

Levitador Magnético: un prototipo experimental para la enseñanza y la investigación en el área del control automático

Gabriel Eirea (*) - Marcelo Acosta - Raúl Bartesaghi - Rafael Canetti (*)

En este trabajo se presentan el diseño y las características de un Levitador Magnético construido en el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería (Universidad de la República, Uruguay) y que se encuentra en operación desde hace cinco meses. El propósito de este equipo es servir como ayuda en la enseñanza del control automático, permitiendo que el estudiante realice el ciclo completo de ingeniería de un sistema de control (modelado, diseño, simulación y verificación experimental). Al mismo tiempo, este equipo sirve como banco de pruebas para la experimentación de técnicas de modelado y control, vinculado a trabajos de investigación dentro del Instituto. El objetivo de control consiste en mantener en levitación una esfera hueca de metal mediante la acción de un campo magnético. Este campo es generado al circular por una bobina una corriente de valor rms controlado. La posición de la esfera es medida por métodos ópticos y adquirida por una computadora personal. El algoritmo de control es implementado por programa en la PC. La planta a controlar es inestable y fuertemente no lineal, apropiada para la aplicación de herramientas de diseño avanzadas. Se exponen también los resultados experimentales obtenidos con técnicas clásicas de control.

1. Introducción

Se ha iniciado este trabajo con la búsqueda de un problema de control que sea a la vez interesante desde el punto de vista académico como posible de ser implementado a nivel de laboratorio. Se halló que el problema de la levitación de un objeto metálico mediante la acción de una fuerza magnética opuesta al peso del mismo, reúne estas condiciones y ofrece un campo muy amplio de investigación en técnicas de control avanzadas.

Se ha obtenido un sistema con las siguientes características:

- la planta a controlar es fuertemente no lineal. Esta presenta cierto grado de complejidad que la hace apropiada para la aplicación de herramientas de diseño avanzadas.
- el algoritmo de control puede ser incorporado al sistema mediante programa, utilizando el lenguaje Pascal, lo cual facilita el trabajo de laboratorio.
- el programa permite además grabar en un archivo los valores de las variables de estado y de la acción de control en función del tiempo, posibilitando la utilización de técnicas de identificación.

Este tipo de dispositivos han sido reportados como casos interesantes para la enseñanza de Control; por ejemplo para Control No-Lineal en forma simulada (no existe el dispositivo físico), Özgüner [1].

A continuación se describen las características físicas y eléctricas del aparato construido, un modelo de su comportamiento dinámico y los primeros resultados obtenidos.

2. Descripción del sistema

El objeto que se desea mantener en levitación es una esfera hueca de metal. Para contrarrestar el peso de la misma se utiliza un electroimán de eje vertical, que ejerce una fuerza de atracción en dirección vertical y orientada hacia arriba.

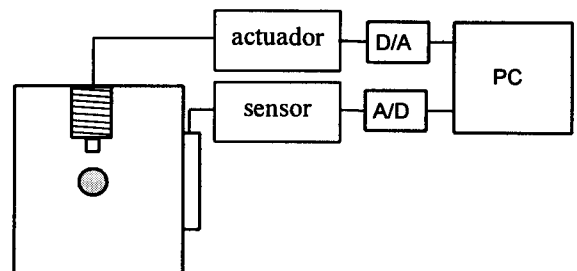


Figura 1- Esquema del Levitador Magnético

Las líneas de campo generadas por este electroimán hacen que el sistema sea estable en el plano horizontal. En efecto, si consideramos las componentes horizontales de la fuerza, se

(*) Docente del Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay.
EMail : geirea@iie.edu.uy, canetti@iie.edu.uy

puede comprobar que esta esta dirigida siempre hacia el eje del electroimán. Existe sobre el mismo un punto de equilibrio estable, aunque con dinámica subamortiguada. Por este motivo el problema de estabilizar el sistema se reduce a controlar la fuerza únicamente en sentido vertical.

Fue necesario implementar entonces:

- a) como **actuador**, un circuito que suministre una corriente i a una bobina de eje vertical, en función de una tensión v_i que recibirá como entrada.
- b) como **sensor**, un sistema óptico capaz de entregar una tensión v_z monótona con la distancia z de la esfera a la parte inferior de la bobina.
- c) una etapa digital que realice los cálculos del algoritmo de control y ofrezca al usuario una interfaz cómoda, tanto para la modificación de dicho algoritmo como para la visualización y procesamiento de los datos del sistema.
- d) fuentes de alimentación y soporte mecánico para las partes arriba mencionadas.

