

# Diseño y Construcción de un Módulo para Pruebas de Levitación Magnética

Aurelio Beltrán, Iván E. Beltrán, Alejandro Chacón, Carlo A. Beltrán, y Rafael Villela

## *Design and construction of a test bench for magnetic levitation*

Recibido: mayo 12, 2013

Aceptado: junio 10, 2013

Palabras clave: electroimán; sensor; levitación; acondicionamiento; LabView; NI-ELVIS.

### **Abstract:**

*This paper presents the design and construction of the maglev module IEBG-CA59010, which includes analysis, design and selection of each part of the magnetic levitator, signal conditioning such as electromagnet and position sensor control, power amplifier and sensor power. Furthermore, the signals are conditioned to implement control algorithms with data acquisition board, in this case the LabView software and the NI-Elvis National Instruments. The analysis of different magnetic levitators was performed in the literature by checking their most important characteristics. The magnetic levitation prototype and results are presented here.*

**Keywords:** Electromagnet, sensor, levitation, conditioning, LabView, NI-ELVIS.



NO de los principales problemas que se presentan para lograr una alta eficiencia en la enseñanza en las Universidades Públicas es la falta de módulos de experimentación que permitan a los estudiantes lograr la excelencia en el aprendizaje. Para complementar los conocimientos obtenidos mediante la teoría en la orientación de control y automatización se requiere el empleo de módulos para experimentar con distintos algoritmos de control y formas de modelado para estudiar las diferencias.

Uno de los principales problemas para lograr una alta eficiencia en la enseñanza en las Universidades Públicas es la falta de módulos de experimentación que permitan a los estudiantes lograr la excelencia en el aprendizaje

Considerando que la levitación magnética motiva, sorprende y tiene un gran impacto según se reporta en la li-

teratura [1]-[3], por lo que se trabajó en un módulo para experimentar debido a sus características principales.

Para el diseño de cada una de las partes del módulo se hizo investigación en artículos especializados en los que se presentan diferentes tipos de levitadores magnéticos, construidos en los centros de educación o por empresas dedicadas a la producción de equipos para laboratorio. Se encontró que los levitadores usualmente tienen las siguientes características: el objeto a levitar es una esfera metálica y el sensor de posición esta constituido por un diodo emisor infrarrojo y un fototransistor colocados uno frente al otro en los costados de la estructura [1][3][6]. Debido a este tipo de estructura el punto de equilibrio en el control de posición es un punto estático. Por otro lado, existen los prototipos fabricados por empresas como Quanser <http://www.quanser.com/>, ECP <http://www.ecpsystems.com/>, FBK <http://www.fbk.com/>, las cuales ofrecen dispositivos similares, excepto ECP que con su prototipo (Model 730: Magnetic Levitation) el cual permite levitar un disco magnético con un grado de libertad tanto utilizando fuerzas de atracción como de repulsión ya que cuenta con dos electroimanes uno en la parte superior y otro en la parte inferior, con dos sensores de posición laser.

En este artículo se detalla el diseño, construcción y modelado de un levitador magnético que tiene buenas características de funcionamiento y que se puede considerar de bajo costo. Se utiliza el módulo Educational Laboratory Virtual Instruments Statement NI-ELVIS, una computadora y el software LabView para realizar las pruebas de funcionamiento.

## DISEÑO DE LAS PARTES DEL LEVITADOR MAGNÉTICO

En esta sección se presenta el análisis y diseño de las partes que conforman el levitador como son: circuito del sensor de posición, actuador (bobina o electroimán), circuito de acondicionamiento de señales, etapa de potencia del actuador, complementado con el programa para elaboración del controlador y tarjeta de comunicación entre la computadora y el levitador magnético.

Del análisis realizado sobre los diferentes tipos de levitadores encontrados en la literatura, las pruebas realizadas sobre modelos preliminares y con los resultados obtenidos se desarrolló el diseño mostrado en la Fig. 1, el cual cuenta con las mejores características de las diferentes estructuras analizadas.

