

Sistema de Control PID Aplicado a un Prototipo de Ejes Levitantes

Mg. Ing. Gastón Peretti, Ing. Emanuel Bernardi, Ing. Leonardo Depetris, Ing. Hugo Pipino, Mayco Cervetto, Leonardo Anchino, Andrés Torti.

Grupo de Investigación y Desarrollo Electrónico - Departamento de Ingeniería Electrónica
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Francisco
San Francisco, Córdoba, Argentina

gastonperetti@gmail.com, bernardiemmanuel@gmail.com, leodepetris@gmail.com, hugopipino@gmail.com, maycocervetto@gmail.com, anchinoleonardo@gmail.com, torti.max@gmail.com

Resumen —

A través del presente trabajo se pretende estudiar e investigar distintas estrategias de control a implementar sobre dispositivos de ejes rotantes levitados magnéticamente. El aporte de este proyecto, se centra en desarrollar un modelo de sistema de control que se adecúe a aplicaciones donde se requiera el giro de piezas con mínimo rozamiento. Los alcances de este proyecto se limitan a un eje ubicado de manera horizontal respecto del suelo.

Se desarrollará un sistema experimental de ejes rotantes eléctricamente, sin escobillas (es decir con las características de un motor asíncrono del tipo jaula de ardilla), cuyo eje levitará magnéticamente a través de dos cojinetes magnéticos activos. Para poder evaluar su funcionamiento se realizarán simulaciones en computadora mediante el software Matlab/Simulink con el modelo de planta y las distintas estrategias de control (en este trabajo se propone un control clásico mediante un controlador proporcional-integral-derivativo), previamente a las pruebas en el prototipo.

Palabras clave: control PID, DSP, modelo de control, Matlab.

I. INTRODUCCIÓN

La levitación magnética consiste en mantener un objeto suspendido en el aire sin ningún tipo de contacto mecánico. En el caso de levitación magnética, la fuerza que permite esta suspensión es la fuerza electromagnética generada por un electroimán que mediante atracción permite mantener en suspensión un objeto ferromagnético [1]. Este proceso es por naturaleza inestable y no lineal, por lo cual se hace indispensable la utilización de un control de lazo cerrado para mantener la levitación.

Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con una entrada de referencia (valor deseado), determina cuál es la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o un valor pequeño [2].

En el ámbito de la investigación existen gran variedad de trabajos relacionados con el control de levitadores magnéticos, algunos de estos trabajos comprueban sus resultados mediante

simulación y otros utilizan resultados experimentales o ambos. Se aplican en ellos diferentes técnicas de control, pudiéndose mencionar:

- Control clásico [3] [4],
- Control lineal robusto [5],
- Control lineal adaptativo [6],
- Control por ganancia programada,
- Control difuso [4],
- Control mediante linealización por realimentación [7] [8],
- Control en modo deslizante [3] [9] [10] [11].

Para el desarrollo de este proyecto se propuso, primeramente, la utilización de un control clásico mediante un controlador proporcional-integral-derivativo, también conocidos como "PID". De manera general, se trata de un sistema de control realimentado como el que se observa en la Fig 1.

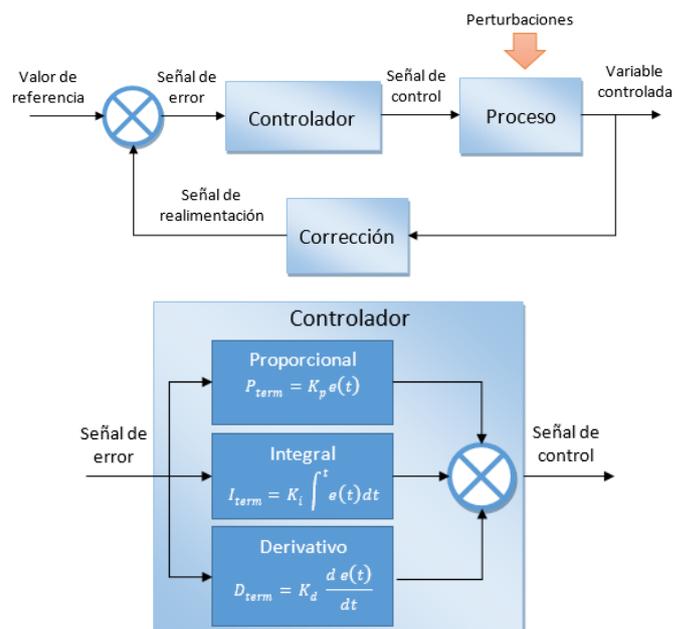


Fig. 1. Sistema realimentado. Detalle del controlador PID.

