

LEVITACIÓN MAGNÉTICA DE UNA LÁMINA FLEXIBLE DE HIERRO CON UN ELECTROIMÁN SUPRESOR DE VIBRACIÓN

Autores:

H. Hayashiya, N, Araki, J.E Paddison, H. Ohsaki y E. Masada
Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Tokio
IEEE Transactions on magnetics. Vol 32 No. 5. Septiembre de 1996

Traducido por:

Claudia Araujo*
Danilo Rairan**

I. Introducción

En el proceso de construcción del hierro supóngase la aplicación de la levitación magnética para el transporte de la lámina¹. Se muestran en la Figura 1 las ventajas de introducir el soporte sin contacto de una lámina de hierro. Estas ventajas son: mejorar la calidad de los productos, reducir los costos del mantenimiento de instalaciones, aumentar la productividad y hacer más silencioso el proceso. De otra parte, la flexibilidad de la lámina de hierro causa vibraciones naturales, las cuales impiden la ejecución del anterior sistema². Para lograr que la levitación de la lámina de hierro sea más estable, se propo-

* Docente de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital F.J.C. Especialista en Informática por la Gestión Educativa de la Universidad Autónoma de Colombia.

** Docente de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital F.J.C. Investigador en Levitación Magnética, Msc. Automatización Industrial de la Universidad Nacional

1 Y. Oshinoya and T Shimogo. "Electro-magnetic levitation control of an elastic plate" in Proc 11th Int. Conf on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Pp 435-440 1989.

2 H. Hayashiya, H. Ohsaki, and E. Masada, "Magnetic levitation control of elastic steel plate for steel making process" in Proc. Of The Int. Conf. on Electrical Engineering. Pp 525-528, 1995.

ne y experimenta un sistema de levitación que no solamente tiene electroimanes principales de soporte, sino también electroimanes para la supresión de vibración.

II. Sistema de Levitación Magnética con Electroimanes Supresores de Vibración

El sistema de levitación magnética para el transporte de la lámina de hierro tiene aspectos en común con muchas aplicaciones de levitación magnética para el soporte de estructuras flexibles. En este caso la lámina es tan flexible que es muy fácil hacer que ella se doble y las características de levitación tienden a perderse. Además, la vibración natural llega a ser incontrolable en el punto del estado de vibración.

Así, es aconsejable acomodar los electroimanes dispersos sobre la lámina de hierro. Los electroimanes supresores de vibración son construidos, en este caso, para suprimir las vibraciones naturales. Como se muestra en la ecuación 1, solamente se utiliza la velocidad (x , largo del entrehierro) de la lámina para controlarlas.

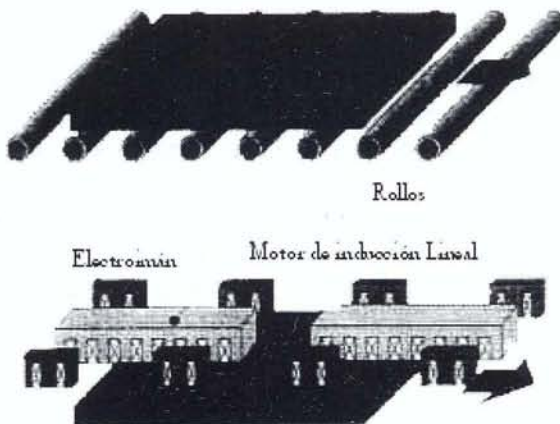


Figura 1. Soporte con contacto y sin contacto para la lámina de hierro

$$f_{vib}^* = k_{vib} \dot{x} \quad (1)$$

Donde f_{vib}^* es la fuerza efectiva y k_{vib} es el coeficiente de control.

La adición de electroimanes de supresión de vibración tienen las siguientes ventajas:

- Son fáciles de hacer con una estrategia de control sencilla, un núcleo magnético pequeño y un circuito eléctrico específico
- Son adecuados para sistemas de control de vibración multipunto
- Ellos no llegan a ser elementos redundantes para soportar una lámina de hierro horizontalmente en un plano.

