tengan un pequeño número de alumnos.
- Es preciso tener en cuenta que, aunque el proyecto esté correctamente diseñado, su temática no resulta atractiva para la totalidad del alumnado. El proyecto generalmente motiva a estudiantes con vocación en electrónica o en control, pero puede resultar poco atrayente, incluso desmotivante, para el resto. Este problema se observa especialmente en el Máster en Ingeniería Industrial, al ser estos unos estudios de carácter generalista, donde los alumnos tienen intereses muy heterogéneos y que, a veces, es cursada únicamente porque proporciona ciertas atribuciones profesionales. Creemos por tanto que el proyecto puede ser más interesante para asignaturas de un máster más específico, o bien para asignaturas optativas de un máster generalista.
- Otro aspecto a considerar es que la asignatura no se imparte de forma aislada, sino en un determinado cuatrimestre en el que el estudiantado también cursa otras materias. Esto tiene algunos efectos inevitables, como la carga de trabajo fluctuante asociada a otros trabajos. De hecho, cada curso se observan más casos de estudiantes que, pese a manifestar interés en la asignatura y reconocer la utilidad del proyecto para su futuro profesional, no realizan la entrega optativa por limitaciones de tiempo.
- A pesar de haber implantado un sistema de evaluación muy ventajoso para los estudiantes que deciden realizar

el trabajo, los resultados obtenidos no han sido del todo los esperados, probablemente por los motivos mencionados en los dos puntos anteriores. El profesorado debe valorar si prefiere optar por la obligatoriedad, asumiendo la carga de trabajo y problemas ya citados, o por hacer optativas ciertas partes, a riesgo de que sean pocos alumnos los que decidan desarrollarlo voluntariamente.

- En el caso de optar por que el trabajo sea voluntario, debería garantizarse que todos los estudiantes adquieran los conocimientos y competencias mínimos asociados al proyecto. Esto se puede conseguir mediante la realización de las prácticas de la asignatura. No obstante, para fomentar la asistencia a las mismas, es imprescindible que estas tengan un efecto apreciable en la calificación. Se ha observado que la voluntariedad simultánea del trabajo y las prácticas supone que una buena parte de los estudiantes pierda el interés en la asignatura.
- El sistema de evaluación continua resulta más atractivo para el estudiantado, pero la percepción general del profesorado durante el primer curso de implantación es que este no ha estado asociado a una mejora sustancial del proceso de aprendizaje. En próximos cursos se valorarán los resultados con una muestra más grande de estudiantes.

Agradecimientos

Los autores queremos agradecer la labor de todo el personal docente y técnico que en algún momento ha contribuido al diseño y desarrollo del proyecto y la asignatura.

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos de innovación docente “Uso de herramientas digitales para la

mejora del aprendizaje en la asignatura multidisciplinar Diseño Electrónico y Control Avanzado” y “Perfeccionamiento de las herramientas digitales utilizadas en la asignatura multidisciplinar Diseño Electrónico y Control Avanzado” (PIIDUZ 705, convocatoria 2022-2023, y PIIDUZ 5026, convocatoria 2023-2024, Universidad de Zaragoza).

Referencias

- Behrens, A., Atorf, L., Schwann, R., Neumann, B., Schnitzler, R., Balle, J., Herold, T., Telle, A., Noll, T. G., Hameyer, K., et al., 2009. MATLAB meets LEGO Mindstorms—A freshman introduction course into practical engineering. *IEEE Trans. Edu.* 53 (2), 306–317.
- Hu, Q., Li, F., Chen, C.-f., 2014. A smart home test bed for undergraduate education to bridge the curriculum gap from traditional power systems to modernized smart grids. *IEEE Trans. Edu.* 58 (1), 32–38.
- Hurley, W. G., Hynes, M., Wolfe, W. H., 2004. Pwm control of a magnetic suspension system. *IEEE Trans. Edu.* 47 (2), 165–173.
- Kokotsaki, D., Menzies, V., Wiggins, A., 2016. Project-based learning: A review of the literature. *Improving schools* 19 (3), 267–277.
- Kumar, A., Fernando, S., Panicker, R. C., 2013. Project-based learning in embedded systems education using an fpga platform. *IEEE Trans. Edu.* 56 (4), 407–415.
- Macías-Guarasa, J., Montero, J. M., San-Segundo, R., Araujo, Á., Nieto-Taladriz, O., 2006. A project-based learning approach to design electronic systems curricula. *IEEE Trans. Edu.* 49 (3), 389–397.
- Montijano, E., Bernal Ruiz, C., Sagüés Blázquez, C., Bono Nuez, A., Artal Sevilla, J., 2017. Ventajas docentes de un flotador magnético para la experimentación de técnicas control. In: *Actas de las XXXVIII Jornadas de Automática*. Gijón, España, p. 495–501.
- Ramírez-Laboreo, É., Sagues, C., Dec. 2018. Reluctance actuator characterization via FEM simulations and experimental tests. *Mechatronics* 56, 58–66.
- Wong, T. H., Nov. 1986. Design of a magnetic levitation control system. *IEEE Trans. Edu.*, 196–200.
- Yu, W., Li, X., 2014. A magnetic levitation system for advanced control education. *IFAC Proc. Vol.* 47 (3), 9032–9037.
- Zhang, Z., Hansen, C. T., Andersen, M. A., 2015. Teaching power electronics with a design-oriented, project-based learning method at the Technical University of Denmark. *IEEE Trans. Edu.* 59 (1), 32–38.