El controlador PID resulta de la combinación lineal de tres modos, el modo proporcional (P), el modo integral (I) y el modo derivativo (D). Así,

El modo proporcional multiplica la señal de error actual por un factor constante conocido como ganancia del modo proporcional (K_p).

El modo integral, como su nombre lo indica, integra el error actual y dicha integral es afectada por una constante K_r/T_i , donde T_i es conocido como tiempo de acción integral.

El modo derivativo deriva la señal de error actual multiplicando dicho resultado por una constante $K_r \times T_D$ donde T_D es conocida como tiempo de acción derivativo [12].

II. DESARROLLO MATEMÁTICO

Si bien por un lado ha sido necesario el diseño de todas las etapas eléctricas – electrónicas que conformarán el sistema de control propiamente dicho, ha sido imprescindible avanzar paralelamente con el análisis teórico del sistema. La finalidad de esto es no solo para el entendimiento físico – matemático del proyecto sino para poder llegar a las ecuaciones que permitirán el correcto control del mismo. En otras palabras, mediante estas igualdades se podrá redactar el código de programa que contendrá el algoritmo necesario para que las unidades inteligentes puedan equilibrar el sistema ante cualquier desbalance, cuestión por la cual esta sección es de relevante importancia.

En primera instancia se realizó un boceto aproximado del sistema de sensado, como se muestra en la Fig. 2:

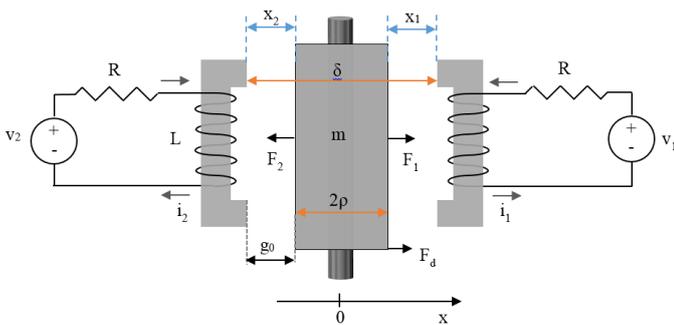


Fig. 2. Boceto del sistema de sensado.

Siendo:

$x_1 - x_2$: Espacios entre las bobinas y el rotor.

x : Desplazamiento del rotor.

δ : Distancia entre las dos bobinas.

ρ : Radio del rotor.

m : Masa del rotor.

$F_1 - F_2$: Fuerzas electromagnéticas inducidas sobre el rotor.

F_d : Fuerza de perturbación externa aplicada sobre el rotor.

$v_1 - v_2$: Voltajes de control aplicados a las bobinas.

$i_1 - i_2$: Corriente de las bobinas.

Cabe aclarar que este esquema corresponde al sistema de control horizontal, razón por la cual supondremos que únicamente habrá desplazamiento en el sentido de las abscisas,

donde además el punto x igual a cero se corresponde con un punto inestable. A su vez, al estar analizando el comportamiento en el sentido horizontal, las fuerzas - en especial la gravitatoria - no manifiesta influencia alguna en sentido axial. Por último, supondremos que el rotor es lo suficiente rígido como para no sufrir flexiones.

