

Ventajas docentes de un flotador magnético para la experimentación de técnicas control

Eduardo Montijano*, Carlos Bernal, Carlos Sagüés, Antonio Bono, Jesús Sergio Artal
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Universidad de Zaragoza
Contacto: emonti@unizar.es

Resumen

En este trabajo se plantea la utilización de un flotador magnético para implementación, puesta a punto y evaluación de estrategias de control en el ámbito de las asignaturas de control de sistemas. Este sistema flotador presenta varias ventajas didácticas desde el punto de vista del control comparado con la versión más popular y utilizada del levitador magnético, manteniendo bastantes de las propiedades del segundo ejemplo. En el artículo se plantean y comparan los modelos matemáticos de ambos sistemas, demostrando las virtudes pedagógicas del flotador. El artículo también incluye resultados de evaluación de diferentes controladores, así como de estimación de variables del sistema.

Palabras clave: Levitador magnético, flotador magnético, innovación docente, teoría de control.

1. Introducción

La teoría de sistemas y su aplicación al control automático conforman una disciplina con gran presencia en la mayor parte de los estudios de ingeniería. Al tener unos fundamentos fuertemente teóricos, que suelen requerir de un gran nivel de abstracción por parte de los estudiantes, la utilización de ejemplos de control reales se convierte en una necesidad en el ámbito docente para garantizar la correcta asimilación de todos los conceptos. Un sistema ampliamente utilizado a la hora de conseguir este objetivo es el levitador magnético [1].

Así, el método pedagógico utilizado es el “learning by-doing”, una técnica didáctica que aprovecha el método científico y curiosidad de los propios estudiantes para fomentar un aprendizaje más profundo y significativo. La literatura centrada en investigación educativa recoge que en contextos universitarios resulta muy útil incorporar este tipo de metodologías activas como estrategia de aprendizaje para crear una dinámica de juego [2, 3], con el propósito de motivar a los estudiantes y que asimilen conceptos de una forma divertida y amena.

Todo ello se traduce en una mejor asimilación de conocimientos junto con un mayor desarrollo de competencias, habilidades y destrezas en el estudiante [4]. En resumen, conlleva un incremento en la eficacia del proceso de enseñanza-aprendizaje.

Un posible montaje de levitación magnética se muestra en la Figura 1 y ha sido estudiado, por ejemplo en [5, 6] desde una perspectiva centrada en el control. Consta de una bobina, que genera una fuerza en un imán, que a su vez es detectado por un elemento Hall. El control es digital, mediante un circuito de acondicionamiento, driver de potencia y algoritmo en tiempo real que se diseñan en la misma asignatura.

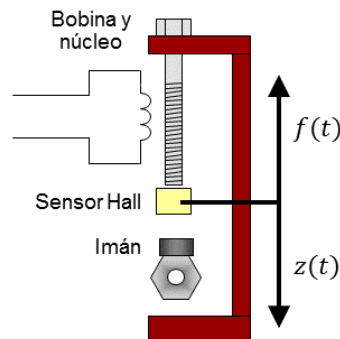


Figura 1: Esquema del levitador magnético

Este levitador presenta dos dificultades desde el punto de vista de su control: la no-linealidad de algunas de sus partes y la inestabilidad. Se trata de un sistema naturalmente inestable, lo que hace que sin la presencia del controlador la tuerca no levite, o se cae al suelo o se pega al imán. Una vez que se resuelve el problema de la inestabilidad también se pueden plantear los objetivos de control en la forma clásica (sobre-oscilación, tiempo de respuesta, error de posición, etc.) o avanzada (capacidad de adaptación, control no-lineal, identificación de sistema, etc.).

Siendo un ejemplo completo, fácil de montar y barato, se ha observado que la inestabilidad del sistema genera muchos problemas de cara a la falta de progresividad en el aprendizaje de los alumnos,

ya que la obtención de los parámetros del modelo es altamente compleja y muy sensible a pequeñas perturbaciones, hecho que complica en gran medida el posterior proceso de control. También dificulta el proceso de evaluación y de laboratorio. Una vez formulado un control resulta complicado para el alumno depurar su funcionamiento, ya que no alcanzar las especificaciones (estabilidad o respuesta) puede ser debido a errores propios conceptuales en el trabajo o a inexactitud en el modelado. Esto ha reducido, en nuestra opinión y experiencia, el aprovechamiento del trabajo práctico y la eficiencia de aprendizaje.

