

Implementation and Control of a Magnetic Levitation System

L. E. Venghi, G. N. González, *Member, IEEE* and F. M. Serra, *Member, IEEE*

Abstract— A magnetic levitation control system is developed in this work. The non-linear system model is linearized around the operating point. Two control loops, an inner current loop and an outer position loop are designed using the linear system obtained. The hardware implementation is described. Simulation and experimental results are shown to validate the dynamic response of proposed control.

Keywords— Magnetic levitation system, control, linearization, power electronics.

I. INTRODUCCIÓN

LOS SISTEMAS de levitación magnética se presentan en muchas aplicaciones, entre ellas, trenes eléctricos, túneles de viento, amortiguadores y frenos. Adquieren importancia práctica en ingeniería porque no requieren contacto entre las partes y en consecuencia simplifican los costos de mantenimiento, lo que los hace aptos para entornos industriales [1].

Se utilizan, además, con fines educativos en la enseñanza de control automático, debido a que su estudio permite profundizar los conceptos de estabilidad y control, contribuyendo a comprender mejor otros sistemas e implementar técnicas avanzadas de control.

Por naturaleza, estos sistemas son no lineales e inestables, por lo tanto para poder aplicar técnicas de control clásico, se deben linealizar alrededor de un punto de operación. La importancia de aplicar leyes de control clásico radica en el hecho de que se trata de estrategias ampliamente difundidas y se encuentran dentro de los contenidos que abarcan las asignaturas de sistemas de control en las universidades [2]. Con el fin de estudiar e implementar dichas estrategias de control lineal, en este trabajo se presenta la construcción de un prototipo experimental de un levitador magnético que será utilizado para profundizar las bases teóricas y resolver problemas de aplicación de sistemas de control.

En primer lugar, se presenta el modelado matemático del levitador, desacoplando el sistema eléctrico del mecánico para poder cerrar lazos de control independientes [3]. Luego, se diseña el lazo de control de corriente para regular la corriente que se suministra al actuador, y el lazo de control de posición que estabiliza el sistema y mantiene la esfera en el valor de referencia [4], [5], [6].

Las variaciones en la posición se detectan mediante diodos infrarrojos cuyas señales se realimentan a las entradas analógicas de un controlador digital de señales DSPIC30F4011, encargado de implementar el control propuesto.

Para poder sintetizar la corriente de referencia, se utiliza un convertidor de corriente continua a corriente continua (CC/CC) tipo puente completo, que modula la tensión aplicada al electroimán.

El artículo está organizado de la siguiente manera, en la Sección II se describen las ecuaciones dinámicas del sistema y las funciones de transferencia correspondientes; en la Sección III se presenta el diseño de los controladores y el ajuste de las ganancias; en la Sección IV se detalla el desarrollo del hardware implementado y en la Sección V y VI se presentan los resultados de simulación y experimentales.

II. MODELADO MATEMÁTICO

En esta sección se determinan las ecuaciones dinámicas del sistema y establecen las funciones de transferencia del sistema linealizado.

En el sistema propuesto de la Fig. 1, una corriente circula a través de una bobina devanada sobre un núcleo de hierro y genera un campo magnético cuyas líneas de flujo se cierran sobre el núcleo produciendo una fuerza de atracción sobre el objeto a suspender.

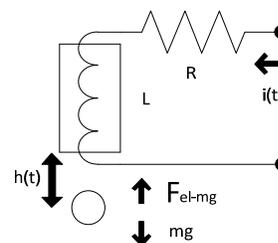


Figura 1. Levitador magnético.

La fuerza que ejerce el campo magnético, se puede obtener derivando la co-energía con respecto al desplazamiento de la esfera [1], [2].