En base a todo lo aclarado anteriormente y observando el esquema particular, se plantean las ecuaciones físicas que describan el sistema. Sin abordar el desarrollo de fórmulas de balance ni la linealización de las mismas por Taylor, se llega a la definición de un espacio de estados mediante las siguientes matrices, en las ecuaciones (1), (2), (3) y (4).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2 * k_x}{m} & 0 & 2 * \frac{k_i}{m} \\ 0 & \frac{-k_i}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (3)$$

$$D = [0] \quad (4)$$

III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Se plantea un sistema en el que el eje se encuentre situado (de manera ideal) en el centro de un espacio confinado por 2 bobinados estatores, uno en cada extremo del eje; existiendo sobre el eje dos fuerzas que actúan: la gravitatoria (que haría caer el eje) y la fuerza magnética que actúa para compensar la anterior, tratando de mantener al eje en el centro. La Fig. 3 nos muestra lo explicado:

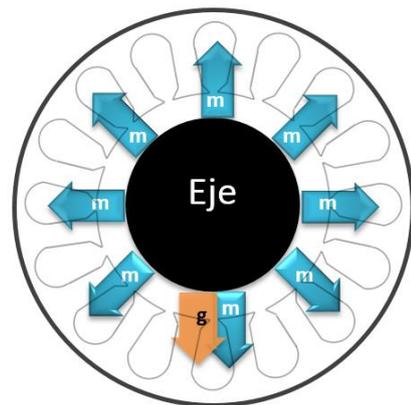


Fig. 3. Diagrama de fuerzas que intervienen en el sistema.

En cuanto al funcionamiento, se puede explicar considerando de manera inicial el eje situado en el centro. Luego por alguna perturbación del espacio (ejemplo: viento) esta posición se ve afectada, supongamos hacia abajo. Al existir sensores de posición magnéticos ubicados en la cercanía al eje, se genera una señal proporcional a esta variación en la posición, que será

acondicionada y luego procesada por el circuito de control. Este circuito de control envía luego una señal al circuito de potencia para que éste último varíe la corriente que energiza las bobinas (siguiendo con el ejemplo que el eje se ha desplazado hacia abajo, se genera un aumento de la corriente que circula por las bobinas superiores, haciendo subir al eje). Nuevamente, la posición del eje cambia (en este caso, de manera ascendente) y el ciclo se repite indefinidamente, evitando que el eje toque el estator.

La efectividad del sistema depende de la velocidad de reacción, es decir que el lapso de tiempo desde que los sensores detectan la variación de posición hasta que se modifica el valor de corriente y el eje retoma su posición, debe ser lo más corto posible.

Esto se encuentra representado en la Fig. 4.

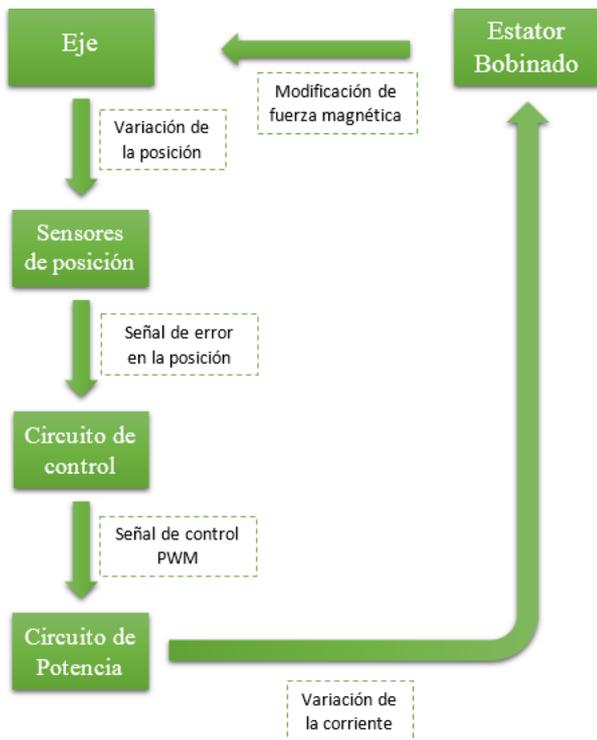


Fig. 4. Diagrama de bloques del sistema de ejes levitantes.

En la Fig. 5 podemos ver el esquemático correspondiente al sistema de control propiamente dicho, el cual a grandes rasgos recibirá los datos provenientes de cada uno de los sistemas de sensado y en base a éstos generará las salidas de control correspondientes.

Son necesarios dos de estos bloques en nuestro prototipo, uno para cada extremo del rotor capaz de monitorear ambos sistemas de sensado (en x e y). Se optó por esta solución dado que de esta manera se obtiene un menor tiempo de respuesta, lo cual es sumamente fundamental.

