JÓVENES EN LA CIENCIA
REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

FÍSICA DE LA LEVITACIÓN MAGNÉTICA SOBRE UN MATERIAL SUPERCONDUCTOR

Jesús Daniel Bello Reyes (1), Paulo César García Quijas (2)

1 [Bachillerato General, Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico León, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [jesus_steel@hotmail.com]

2 [Colegio de Nivel Medio Superior, Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico León, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [pgquijas@gmail.com]

Resumen

La tecnología de levitación magnética ha estado recibiendo cada vez más atención, ya que ayuda a eliminar las pérdidas por fricción debido al contacto mecánico. Algunas aplicaciones de ingeniería incluyen los trenes de levitación magnética de alta velocidad, cojinetes magnéticos y plataformas de alta precisión. El objetivo de este trabajo es modelar matemáticamente un sistema de levitación magnética. El modelo se implementa para controlar la posición vertical de una masa metálica mediante el ajuste de la corriente en el electroimán a través de una fuente de voltaje.

Abstract

Magnetic levitation technology has been receiving increasing attention because it helps eliminate frictional losses due to mechanical contact. Some engineering applications include high speed maglev trains, magnetic bearings and high-precision platforms. The objective of this work is to model mathematically a magnetic levitation system. The model is implemented to control the vertical position of a metallic mass by adjusting the current in the electromagnet through the input voltage.

Palabras Clave Campo magnético; Circuito eléctrico, Fuerza antigravitacional; Ajuste por mínimos cuadrados

INTRODUCCIÓN

La levitación es un fenómeno que siempre ha cautivado la imaginación del ser humano. Hoy en día, se conocen unos cuantos mecanismos físicos que permiten "sostener" un objeto flotando sin contacto mecánico alguno con el suelo. No obstante, cuando se pretende extrapolar este atractivo fenómeno a sistemas de interés científico o tecnológico, aparecen serias dificultades. En particular, las aplicaciones basadas en efectos dinámicos (un colchón de aire, por ejemplo) requieren una gran cantidad de energía, y las que tratan de evitar este problema mediante la estática (como las basadas en imanes que se repelen) son altamente inestables. Una mínima perturbación sobre el objeto levitante lo expulsa irreversiblemente de su posición de equilibrio.

Aunque queda mucho camino por recorrer, las propiedades de atracción-repulsión entre imanes y superconductores han hecho posibles grandes avances en este campo. Estos sistemas son muy estables y el consumo de energía se reduce de modo drástico. En el rango de las aplicaciones a gran escala, disponemos ya de conocimiento y tecnología para levitar grandes masas [1].

Llamamos levitación magnética al fenómeno por el cual un material puede levitar gracias a la repulsión existente entre los polos iguales de dos imanes o bien debido a lo que se conoce como "Efecto Meissner", que es una propiedad inherente a los superconductores.

La superconductividad es una característica de algunos materiales, los cuales, por debajo de una cierta temperatura crítica, no oponen resistencia al paso de la corriente; es decir: son materiales que pueden alcanzar una resistencia nula. En estas condiciones de temperatura son capaces de transportar energía eléctrica sin ningún tipo de pérdidas, y además poseen la propiedad de rechazar las líneas de un campo magnético aplicado. Se denomina "Efecto Meissner" a esta capacidad

Cuando se acerca un imán a un superconductor, el superconductor se convierte en un imán de polaridad contraria de modo que "sujeta" al otro imán sobre él. Pero, al contrario que un imán normal (que haría que el otro imán se diera la vuelta y se quedase pegado a él), un superconductor cambia el campo magnético cuando el exterior lo hace, compensándolo, de modo que es capaz de mantener el otro imán fijo en el aire. Se genera una fuerza magnética de repulsión la cual es capaz de contrarrestar el peso del imán produciendo así la levitación del mismo. De hecho, si se aleja el imán del superconductor una vez que está cerca, éste cambia de polaridad y lo atrae lo suficiente para mantenerse a la misma distancia.

Por tanto un objeto estará bajo levitación magnética cuando la fuerza generada por la repulsión electromagnética es lo suficientemente fuerte para equilibrar el peso del objeto.