La co-energía magnética del inductor está dada por el producto entre el cuadrado de la corriente i y la inductancia L de la bobina,

$$W_m = \frac{1}{2} Li^2. \quad (1)$$

La fuerza electromagnética se obtiene a partir de la derivada de la co-energía magnética respecto al desplazamiento vertical.

$$f_e = \frac{dW_m}{dh}. \quad (2)$$

Al trabajar en una dirección, la cual a su vez corresponde a la altura h del objeto levantado, se puede definir la fuerza en esa dirección, reemplazando (1) en (2) y calculando la derivada,

$$f_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dh}, \quad (3)$$

donde,

$$L = L_1 + \frac{k}{h}. \quad (4)$$

L_1 es el valor de inductancia de la bobina y k/h un término que surge de la interacción entre la bobina y la esfera como consecuencia de la dispersión de las líneas de flujo. Por lo tanto, (4) representa el valor de la inductancia para el espacio de trabajo próximo al electroimán donde la fuerza electromagnética ejerce efecto sobre la esfera.

Reemplazando (4) en (3) y derivando, se obtiene,

$$f_e = -\frac{1}{2} k \frac{i^2}{h^2}. \quad (5)$$

Utilizando la segunda ley de Newton, se puede escribir la siguiente ecuación,

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = mg - f_e. \quad (6)$$

Por otro lado, considerando el circuito RL que conforma el electroimán se tiene,

$$v = Ri + L \frac{di}{dt}. \quad (7)$$

Las ecuaciones (5), (6) y (7) constituyen las ecuaciones dinámicas del sistema.

Debido a que el sistema es no lineal (6), para poder implementar una estrategia de control clásica, se debe linealizar en torno a un punto de operación. Se selecciona un punto de trabajo donde se realiza la expansión en serie de Taylor, y finalmente se obtiene la función de transferencia del sistema [3]. Considerando como variables de estado la corriente i , altura h , y velocidad ω , se tiene,

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = -i \frac{R}{L} + v \frac{1}{L}, \\ \frac{dh}{dt} = \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} = g - \frac{k}{2m} \frac{i^2}{h^2}. \end{cases} \quad (8)$$

El punto de trabajo seleccionado, surge de la asignación de un valor de referencia de altura, al sistema de ecuaciones (8),

$$\begin{cases} h = h_0, \\ \omega = \frac{dh}{dt} = 0, \\ i = i_0 = \sqrt{\frac{2mgh_0^2}{k}}. \end{cases} \quad (9)$$

Se realiza la expansión en serie de Taylor (8), en el punto de trabajo (9). La tercera ecuación del sistema, se expresa de la siguiente manera,

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = -\frac{ki_o}{h_o^2} i + \frac{ki_o^2}{h_o^3} h. \quad (10)$$

Aplicando la transformada de Laplace y considerando nulas las condiciones iniciales se obtiene,

$$ms^2 H(s) = -\frac{ki_o}{h_o^2} I(s) + \frac{ki_o^2}{h_o^3} H(s). \quad (11)$$

Definiendo los términos constantes como k_1 y k_2 la función de transferencia que relaciona a la altura h con la corriente del electroimán es la siguiente,

$$\frac{H(s)}{I(s)} = -\frac{k_1/m}{s^2 - \frac{k_2}{m}}. \quad (12)$$

La ecuación (12) representa la función de transferencia del modelo linealizado del sistema mecánico. Esta función de transferencia tiene dos polos, donde uno de ellos se encuentra en el semiplano derecho del plano complejo, por lo tanto el sistema es inestable. A partir de esta conclusión, surge la necesidad de un control para poder estabilizar el sistema [4], [5], [6].

III. CONTROL

En esta sección se presenta el diseño de los lazos de control, uno de corriente y otro de posición.

Debido a que la fuerza electromagnética es proporcional al cuadrado de la corriente, es conveniente cerrar un lazo de control de dicha variable que permita seguir las referencias establecidas por el lazo de posición [6]. A partir del cálculo del error de posición, se determina la corriente de referencia que el electroimán necesita para mantener la posición de la esfera en el valor de referencia. El lazo de posición se encarga de comparar la posición de referencia con la medida y generar referencias de corriente mediante la acción de un controlador PID.