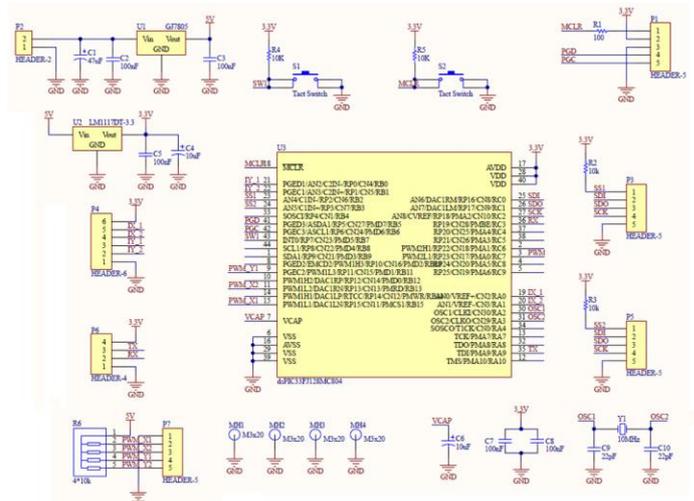


Fig. 5. Esquemático del circuito de control.

Como se puede apreciar, la unidad inteligente es un “DSP”, en este caso el modelo dsPIC33FJ128MC804 de la firma Microchip. Podemos observar entonces el circuito correspondiente al oscilador para que el mismo funcione, capacitores de filtrado en sus pines de alimentación y además un conector que permite el acceso a los pines necesarios para su programación [13] [14].

Se aclara que será mediante interfaz SPI que cada etapa de control se comunicará con los dos sistemas de sensado que monitorea. Si bien son dos conectores SPI los que se implementan, únicamente se ocupa un solo puerto SPI del “DSP”. Para poder intercambiar información con ambos bloques de sensado usando un solo puerto se emplean dos pines de selección (SS1 y SS2), los cuales son activados alternadamente para elegir con cual periférico se desea comunicar.

Para comandar la placa de potencia, podemos ver en el esquemático que se usa un conector donde se envían salidas de voltaje usando la técnica PWM. Son necesarias cuatro salidas digitales (PWM_X1, PWM_X2, PWM_Y1 y PWM_Y2), las cuales permiten el comando de los dos bloques de sensado. También podemos observar dos etapas de alimentación. Una de ellas es necesaria para alimentar nuestro DSP, mientras que la otra es necesaria para obtener salidas PWM capaces de activar los dispositivos conmutadores del siguiente bloque de potencia. Por último esta placa de control posee dos botones táctiles, uno destinado para el reset, y el otro para el encendido/apagado.

Podemos observar el esquemático correspondiente al bloque de potencia en la Fig. 6, el cual es comandado por la etapa de control. Este bloque provee directamente las salidas para los dos ejes de movimiento (horizontal y vertical) presentes en uno de los extremos. Para eso, los voltajes de salidas son aplicados a las bobinas presentes en el estator que se encuentran en dicho extremo.

Tal como se aprecia, los encargados de realizar la tarea de conmutación son cuatro MOSFET de canal N IRFZ44. Estos

dispositivos reciben directamente desde la placa de control en cada una de sus compuertas la señal PWM correspondiente para el eje que controlan, razón por la cual se implementa un conector específico en el montaje. De esta manera realizan una conmutación de potencia, la cual es aplicada directamente al bobinado del estator correspondiente, para lo cual se emplean los pines de salida (OUT_X1, OUT_X2, OUT_Y1 y OUT_Y2). Estos pines, como podemos observar, se encuentran agrupados en dos conectores. Por otro lado se pueden observar también los conectores que contienen los pines necesarios para sensar las corrientes que están manejando cada uno de los MOSFET (IX_1, IX_2, IY_1 e IY_2), es decir, las corrientes de salidas aplicadas a los bobinados del estator, lo cual es un parámetro de control que deberá controlarse en un futuro. Por último tenemos también un conector que contiene los pines necesarios para la alimentación de este bloque.