Para poder resolver en parte la falta de progresividad del levitador, la principal contribución de este trabajo es el desarrollo de un sistema diferente, que se muestra en la Fig. 2 y que llamaremos flotador. Se construye a partir del levitador, invirtiendo el orden de los elementos: arriba sensor, tubo con imán y bobina con un imán polarizador. La alteración en la dirección de las fuerzas hace del flotador un sistema naturalmente estable, lo que simplifica el modelado, la implementación y visualización de las virtudes de diferentes controladores. En el documento se han enfatizado las oportunidades educativas que proporciona este sistema, así como el incremento en la participación e interacción de los estudiantes en el aula [7, 8, 9]. El modelo desarrollado ha sido simulado, posteriormente ensamblado, testeado y validado de manera experimental.

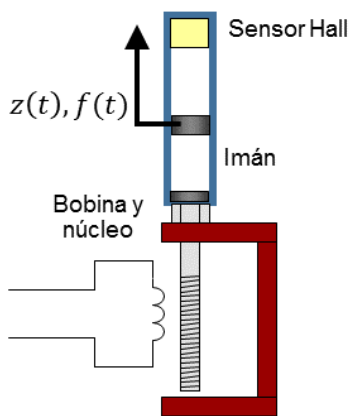


Figura 2: Esquema del flotador magnético

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera: La sección 2 describe la asignatura en la que se ha implantado este sistema, Diseño Electrónico y Control Avanzado. La sección 3 contiene una descripción más detallada de todas las componentes que forman el flotador. Los modelos matemáticos del levitador y el flotador se comparan en la Sección 4, poniendo de manifiesto las ventajas del

segundo con respecto al primero. En la Sección 5 se muestran los resultados que se obtienen con el flotador al utilizar algunas de las técnicas que se explican en la asignatura basadas en espacio de estados. Por último, las conclusiones y posibles líneas de trabajo futuro se describen en la Sección 6.

2. Descripción de la asignatura

La asignatura de Diseño Electrónico y Control Avanzado [10] es una asignatura multidisciplinar del Máster en Ingeniería Industrial de la Universidad de Zaragoza en la que participan profesores del departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones (encargados del diseño electrónico) y del departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas (encargados del control avanzado). La asignatura combina la enseñanza de las técnicas modernas de diseño electrónico y programación de microcontroladores con las técnicas avanzadas de control, centradas en el diseño de reguladores para sistemas lineales en espacio de estados.

Como pre-requisitos, el alumno que se matricula en la asignatura ha debido cursar previamente asignaturas relacionadas y posee conocimientos de electrónica digital y de potencia así como de control de sistemas y la automatización. Sin embargo, es posible que su capacidad para trasladar la abstracción matemática del control a los sistemas reales sea un poco limitada. Se trata por tanto de que pueda rápidamente implementar sus conocimientos básicos, así como implementar y evaluar técnicas más avanzadas de estimación y control de sistemas.

Con el objetivo de asimilar los conceptos teóricos, para superar la asignatura los alumnos tienen que resolver un proyecto que abarca las dos partes de la asignatura. El trabajo representa el 60% de la evaluación de la asignatura, lo que lo convierte en el pilar fundamental de la misma. Es por ello, que la elección de un buen sistema es crucial de cara al aprendizaje y la evaluación de los alumnos.