Para el diseño del control de corriente y el control de posición se utilizaron los parámetros del electroimán calculados mediante ensayos y las constantes definidas para el punto de equilibrio que se ven en la TABLA I.

TABLA I
CONSTANTES DEL SISTEMA.

Constante	Valor
R	3.8[Ω]
L	32[mH]
m	0.039[kg]
k	0.0004
h_o	0.025[m]
i_o	1.5[A]

A. Lazo de Corriente

Para desacoplar los lazos de control, la dinámica del lazo de control de corriente se ajusta para que sea diez veces más rápida que la del control de posición, esto permite reducir un orden en la función de transferencia del sistema completo.

Aplicando la transformación de Laplace a la primera ecuación del sistema (8), se obtiene la función de transferencia del lazo de corriente,

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{1}{R + sL}. \quad (13)$$

Para eliminar el error en estado estable y ajustar la respuesta transitoria, se utiliza un controlador PI cuya función de transferencia es la siguiente,

$$\frac{V(s)}{E_i(s)} = \frac{k_{pi}s + k_{ii}}{s}. \quad (14)$$

De (13) y (14) se obtiene la función de transferencia de lazo cerrado, para el control de corriente, como,

$$G_{LC_i} = \frac{\frac{k_{pi}}{L} \left(s + \frac{k_{ii}}{L} \right)}{s^2 + s \left(\frac{k_{pi}}{L} + \frac{R}{L} \right) + \frac{k_{ii}}{L}}. \quad (15)$$

Del denominador de (15), se toman las ganancias y se igualan con los coeficientes del denominador de la ecuación prototipo de segundo orden y se obtiene,

$$k_{pi} = \left(2\zeta\omega_n - \frac{R}{L} \right) L, \quad (16)$$

$$k_{ii} = \omega_n^2 L. \quad (17)$$

Reemplazando las constantes del sistema y los parámetros de diseño, se obtienen las ganancias del lazo de corriente que se muestran en la TABLA II.

TABLA II
PARAMETROS DE DISEÑO Y GANANCIAS

Variable	Valor
ζ	1
t_s	0.01[s]
k_{pi}	21.8
k_{ii}	5120

Donde ζ es el amortiguamiento relativo, t_s el tiempo de asentamiento y, k_{pi} y k_{ii} la ganancia proporcional e integral del control de corriente.

B. Lazo de Posición

En el lazo de control de posición se utiliza un controlador PID incorporando así un término derivativo que permite estabilizar el sistema, eliminar el error en estado estable y ajustar la respuesta transitoria. En la Fig. 2 se muestra el control completo del sistema.

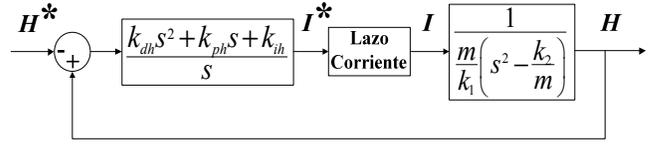


Figura 2. Control completo del sistema de levitación.

Operando algebraicamente con el diagrama en bloques de la Fig. 2, se obtiene la función de transferencia de lazo cerrado,

$$G_{LC_h} = \frac{k_{dh}s^2 + k_{ph}s + k_{ih}}{\frac{k_1}{m} \left[s^3 + \frac{k_1 k_{dh}}{m} s^2 + \left(\frac{k_1 k_{ph}}{m} - \frac{k_2}{m} \right) s + \frac{k_1 k_{ih}}{m} \right]}. \quad (18)$$

Al agregar un controlador PID, se incrementa el orden de la función de transferencia de lazo cerrado. Por lo tanto, se ajustan los polos dominantes para obtener una respuesta críticamente amortiguada y el polo de tercer orden ubicado de manera distante para que su efecto sea despreciable. Por último, se igualan los coeficientes con el denominador de la función de transferencia y se obtienen las ganancias que se especifican en la TABLA III.