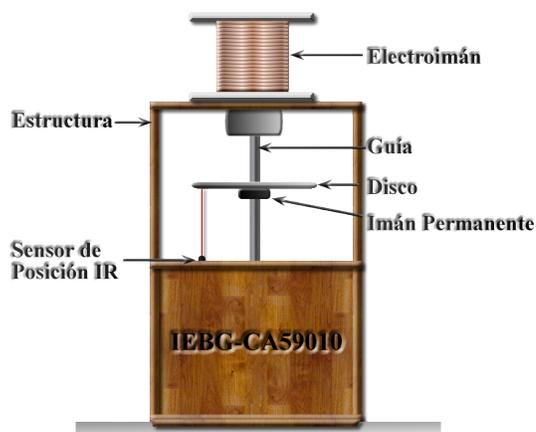


Figura 1. Estructura propuesta para el Levitador Magnético IEBG-59010.

## Diseño del electroimán

Para el diseño del electroimán se utilizó la información proporcionada en [7], donde se hace un análisis para optimizar las dimensiones de éste como son diámetro del núcleo, grosor del embobinado y longitud, a partir del diámetro de una esfera utilizada como elemento de levitación. En la Fig. 2, se muestra la estructura del núcleo utilizado para el cálculo en dicho análisis.

Para encontrar el diámetro óptimo de la bobina se propone la ecuación (1).

$$\Delta = 0.8D, \quad (1)$$

donde  $\Delta$  es el diámetro de la bobina y  $D$  el diámetro de la esfera a levitar.

El grosor de la bobina se calcula con (2).

$$w = 0.5D, \quad (2)$$

donde  $w$  es el grosor de la bobina.

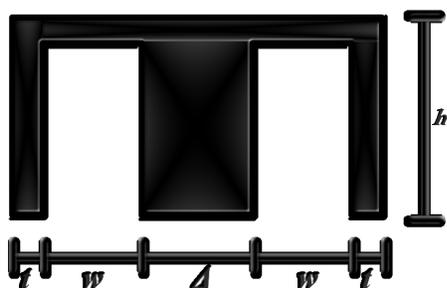


Figura 2. Núcleo utilizado para los cálculos del solenoide.).

La longitud de la bobina está dada por (3)

$$h = 2w, \quad (3)$$

donde  $h$  es la profundidad (longitud) del embobinado.

$$a = \frac{D}{9}, \quad (4)$$

donde  $a$  es la constante de decaimiento de la bobina.

Finalmente la coraza de la bobina debe tener un grosor  $t$ , que se obtiene con (5).

$$t = 0.1D \quad (5)$$

Tomando en cuenta las consideraciones de [1][2][7], para obtener un dispositivo de prueba de bajo costo y las características de un sistema comercial. Se utiliza la información obtenida para calcular la bobina.

Las dimensiones obtenidas considerando la masa de la esfera a levitar de  $M = 0.6$  Kg, la misma masa que el objeto utilizado en la estructura propuesta, considerando que lo que interesa es la fuerza de atracción sin importar la forma del objeto atraído. Dicha esfera tiene un diámetro de 4.7 cm, por lo que las dimensiones obtenidas para la bobina son las siguientes:

$$\Delta = 0.8 \times 4.7 = 3.8 \text{ cm}$$

$$w = 0.5 \times 4.7 = 2.35 \text{ cm}$$

$$h = 2 \times 2.35 = 4.7 \text{ cm}$$

Con los datos obtenidos se procedió a la construcción del electroimán<sup>1</sup>, con las consideraciones siguientes: el embobinado es manual y no contará con coraza, se necesitará un espacio mayor para obtener una fuerza de atracción equivalente, por lo que la bobina tendrá 6 cm de longitud, el cálculo del número de vueltas se hace considerando la sección transversal del conductor y dos bobinas en paralelo, ya que de acuerdo con [4][7], permiten un comportamiento térmico más adecuado. El número de espiras se calculó utilizando un alambre magneto #23 con una capacidad de corriente de 1.6 Amperes o 3.2 Amperes entre ambas bobinas. El resultado son 1000 vueltas con una longitud de 198 m, una resistencia de 6  $\Omega$ , 1 Kg de peso, de acuerdo con los datos proporcionados por el fabricante de alambre magneto. El electroimán construido se muestra en la Fig. 3. Donde se puede apreciar el resultado final.