En los primeros años de impartición de la asignatura este proyecto consistió en desarrollar un sistema completo de control de un levitador magnético. Los alumnos se encargaban de hacer el diseño electrónico de una etapa de acondicionamiento para tratar la medida de un sensor Hall y su lectura desde una placa Arduino Due, así como el montaje de un driver PWM sobre la salida correspondiente del microprocesador. Con el modelo del sistema real calculaban algoritmos de control y finalmente los implementaban en el microprocesador utilizando las técnicas de tiempo real y aritmética de computador explicadas en clase. Aunque para el

proceso de aprendizaje la utilidad del levitador ha quedado demostrada, en los dos años que se ha utilizado se han podido observar ciertas limitaciones y dificultades de este sistema. En particular, este es un sistema naturalmente inestable y fuertemente no lineal tanto en el propio sistema como en el sensor Hall. Esto hace que resulte difícil ajustar el funcionamiento estable y robusto de los controladores calculados. Como consecuencia el alumno es incapaz de aislar los elementos y no sabe si los problemas aparecen en el modelado, en la identificación de los parámetros, en sus conocimientos de control o incluso en la propia implementación hardware o software.

Con el objetivo de eliminar algunas de estas limitaciones, aquí se propone la utilización de un sistema alternativo para el trabajo que, por un lado mantenga las propiedades positivas de su predecesor, abarcando todos los elementos trabajados en la asignatura, pero que a la vez elimine los problemas del sistema original. En concreto, la propuesta es utilizar como sistema del trabajo un flotador magnético. Este sistema es no lineal también, lo que permite enfatizar la cruda realidad pero es naturalmente estable, lo cual hace mucho más fácil identificar los parámetros, en las fases iniciales del desarrollo y el aislamiento de cada parte del desarrollo.

3. Descripción del flotador magnético

En la Figura 3 se muestra el sistema del flotador, con todas las circuitos que intervienen en el mismo. Por un lado, en la parte superior de la figura, a la derecha, se encuentra el imán flotando sobre el tubo, que es el elemento que se desea controlar. En el tubo se pega una regla graduada, para poder medir visualmente la altura del imán en cada momento. La parte superior del tubo lleva unido el sensor Hall de tipo lineal y ratiométrico, mientras que en la parte inferior se encuentra la bobina, encargada de generar la fuerza que controla la posición del imán. En la parte inferior del tubo hay otro imán de neodimio (material N35) que genera una polarización, de forma que en reposo se alcanza una altura de equilibrio.

Por otro lado, en la parte inferior de la figura se observa el micro-controlador (un Cortex M3 de Atmel), basado en una placa Arduino Due, y un módulo que incorpora el driver y la etapa de acondicionamiento. En la asignatura también se trata de enseñar a diseñar la electrónica que permite el interface del control con el exterior. La etapa de acondicionamiento, encargada por un lado de transformar las tensiones del sensor Hall a tensiones adecuadas para la placa y por otro lado en-

cargada de suministrar la tensión adecuada a la bobina mediante un convertidor DC-DC basado en un PWM bipolar.

Por último, en la parte posterior de la figura se observa el osciloscopio utilizado para identificar el sistema y depurar el diseño electrónico, y (se ve parcialmente a la izquierda) una fuente de alimentación encargada de suministrar potencia. La programación se realiza mediante el entorno de desarrollo Arduino en el computador y la depuración del software con el propio monitor serie que lleva integrado dicho entorno.

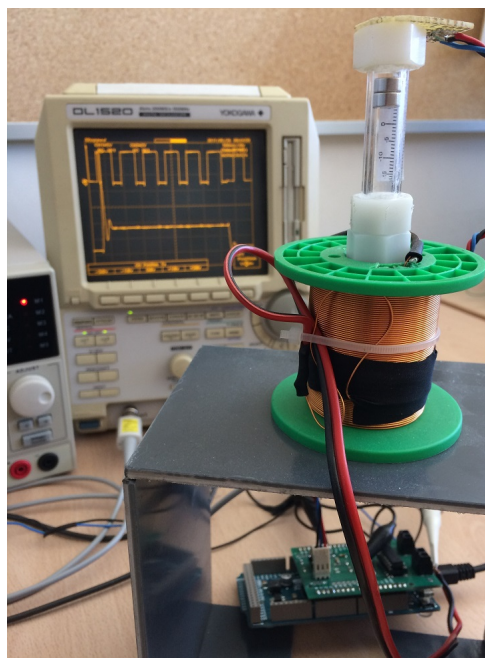


Figura 3: Flotador magnético.