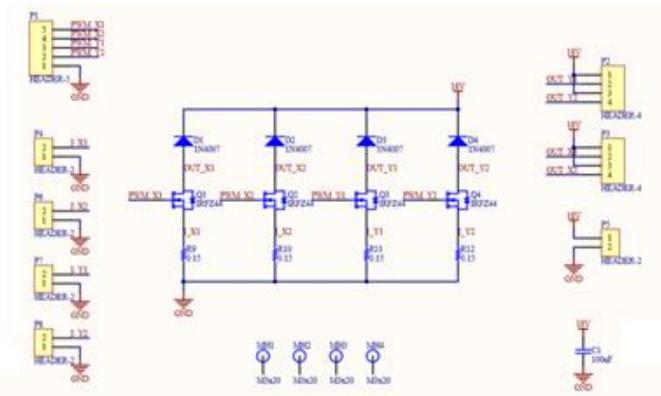


Fig. 6. Esquemático del circuito de potencia.

En las Fig. 7 y Fig. 8 se tiene el PCB construido, que incluye los dos bloques explicados (control y potencia).

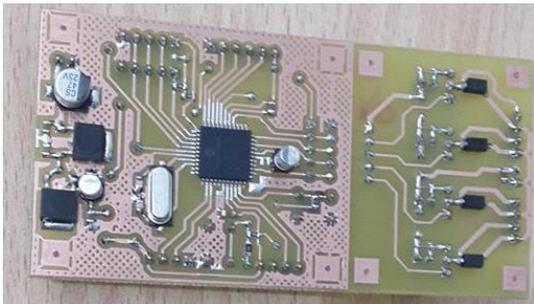


Fig. 7. PCB del circuito de control y potencia (vista inferior).

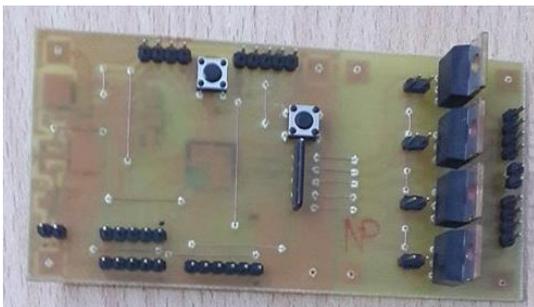


Fig. 8. PCB del circuito de control y potencia (vista superior).

Cálculo de los bobinados

En esta sección detallaremos como se ha llegado al diseño de los bobinados empleados en cada uno de los dos estatores. Es de gran relevancia para el proyecto en sí este diseño, ya que en caso de contar con bobinados cuyas características no sean las adecuadas, todo el sistema podría presentar problemas e incluso no funcionar.

En primera instancia se realizaron mediciones sobre el eje que fue escogido para las pruebas del sistema en funcionamiento. Las características aproximadas de dicho eje son: 38,2 mm de diámetro; peso 438 g y un largo de 300 mm. No obstante, como este eje servirá solo para las primeras pruebas y puesta a punto del sistema, se decidió sobredimensionar los bobinados para que sean capaces de trabajar en aplicaciones futuras sin necesidad de realizar modificaciones. Por elección, se determinó que como máximo la fuerza levitante será capaz de mantener en equilibrio a rotores de aproximadamente 3 kg.

En la Fig. 9 se tiene un diagrama realizado para plantear las ecuaciones del cálculo de los bobinados. Como puede verse, se tienen las variables l_{fe} , δ , A , α , i y N que corresponden respectivamente a la longitud que debe atravesar el flujo magnético que provoca la levitación, la separación entre el estator y el rotor, el área transversal al flujo magnético del entrehierro del estator, el ángulo al que se encuentra el rotor de cada entrehierro al estar éste en equilibrio, la corriente que circula por las bobinas y la cantidad de vueltas de cada bobinado.

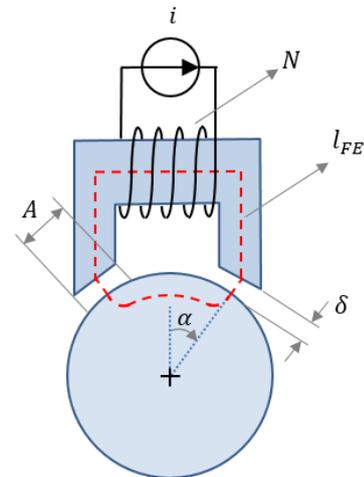


Fig. 9. Diagrama utilizado para el cálculo de los bobinados.