Para examinar la dependencia del amortiguamiento de la vibración de la lámina en puntos de soporte se realizó la simulación de la respuesta de la lámina con el método de elementos finitos.

La lámina de hierro fue modelada con el tipo de elementos finitos de una barra unidimensional de Euler, la cual se dividió en 20 elementos. El tamaño de la lámina modelada era de 1 m. de longitud, 100 mm. de ancho y 2 mm. de espesor. La barra se localizó horizontalmente 4 mm. debajo de los electroimanes, y la levitación se inició en $t=0$ S.

El entrehierro de referencia fue 2 mm. Como se muestra en la Figura 2, la lámina fue soportada en los puntos en los cuales estaba a 200 mm. de los bordes. Es posible controlar la vibración que ocurre justo después de comenzar la levitación porque se presentan puntos de primera vibración cerca a los puntos de soporte. De otra parte, la vibración es amortiguada rápidamente, como se ve en la Figura 3, en la cual los electroimanes de supresión de vibración fueron acomodados en cada borde de la lámina. Aquí, f_{vib}^* fue ajustada a $2[N*s/m]$.

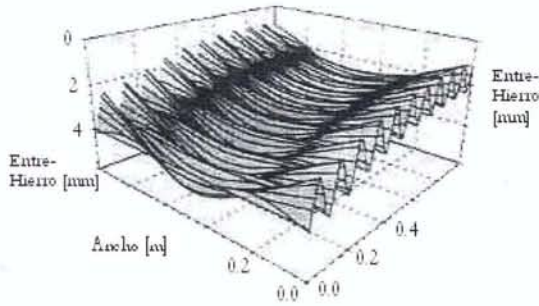


Figura 2. Respuesta sin el electroimán controlador de vibración.

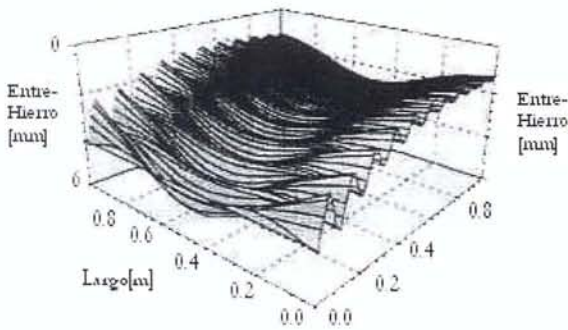


Figura 3. Respuesta con el electroimán controlador de vibración

III. Experimentos de Levitación Magnética para una Lámina de Hierro Flexible

A. Configuración del Montaje Experimental

Se realizaron experimentos de levitación magnética utilizando montajes experimentales, como se ve en la Figura 4.

La Figura 5 muestra el diagrama de bloques del sistema de control para los electroimanes principales de soporte. El sistema tiene una estructura de cascada. Por virtud de esta estructura es posible considerar los electroimanes como actores dinámicos ³.

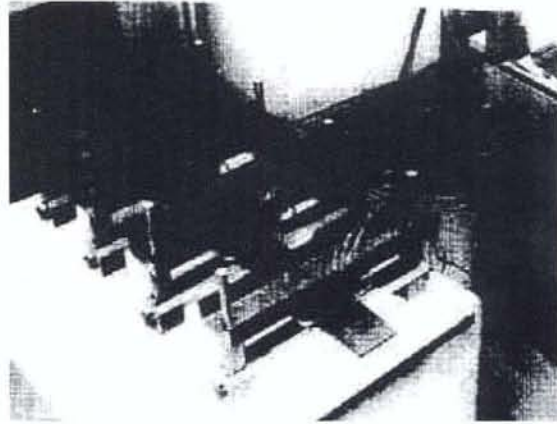


Figura 4. Fotografía de la máquina experimental.