El objetivo principal de este trabajo es modelar matemáticamente un sistema de levitación magnética midiendo la posición del cuerpo y controlando la corriente. El modelo matemático del sistema de levitación magnética que se considera es el de una masa metálica que se suspende o levita por un campo magnético generado por un electroimán (bobina) controlado por una fuente de corriente [2]. Se utilizaron datos experimentales de un modelo de control automático para calcular las no linealidades del sistema realizando un ajuste por mínimos cuadrados al modelo lineal [3], [4].

Modelado matemático

Todos los sistemas que utilicen levitación magnética para sostener elementos ferromagnéticos deben contar, por lo menos, con dos elementos: un sistema eléctrico, constituido por una fuente variable de voltaje y una bobina; un sistema electromecánico, que utiliza la energía eléctrica almacenada en la bobina en forma de campo magnético para compensar la energía mecánica.

La fuente de fuerza anti-gravitacional del sistema es un campo magnético generado por una bobina, utilizada para contrarrestar la fuerza de gravedad ejercida sobre la masa m del cuerpo por el campo gravitatorio terrestre. Una forma de encontrar la ecuación de movimiento del cuerpo del sistema representado por la Imagen1, es aplicando el segundo principio de Newton dado por:

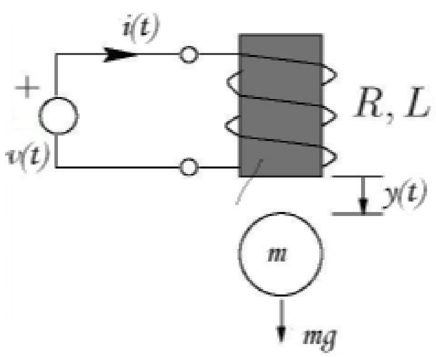

IMAGEN 1: Sistema de levitación magnética. Donde i es corriente, R, resistencia del inductor, L, inductancia del inductor, y, la posición del cuerpo de la bobina, m, la masa del cuerpo, g, la constante de gravedad.

$$\sum F = ma$$

De este principio se llega:

$$\sum F = mg + F(y, i)$$

Donde F(y,i) es la fuerza ejercida por la bobina dependiente de la posición "y". y > 0 es la posición vertical (hacia abajo) del cuerpo medida desde un punto de referencia (y =0 cuando la bola está pegada a la bobina), i es la corriente.

Para interpretar el comportamiento de la fuerza aplicada por la bobina sobre el cuerpo, debemos analizar el comportamiento de la inductancia de la bobina en presencia del cuerpo metálico [5]. Esta inductancia puede modelarse por la ecuación:

$$L(y) = L_1 + \frac{L_0}{(1+\frac{y}{c})}$$

Donde L_1, L_0 y c son constantes que se obtienen de mediciones.

Este modelo representa el caso en el que la inductancia tiene un máximo valor cuando el cuerpo está pegado a la bobina $L(y)=L_1+L_0$, y decrece a medida que el mismo se aleja hasta y=∞ $L(y)=L_1$. Una vez obtenido el modelo de la variación de la inductancia, tomando la ecuación siguiente como la energía almacenada en la bobina, la fuerza F(y,i) está dada por:

$$F(y, i) = \frac{\partial E}{\partial y} = \frac{L_0 i^2}{2c(1+\frac{y}{c})^2}$$

De ésta manera se define la ecuación que describe la dinámica del sistema:

$$\sum F = mg + \frac{L_0 i^2}{2c(1+\frac{y}{c})^2}$$

Expansión polinomial de la fuerza de control

Como ya se mencionó, la ecuación debe ser extendida para calcular las no linealidades del sistema. De la última ecuación, en condiciones de equilibrio estático queda:

$$0 = mg - \frac{L_0 i^2}{2c(1+\frac{y}{c})^2}$$

Considerando que la fuerza de control y el peso de la masa son de signo contrario, se resuelve la ecuación de la forma siguiente:

$$\frac{L_0 i^2}{mg} = 2c(1+\frac{y}{c})^2$$

Como L_0 y C son constantes, reacomodando términos resulta la siguiente ecuación:

$$\frac{L_0 i^2}{2cmg} = (1+\frac{y}{c})^2$$

En este caso se propone una expansión polinomial en el lado derecho de la ecuación de la siguiente forma:

$$\frac{l_0 i^2}{2cmg} = b_0 + b_1 y + b_2 y^2 + b_3 y^3 + \cdots + b_6 y^6$$

Donde b_0, b_1, b_2, b_3,…, b_6 son constantes que se determinarán numéricamente asignando valores para la corriente y la posición.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para encontrar los coeficientes de la expansión polinomial se utilizó el método de mínimos cuadrados. Este método permite obtener la corriente requerida para hacer levitar la masa en diferentes posiciones.