TABLA III
PARAMETROS DE DISEÑO Y GANANCIAS

Variable	Valor
ζ	1
t_s	0.1[s]
k_{ph}	5615
k_{ih}	106666
k_{dh}	80

Donde ζ es el amortiguamiento relativo, t_s el tiempo de asentamiento y, k_{ph} , k_{ih} y k_{dh} la ganancia proporcional, integral y derivativa del control de posición.

IV. IMPLEMENTACION DEL HARDWARE

En esta Sección se detalla la construcción del electroimán, convertidor de potencia, etapas de adaptación de señales y ajuste de sensores. En la Fig. 3 se muestran las etapas que constituyen el sistema y la realimentación de las señales.

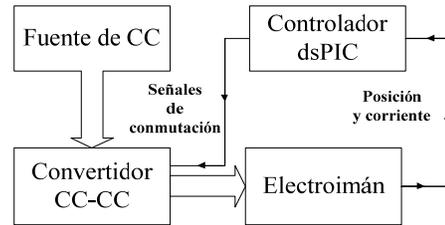


Figura 3. Diagrama en bloques del levitador implementado.

El convertidor CC/CC recibe señales de conmutación desde un controlador y modula la tensión para proporcionar al electroimán una corriente cuya magnitud depende de la posición y corriente sensada.

En la Fig. 4 se muestra una foto del sistema implementado.

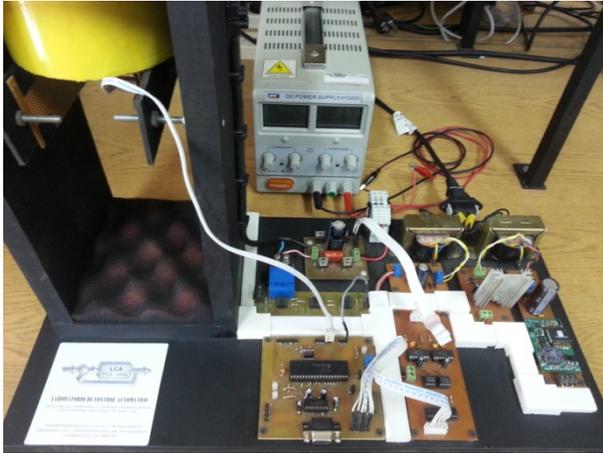


Figura 4. Foto del levitador implementado.

A. Diseño del electroimán

La implementación del electroimán requiere el diseño de la bobina y del núcleo magnético [7].

Para el diseño de la bobina, es necesario conocer la magnitud de la corriente de régimen para definir el calibre del alambre. Además, se debe tener en cuenta el número de vueltas, debido a que al aumentar el número de espiras se genera una fuerza magnética de mayor magnitud pero también aumenta la resistencia de la bobina. Por otro lado, el tamaño y la forma del núcleo, definen la manera en que se concatena el flujo y genera la fuerza magnética.

El electroimán implementado para este trabajo se diseñó para una corriente de régimen de 1,5 [A] con un número de vueltas igual a 1000 y con un núcleo cuyas dimensiones se mencionan en la TABLA IV.

TABLA IV
DIMENSIONES DEL NUCLEO

Parámetro	Valor
Diámetro del núcleo	50 [mm]
Ancho del carretél	45 [mm]
Alto del carretél	50 [mm]
Grosor de cobertura exterior	10 [mm]

B. Convertidor de Potencia y Drivers

El convertidor CC/CC puente completo implementado [8], está constituido por 4 transistores MOSFET IRF540 [9]. Debido al efecto de las inductancias parasitas propias del montaje, se agregan snubbers capacitivos y un capacitor electrolítico, para atenuar los picos de tensión en la salida del convertidor y proporcionar los picos de corriente exigidos por el convertidor. En la Fig. 5 se muestra el convertidor implementado.

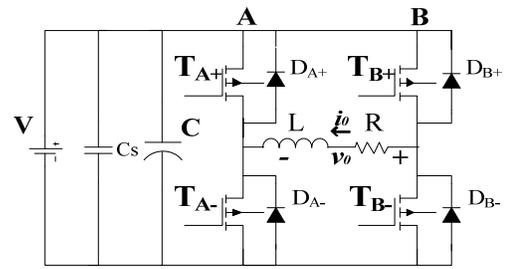


Figura 5. Convertidor CC/CC Puente Completo.