Desde el punto de vista electrónico, es importante notar que el flotador no presenta diferencias significativas respecto a su predecesor. Los dos sistemas utilizan las mismas componentes hardware, por lo que la etapa de acondicionamiento encargada de transformar los niveles de de tensión que proporciona el sensor Hall a niveles compatibles con el micro-controlador, es la misma (una etapa de amplificación diferencial). Esto también hace que la transformación de las medidas del sensor tampoco cambie. Tampoco los conceptos electrónicos que subyacen: aritmética de computador, cuantificación, muestreo y organización de tiempo real de las tareas.

De igual manera, la parte de programación del microcontrolador sigue estando presente sin modificaciones. Todos los problemas relacionados con la división del código del controlador en varias tareas con diferentes prioridades y muestreos, así como los problemas relacionados, tanto del tiempo como de las variables que intervienen en el proceso,

no se ven afectados por el paso de levitación de la tuerca a flotación. Por último, las técnicas de control a utilizar tampoco cambian con el nuevo sistema, ya que se siguen empleando los mismos esquemas de control.

A partir de aquí, todo lo demás son ventajas en el nuevo sistema. Como punto de partida, el flotador es un sistema estable por naturaleza, lo que simplifica en gran medida la obtención de los parámetros del modelo, utilizando las mismas técnicas que anteriormente, además de ser matemáticamente más manejable, como demostraremos en la siguiente sección. Adicionalmente, la comprobación visual de los resultados del control resulta mucho más sencilla e intuitiva. Estos son los aspectos clave e innovadores de cara al aprendizaje del alumno, ya que el nuevo sistema permite a los estudiantes identificar y relacionar de manera muy sencilla los elementos del sistema real con los conceptos estudiados en la asignatura.

4. Modelo matemático

En esta sección se discuten los modelos matemáticos de comportamiento del levitador y el flotador magnético, mostrando los aspectos que tienen en común y las principales diferencias que hacen del segundo un sistema con una mejor cualidad didáctica en el contexto de la asignatura.

El objetivo de ambos sistemas es el mismo, conseguir que una tuerca metálica, o un imán, alcance una distancia deseada (referencia de control) con respecto a un imán cuyo campo magnético es modificado mediante una bobina. La variable de control en ambos sistemas es la misma, la tensión que se alimenta a la bobina mediante un PWM, $u(t)$. Mediante cambios en la tensión, se modifica la intensidad de corriente que circula por la bobina de acuerdo a

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t), \quad (1)$$

donde L representa la inductancia de la bobina y R la resistencia asociada al circuito eléctrico. Variaciones en la intensidad, generan en ambos sistemas una fuerza magnética, $f(t)$, que es la que modifica la posición de la tuerca, $z(t)$.

Sin embargo, los puntos que ambos sistemas tienen en común terminan aquí. Mientras que en el caso del levitador, la fuerza que ejerce la bobina se puede expresar como

$$f(t) = k_0 \frac{(k_1 + i(t))^2}{z^2(t)}, \quad (2)$$

donde k_0 y k_1 son dos constantes del modelo que los estudiantes tienen que ajustar en base a medi-

das que realizan, en el caso del flotador esta ecuación es más sencilla y es razonablemente ajustable con un sólo parámetro,

$$f(t) = k_0 \frac{i^2(t)}{z^2(t)}, \quad (3)$$

desapareciendo la constante k_1 . Lógicamente el alumno ha de identificar en su sistema dichos parámetros para que el controlador calculado en base al modelo se ajuste después a su sistema. Esta simplificación se debe a la estabilidad natural que presenta el flotador. Si no circula corriente por la bobina, la tuerca alcanza una posición de equilibrio cuando la fuerza de repulsión entre los dos imanes es igual al peso de la tuerca, posición de reposo con todas las variables igual a cero.