2.1. Actuador

Se utiliza un driver de corriente, constituido por un modulador de ancho de pulso (PWM) que excita a un transistor de efecto de campo (FET). El ciclo de trabajo del PWM está determinado por la tensión de entrada al driver (v_i) y puede variar de 0 a 0,95. El disparo del FET se realiza con la ayuda de un transistor de conmutación rápida.

En la Figura 2 se muestra la curva de la corriente por la bobina i contra la tensión de entrada v_i , la cual puede ser aproximada por dos tramos lineales.

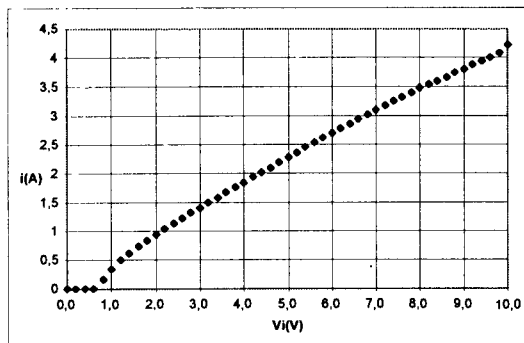


Figura 2 - Curva del actuador

2.2. Sensor

La posición de la esfera es medida por el sistema óptico que se muestra en la Figura 3. La

cantidad de luz que recibe el fotodiodo depende de la cantidad de luz que incide sobre la pantalla reflectora, que a su vez depende de la posición de la esfera.

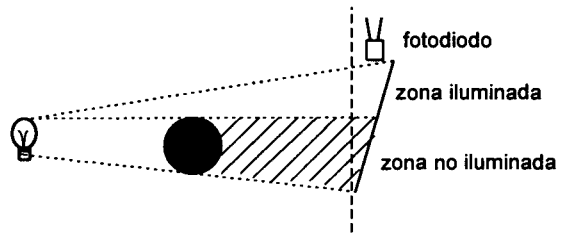


Figura 3 - Esquema del sensor de posición

Como era de esperarse, la curva de tensión contra posición de la esfera no es lineal. Sin embargo puede aproximarse con una recta sin incurrir en errores muy importantes, tal como se aprecia en la Figura 4. Una aproximación lineal por tramos mejora aún más la precisión.

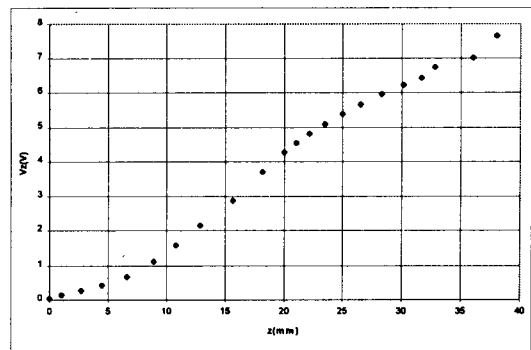


Figura 4 - Curva del sensor

Se han tomado precauciones para que la disposición mecánica de este conjunto no sufra modificaciones. Para compensar ésta y otras posibles variaciones a las que el sistema óptico es sensible, se ha implementado un mecanismo simple de calibración:

al iniciar el programa, se solicita al usuario que coloque la esfera contra la bobina, luego se le solicita que quite la esfera del haz luminoso. De esta manera el programa mide los valores extremos y ajusta automáticamente los parámetros de la curva de calibración, bajo la hipótesis de que no se modifica la forma de la curva.

2.3. Etapa digital

Se utiliza una computadora personal equipada con una tarjeta que realiza la conversión analógica-digital de la tensión v_z y la conversión digital-analógica de la señal v_i .

El programa fue desarrollado en lenguaje Pascal y realiza básicamente dos tareas:

a) **Sensado y control.** Periódicamente toma una lectura de la tensión v_z , deduce la posición z , la filtra para reducir ruido de alta frecuencia, estima su derivada z' , aplica el algoritmo de control y genera la acción de control i , determina la tensión v_i necesaria y la escribe en el puerto de salida.

b) **Monitoreo.** Muestra las variables del sistema en la pantalla en tiempo real y atiende las solicitudes del teclado que permiten, entre otras cosas, modificar las constantes del controlador, guardar un registro de la evolución del sistema en los últimos minutos, etc.

El algoritmo de control puede ser modificado reescribiendo una rutina y utilizando todas las facilidades que el lenguaje Pascal ofrece.