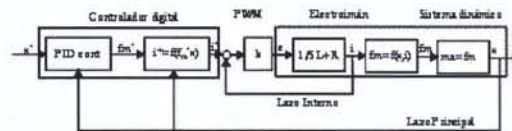


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema de control

Se utilizó un control PID para calcular la fuerza de atracción efectiva para los electroimanes principales de soporte, la cual se da en la siguiente ecuación:

$$f^* = K_p x_d + K_d \frac{dx_d}{dt} + K_i \int x_d dt + mg \quad (2)$$

Donde "m" es la masa que el electroimán debe soportar, "g" es la aceleración de la gravedad, x_d la diferencia entre el entrehierro "x" y el entrehierro de referencia " x_{ref} ". Aquí se calculó una compensación no lineal para la corriente i^* dada por la ecuación 3.

$$i^* = x \left(\frac{f_m^*}{\alpha} \right), \quad \alpha = \frac{\mu_0 N^2 S_F}{4} \left[\frac{Nm^2}{A^2} \right] \quad (3)$$

3 J. Ackermann, "Robust control" Springer-Verlag. 1993.

Donde μ_0 es la permeabilidad del aire, N es el número de vueltas de la bobina, S_p es el área polar. En los siguientes experimentos los coeficientes de control K_p , K_i y K_d fueron ajustados a 3500 N/m, 6000 N/m y 85 Ns/m, respectivamente.

En el montaje experimental, la longitud del entrehierro "x" se mide con un sensor de corriente de eddy, el cual se localiza justo bajo cada electroimán, y la corriente i es calculada en función de la longitud del entrehierro medido "x" por un computador personal. La corriente de la bobina "i" se mide con un sensor de corriente aislado la corriente del lazo más pequeño es generada por un circuito análogo y cada electroimán es independientemente controlado por modulación de ancho de pulso. El tiempo de muestreo para cada control fue de 0.5 mS. La longitud inicial del entrehierro " x_{int} " fue cercana a 4 mm. y el entrehierro de referencia " x_{ref} " fue de 2 mm. en los siguientes experimentos.

B. Resultados Experimentales

En la Figura 6 se muestra la localización de los electroimanes y la lámina de hierro. Mag 1,2,3 y Mag 4 son los electroimanes principales de soporte, y Mag5 es el electroimán supresor de vibración.

Primero, el experimento de levitación se realizó sin Mag5. La respuesta del entrehierro medido al borde de la lámina y su densidad espectral de potencia (PSD) se muestran con líneas oscuras en las Figuras 7 y 8 respectivamente. La levitación de la lámina se hizo inestable después de $t=1_s$ por el primer estado de vibración cuya frecuencia natural fue de 51.9 Hz.

A continuación se introdujo Mag5 para suprimir tal estado de vibración. La pérdida de la

levitación por el primer estado de vibración fue completamente evitada cuando el entrehierro del Mag5 se ajustó moderadamente. En muchos casos, sin embargo, el segundo estado, cuya frecuencia natural fue de 143.0 Hz, se produjo porque el ancho de banda del actuador Mag5 fue muy alto. La respuesta del entrehierro des-