Figura 3. Electroimán diseñado y construido para el levitador magnético.

El electroimán tiene una inductancia de 100 mH.

## Selección del objeto a levitar

El objeto a levitar es un disco duro de computadora arreglado con un buje y un imán permanente pegado a éste. Ya que los desplazamientos son en una guía de aluminio. Se seleccionó porque puede reflejar de manera eficiente un rayo de luz infrarrojo y detectarse por un fototransistor lo que

<sup>1</sup> Los autores recomiendan comprar el que reúna las características más cercanas a las calculadas.

permite medir de manera eficiente la posición. El disco se muestra en la Fig. 4.



Figura 4. Disco acondicionado como objeto a levitar.

### Circuitería necesaria

Como en las pruebas se utiliza el módulo de National Instruments NI Elvis entonces la señales de control y del sensor de posición del disco se acondicionan de acuerdo con las características de los puertos de entrada y salida análogas entregadas por éste, cuyo valor máximo es 10 V, por esto se diseñó un arreglo de un amplificador operacional con dos transistores en configuración darlington como se muestra en la Fig. 5. Con este arreglo se eleva el voltaje a un valor máximo de 20 V y se maneja adecuadamente la corriente que exige el electroimán para atraer el objeto a levitar.

Otra de las señales importantes es la proporcionada por el sensor de posición la cual se acondiciona para ser utilizada en el control del sistema con el software de LabView con el circuito de la Fig. 6. El fototransistor entrega 5 V cuando no incide luz sobre él, con el arreglo se acondiciona de tal manera que a la entrada análoga del módulo NI-ELVIS se tenga un valor máximo de 10 V.

### Módulo de levitación construido

El levitador construido tiene la estructura con las mejores características de los levitadores de ECP, Quasner y FBK. Por lo anterior se considera que es una estructura híbrida que permite cumplir con los planteamientos iniciales de

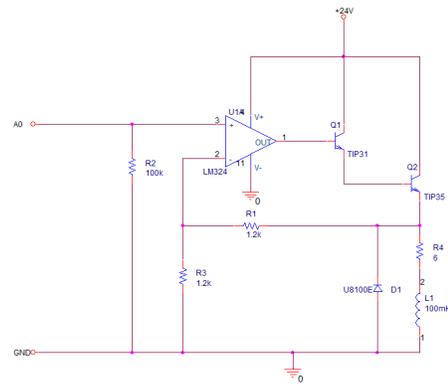


Figura 5. Circuito que controla el voltaje aplicado en la bobina.

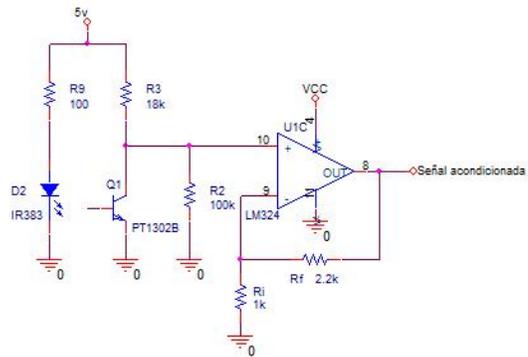


Figura 6. Circuito de polarización y acondicionamiento del sensor.

obtener un prototipo económico y con buenas características de funcionamiento. El resultado final se muestra en la Fig. 7.

## PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS PARTES DEL LEVITADOR

En esta sección se muestran los resultados de las pruebas realizadas en el sensor de posición y electroimán.

### Análisis del comportamiento del electroimán

Una vez construido el levitador magnético se procedió a analizar su comportamiento, en este caso el electroimán.



Figura 7. Levitador magnético IEBG-CA59010 construido.

Para lo cual se colocó el objeto a ser atraído a diferentes distancias midiéndose el voltaje requerido para elevarlo. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Voltajes aplicados al electroimán y posición del disco.

| Voltaje (V) | Posición (cm) |
|-------------|---------------|
| 6.8         | 3.4           |
| 7.6         | 3.5           |
| 8.4         | 3.7           |
| 9.2         | 3.9           |
| 9.6         | 4             |
| 10          | 4.2           |
| 10.4        | 4.4           |

Los valores obtenidos se procesaron utilizando un software para la generación de gráficas, el resultado se muestra en la Fig. 8. La respuesta muestra que tiene un comportamiento no lineal.