Se ha implementado un circuito acondicionador de señales, que actúa como interfaz entre la etapa digital y las etapas del sensor y el actuador.

2.4. Montaje del sistema

Se ha tenido especial cuidado en el montaje del equipo, en reducir al mínimo el ruido que es introducido a los circuitos, principalmente a la etapa acondicionadora de señales. Esto es necesario debido a las importantes corrientes conmutadas que manejan la bobina. Para ello se han seguido los siguientes principios:

- la conexión de señales sensibles a ruidos se hizo con cable blindado con la malla a tierra
- la conexión de líneas de alimentación se hizo con cables torneados
- la corriente que va a la bobina se conectó con un cable blindado con la malla a tierra

- la distribución de la alimentación dentro de las tarjetas se hizo en forma de estrella
- cada tarjeta está rodeada por una caja de metal conectada a tierra
- cada tarjeta recibe alimentación de una fuente no regulada y tiene su propio regulador incorporado

Existen tres fuentes de alimentación distintas:

- fuente regulada de 80 VDC para entregar potencia al electroimán
- fuente regulada de 12 VDC para alimentar la lamparita utilizada para el sensor de posición
- fuente no regulada de ± 20 VDC para alimentar la electrónica del driver y el acondicionador de señales

3. Dinámica

La dinámica de la esfera puede modelarse en forma aproximada como:

$$M z'' = M g - F(z, i)$$

Donde g : aceleración de la gravedad, M : masa de la esfera, F : fuerza magnética. La variable de control es $i(t)$.

El cálculo teórico de la fuerza magnética que se ejerce sobre la esfera es sumamente complejo, debido a la no verificación de ciertas hipótesis simplificadoras clásicas en electromagnetismo (como ser campo uniforme, simetría, etc.). Por ejemplo: es típico simplificar el análisis despreciando corrientes de Foucault, en este caso es evidente que no es posible. Las corrientes inducidas por efecto de la corriente conmutada son muy importantes. Por ello se realizó una medida experimental de dicha

Acondicionador de señales

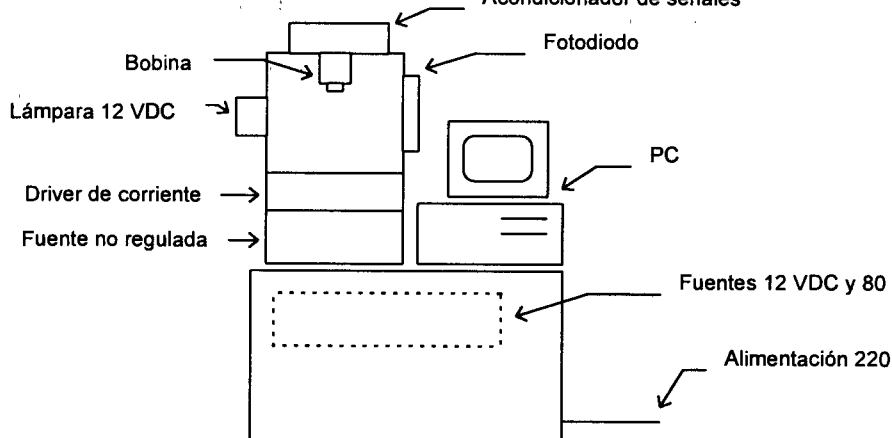


Figura 5 - Montaje del Levitador Magnético

fuerza, buscando hallar una ley que se ajustara lo mejor posible a las medidas realizadas. Siendo la esfera siempre la misma, las variables que intervienen en la determinación de la fuerza son la corriente i y la posición z . En tal sentido se realizaron medidas de fuerza para distintos valores de i y de z .

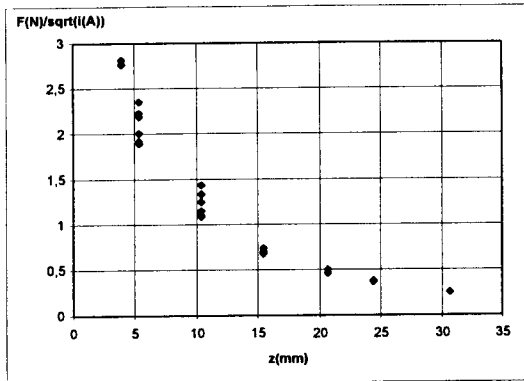


Figura 6 - Fuerza magnética sobre la esfera

Se ajustó una ley de la forma $F(i,z)=i^{-a} \cdot f(z)$. En primer término se halla el parámetro a . En segundo lugar se halla la función $f(z)$ aproximando la curva determinada por los puntos $F(i,z)/i^a$ en función de z (mostrada en la Figura 6). Se observa una gran consistencia de los datos con una ley del tipo hipérbolico.

