

# SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA DE EJES ROTANTES PARA MEDICIÓN DE DESBALANCES

Peretti Gaston<sup>1</sup>, Gallina Sergio Hilario<sup>2</sup>, Felissia Sergio Francisco<sup>1</sup>, Lurgo Gerardo<sup>1</sup>, Depetris Leonardo<sup>1</sup>, Pipino Hugo<sup>1</sup>

- 1) Departamento de Electrónica de Facultad Regional San Francisco de la Universidad Tecnológica Nacional
- 2) Departamento de Electrónica Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Catamarca

Av. De la Universidad 50- San Francisco (Pcia de Córdoba) – CP (2400)

Tel.: 03564-421147 / e-mails: [gastonperetti@gmail.com](mailto:gastonperetti@gmail.com)

## Resumen

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

El presente trabajo consiste en desarrollar un sistema de medición de desbalances a través de un eje rotante levitado magnéticamente.

**Palabras clave:** Levitación magnética - Ejes rotantes - Control – Medición de desbalances

## Contexto

La investigación está inserta dentro de la línea de control y procesamiento de señales en tiempo real. El desarrollo del proyecto de investigación titulado *sistema de levitación magnética de ejes rotantes para medición de desbalances*, se lleva a cabo en el ámbito del Departamento de Electrónica de la Facultad Regional San Francisco en conjunto con el Departamento de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Catamarca.

La Institución que acredita el proyecto de Investigación y desarrollo (PID) es Rectorado de la Universidad Tecnológica Nacional mediante la financiación del mismo con fecha Marzo del 2014.

## Introducción

El principal interés para la utilización de la levitación magnética en ingeniería aplicada radica en que son sistemas sin contacto, por lo que no requieren lubricantes, y su costo de mantenimiento es muy bajo. Esta falta de contacto físico y la nula necesidad de lubricantes hace de esta tecnología, ideal para trabajar en entornos industriales en donde son necesarias atmósferas libres de polución, como por ejemplo la levitación de objetos en túneles de viento o la levitación en mesas antivibración en fabricantes de semiconductores [4]. Por otra parte, la falta de contacto también permite evitar todos los problemas derivados de éste mismo como el desgaste y el calentamiento. Esta cualidad hace que la levitación magnética sea ideal para su utilización en cojinetes magnéticos, turbinas en molinos de viento [6] y trenes que logran alcanzar velocidades de hasta 580km/h [4]. Pero también existen otras aplicaciones de gran importancia, aunque menos conocidas, como es el caso de los dispositivos de asistencia ventricular, que logran hacer fluir sangre sin aumentar la temperatura y por lo tanto sin modificar sus propiedades [13].

En el ámbito de la investigación existen gran variedad de trabajos relacionados con el control de levitadores

magnéticos. Gran parte de estos trabajos comprueban sus resultados mediante simulación y otros utilizan resultados experimentales o ambos. Se aplican en ellos diferentes técnicas de control, desde control clásico [4,8] hasta control lineal robusto [14], pasando por control lineal adaptativo [11], control por ganancia programada, control difuso [8], control mediante linealización por realimentación [6,7], o control en modo deslizante [1,4,9,16]. La mayor parte de estos trabajos explican las propiedades y ventajas del controlador bajo estudio realizando una comparación exclusivamente con un microcontrolador, pero no existe una comparativa entre un abanico mayor de microcontroladores, ni tampoco con una aplicación específica como lo indica el objetivo del proyecto que es su utilización en una aplicación particular como la medición de desbalances de piezas sometidas a rotación bajo levitación magnética.

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 rozamiento casi nulo, bajo distintas configuraciones de sensores y junto a una estrategia de control adecuada para este tipo de modelos.

En particular, 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.

La levitación magnética y en particular los cojinetes magnéticos activos, ocupan una línea de investigación en desarrollo tanto en el ámbito académico como en la industria, debido a las ventajas que proporcionan, en especial, por la ausencia de rozamiento. Sin embargo, los cojinetes magnéticos, tienen alguna desventaja como el hecho de ser inestables. Esto provoca que el diseño de un controlador sea estrictamente necesario y que la consecución de un comportamiento apropiado del sistema puede ser complicado, en función de la aplicación concreta que se considere. Adicionalmente, los actuadores y el método de sensado de la posición requieren de un cuidadoso diseño y de una adecuada selección de componentes.

La secuencia de actividades a realizar, prevén primeramente, la implementación de dos prototipos experimentales flexibles, donde se puedan montar distintos actuadores y sensores. Uno de los prototipos se realizará para un eje posicionado horizontalmente y

otro con un eje posicionado verticalmente. Posteriormente, para cada uno de los casos, se obtendrá un modelo de la dinámica de sustentación del eje, que se ampliará, en un segundo paso, a un modelo que incluya la dinámica inducida por la rotación del mismo. En base al modelo se adoptará una estrategia de control eficiente, que será luego implementada experimentalmente mediante un controlador digital. En el ámbito docente de Ingeniería de control, los sistemas de levitación magnética tienen un especial interés para la realización de laboratorios y demostraciones en clase. En primer lugar porque permite profundizar en las bases teóricas de una forma más motivante para los alumnos y en segundo lugar porque permite a los estudiantes enfrentarse a problemas reales de control, acortando de esta manera la distancia entre los conocimientos teóricos y los conocimientos reales. La propuesta de estos experimentos asociados a estos dos prototipos en el estudio del grado, como posgrado es el segundo objetivo de este proyecto.