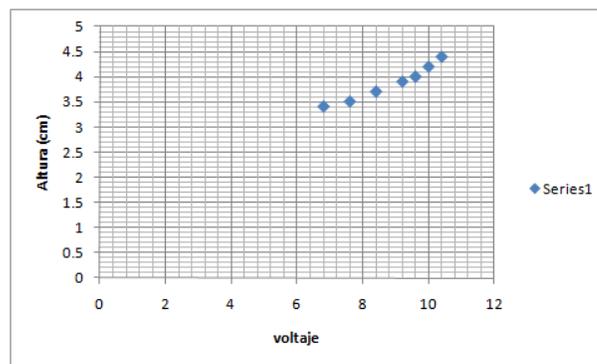


Figura 8. Gráfica voltaje de atracción de la bobina vs. altura del disco.

## Análisis del comportamiento del sensor

Para determinar la posición del dispositivo a levitar, se utiliza un sensor óptico conformado por un diodo infrarrojo (IR383) con el fototransistor (FTP 1302B), el cual se sitúa en la parte inferior del sistema como se indica en la Fig. 1, lo cual permite medir un rango amplio de posiciones comparativamente con [1][5][8].

Para realizar las mediciones pertinentes se ubica el objeto a levitar (disco), a una distancia prefijada y se mide el voltaje entregado por el sensor de posición. De esta manera se obtuvieron los valores que se muestran en la tabla 2. Las distancias están medidas a partir del final del núcleo a la superficie reflejante del disco. Como el centro del disco tiene un espesor mayor, y aunque la distancia que el disco puede desplazarse es de 7 cm, la zona de levitación se limita a 4 cm.

Los valores obtenidos se grafican para ver el comportamiento del sensor. El resultado se muestra en la Fig. 9.

Finalmente se obtiene la ecuación linealizada de la respuesta del sensor de posición utilizando mínimos cuadrados (6). Esta ecuación se utiliza en la programación en el programa de software utilizado para el control, en este caso LabView para determinar la posición medida por el sensor a partir del voltaje entregado y poder compararla con el valor de posición deseado.

$$V_s = -10.4 + 709.23x, \quad (6)$$

Tabla 2. Voltajes del sensor vs. distancia entre disco y el solenoide.

| Distancia (m) | Voltaje (V) |
|---------------|-------------|
| 0.072         | 5.74        |
| 0.067         | 5.45        |
| 0.062         | 4,85        |
| 0.057         | 4.32        |
| 0.052         | 3.8         |
| 0.047         | 3.04        |
| 0.042         | 2           |
| 0.037         | 1.1         |
| 0.032         | 0.71        |

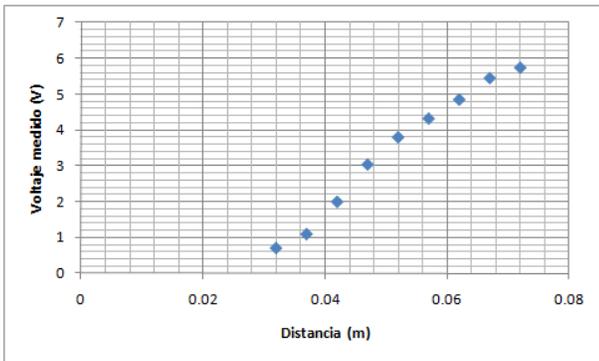


Figura 9. Gráfica voltaje del sensor vs. distancia entre disco y solenoide.

donde  $x$  representa la distancia entre el disco y solenoide y  $V_s$  el voltaje entregado por el sensor.

Se realizaron pruebas de la distancia a la que se encuentra el disco a levitar y la corriente necesaria para elevarlo. Se repite el procedimiento anterior para obtener la ecuación linealizada.

$$I_a = -1.484 + 100.89x, \quad (7)$$

donde  $I_a$  es la corriente requerida para atraer el objeto a levitar y  $x$  es la distancia de separación entre el electroimán y el objeto a levitar.