Para modular la tensión de corriente continua, se utiliza una estrategia de conmutación PWM unipolar [8]. Ésta modulación, permite duplicar la frecuencia de conmutación para minimizar el ripple de corriente en la carga.

Las señales de driver provienen de un DSC [10] (Digital Signal Controller) configurado para tal propósito, y deben ser amplificadas a un nivel de tensión que permita conmutar los transistores, para lo cual, se agrega una etapa intermedia entre el controlador y el convertidor, detallada en la Fig. 6.

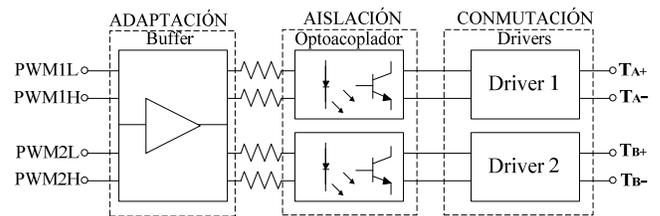


Figura 6. Adaptación de señal del controlador.

C. Sensado

a. Sensor de Corriente

Para la medición de la corriente del electroimán se utilizó un sensor de efecto hall LA25-NP [11]. Éste sensor fue configurado a través del conexionado interno para trabajar en el rango de corriente ± 5 [A].

Debido a que la corriente máxima de salida del sensor es de 25 [mA] y la tensión a la que trabaja el DSC de +5[V], se determina el valor de la resistencia de ajuste de resolución en 200 [Ω].

El sensor de corriente, entrega tensiones de polaridad proporcional a la señal de entrada, por lo tanto, para trabajar con el controlador que únicamente utiliza valores positivos hasta 5 [V], la señal de salida del sensor de corriente, debe ser adaptada tal como se muestra en la Fig. 7.

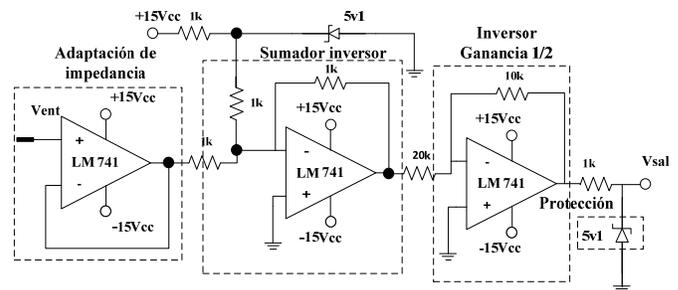


Figura 7. Etapa de adaptación del LA25-NP.

b. Sensores Infrarrojos

Para el sensado de la posición de la esfera, se utilizaron diodos infrarrojos BPW41 [12].

La tensión en bornes de dicho diodo es inversamente proporcional a la luz incidente en el área de la ventana del mismo. El diodo infrarrojo se conecta en serie con una resistencia de $1M[\Omega]$ que permite mantener los valores de corriente en el rango nominal de trabajo del dispositivo cuando la tensión del circuito es de $5[V]$. La señal de tensión se debe adaptar mediante un amplificador operacional configurado como seguidor de tensión para adaptar la impedancia de salida y permitir la visualización de las señales. En la Fig. 8 se muestra la implementación del circuito receptor.

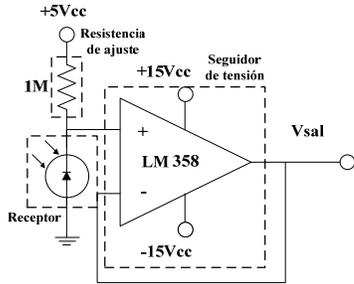


Figura 8. Fotodetector con circuito de adaptación.

Para el circuito emisor, se utilizaron diodos LED infrarrojos con resistencias de limitación, alineados con los receptores.

V. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se realizaron simulaciones del sistema de levitación magnética en la plataforma Simulink de MATLAB, para validar los controles desarrollados en la Sección III. Los parámetros utilizados para las simulaciones son los mostrados en la TABLA I.

A. Control de Posición con Señales Arbitrarias

En la Fig. 9 se puede apreciar el comportamiento del control de posición ante señales de referencia cuadrada y triangular. En el caso de la referencia cuadrada, se puede observar que el tiempo de asentamiento es de $100[ms]$ y tiene un sobrepeaso del 5%. Para la señal triangular, el control responde sin presentar inconvenientes debido a que los cambios en la posición se producen de manera suave.

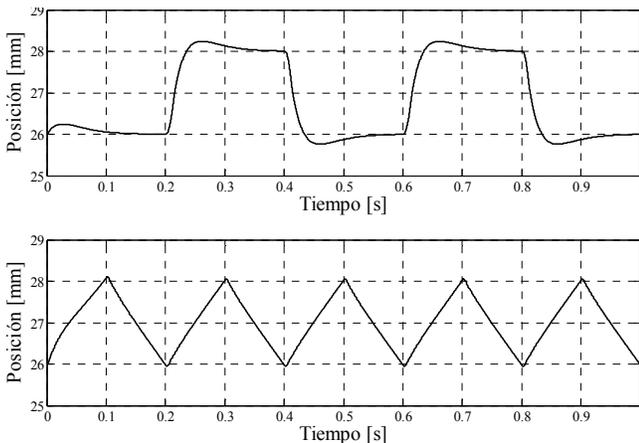


Figura 9. Control con referencia cuadrada y triangular.

B. Perturbación en el Control de Posición

En la Fig. 10 se muestra el control de posición en el momento que se ubica la esfera en la posición de referencia. Se observa que se produce un desequilibrio como consecuencia del efecto de la gravedad el cual es compensado por el control una vez que el sistema detecta la esfera. Al perturbarse el sistema (aumento de masa), se observa que el control compensa la perturbación y la esfera vuelve a la posición de referencia a los $100[ms]$ para lo cual requiere un incremento de corriente en el actuador.

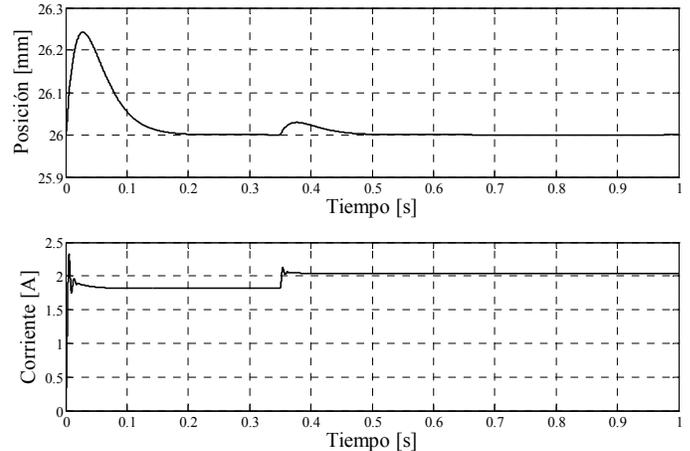


Figura 10. Respuesta del Control a una perturbación.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para validar el comportamiento de los controles diseñados, se realizaron ensayos utilizando el prototipo experimental cuyo hardware se describe en la Sección IV.

A. Control con Señal de Referencia Cuadrada

La Fig. 11 muestra el desplazamiento de la bola entre dos referencia fijas de posición.

Para permitir que la esfera se aleje del electroimán y se mantenga levitando, se necesita de una disminución transitoria de la corriente y un incremento en el valor medio, debido a que al aumentar la distancia necesita una fuerza magnética de mayor magnitud para mantener la levitación. Caso contrario, el control efectúa una acción con efecto opuesto.