Por otro lado, aplicando al segunda ley de Newton para considerar el equilibrio de fuerzas, en el flotador obtenemos

$$M \frac{dz(t)}{dt^2} = f(t) - Mg - k_2 \frac{dz(t)}{dt}, \quad (4)$$

con k_2 un coeficiente de rozamiento viscoso que también se tiene que ajustar de manera empírica. En el levitador, la ecuación de equilibrio de fuerzas queda de la siguiente manera:

$$M \frac{dz(t)}{dt^2} = Mg - f(t) \quad (5)$$

Linealizando la fuerza, eq. (2) y (3), en el punto al que queremos que nuestra tuerca se estabilice, obtenemos

$$f(t) \simeq k_i i(t) + k_z z(t), \quad (6)$$

donde ya se ha eliminado el punto de trabajo y $k_i > 0$ y $k_z < 0$ son las constantes obtenidas del proceso de linealización. Si sustituimos esta ecuación en (4) obtenemos una relación entre $z(t)$ e $i(t)$ de segundo orden estable, con una pareja de polos complejos y conjugados con parte real negativa. La misma sustitución en (5) da lugar a un modelo en el que se refleja la inestabilidad del sistema.

Por último, viendo de nuevo la Figura 2, la colocación del sensor Hall en la parte superior del tubo del flotador también simplifica el lazo de realimentación, ya que si $z(t)$ aumenta, también lo hace la tensión que mide el sensor, mientras que en el caso del levitador un aumento de $z(t)$ produce una disminución de la tensión, dando lugar a un signo -1 que todavía confunde más a los alumnos.

En resumen, el flotador es un sistema naturalmente estable que da lugar a un modelo matemáticamente más sencillo en el que resulta más fácil la identificación de los parámetros. Desde una perspectiva puramente didáctica, presenta ventajas

significativas a la hora de mostrar a los estudiantes la aplicación de diferentes técnicas de control sin por ello afectar a la parte relacionada con la electrónica de la asignatura.

5. Ejemplos de control del flotador magnético

En esta sección se ilustran resultados de algunos de los controladores que los alumnos deben plantear en el marco de la asignatura utilizando el flotador magnético. En concreto se plantea la utilización de dos controladores basados en espacio de estados. El primero es un esquema de control con pre-alimentación de consigna y estimación del estado, definido mediante altura, velocidad e intensidad. El segundo esquema de control está basado en el uso de integradores, un único integrador en este caso, también con estimación del estado. Los dos esquemas de control se muestran en la Figura 4, donde los bloques con L representan las leyes de control empleadas.

Al ser un sistema estable, el alumno ajusta las leyes de estimación y control en el propio sistema de una forma más sencilla. Otra ventaja del flotador es la posibilidad de modificar la referencia del sistema. En el caso del levitador, que es un sistema naturalmente inestable, era mucho más complicado. Esto permite ver en el osciloscopio (o en el monitor serie de Arduino) la respuesta transitoria del sistema sin necesidad de preocuparse por congelar la imagen en el instante adecuado. En nuestros experimentos, la referencia alterna entre valores de 0 y 4 milímetros con una frecuencia aproximada de medio Hercio.

La Figura 5 muestra los valores de la altura y de la tensión en la bobina para los dos esquemas de control planteados. En la primera fila de la figura se muestra la altura del imán, donde se observa que el esquema basado en integradores consigue subir los 4mm, mientras que el esquema de prealimentación, a causa del rozamiento seco, únicamente sube 2.5mm. La segunda fila muestra el valor de la tensión aplicada en la bobina, donde también se observa que la acción calculada por el esquema basado en integradores es más suave. Conviene notar que en ambos esquemas se ha utilizado la misma asignación de valores propios para el cálculo de las matrices con las leyes de control y de observación. De este experimento, los alumnos son capaces de observar las bondades y las limitaciones de dos esquemas de control más avanzados que el clásico PID, que también tienen que implementar en la asignatura.