Más allá que el trabajo plantea como objetivo primario, la construcción de dos prototipos que permitan de forma flexible, realizar ensayos de controladores experimentales, para gobernar magnéticamente la posición de un eje dentro de un sistema rotante haciendo las veces de cojinete magnético; nuestro interés radica en realizar pruebas enfocandonos en la medición de la perturbación debida al desbalance del eje. A través de esta posibilidad, nosotros proponemos aplicar este tipo de dispositivo en máquinas que deben realizar la medición y compensación del desbalance de piezas rotantes, como por ejemplo la medición de desbalances en rotores de motores de jaula de ardilla. La posibilidad de obtener una señal representativa de esta perturbación y el posterior procesamiento mediante técnicas de Procesamiento Digital de Señales, permitiría mejorar las características de funcionamiento de este tipo de equipos mencionados.

Por otra parte, los cojinetes magnéticos son un área de aplicación que se ha desarrollado ampliamente en el mundo, pero para usos muy específicos donde se requiere de mínimo o nulo rozamiento (compresores, turbinas, generadores eólicos, etc), de manera que, es claro el impacto que puede tener este proyecto para el ámbito industrial, principal receptor de los egresados de la carreras que se dictan en nuestra Facultad Regional. Además, el hecho de disponer de 2 bancos

de pruebas el sistema permitiría disponer de dispositivos y casos reales para realizar investigación y docencia sobre controladores y diferentes metodologías avanzadas en control. Esto significaría un impulso importantísimo para entusiasmar académicamente al estudiante avanzado en el área de sistemas de Control.

## Línea de Investigación y Desarrollo

Nuestro proyecto consta de los siguientes ejes:

1. Diseñar y construir un prototipo horizontal y vertical, donde se puedan montar los actuadores y sensores para la experimentación.
2. Obtención del modelo de la dinámica de la sustentación y rotación del eje para ambos prototipos.
3. Desarrollo del hardware y software para detectar la señal de desbalance y con ello el desbalance de la pieza rotante.
4. Implementar la aplicación desarrollada sobre una máquina de medición de desbalances de motores de jaula de ardilla.

## Resultados y objetivos

### OBJETIVO GENERAL:

- Diseñar y construir un sistema de control electrónico capaz de medir desbalances en un sistema de ejes rotantes con cojinetes magnéticos, para ser aplicado luego a una máquina de balanceo de rotores de motores de jaula de ardilla, que no sólo sea un avance tecnológico interesante para la industria en general, sino también que el sistema a través del uso de los prototipos en los laboratorios permita superar día a día la enseñanza de la ingeniería en nuestra universidad tecnológica.

**OBJETIVOS ESPECÍFICOS:** Diseñar y construir un sistema de control electrónico capaz de medir desbalances en un sistema de ejes rotantes con cojinetes magnéticos con los siguientes aspectos:

- Diseñar y construir un prototipo horizontal flexible, donde se puedan montar distintos actuadores y sensores para la experimentación y tratamiento de señales.

- Diseñar y construir un prototipo vertical flexible, donde se puedan montar distintos actuadores y sensores para la experimentación y tratamiento de señales.

- Obtener un modelo de la dinámica de sustentación del eje para ambos casos.

- Obtener un modelo que incluya la dinámica inducida por la rotación del eje para ambos prototipos (horizontal y vertical).

- Establecer la estrategia de control adecuada en función de los modelos obtenidos anteriores.

- Realizar ensayos y pruebas sobre el tipo de control elegido, en ambos prototipos.

- Detectar la señal de desbalance y con ello el desbalance de la pieza rotante.

- Evaluar precisión, repetición y grado de confiabilidad del sistema de medición.

- Implementar la aplicación desarrollada sobre una máquina de medición de desbalances de motores de jaula de ardilla.

- Evaluar confiabilidad y precisión del conjunto en general.

- Informar y capacitar a la industria sobre las distintas aplicaciones que se podrían desarrollar en un futuro cercano, utilizando los conocimientos adquiridos sobre el sistema desarrollado.

- Exposición de ensayos, pruebas y resultados en congresos.

Se desea que la propuesta de diseño de este sistema sea un primer paso para generar lineamientos sobre distintas metodologías de control de un eje levitado magnéticamente.

**RESULTADOS:** considerando que el proyecto se encuentra en su fase inicial, los resultados que se esperan, se pueden resumir como:

- ✓ Concretar la experimentación y desarrollo del sistema de medición de desbalances, a través de un eje levitado magnéticamente.