Luego de desarrollar, se llega a la ecuación (5). De esta manera, si por ejemplo la corriente que circula por los devanados para el caso máximo propuesto (con un rotor tiene 3 Kg de masa) fuese 0,5 A, entonces es necesario que los bobinados posean 90 vueltas para mantener al eje en equilibrio; mientras que si se someten a dichos bobinados a una corriente de 1 A, entonces serán necesarias 45 vueltas. Para sobredimensionar aún más la capacidad de los bobinados, se optó por emplear devanados de alambre esmaltado de 90 vueltas y con un área capaz de soportar 1 A (0.2 mm² de sección). De esta forma entonces se podrá levantar un rotor de

3 Kg o incluso mayor sin correr riesgos de calentamiento en los bobinados, permitiendo trabajar cerca del límite máximo con mayor tranquilidad.

$$44,7 A = N * i \quad (5)$$

A continuación se tiene una fotografía (Fig. 10) en la que puede observarse cada una de las placas que componen el proyecto de levitación magnética (placas de medición y placas de control-potencia), también se presentan los estatores bobinados y el eje situado en su interior. Este montaje es el utilizado para realizar cada una de las pruebas y es el soporte sobre el cual se efectuarán modificaciones, si fuese necesario.

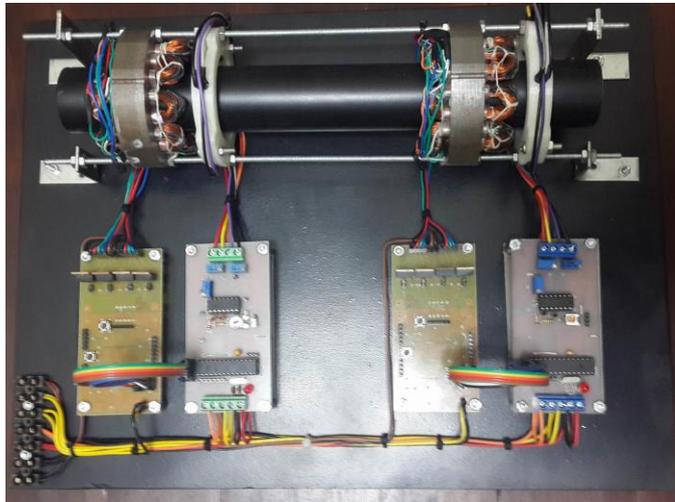


Fig. 10. Fotografía del sistema de ejes levitantes.

IV. SIMULACIONES

Con el objetivo de poder visualizar y analizar el comportamiento magnético del estator hemos realizado una simulación por elementos finitos en el software FEMM (Finite Element Method Magnetics). Esta poderosa herramienta de software nos permite resolver problemas que involucran ecuaciones diferenciales en superficies de gran complejidad a partir de múltiples geometrías simples. Es importante destacar, que a medida que se incrementa el número de regiones pequeñas, el resultado aproximado se acerca a la solución exacta del problema inicial. En concreto, el programa discretiza el dominio del problema usando elementos triangulares, para luego aproximar la solución mediante una interpolación lineal de los valores de potencial en los tres vértices del triángulo.

Para llevar a cabo la simulación hemos dibujado en AutoCAD un perfil del cojinete magnético, que luego importamos desde la aplicación FEMM. Ya en el programa, ingresamos las propiedades de los materiales (aire, cobre, acero) y creamos los circuitos de corrientes de acuerdo a nuestros intereses. Luego, generamos los elementos triangulares y ejecutamos la simulación, obteniéndose los resultados mostrados en Fig. 11, Fig. 12 y Fig. 13.

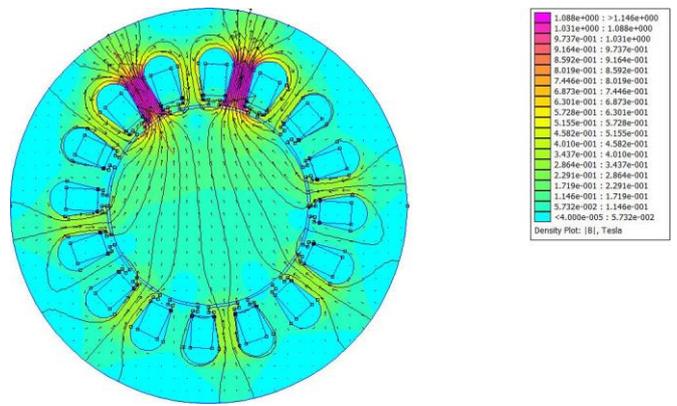


Fig. 11. Simulación del estator.