## MODELADO MATEMÁTICO DEL LEVITADOR

El sistema de levitador magnético diseñado no es una estructura convencional ya que el disco a levitar tiene unido un imán permanente del tipo anillo de Neodymium (Nd-Fe-B), el cual modifica el comportamiento del sistema al contribuir con una fuerza de atracción adicional al moverse el disco acercándose o alejándose por la fuerza de atracción del electroimán.

El campo magnético del sistema se puede expresar por (8).

$$\vec{B}_t = \vec{B}_e + \vec{B}_m, \quad (8)$$

donde  $\vec{B}_t$  es el campo magnético total,  $\vec{B}_e$  es el campo inducido por el electroimán y  $\vec{B}_m$  es el campo magnético inducido por los imanes NIB.

$$\phi(t) = \phi_e + \phi_{Mx}(t), \quad (9)$$

donde  $\phi(t)$  es la relación de enlace flujo-corriente del electroimán y  $\phi_{Mx}(t)$  es el flujo introducido por los imanes NIB. La función flujo-corriente del electroimán en función de la posición esta dada por

$$\phi_e(x) = L(x(t)i(t)) \quad (10)$$

Por lo que la relación del flujo magnético total es

$$\phi(t) = L(x(t)i(t)) + \phi_{Mx}(t), \quad (11)$$

donde  $i(t)$  denota la corriente a través del electroimán, y  $x(t)$  denota el desplazamiento del objeto levitado a la parte inferior del electroimán.  $L(x)$  indica la inductancia cuando el objeto levitado se asume que es de hierro/acero y se puede considerar como una función de  $x(t)$ , usando una aproximación  $L(x)$  se puede expresar como (12)

$$L(x) = L_1 + \frac{L_o}{1 + \frac{x}{a}}, \quad (12)$$

donde  $L_o = L(0) - L(\infty)$ ,  $L_1 = L(\infty)$  y  $a$  es un coeficiente constante.

De acuerdo a la teoría electromagnética, la co-energía magnética, denotada como  $W$ , se puede calcular (13).

$$W(t) = \int_0^{i(t)} \phi(\vec{l}, x(t)) d\vec{l} \quad (13)$$

$$W(t) = \frac{1}{2} \left( L_1 + \frac{L_o}{1 + \frac{x(t)}{a}} \right) i^2(t) + \phi_M(x(t)i(t)) \quad (14)$$

Al introducir la fuerza magnética, denotada como  $f(t)$  se determina la co-energía magnética de acuerdo con

$$f(t) = \frac{\partial W(t)}{\partial X_a} \quad (15)$$

$$m \frac{d^2 x(t)}{d^2 t} = mg + f(t) + f\dot{x} \quad (16)$$

$$m \frac{d^2 x(t)}{d^2 t} = mg - \frac{1}{2} \frac{L_o i^2(t)}{a \left( 1 + \frac{x(t)}{a} \right)^2} + \frac{d\phi_M x(t)}{dt} \quad (17)$$

Comparado con los modelos usados en [5][9]; el tercer término en el lado derecho en (17) es nuevo y éste es la fuerza electromotriz FEM inducida por el imán permanente NIB.

Con un análisis del circuito, la perspectiva eléctrica del electroimán se puede modelar como

$$u(t) = Ri(t) + \frac{d(Lx(t)i(t))}{dt} + \frac{d\phi_M x(t)}{dt}, \quad (18)$$

donde  $R$  es la resistencia de bobina, y  $u(t)$  es el voltaje de entrada a la bobina.

Debido a la dificultad de obtener los valores del modelo matemático, se optó por obtener un modelo de manera experimental en base a aplicar una entrada escalón y obtener los datos de la respuesta utilizando el módulo NI-Elvis resultando (19).

$$\frac{X(s)}{V(s)} = 0.37 \frac{234.81}{s^2 + 11.11s + 234.81} \quad (19)$$

Modelo que no logra contener todas las características del sistema pero que es una aproximación medianamente buena.

## Control de posición PID

Finalmente con el modelo del sistema obtenido se calcularon las ganancias del controlador PID utilizando el método de cancelación de polos.

$$K_p = 1$$

$$K_i = 21.28$$

$$K_v = 0.09.$$

Para la aplicación del controlador se utilizó el software de LabView en el cual se programó el sistema de control y se utilizó el módulo NI Elvis para su aplicación. En la Fig. 10, se muestra el panel del usuario.