Para concluir esta sección, la Figura 6 muestra los valores de las 3 variables estimadas por el ob-

servador en el esquema de control basado en pre-alimentación. Al ser capaces de variar la consigna, los alumnos también pueden observar diferencias en las otras variables de estado utilizando el flotador. Por ejemplo, se observan los picos en la variable velocidad cada vez que hay un cambio en la referencia y el imán se desplaza al nuevo punto deseado. En el caso de la altura del imán, los alumnos también comprueban la bondad del observador (o los posibles fallos) comparando la estimación de la altura con la medida (transformada a metros) que proporciona el sensor Hall, o comparando el valor estimado de la intensidad de la corriente que circula por la bobina con el valor que marca la fuente de alimentación.

6. Conclusiones

Este trabajo ha mostrado las ventajas potenciales que presenta la utilización de un flotador magnético como alternativa al uso de un levitador magnético en el ámbito de la docencia en control. Comparado con el levitador, se ha demostrado que el flotador presenta un modelo matemático ligeramente más sencillo, siendo además estable por naturaleza. Adicionalmente, el nuevo sistema no requiere modificaciones significativas en el diseño electrónico ni en la aplicación de las técnicas de control. De esta forma, a nivel didáctico se mejora la comprensión de los aspectos relevantes del control.

En el artículo se han mostrado también ejemplos de algunos de los controladores utilizados en la asignatura de Diseño electrónico y control avanzado integrada en el Master de Ingeniería Industrial, donde se puede observar el comportamiento del flotador con cambios en la referencia. Como trabajo futuro, se plantea realizar un análisis más detallado y sistemático del aprendizaje de los alumnos con esta metodología docente.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de innovación docente PIIDUZ_16_074 de la Universidad de Zaragoza.

Referencias

- [1] T. H. Wong. Design of a magnetic levitation control system. *IEEE Transactions on Education*, 29(4):196–200, Nov 1986.
- [2] G. S. Mason, T. R. Shuman, and K. E. Cook. Comparing the effectiveness of an inverted classroom to a traditional classroom in an upper-division engineering course. *IEEE Transactions on Education*, 56(4):430–435, November 2013.

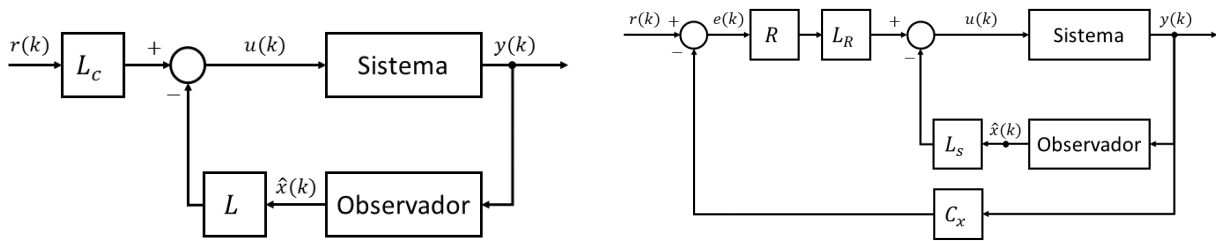


Figura 4: Esquemas de control empleados para probar el flotador.