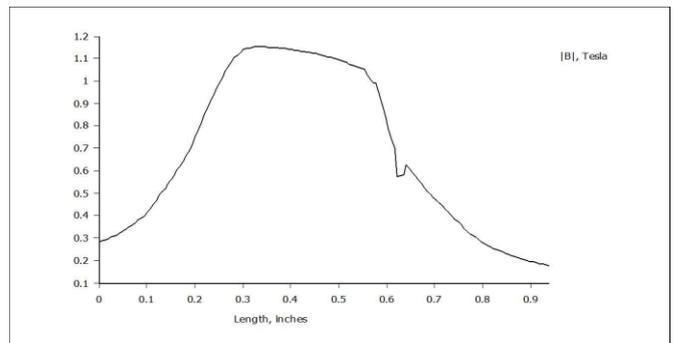


Fig. 12. Gráfica de |B| sobre la línea roja de la Fig. 10.

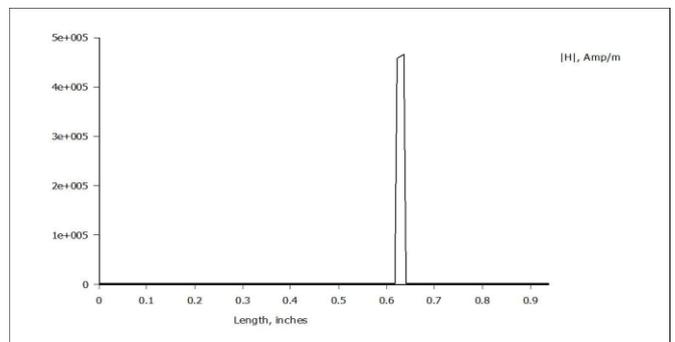


Fig. 13. Gráfica de |H| sobre la línea roja de la Fig. 10.

En el resultado de la Fig. 11 se observa el circuito de corriente superior excitado con una corriente de 1 A, y el resto de los circuitos con 0,5 A. Esta simple simulación nos muestra cómo se distribuyen los vectores y las líneas de flujo magnético involucradas en el sistema. Además, en la Fig. 12 se observa la magnitud de la inducción magnética |B|, mientras que en la Fig. 13 se tiene la intensidad del campo magnético |H|, ambas sobre la línea roja de la Fig. 11.

A partir de esta simulación, y otras para distintas condiciones, hemos podido visualizar el comportamiento del campo magnético y analizar la aplicabilidad de estas propiedades físicas al proyecto de cojinetes magnéticos.

Por su parte, también se realizaron simulaciones para evaluar el comportamiento del control PID desarrollado. A través del software SIMULINK de MATLAB obtuvimos la respuesta al

escalón del modelo planteado a lazo abierto sin controlador, donde la misma se aleja rápidamente del punto de equilibrio del sistema.

Tal como se tenía previsto, la existencia de un problema de inestabilidad nos obliga a la implementación de un algoritmo de control, siendo propuesta la utilización de un controlador clásico PID.

Básicamente la estructura de un controlador está compuesta por:

- Un generador de error donde se compara la señal de salida controlada medida $y_m(t)$ con la señal de consigna $r(t)$.
- Un algoritmo de control que genera una señal de salida del controlador $y_r(t)$ de acuerdo a los diferentes modos, funciones y/o algoritmos presentes en el controlador.

La Fig. 14 muestra el esquema utilizado para simulación del sistema con el controlador PID correspondiente.

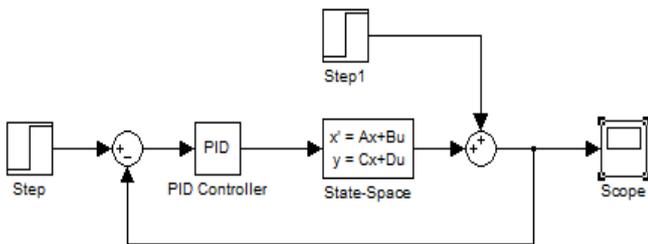


Fig. 14. Esquema en Simulink.