- ✓ Evaluar precisión y confiabilidad del sistema.

- ✓ Implementar la aplicación desarrollada sobre una máquina de medición de desbalances de motores de jaula de ardilla.
- ✓ Exposición de ensayos, pruebas y resultados en congresos
- ✓ Planificar clases prácticas en asignaturas y cursos relacionados con sistemas de control y la automatización en general a fin de complementar la enseñanza en las carreras de grado de Ingeniería Electrónica e Informática.
- ✓ Realizar transferencia de tecnología a empresas del sector, desde los mismos grupos de investigación en distintas regiones (centro a través de la UTN San Francisco- Córdoba y norte del país a través de la UNCa).

## Formación de Recursos Humanos

El director del proyecto, Mg. Esp. Ing. Peretti Gastón Carlos realizó la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, mención Telecomunicaciones en la Universidad Nacional de Córdoba. En la actualidad es docente de la carrera de Ing. Electrónica de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Francisco, en la cátedra de Dispositivos Electrónicos y posee publicaciones en congresos y libros referidas a las líneas de investigación sistemas de control y comunicaciones. El Codirector del proyecto, Ing. Sergio H. Gallina ha cursado los módulos correspondientes a la Maestría en Ingeniería de software y a la especialidad en Gestión Estratégica de los Servicios de Telecomunicaciones, actualmente trabaja en la tesis de la especialización manteniendo una estrecha relación con otras instituciones tales como el Dpto. Electrónica de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Córdoba y el Dpto. Electrónica de la UTN Facultad Regional San Francisco. El Ing. Felissia Sergio, se encuentra actualmente cursando la Maestría en Sistemas de Control aplicado en la UTN Facultad Regional Paraná y es docente de la misma universidad en las cátedras de de Informática I, Sistemas de Control Aplicado y Control de Procesos. El grupo de investigación también está conformado por alumnos avanzados de la carrera Ingeniería Electrónica de la Facultad Regional San Francisco y la Universidad Nacional de Catamarca.

Respecto al potencial humano que conforma el grupo de trabajo, está formado por docentes y alumnos de la Universidad Nacional de Catamarca y Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Francisco (Pcia. de Córdoba). Además se propone interactuar con grupos de trabajo en el área de otras universidades, principalmente con el Laboratorio de Investigación Matemática Aplicada a Control de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (LIMAC-FCEFyN de la UNCa).

## Referencias

- [1] 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, pp 326-329.
- [2] Barie W., (1996), Linear and nonlinear state-space controllers for magnetic levitation, Int. Journal of Systems Science, 27(11), pp 1153-1163.
- [3] Chen, C.-T., (1993), Analog and Digital Control System Design. Transfer Function, State-Space, and Algebraic Methods, Saunders College Publishing.
- [4] Dan C. et al., (1993), Sliding Mode and Classical Control for Magnetic Levitation System, IEEE Control Systems.
- [5] DeCarlo R.A et al., (1988), Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A tutorial, Proc. of the IEEE, 76(3), pp 212-232.
- [6] El Hajjaji A., (2001), Modeling and Nonlinear Control of Magnetic Levitation Systems, IEEE Trans. On Industrial Electronics, 48(4), pp 831-838.
- [7] Filho M.R. et al., (2001), A Design Methodology of Tracking Controllers for Magnetic Levitation Systems, IEEE Int. Conf. on Control and Applications, pp 47-51.
- [8] Golob M., (2003), Modeling and control of the magnetic suspension system, ISA Transactions, 42, pp89-100.
- [9] Jalili-Kharaajo M. et al., (2003), Sliding mode control of voltage-controlled magnetic levitation system, IEEE.
- [10] Munaro C.J. et al., (2002), Modeling and Observed-Based Nonlinear Control for a Magnetic Levitation System, IEEE Int. Conf. on Control Applications.
- [11] Palis S., (2007), Nonlinear adaptive control of magnetic bearings, IEEE.
- [12] Ogata K., (1997), Modern Control Engineering, 3a ed., Prentice Hall.

[13] Samiappan C. et al., (2008), Maglev Apparatus for Power Minimization and Control of Artificial Hearts, IEEE Trans. on Control Systems Tech., 16(1), pp 13-18.

[14] Shen J-C, (2002), H $\infty$  Control and Sliding Mode Control of Magnetic Levitation System, Asian Journal of Control, 4(3), pp 333-340.

[15] Slotine, J.-J. E., W. Li, (1991), Applied Nonlinear Control, Prentice Hall.

[16] 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.

[17] Utkin V., (1996), Integral Sliding Mode in Systems Operating under Uncertainty Conditions, Proc. Of the 35th conf. on Decision and Control, pp 4591-4596.

[18] Xinghuo Y., (2009), Sliding-Mode Control With Soft Computing: A Survey, IEEE Trans. on Ind. Elec.,56(9), pp 3275-3285.