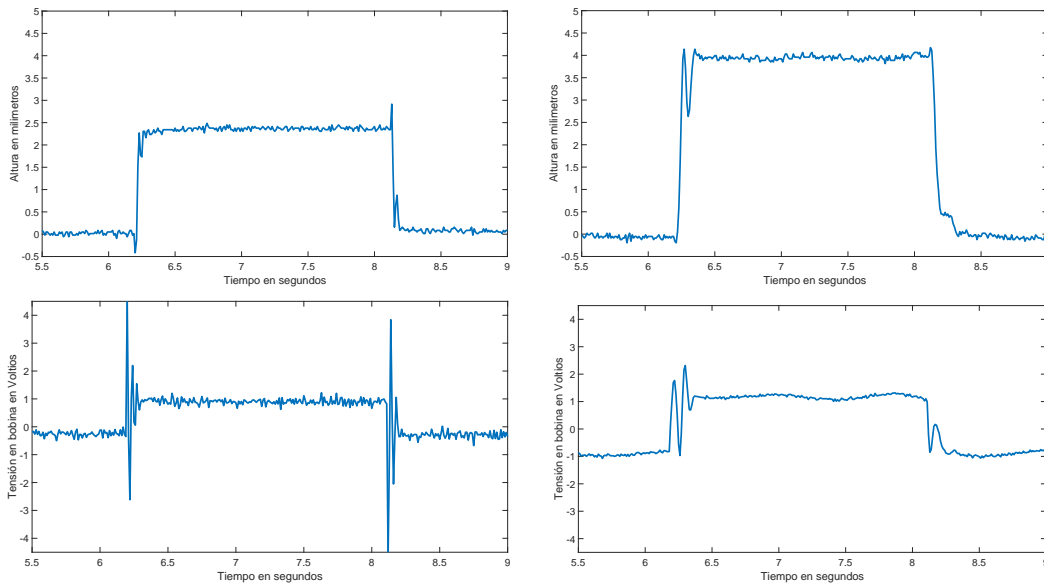


Figura 5: Evolución de la altura y la tensión aplicada a la bobina para el flotador y los dos esquemas de control de la Figura 4. En la primera fila se muestra la altura del imán, donde se observa que el esquema basado en integradores consigue subir los 4mm, mientras que el esquema de prealimentación, a causa del rozamiento seco, únicamente sube 2.5mm. La segunda fila muestra el valor de la tensión aplicada en la bobina.

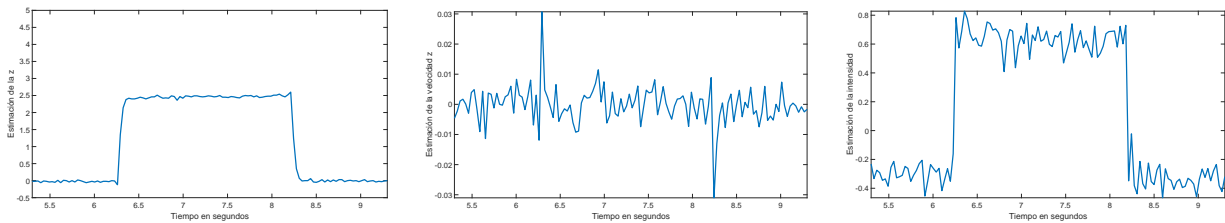


Figura 6: Estimación de las tres variables de estado para el esquema de control basado en prealimentación. De izquierda a derecha: altura, velocidad e intensidad.

[3] L. Moreno, C. González, I. Castilla, E. González, and J. Sigut. Applying a constructivist and collaborative methodological approach in engineering education. *Elsevier Computers & Education*, 49(3):891–915, November 2007.

[4] C. A. Jara, F. A. Candelas, S. T. Puente, and F. Torres. Hands-on experiences of undergraduates students in automatics and robotics using a virtual and remote laboratory. *EL-*

sevier Computers & Education, 57(4):2451–2461, December 2011.

[5] Y. Zi-Jiang and T. Michitaka. Adaptive robust nonlinear control of a magnetic levitation system. *Automatica*, 37(7):1125–1131, July 2001.

[6] V. S. Bandal and P. N. Vernekar. Design of a discrete-time sliding mode controller for a magnetic levitation system using multirate

- output feedback. In *American Control Conference*, pages 4289–4294, 2010.
- [7] V. A. Oliveira, E. F. Costa, and J. B. Vargas. Digital implementation of a magnetic suspension control system for laboratory experiments. *IEEE Transactions on Education*, 42(4):315–322, Nov 1999.
- [8] R. Galvao, T. Yoneyama, F. M. U. de Araujo, and R. G. Machado. A simple technique for identifying a linearized model for a didactic magnetic levitation system. *IEEE Transactions on Education*, 46(1):315–322, Feb 2003.
- [9] W. Yu and X. Li. A magnetic levitation system for advanced control education. In *International Congress of Federation of Automatic Control*, pages 9032–9037, 2014.
- [10] Guía docente de la asignatura de diseño electrónico y control avanzado. <http://titulaciones.unizar.es/guias16/index.php?asignatura=60805>. Accessed: 2017-05-30.