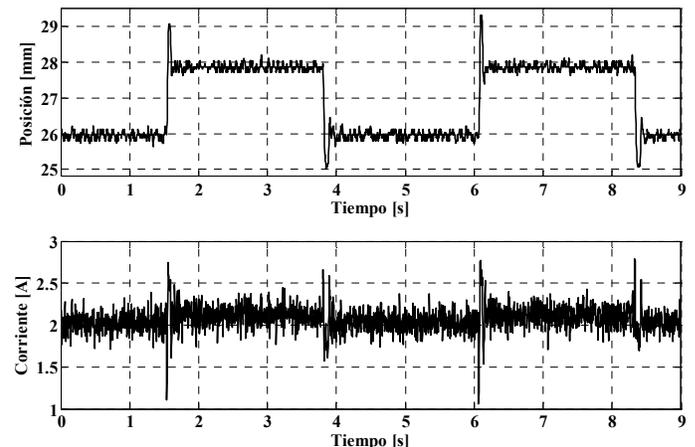


Figura 11. Control con señal de Referencia Cuadrada.

B. Control con señal de referencia triangular

En la Fig. 12 se puede observar que la esfera realiza un desplazamiento suave entre dos referencias de posición y la corriente evoluciona de manera proporcional a la posición, ajustándose a los requerimientos del sistema.

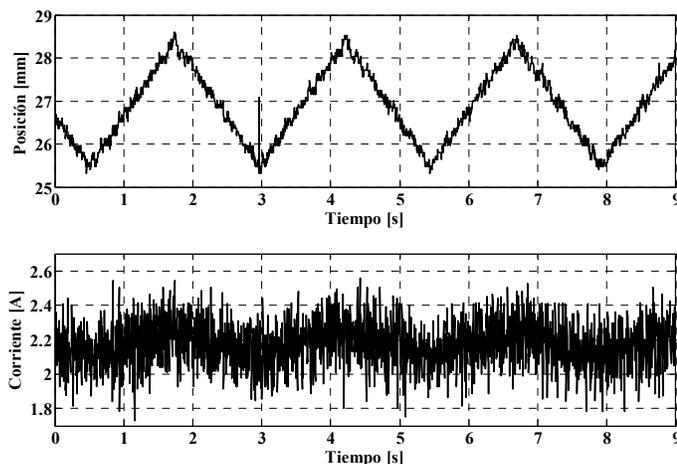


Figura 12. Control con señal de referencia triangular.

C. Respuesta del Control ante una Perturbación

En la Fig. 13 se muestran los resultados obtenidos cuando se perturba el sistema como consecuencia de un aumento en la masa de la esfera. Se observa que luego de extinguido el transitorio, el valor medio de la posición permanece en el valor de referencia (26 [mm]).

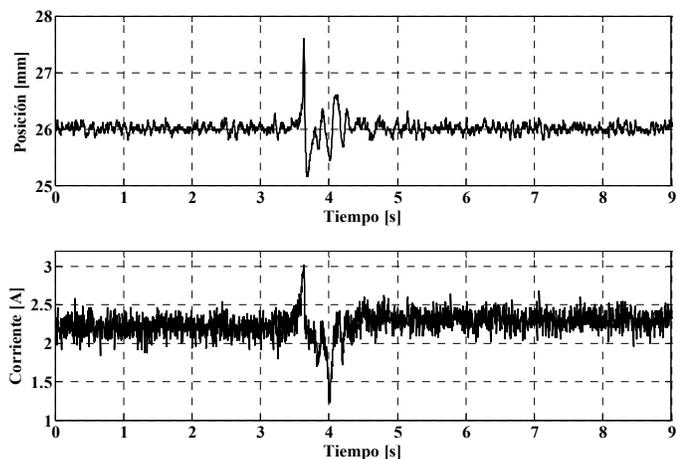


Figura 13. Respuesta del Control ante una perturbación.

VII. CONCLUSIONES

En éste trabajo se implementó el control de un levitador magnético utilizando un dsPIC30F3011.

Se modeló el sistema y se utilizó una estrategia de control clásica para controlar un sistema no lineal. La elección de los controladores y el correspondiente ajuste de sus ganancias constituyen una parte importante de la formación del estudiante en los temas de control clásico.