En la respuesta del modelo controlado frente a una perturbación de + 0,2 unidades de distancia, anexada al sistema a través de Step1, se observa una rápida acción correctiva permitiendo que el eje regrese nuevamente hacia el equilibrio (Fig. 15).

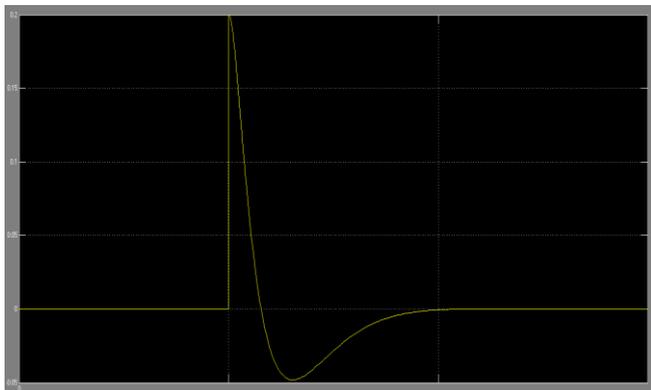


Fig. 15. Respuesta a perturbaciones del sistema realimentado.

V. CONCLUSIONES

Luego de energizar el circuito se observa que el sistema trata de responder según lo esperado, pero dicha levitación no se mantiene en el tiempo, resultando un periodo útil

relativamente bajo. No obstante se está trabajando con este inconveniente para perfeccionar el control PID o llegado el caso, proponer un sistema de control más complejo.

Luego de las mejoras propuestas respecto del control, desde un enfoque educativo, el proyecto desarrollado puede resultar de gran utilidad para explicar de manera didáctica en qué consisten los sistemas levitantes para el público en general, siendo considerada su inclusión futura en el “Museo Interactivo de Ciencias” de la Facultad Regional San Francisco. El prototipo a su vez podría insertarse en las cátedras “Sistemas de Control” y “Sistemas de Control Aplicado” de la carrera de Ingeniería Electrónica, como herramienta para realizar experiencias prácticas referidas a controles PID.

VI. BIBLIOGRAFÍA Y SITIOS WEB

- [1] http://www.mcgs.ch/active_magnetic_bearings.html
- [2] Ogata K. Ingeniería de Control Moderna, 5° Edición.
- [3] Dan C. et al., (1993), Sliding Mode and Classical Control for Magnetic Levitation System, IEEEControl Systems.
- [4] Golob M., (2003), Modeling and control of the magnetic suspension system, ISA Transactions.
- [5] Shen J-C, (2002), H ∞ Control and Sliding Mode Control of Magnetic Levitation System, Asian Journal of Control.
- [6] Palis S., (2007), Nonlinear adaptive control of magnetic bearings, IEEE.
- [7] El Hajjaji A., (2001), Modeling and Nonlinear Control of Magnetic Levitation Systems, IEEE Trans. On Industrial Electronics.
- [8] Filho M.R. et al., (2001), A Design Metodology of Tracking Controllers for Magnetic Levitation Systems, IEEE Int. Conf. on Control and Applications.
- [9] Bandal V.S., (2009), A New Approach to a Sliding Mode Controller design for a Magnetic Levitation System, Asia-Pacific Conf. On Computational Intelligence and Industrial Applications.
- [10] Jalili-Kharaajo M. et al., (2003), Sliding mode control of voltage-controlled magnetic levitationsystem, IEEE.
- [11] Sun Z.G. et al., (2009), Integral Sliding Mode Control with Integral Switching Gain for Magnetic Levitation Apparatus, Int. Conf. on Power Elect. Sys. and Applications.
- [12] Adam E. Instrumentación y Control de Procesos, 2° edición, Editorial ediciones UNL, Año 2014.
- [13] Sensor Design Using the Microchip dsPIC, 1st Edition
- [14] Programming 16-Bit PIC Microcontrollers in C, 2nd Edition

Nota: última visita a cada sitio web el día 22/06/2016.