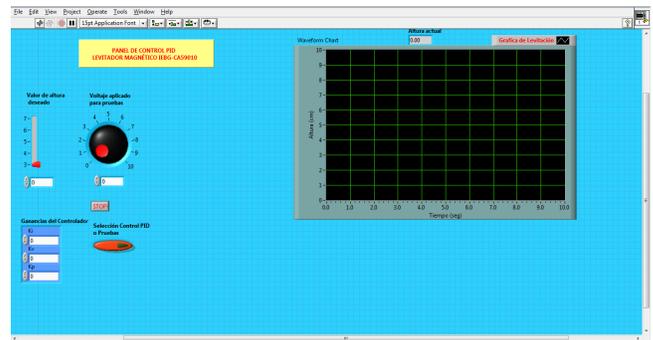


Figura 10. Panel frontal del control PID en LabView.

## RESULTADOS

El comportamiento del levitador se analizó a partir de las respuestas obtenidas al aplicar el sistema de control en lazo cerrado. Se observó la respuesta cuando al sistema se le programa un valor de posición deseada.

- **Caso 1.** Alcanzar una posición de 3.7 cm sin perturbaciones. El resultado obtenido se muestra en la Fig. 11.
- **Caso 2.** Una segunda prueba consistió en exigirle al sistema que siga una trayectoria, para lo cual se le exigió un valor de posición representado por una onda senoidal de amplitud de 1 cm con un valor de referencia de 4.4 cm.

El valor deseado se muestra en la Fig. 12, y el resultado obtenido en la Fig. 13.

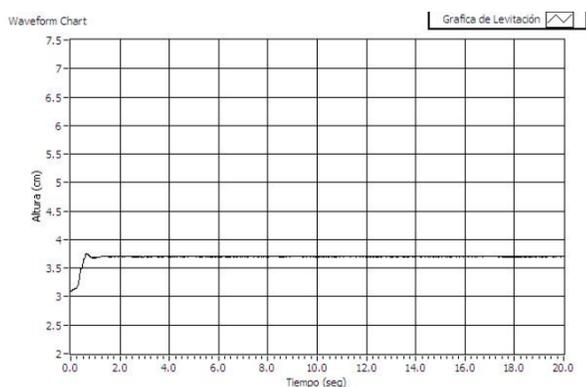


Figura 11. Respuesta del sistema a un valor de posición fijo.

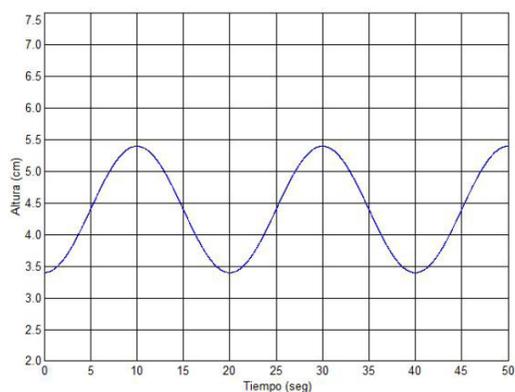


Figura 12. Trayectoria de posición deseada.

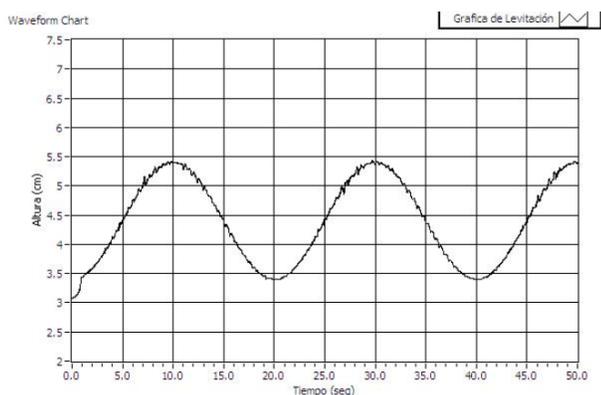


Figura 13. Respuesta del sistema a una trayectoria de posición deseada.