Para determinar la confianza de la aproximación se usó el coeficiente de correlación lineal R^2, el cual indica qué tanta relación existe entre las variables. R^2 va desde 0 hasta 1, donde 0 indica que no existe ninguna relación entre las variables y 1 es el grado máximo de correlación lineal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos utilizados para obtener el polinomio característico corresponden a una corriente variable que va desde 0.38 A a 2.12 A; una posición que oscila entre los 0.0015 m y los 0.09 m, donde L_0 = 0,0017 H, L_1 = 0,000059 H, c = 0,001051 m.

Las imágenes siguientes muestran la respuesta de los valores medidos experimentalmente.

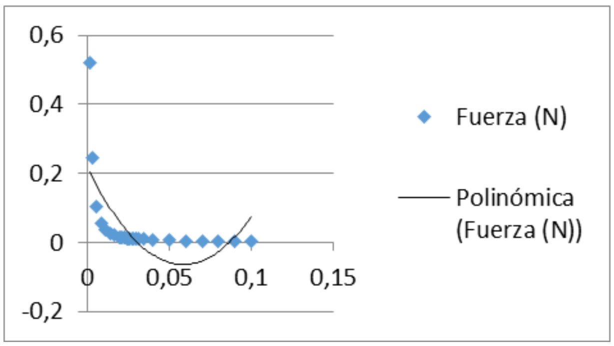

IMAGEN 2: Gráfica de la fuerza con línea de tendencia de segundo grado: $y = 81.68x^2 - 9.585x + 0.216$, $R^2 = 0.460$

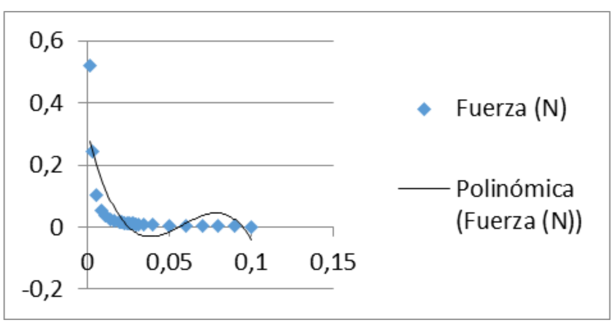

IMAGEN 3: Gráfica de la fuerza con línea de tendencia de tercer grado: $y = -2324.x^3 + 408.3x^2 - 21.07x + 0.308$, $R^2 = 0.644$

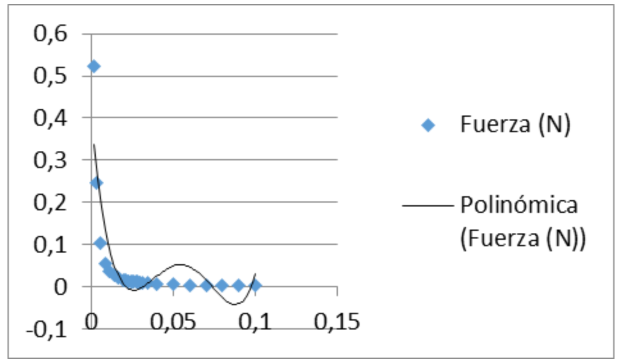

IMAGEN 4: Gráfica de la fuerza con línea de tendencia de cuarto grado: $y = 82972x^4 - 18573x^3 + 1399.x^2 - 40.86x + 0.396$, $R^2 = 0.768$