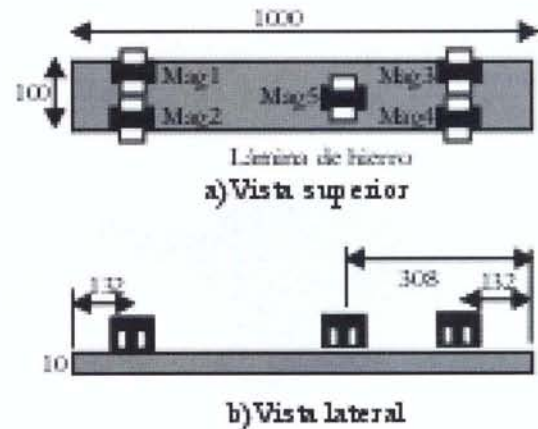


Figura 6. Localización del electroimán en la lámina de hierro

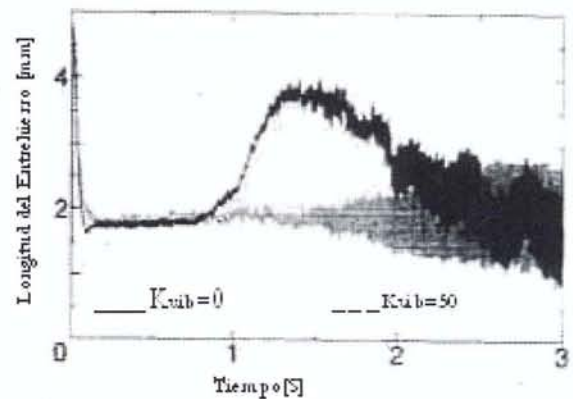


Figura 7. Entrehierro de Respuesta para la Lámina

de el borde de la lámina y su PSD se muestran con líneas delgadas en la Figura 7 y la Figura 8, respectivamente.

Para evitar la generación de esta vibración se instaló un filtro de quinto orden, tipo FIR con una frecuencia de corte de 143.0 Hz instalado antes del controlador PID. La Figura 9 muestra la respuesta del entrehierro en el borde de la lámina cuando se insertó el filtro de corte. La generación de vibración del segundo estado se evitó, y se realizó la levitación estable de una lámina de hierro flexible.

IV. Conclusiones

Se propuso la levitación estable de una lámina flexible utilizando un sistema de levitación magnética con un electroimán supresor de vibración. Se realizaron experimentos usando una lámina flexible de hierro. Los resultados fueron los siguientes:

- El primer estado de vibración, cuya frecuencia natural es 51.9 Hz, es controlada efectivamente por un electroimán supresor de vibración
- El segundo estado, cuya frecuencia natural es 143.0 Hz, es difícil de controlar por electroimanes
- Un filtro de corte es adecuado para evitar la aparición de vibración natural, que es difícil de controlar

Estos resultados indican que el electroimán supresor de vibración es valioso para la estabilización de la levitación en una lámina de hierro flexible.

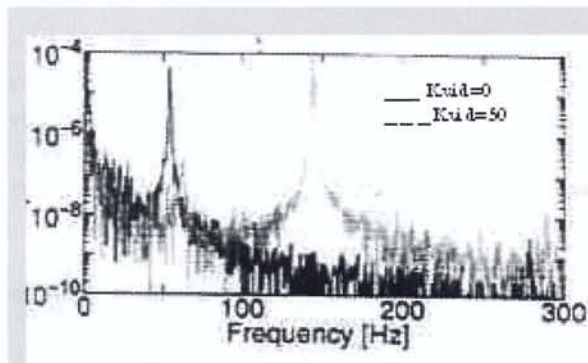


Figura 8. PSD del Entrehierro de Respuesta

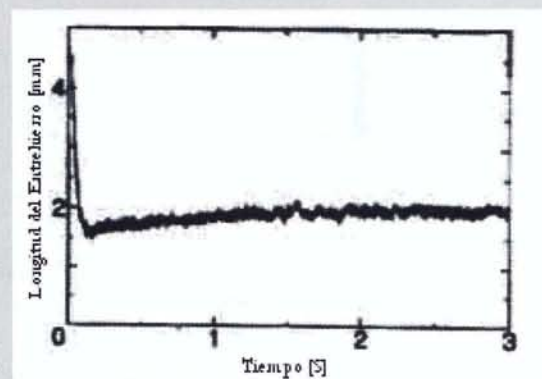


Figura 9. Entrehierro de Respuesta con el Filtro de Corte

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Y. Oshinoya and T Shimogo. Electro-magnetic levitation control of an elastic plate in Proc 11th Int. Conf on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Pp 435-440 1989.
- H. Hayashiya, H. Ohsaki, and E. Masada, Magnetic levitation control of elastic steel plate for steel making process in Proc. Of The Int. Conf. on Electrical Engineering. Pp 525-528, 1995.
- J. Ackermann, Robust control Springer-Verlag. 1993.