Se realizaron ensayos de simulación y experimentales para verificar el desempeño de los controles diseñados.

Tanto los ensayos de simulación como experimentales evaluados para diferentes señales de referencia, demuestran que el sistema se comporta según lo esperado.

Como conclusión, más allá de la naturaleza no lineal del sistema, se puede controlar la variable de interés aplicando técnicas de control clásico.

REFERENCIAS

- [1] J.C. Moreno, *Control Lineal y No Lineal de un Levitador Magnético*. España: Universidad Politécnica de Catalunya, 2010.
- [2] T.H.Wong, "Design of a magnetic levitation control system", *IEEE Transactions on Education*, vol. E-29, pp. 196-200, 1986.
- [3] B.C. Kuo, *Sistemas de Control Automático*, Mexico: Prentice Hall, 1996.
- [4] J.H. Yang, y T.S. Kim, "Actuator and Sensor Modeling for Magnetic Levitation System", *International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, Korea, Oct. 17-20, 2007, pp. 917-922.
- [5] V.A. Oliveira, E.F. Costay J.B. Vargas, "Digital Implementation of a Magnetic Suspension Control System for Laboratory Experiments", *IEEE Transactions on Education*, vol. 42, no. 4, pp. 315-322, 1999.
- [6] G.N. González, *Implementación de un Control de Velocidad a Lazo Cerrado de un Motor de CC con dsPIC30F4011*. Argentina: Universidad Nacional de San Luis, 2011.
- [7] W.G. Hurley y W.H. Wolfe, "Electromagnetic Design of a Magnetic Suspension System", *IEEE Transactions on Education*, vol. 40, no. 2, pp. 124-130, 1997.
- [8] N. Mohan, *Electrónica de Potencia Convertidores, aplicaciones y diseño*, Mexico: McGrawHill, 2009.
- [9] Data Sheet IRF540, ST Microelectronics, 2001.
- [10] Data Sheet dsPIC30F4011/4012, Microchip, 2005.
- [11] Data Sheet LA25-NP, LEM, 2004.
- [12] Data Sheet BPW41N, Vishay Telefunken, 1999.



Luis E. Venghi recibió su título de Ingeniero Electrónico en 2016, en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de San Luis (UNSL), Argentina. Desde el año 2013 es integrante del Laboratorio del Control Automático (LCA) de la UNSL. Actualmente es becario del CONICET e integrante del Grupo de Electrónica Aplicada y se encuentra cursando el doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), Córdoba, Argentina. Sus temas de interés son: sistemas de control, electrónica de potencia, vehículos eléctricos, accionamientos eléctricos y tolerancia a fallas.



Guillermo N. González nació el 02/03/1985 en Villa Mercedes, provincia de San Luis, Argentina. Cursó estudios universitarios y obtuvo el título de Ingeniero Electrónico en 2012 en la Universidad Nacional de San Luis (UNSL). Desde 2012 es becario del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) e integrante del Grupo de Electrónica Aplicada (GEA) y se encuentra cursando el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), Córdoba, Argentina. Desde 2007 es integrante del Laboratorio de Control Automático (LCA) de la UNSL. Sus temas de interés son: electrónica de potencia, sistemas de control, control de máquinas eléctricas y conversión de fuentes de energía renovables.



Federico M. Serra recibió su título de Ingeniero Electricista Electrónico en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Económico Sociales de la Universidad Nacional de San Luis, Argentina, en 2007, y el grado de Dr. En Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, en 2013. Desde el 2012 se desempeña como director del Laboratorio de Control Automático de la Universidad Nacional de San Luis. Actualmente es Profesor Adjunto en la Universidad Nacional de San Luis. Sus temas de interés en investigación incluyen el control no lineal de convertidores electrónicos de potencia especialmente usando técnicas basadas en pasividad en aplicaciones de microrredes, vehículos eléctricos y conversión de energía en fuentes de energía renovables.