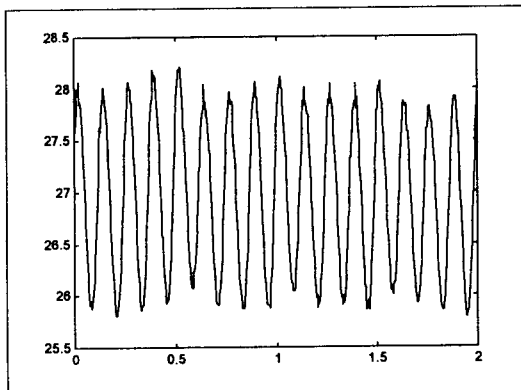


Fig.7-Posición(mm) en función del tiempo (s)

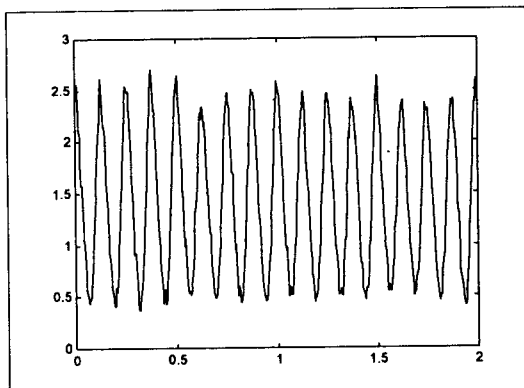


Fig.8 - Corriente (A) en función del tiempo(s)

4. Experimentos realizados

Se implementó un algoritmo básico de control para estudiar el desempeño del sistema. Este algoritmo no ha sido optimizado y su único objetivo es lograr la levitación de la esfera, sin imponer condiciones adicionales. Este algoritmo consiste en un sencillo controlador proporcional derivativo (PD). Los parámetros fueron ajustados a partir de valores teóricos calculados en base a un modelo del sistema. Este se obtuvo con las técnicas standard de linealización en la trayectoria de operación (ver p.ej. Kuo [2]).

La gráfica de la posición de la esfera en función del tiempo se muestra en la Figura 7, que reproduce un registro de operación experimental. Se observa que existe un ciclo límite, de unos 2mm. de amplitud en la posición, causado por la no linealidad del sistema.

La Figura 8 muestra la corriente aplicada a la bobina durante el mismo período.

5. Conclusiones

El Levitador Magnético que se ha expuesto en este trabajo fue desarrollado con la finalidad de obtener un sistema experimental que sea útil en aplicaciones de enseñanza e investigación dentro del área del control automático. El equipo funciona como plataforma de experimentación para técnicas de control tanto básicas como avanzadas.

Quedan planteados futuros trabajos, que son en realidad la razón de su construcción: minimizar la amplitud del ciclo límite, seguimiento de trayectorias no estáticas, robustez frente a las perturbaciones externas y derivas de la dinámica del dispositivo.

6. Referencias

[1] - Özgüner, Ümit- "Three-Course Control Laboratory Sequence". *IEEE Control Systems Magazine*, Vol 9, No. 3, pp.14-18. Abril 1989 .

[2] - Kuo, Benjamin C. - "Automatic Control Systems ". Prentice - Hall Inc.

BIOGRAFIAS

Gabriel Eirea

Nació en Montevideo en 1970. Estudió en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, donde actualmente está trabajando en su proyecto de graduación. Trabaja como ayudante en el Instituto de Ingeniería Eléctrica desde 1995.

Sus áreas de interés son la Electrónica Aplicada y el Control Automático.

Rafael Canetti

Nació en Montevideo en 1952. Obtuvo los grados de Ingeniero y Master en Ingeniería (Control) en la UNAM, México. Fue becario del Instituto de Ingeniería, UNAM. Actualmente es Profesor Titular del Instituto de Ingeniería Eléctrica, de la Facultad de Ingeniería. Tiene a su cargo la Jefatura del Departamento de Control y Electrónica Industrial.

Sus áreas de interés son: Identificación de Sistemas Dinámicos, Control de Procesos y Redes Neurales.