Un análisis de las respuestas obtenidas muestra que cuando se requiere una posición deseada fija, la respuesta presenta un sobrepaso situación no deseada ya que el controlador se diseñó para una respuesta de primer orden (sin sobrepaso). En la respuesta de seguimiento de trayectoria el resultado es bastante bueno por lo que el sistema se puede considerar que trabaja bastante bien. Sin embargo, el modelo matemático obtenido no logra emular el comportamiento no lineal del sistema. La robustez del controlador PID puede minimizar la falta de un buen modelo logrando que el sistema trabaje de manera aceptable.

## CONCLUSIONES

- El levitador magnético obtenido muestra un funcionamiento robusto y con excelentes condiciones para utilizarse en pruebas de algoritmos de control.
  - El levitador magnético es relativamente económico comparado con levitadores comerciales.
- La circuitería de acondicionamiento de señales del levitador funciona según lo previsto.
- El algoritmo de control PID permite evaluar el comportamiento del levitador.
- El sistema modifica su comportamiento después de un tiempo relativamente grande de funcionamiento.

## Bibliografía

- [1] Milica B. Naumovic, Boban R. Veselic “Magnetic Levitation System in Control Engineering Eduaction” Series: Automatic Control and Robotics Vol- 7, No. 1, 2008, pp. 151-160.
- [2] Lundberg, Kenet H, LilienKamp, Katie A. and Guy Marsden “Low-Cost Magnetic Levitation Project Kits” IEEE Control Systems Magazine, Vol. 24, No. 5, October 2004, pp. 65-69.
- [3] Guy Marsden “Levitation” Revista Nuts & Volts September 2003 pp. 59-62.

- [4] Lloyd H. Dixon “Magnetics Design for Switching Power Supplies” Application notes Microchip Technology pp. 1-10.
- [5] Walter Barie and John Chiasson, “Linear and Non-linear State-Space Controllers for Magnetic Levitation”, INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEM SCIENCE, VOL. 27, NO. 11, APRIL 1996, pp. 1153-1163
- [6] Ahmed El Hajjaji and M. Ouladsine, “Modeling and Nonlinear Control of Magnetic Levitation Systems” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 48, No.4, AUGUST 2001, pp. 831-838.
- [7] William G. Hurley “Electromagnetic Design of a Magnetic Suspension System”, IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 40, No.2, May 1997, pp. 124-130.
- [8] William G. Hurley “PWM Control of a Magnetic Suspension System” IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 47, NO. 2, MAY 2004, pp. 165-173.
- [9] R. Sinha and M.L. Nagurka “ANALOG AND LABVIEW-BASED CONTROL OF A MAGLEV SYSTEM WITH NI-ELVIS” International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 5-11, 2005, Orlando, Florida USA IMECE2005-81600.

## Acerca del autor o autores

Aurelio Beltrán Obtuvo el grado de Ingeniero Electricista de la Universidad Autónoma de Zacatecas en 1988 y Maestría en Ingeniería de La Universidad Autónoma de Zacatecas en 2006, docente en la Universidad Autónoma de Zacatecas desde 1984. Campos de interés: control automático, energías renovables y control de inversores multinivel de bajo contenido de armónicos.

Iván E. Beltrán Obtuvo el grado de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica en 2010. Campo de interés: Control Automático.

Alejandro Chacón Obtuvo el grado de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica de la Universidad Autónoma de Zacatecas en 1990 y de Maestría en Ciencias Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas en 2009. Campos de interés: comunicaciones inalámbricas e instrumentación en ciencias nucleares.

Carlo A. Beltrán Obtuvo el grado de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica de la Universidad Autónoma de Zacatecas en 2013. Campos de interés: Control Automático y biotecnología.

Rafael Villela Obtuvo el grado de Ingeniero Electricista de la Universidad Autónoma de Zacatecas en 1984, Maestría en Matemáticas Aplicadas por la Universidad Autónoma de Zacatecas en 2001 y el Doctorado en Educación de la Universidad de Durango Campus Zacatecas en 2007. Campos de interés: sistemas de control y automatización, robótica, ahorro y calidad de la energía y la probabilidad.