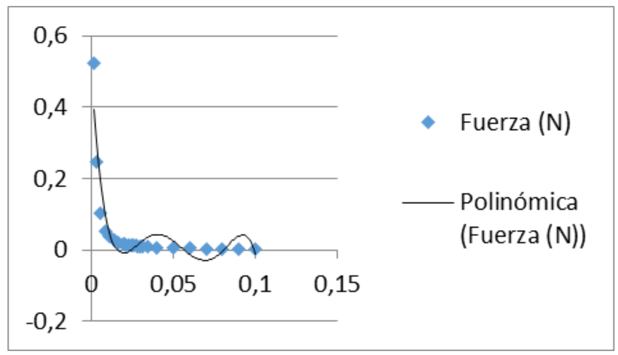

IMAGEN 5: Gráfica de la fuerza con línea de tendencia de quinto grado: $y = -3E+06x^5 + 77618x^4 - 78824x^3 + 3582.x^2 - 70.87x + 0.491$, $R^2 = 0.863$

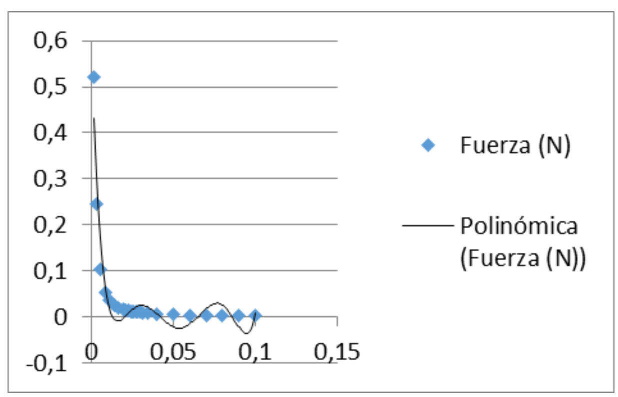

IMAGEN 6: Gráfica de la fuerza con línea de tendencia de sexto grado: $y = 9E+07x^6 - 3E+07x^5 + 4E+06x^4 - 23480x^3 + 7318.x^2 - 107.2x + 0.576$, $R^2 = 0.918$

Aplicando el método de mínimos cuadrados se observa que la mejor aproximación se obtiene para un polinomio de grado seis, ya que el resultado del coeficiente de correlación lineal es muy cercano al grado máximo de correlación.

CONCLUSIONES

Se encontró que la curva que mejor ajusta a los datos es un polinomio de grado seis, ya que tiene un coeficiente de correlación lineal de 0.918, muy cercano a su valor máximo. En un principio se suponía que un polinomio de grado tres se aproximaría de mejor forma, sin embargo, se obtuvo que su coeficiente de correlación lineal es de 0,644 que no es valor óptimo para el ajuste.

Con base a los datos y la gráfica se determinó que los valores de la corriente que optimizan la fuerza de control, es decir, donde se pueden encontrar pequeñas variaciones en el desplazamiento de la masa fueron para la corriente de 0.95A a 1.15A, y la posición de 0.026m a 0.031m.

AGRADECIMIENTOS

En la presente sección, agradezco en primera estancia a la Universidad de Guanajuato por permitirme esta grandiosa experiencia de entrar al mundo de la investigación. Posteriormente a mi asesor, Dr. Paulo César García Quijas, por brindarme toda su atención al realizar el proyecto y permitirme trabajar con él, y por último a mi tutor interno, Miguel Ángel Ruiz Torres por resolver ciertas dudas en el proceso del proyecto.

REFERENCIAS

[1] Sawada K., (1996), Development of magnetically levitated high speed transport system in Japan. Transactions on magnetics IEEE, 32(4), 2230-2235.
[2] Ahmed E. H., Ouladsine M. (2001), Modeling and Nonlinear Control of Magnetic Levitation Systems. Transactions on Industrial Electronics IEEE, 48(4), 831-838.
[3] Palmeri D., Pucci M. A., (2004) Construcción y control de un sistema de levitación magnética, Departamento de Ciencia y Tecnología Universidad Nacional de Quilmes (Comunicación interna), 1-6.
[4] Arjón-Puente A. A., Mandujano-García E. N., (2007), Modelado matemático y control para levitación magnética, (Tesis) Zacatecas: Universida Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica.
[5] Woodson H.H., Melcher J.R., (1968), Field Description of Magnetic and Electric Forces, Electromechanical Dynamics Part II (418-466), Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare.