

Diseño, Modelamiento, Simulación e Implementación de un Sistema de Levitación Magnética (Maglev) con un Grado de Libertad

Bernard Herrera^{1*}, Marcos Guevara²

Colegio de Ciencias e Ingeniería –El Politécnico– Universidad San Francisco de Quito

Calle Diego de Robles y Via Interoceánica, Quito, Ecuador.

Autor principal/Corresponding author E-mail: bernardherrera@gmail.com

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 11/21/2012. Aceptado/Accepted: 12/06/2012.

Publicado en línea/Published on Web: 12/28/2012. Impreso/Printed: 12/28/2012.

Abstract

In the present work, a magnetic levitation system (maglev) with one degree of freedom (vertical) is designed, simulated and implemented physically. A simplified linear model is first obtained which describes the system. From this model, linear controllers are designed using traditional control methods. The effectiveness of these controllers to stabilize the system and their performance parameters are tested by simulation. The proposed models are also validated experimentally. Regarding implementation, an electromagnet is used, whose current flow is controlled to levitate a disk in which a permanent magnet is inserted. The current control is performed using the PWM (Pulse Width Modulation) technique. An infrared optical position sensor and a current sensor are constructed to measure these variables in the system. The control algorithms are implemented in a microcontroller optimized for signal processing (dsPIC). Due to the digital implementation of the controllers, the influence of sampling and processing times on the performance and stability of the system is discussed. Stabilization of the disc for small variations around an equilibrium point within the range of 3 to 8 cm from the magnet is achieved. Finally, the considerations necessary to achieve dynamic control within the range (for variable positions) including non-linear control strategies are discussed.

Keywords. Magnetic levitation, maglev, IR distance sensor, current sensor, dsPIC30F4013, PWM, digital control.

Resumen

En el presente trabajo se diseña, simula e implementa físicamente un sistema de levitación magnética (maglev) con un grado de libertad (vertical). Se deduce teóricamente un modelo simplificado lineal que modela al sistema, a partir del cual se diseñan controladores lineales mediante métodos tradicionales de control. Se prueba la efectividad para estabilizar al sistema y los parámetros de desempeño de dichos controladores mediante simulación. Los modelos propuestos además se validan experimentalmente. En cuanto a la implementación, se utiliza un electroimán, cuya corriente se controla para levantar un disco en el cual se inserta un imán permanente. El control de la corriente se realiza mediante la técnica PWM (Pulse Width Modulation). Se implementa un sensor óptico infrarrojo de posición y un sensor de corriente para medir dichas variables en el sistema. Los algoritmos de control se implementan en un microcontrolador optimizado para instrucciones de procesamiento de señales dsPIC. Debido a la implementación digital de los controladores se discute ampliamente la influencia del tiempo de muestreo y de procesamiento sobre el desempeño y estabilidad del sistema. Se logra estabilización del disco para pequeñas variaciones alrededor de un punto de equilibrio dentro del rango de 3 a 8 cm desde el electroimán. Finalmente, se discuten las consideraciones necesarias para lograr un control dinámico dentro del rango (para posiciones variables) incluyendo estrategias de control no lineal.

Palabras Clave. Levitación magnética, maglev, sensor de distancia IR, sensor de corriente, dsPIC30F4013, PWM, control digital.

Introducción

En el presente trabajo se modela, simula e implementa un sistema de levitación magnética (maglev) con un grado de libertad. La idea básica del sistema es hacer

flotar en el aire (levantar) a un objeto que tiene un imán permanente dentro de él, mediante la fuerza electromagnética generada por un electroimán que se encuentra fijo encima de éste.

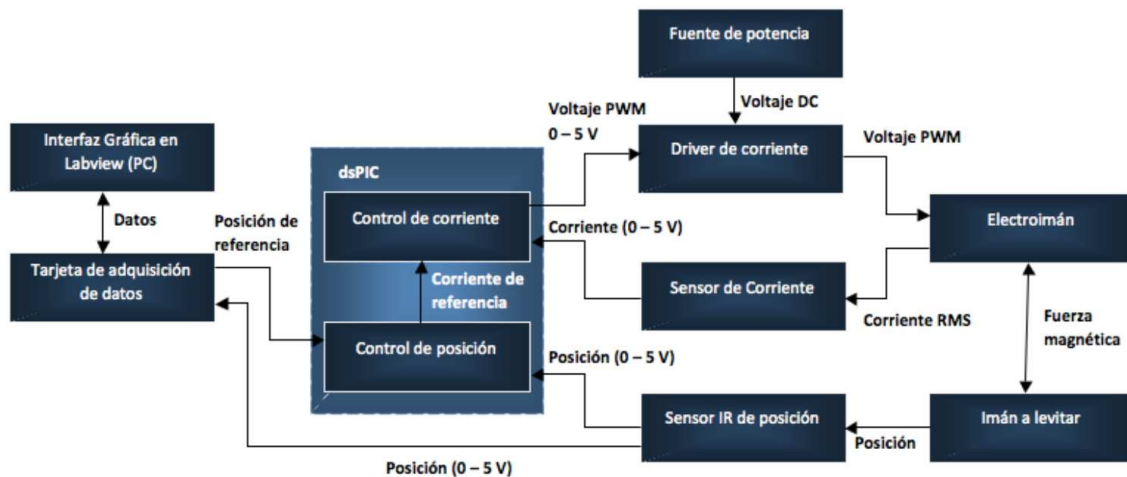


Figura 1: Diagrama general de los elementos del sistema y su interconexión

A diferencia de la mayoría de trabajos anteriores como [1, 2, 3, 4], en los cuales el objeto levita muy cerca del electroimán (normalmente a distancias de medio centímetro y llegando a un máximo de tres centímetros), el sistema descrito en el presente trabajo se diseña para operar en un rango más amplio (hasta una distancia de 10 cm al electroimán).

La planta a controlar es un disco de poliestireno dentro del cual se encuentra un imán permanente que se pretende hacer levitar mediante un electroimán. Al pasar una corriente por el electroimán, se induce un campo magnético en éste, el cual crea una fuerza magnética de atracción entre el disco y el electroimán. Dicha fuerza pretende compensar a la fuerza de gravedad. La fuerza magnética ejercida sobre el imán depende de la corriente que circula por el electroimán. Otros factores que intervienen en la planta incluyen la masa y forma del objeto, la intensidad del campo magnético del imán permanente y la forma del electroimán (la cual determina la distribución del campo magnético generado).

Se utiliza control por realimentación para estabilizar al disco en el aire. El elemento encargado del procesamiento es un microcontrolador optimizado para procesamiento digital de señales dsPIC30F4013. Recibe las señales de los sensores, las procesa y envía señales de control dinámicas a los actuadores con el objetivo de controlar la corriente en la bobina del electroimán y la posición del disco.

Se dispone de un circuito driver de corriente que regula dicha variable. Éste sirve como conexión entre la señal de control que viene del procesador y la parte de potencia del sistema. El valor promedio de la corriente se controla mediante la técnica de PWM (Pulse-Width Modulation). Los sensores son: un sensor de la corriente que circula por la bobina y un sensor de posición del disco a levitar. Son transductores de los valores de corriente y de posición a un voltaje que puede interpretarse por la unidad de procesamiento.

Finalmente, se tiene una interfaz con el usuario para visualizar las variables del sistema y para cambiar la referencia de posición a la que se desea que esté el disco. Para esto se usa una computadora con el software LabView y una tarjeta de adquisición de datos para transformar las señales eléctricas del sistema en valores compatibles con la computadora y viceversa.

Métodología

Modelamiento matemático del sistema

En el presente trabajo se describe un modelo matemático para el sistema, el cual es simplificado, es lineal y modela al sistema adecuadamente sólo para pequeñas oscilaciones alrededor de un punto de equilibrio. Es suficiente para estabilizar al disco en una posición fija.

Existe otro modelo completo, el cual es no lineal y más complejo e incluye más variables del sistema, lo que permite que sea válido para describir al sistema en cualquier punto de operación. Sin embargo, la complejidad de dicho modelo y la necesidad del uso de esquemas de control no lineales fueron razones para no escogerlo en la presente implementación. El modelo completo se describe en [2]. Una variación similar se encuentra en [5] y otra variación para un sistema maglev con dos grados de libertad se describe en [4].

Ecuaciones eléctricas del electroimán

El electroimán está construido por cable de cobre enrollado alrededor de un núcleo de hierro. El cable tiene una resistencia al paso de corriente que depende de su longitud y sección transversal. Además, el cable enrollado como solenoide se comporta como un inductor al generar un campo magnético en su interior.

De éste modo, el modelo eléctrico más simple del electroimán, para caracterizar la respuesta de corriente al

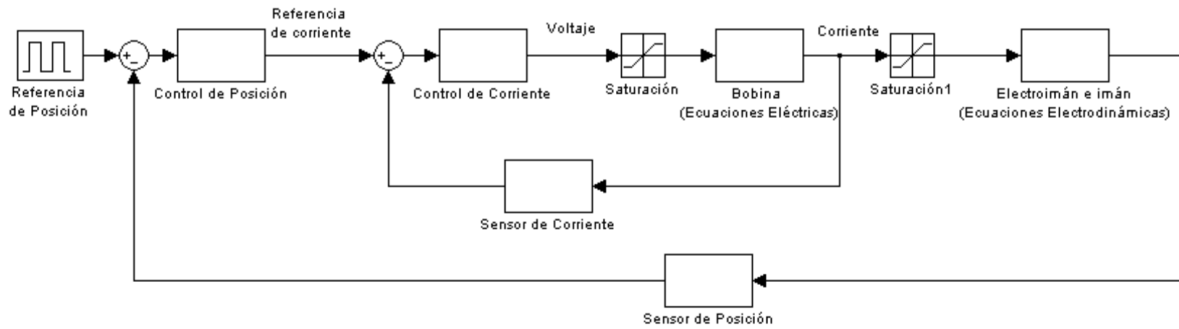


Figura 2: Esquema de control del sistema maglev completo

voltaje aplicado, es un circuito RL, modelado por la ecuación (1) a partir de la cual se obtiene la función de transferencia (2) mediante la transformada de Laplace:

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} \tag{1}$$

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{1}{R + Ls} \tag{2}$$

donde V es el voltaje en la bobina del electroimán, i es la corriente que circula por éste, R es su resistencia y L su inductancia.

Ecuaciones electromagnéticas del sistema

Para caracterizar la fuerza magnética que ejerce el electroimán sobre el imán que levita, se utilizó el siguiente modelo empírico usado también en varios trabajos relacionados como [1] y [5]:

$$f_m = C \frac{i^2}{x^2} \tag{3}$$

donde C es una constante, llamada la constante del electroimán y x es la distancia del electroimán al disco.

La constante C depende de la forma del núcleo del electroimán, del número de vueltas del bobinado del y de la forma e intensidad del campo magnético de los imanes permanentes dentro del disco. Para validar experimentalmente éste modelo empírico, se realizaron mediciones de pares de corriente en el electroimán y posición del disco para los cuales el disco está a punto de elevarse. Es decir, se fija al disco a cierta distancia del electroimán y se aumenta la corriente hasta que el disco esté a punto de elevarse y se repite éste procedimiento para varias posiciones. Éstos valores se conocen como corriente de equilibrio (i_0) y posición de equilibrio (x_0), debido a que son puntos de equilibrio inestable en los cuales la fuerza magnética equipara a la de gravedad debida a la masa del disco.

De los experimentos mencionados se concluye que la constante C en realidad varía con respecto a la corriente de equilibrio (y con respecto a la posición de equilibrio correspondiente). Debido a la variación de C, la ecuación (3) sólo modela adecuadamente a la fuerza magnética para pequeñas variaciones alrededor del punto de equilibrio (x_0, i_0).

Ecuación dinámica y linealización

A partir de una sumatoria de fuerzas del sistema, se obtiene la siguiente ecuación dinámica para el sistema. Se desprecia la fuerza de arrastre viscoso del aire:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = mg - f_m \tag{4}$$

donde m es la masa del disco y g es la aceleración de la gravedad.

Linealizando f_m de la ecuación (3) mediante una aproximación de polinomio de Taylor de primer orden alrededor de un punto de equilibrio (x_0, i_0), reemplazando éste resultado en (4) y aplicando la transformada de Laplace, se obtiene la función de transferencia del sistema linealizado:

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{-\frac{2Ci_0}{mx_0^2}}{s^2 - \frac{2Ci_0}{mx_0^3}} \tag{5}$$

Diseño de controladores y simulación

Como se muestra en la figura 2, se utiliza un lazo para el control de la corriente en el electroimán y otro para el control de la posición del disco.

El control independiente de corriente se realiza para garantizar que la corriente tenga el valor deseado frente a perturbaciones que vienen de efectos como calentamiento en la bobina. Además, el controlador acelera el tiempo de respuesta de la corriente. Se utilizó un controlador discreto lineal para la corriente. En cuanto al control de posición, se utilizó un controlador PID (lineal), el cual logra estabilizar al sistema.

Para medir los efectos del tiempo de muestreo, debido a la implementación discreta de los controladores en el dsPIC, se realizaron simulaciones sin tomar éste tiempo en cuenta y otra en la cual se simula el tiempo de muestreo como un retardo. El efecto de un tiempo de muestreo insuficiente es claro, crea oscilaciones que pueden sacar al sistema de la zona lineal, desestabilizándolo de éste modo.

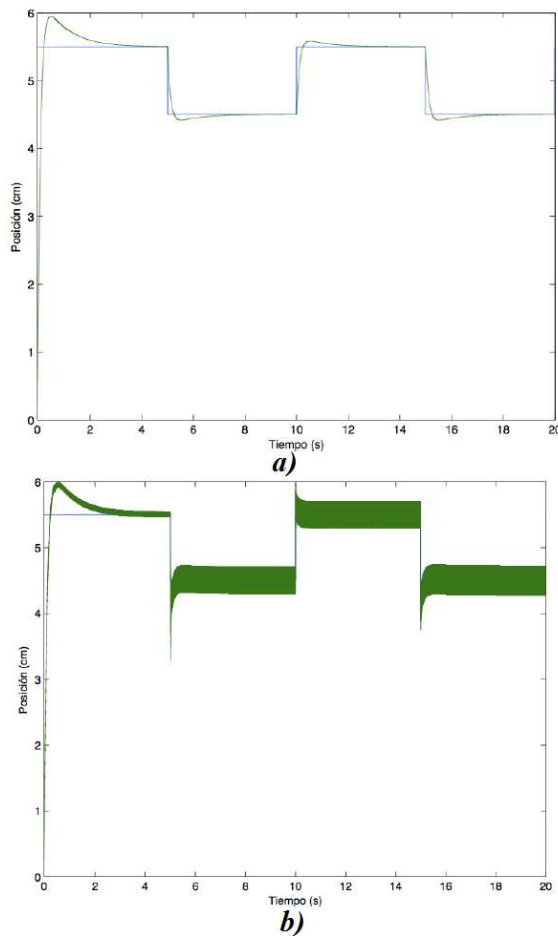


Figura 3: Simulaciones de la planta con controlador PID a) sin retardo (continuo) y b) con retardo (simula controlador discreto)

Implementación

Electroimán: Se utilizó un electroimán con núcleo en forma de T de hierro laminado. El bobinado tiene 630 vueltas de alambre de cobre, una resistencia de 2.8 ohmios y una inductancia de 107.1 mH.

Disco: Se colocaron 3 imanes de neodimio (NIB) en el centro de un disco de poliestireno de 8 cm de diámetro. La masa total es de 22.6 g.

Driver de corriente: Se implementó un circuito driver de corriente basado en un MOSFET de potencia. El circuito básicamente conecta y desconecta la alimentación de potencia a la bobina según la onda PWM que se envía desde el microprocesador. Distintos ciclos de trabajo (anchos de pulso) producen distintos valores de corriente promedio en la bobina, debido a la propiedad pasa bajos de ésta. El driver incluye también un optoacoplador que separa la parte de control de la de potencia, protegiendo a los elementos de circuito.

Sensor de corriente: El sensor implementado permite medir la corriente en la bobina mediante el uso de una resistencia de potencia y un circuito acondicionador de señal.

Sensor de posición: El sensor de posición utilizado consta de un diodo LED infrarrojo emisor y otro receptor. El

diodo emisor emite un haz de luz infrarroja que rebota en el disco y regresa al receptor. La intensidad de luz recibida, y el voltaje de salida correspondiente del sensor, tiene una variación inversamente proporcional a la distancia entre el disco y el sensor.

Procesador: Se implementaron los controladores en un microprocesador optimizado para procesamiento digital de señales (DSP) dsPIC30F4013. Se eligió dicho controlador debido a su alta velocidad de muestreo y procesamiento.

Resultados

Control de corriente

El control lineal de corriente produjo una respuesta satisfactoria en cuanto a reducción del tiempo de respuesta y eliminación del error en estado estable.

Control de posición

Se logró estabilizar la posición del disco alrededor de la posición de equilibrio de 5 cm. Se puede observar un error en estado estable de unos 0.5 cm atribuible principalmente a la no linealidad del sensor de posición. El tiempo de respuesta es de aproximadamente 1.5 segundos. En cuanto al rechazo a perturbaciones, el sistema vuelve a su posición de equilibrio con bastante rapidez si se lo desplaza un máximo aproximado de 0.5 cm de su posición de equilibrio.

Fue necesario usar guías laterales que pasan por agujeros en los bordes del disco para lograr su estabilización. El objetivo de dichas guías es sólo mantener al disco centrado, evitando movimientos laterales, permitiendo el movimiento vertical libre con una fricción mínima. Esto a pesar que el mismo campo magnético jala al imán en el disco a alinearse con el eje central del electroimán. Dicha fricción, aunque muy pequeña, tiene un efecto adicional de amortiguamiento sobre el sistema, lo cual favorece en su estabilización. Sin las guías, el sistema permanece estable por un segundo pero luego oscila con mayor amplitud cada vez hasta caer. Este efecto puede deberse a oscilaciones causadas por un tiempo de muestreo menor al necesario.

Conclusiones y Recomendaciones

Se logró estabilizar con suficiente robustez al sistema para pequeñas variaciones alrededor de un punto de equilibrio representativo mediante control lineal. La consistencia entre las simulaciones y los resultados prácticos demuestra la validez de los modelos obtenidos alrededor de dicho punto de equilibrio. Se logró además estabilizar al sistema en un punto de equilibrio más lejano al electroimán que en la mayoría de trabajos similares. A pesar de que sólo se describieron simulaciones e implementación de un controlador para una posición de equilibrio, el mismo esquema lineal utilizado puede utilizarse para cualquier punto de equilibrio dentro del rango descrito en el trabajo.

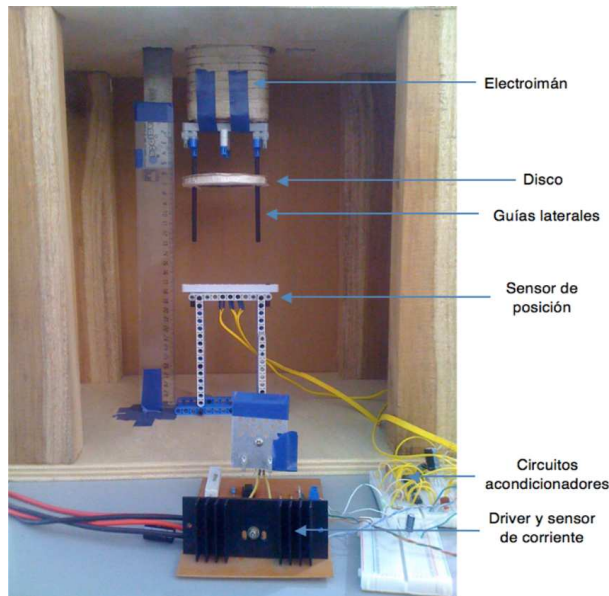


Figura 4: Fotografía del sistema implementado mostrando sus componentes

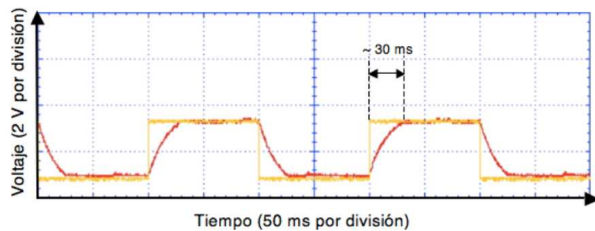


Figura 5: Referencia de corriente de 1 a 2 A y salida del sensor de corriente en la bobina con controlador de corriente

Los resultados también demuestran la versatilidad que ofrece un sistema digital en cuanto a la integración de componentes distintos en un solo sistema. El acondicionamiento de señales de los sensores, conexión de elementos de control y de potencia mediante PWM, la facilidad en la construcción de una interfaz gráfica y la implementación de controladores digitales cuya arquitectura y parámetros se pueden cambiar mediante programación, son evidencias de las ventajas de implementar digitalmente un sistema de control.

No se consiguió implementar en la práctica el objetivo inicial de controlar dinámicamente al sistema maglev en todo su rango, con la posibilidad de seguimiento de trayectorias con un grado de libertad más allá de lograr la estabilización alrededor de una posición fija. Sin embargo, la plataforma física construida y los modelos desarrollados permiten el cumplimiento de ese objetivo. De este modo, se discuten a continuación dificultades que se deben superar y varias posibles estrategias de control para lograrlo.

Importancia del tiempo de muestreo y de procesamiento

El efecto de retardo producido por el muestreo y por la operación de retención de los valores hasta el siguiente

ciclo tiene drásticos efectos contra la estabilización del sistema. De hecho, en comparación con otros problemas de control, maglev es mucho más sensible a dicho efecto y requiere procesamiento y muestreo de alta velocidad.

Es posible reducir en cierta medida la necesidad de una alta velocidad de muestreo y procesamiento mediante el diseño digital directo sobre la planta discretizada, cómo se realizó para el control de corriente, de modo que el controlador se pueda diseñar tomando en cuenta totalmente el efecto del muestreo. El tiempo de muestreo se modela de este modo como un término de la función de transferencia del sistema. Sin embargo, la inestabilidad natural del sistema y el hecho que sea altamente no lineal, hace que incluso con el diseño discreto directo se requiera un procesador con velocidad de muestreo y procesamiento altas.

Es por ello que se escogió al dsPIC, dado que posee un núcleo optimizado para instrucciones de DSP y además tiene facilidades de microcontroladores como conversión analógica digital, PWM, etc. Sin embargo un DSP (Digital Signal Processor) como tal está diseñado específicamente para la tarea y permitiría alcanzar mayores velocidades de ejecución de los lazos de control. Otras opciones son FPGAs, CompactRIO o sistemas Real Time.

Importancia de la precisión y linealidad de los sensores

El sensor de corriente demostró ser lineal y con una precisión suficiente para lograr la estabilización de corriente con tiempos de respuesta suficientemente bajos. El hecho que sea un sensor netamente analógico (antes de la conversión analógico digital en el dsPIC) es también una ventaja, ya que no se pierde precisión por cuantización en el sensor en sí.

El sensor infrarrojo de posición tuvo una respuesta satisfactoriamente precisa. Factores de diseño que apoyan a ello son la forma plana del disco, el hecho que esta hecho de una superficie lisa y blanca (todo lo cual aumenta su reflectividad). Por otro lado, el guiado del disco tiene una influencia positiva sobre la precisión del sensor ya que evita variaciones de la señal por posibles movimientos laterales del disco fuera del eje central o por pandeos del mismo.

Sin embargo, el sensor es no lineal, lo cual introduce dinámicas al sistema que no se modelan y que dificultan su control, teniendo efectos como errores en estado estable, oscilaciones o funcionamiento restringido a un pequeño rango lineal alrededor de un punto de equilibrio.

Un circuito analógico que linealice la respuesta del sensor podría ser una propuesta para este problema. Basar el sensor en otro principio físico es difícil: un sensor ultrasónico requiere un tiempo de procesamiento (mientras se espera la señal de eco) que introduce un retardo considerable al sistema, lo cual puede desestabilizarlo. Un

sensor basado en LEDs y una o un arreglo de fotorresistencias es una opción, pero la interferencia de la luz ambiente es un problema y esta opción es útil sólo para una posición fija.

Una buena opción es un sensor de efecto hall, que mida la posición del disco mediante el campo magnético en cierto punto. Sin embargo, la arquitectura de control debería cambiarse, ya que el sensor también mide el campo generado por el electroimán y éste sería cambiante para control dinámico de posición. La variable de control al usar éste sensor debería ser el campo magnético en sí.

Otros esquemas posibles de control

La aplicación de control no lineal al sistema sería el siguiente paso a seguir con el fin de lograr control dinámico sobre todo el rango de operación del sistema. De éste modo se podría tomar en cuenta un modelo más real del sistema, sin necesidad de aproximaciones lineales y diseñar controladores tomando en cuenta la dinámica no lineal.

El primer esquema de control no lineal es Scheduled Gain Control (control por ganancias tabuladas). Dicho esquema posee diversos modelos linealizados del sistema alrededor de varios puntos de equilibrio con controladores lineales diseñados alrededor de dichos puntos. Dependiendo de la zona en la que se encuentre el disco, se activa un controlador lineal respectivo. Ésta estrategia es interesante ya que implementa control sobre un rango permitiendo la facilidad de diseño de controladores lineales.

Sliding Mode Control (SMC) es otra estrategia posible. Parte de un modelo completo y no lineal del sistema y se basa en principios de control por optimización de errores para el diseño de controladores que establezcan al sistema. Diseño de controladores basados en ésta estrategia y simulaciones para el sistema maglev se describen en [5]. Dichos controladores podrían implementarse en el sistema descrito en ésta tesis.

La desventaja de los esquemas de control no lineal es que normalmente requieren mayor cantidad y mayor complejidad de operaciones matemáticas en los controladores, de modo que requieren un elemento de procesamiento optimizado para ello.

La variedad de elementos integrados en el sistema y de estrategias de control posibles, hacen al sistema maglev desarrollado en la presente tesis una buena plataforma de enseñanza e investigación en materias como Control Automático, Mecatrónica, Sensores e Instrumentación, entre otras.

Modificaciones posibles a la estructura física

El uso de un imán permanente en el disco que levita es la mejor opción para aumentar la fuerza magnética

sobre éste y así aumentar el rango de operación del sistema con la misma corriente que se necesitaría para elementos ferromagnéticos, como una esfera de acero por ejemplo.

Sin embargo, se puede realizar el sistema maglev utilizando una placa de material ferromagnético con la misma área que la del electroimán y hacerlo levitar a una pequeña distancia de éste. Incluso se puede tener un núcleo en forma de E acostado, con el bobinado en el eje central y teniendo a los otros dos ejes laterales como camino para el campo magnético. Ésta implementación facilita el modelado y control del sistema, ya que se puede tratar como un circuito magnético con un pequeño air gap. El sistema es más fácil de controlar con robustez, tiene la capacidad de levitar un mayor peso y rechaza perturbaciones mayores. Sin embargo, funciona en un rango pequeño de distancia entre el electroimán y el objeto que levita.

Otra posible extensión del sistema maglev es la adición de uno o dos grados de libertad mediante la adición de electroimanes para control de posición lateral. Sin embargo, el sistema presenta retos en la ubicación de los sensores y la influencia mutua entre los campos magnéticos de los varios bobinados. Una posible implementación de dicho sistema se describe en [4].

Referencias

- [1] Li, J.H. 2005. "DSP-based Control of a PWM-driven Magnetic Levitation System." *IEEE ICSS2005 International Conference on Systems and Signals*. 483-487.
- [2] Yang, Z.; Gerulf, K.; Pedersen, M.; Jorgen H.P. 2008. "Model-based Control of a Nonlinear One Dimensional Magnetic Levitation with a Permanent-Magnet Object." *Arreguin, Juan Manuel Ramos. Automation and Robotics. InTech*. 359-374.
- [3] Guillermo, E.; Larriva, J.; Trelles, J. 2003. "Control de un levitador magnético." *Cuenca*.
- [4] Thijssen, M. 1996. "A 2-dimensional Magnetic Levitation-System." Master of Science Thesis. Eindhoven University of Technology.
- [5] Al-Muthairi, N.F. and Zribi, M. 2004. "Sliding Mode Control of a Magnetic Levitation System." *Mathematical Problems in Engineering* (93-107).