

# Sistema de Medición con DSP Aplicado a un Prototipo de Ejes Levitantes

Mg. Ing. Gastón Peretti, Ing. Emanuel Bernardi, Ing. Leonardo Depetris, Ing. Hugo Pipino, Ing. Mayco Cervetto, Leonardo Anchino, Andrés Torti.

Grupo de Investigación y Desarrollo Electrónico - Departamento de Ingeniería Electrónica  
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Francisco  
San Francisco, Córdoba, Argentina

gastonperetti@gmail.com, bernardiemanuel@gmail.com, leodepetris@gmail.com, hugopipino@gmail.com, maycocervetto@gmail.com, anchinoleonardo@gmail.com, torti.max@gmail.com

## Resumen —

Este proyecto se deriva como una etapa fundamental de un proyecto más amplio que involucra el desarrollo de un sistema activo de cojinete magnético. Puntualmente, se enfoca en el estudio del elemento de sensado a utilizar y de los pasos requeridos para el acondicionamiento de señal. El estudio realizado involucra un análisis a priori de las condiciones que serán impuestas por el proyecto global de levitación magnética, teniendo como punto de partida la precisión y velocidad a la que debe responder el circuito de sensado, para poder realizar un control efectivo.

Como dispositivo sensor se emplean inductancias, que respondan a las variaciones de posición de un material ferromagnético. La unidad de cálculo utiliza un DSP para generar una onda de referencia y para interpretar los datos de medición, con una serie de sub circuitos encargados de adaptar la señal. Luego de realizar las pruebas pertinentes, se concluye de manera favorable, siendo necesario realizar una contrastación rigurosa para verificar la linealidad de la respuesta del dispositivo desarrollado.

**Palabras clave:** sensores inductivos, red R2R, filtros digitales, amplificadores de señal.

## I. INTRODUCCIÓN

La levitación magnética consiste en mantener un objeto suspendido en el aire sin ningún tipo de contacto mecánico. En el caso de levitación magnética, la fuerza que permite esta suspensión es la fuerza electromagnética generada por un electroimán que mediante atracción permite mantener en suspensión un objeto ferromagnético [1]. Este proceso es por naturaleza inestable y no lineal, por lo cual se hace indispensable la utilización de un control de lazo cerrado para mantener la levitación.

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 no necesidad de lubricantes hace de esta tecnología la ideal para trabajar en

entornos industriales en que son necesarias atmósferas libres de polución, algunos ejemplos de su utilización serían la levitación de objetos en túneles de viento o la levitación en mesas antivibración en fabricantes de semiconductores [2]. Además, la falta de contacto también permite evitar el rozamiento y todos los problemas derivados de este (desgaste, calentamiento). Esta cualidad hace que la levitación magnética sea ideal para su utilización en cojinetes magnéticos y formando parte de turbinas en molinos de viento [3].

En sistemas activos de cojinete magnético (AMB), aplicación en la que se enfoca el proyecto, la línea de equilibrio del rotor siempre se encuentra en el centro del estator. El espacio de aire entre el rotor y el estator en sistemas de este tipo es sumamente pequeño, normalmente menor que 0,5 mm. En estas aplicaciones los sensores de desplazamiento son una parte muy importante y deben ser capaces de realizar rápidas y precisas mediciones sobre una superficie giratoria, como es el caso del rotor, para saber si se encuentra o no fuera de este eje.

Las buenas cualidades de los sistemas de control dependen en gran medida de la calidad de señal que posee el sensor, por ello que durante el desarrollo del prototipo se analizó detalladamente que sensor utilizar, considerando dos tipos de sensores muy comunes en estos dispositivos: los sensores capacitivos y de corrientes parásitas o de Foucault.

Como se sabe, la capacitancia es directamente proporcional al área de superficie de los objetos y la constante dieléctrica del material entre ellos, e inversamente proporcional a la distancia que los separa, en materiales conductores al ser menor la distancia entre la sonda y el objetivo, la capacitancia aumenta y viceversa. En los sensores de corriente inducida o de Foucault se utilizan campos magnéticos para detectar la distancia al objetivo. Cuando este campo magnético alterno interactúa con un objetivo conductor induce una corriente parásita en él. Esta corriente inducida produce su propio campo magnético que se opone al campo de detección. Esto último provoca que la impedancia de la bobina sensora cambie. La cantidad de cambio de esta impedancia depende de la distancia entre el objetivo y la bobina de detección en la sonda.

## II. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Los sensores “sin contacto” tanto capacitivos como de corriente de Foucault, contienen tecnologías diferentes, cada una de ellas con sus ventajas y desventajas. Si se comparan estos puntos fuertes y débiles correctamente se puede elegir el más adecuado para cada aplicación.

Tabla 1: Tabla comparativa entre sensores capacitivos e inductivos [4].

Factor	Capacitiva	Eddy-actual
Entornos sucios	No Apto	Muy Apto
Objetivos pequeños	Muy Apto	Apto
Alcance	Apto	Muy Apto
Materiales delgados	Muy Apto	Apto
Versatilidad de materiales	Muy Apto	Apto
Múltiples sondas	Muy Apto	Apto
Fácil montaje sonda	Muy Apto	Apto
Resolución	Muy Apto	Apto
Ancho de banda	Apto	Muy Apto
Costo	Apto	Muy Apto

Los sensores capacitivos y de corrientes parásitas responden de manera diferente para los distintos materiales de los objetivos. La intensidad de las corrientes parásitas y por ende el campo magnético resultante depende de la permeabilidad y resistividad del material de manera muy significativa. Es por esto que estos sensores deben ser obligatoriamente calibrados con el mismo material que el del objetivo y nunca debe cambiarse la naturaleza de dicho objetivo sin la debida recalibración.

Otro aspecto tenido en cuenta en la elección es el rango de temperatura de funcionamiento. Los sensores inductivos tienen un rango de  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por otro lado, las sondas capacitivas se ven afectadas por la condensación y solo operan de  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Debido a que por el momento se utilizarán a temperatura ambiente, ambos tipos son de utilidad.

Por otro lado, no es conveniente utilizar sensores inductivos en casos donde se lleve a cabo la rotación de un material magnético ya que las corrientes parásitas penetran en el material, el cual en caso de que el mismo no sea uniforme generará perturbaciones, desembocando por lo tanto en errores en la medición. La única forma de emplearlos en estos casos es que dichos errores sean aceptables en la aplicación.

Si bien lo anterior inclinaría la balanza hacia la utilización de sensores capacitivos se tiene que no son recomendables en ambientes con alto grado de suciedad, como son los industriales. Además, puede suponerse que al utilizar sensores inductivos el error producido por falta de uniformidad sea mínimo ya que en el prototipo se emplea un eje pulido de buena calidad. Debido a lo expuesto y por motivos de disponibilidad se opta por estos últimos.

## III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

El sistema completo al cual se aplica el prototipo a desarrollar funcionaría en un lazo cerrado, encontrándose (de manera ideal) el eje situado en el centro de un espacio confinado por 2 bobinados estatores, uno en cada extremo del eje; existiendo sobre el eje dos fuerzas que actúan: la gravitatoria (que haría caer el eje) y la fuerza magnética que actúa para compensar la anterior, tratando de mantener al eje en el centro. La imagen de la Fig. 1 muestra lo explicado:

Además de los sensores inductivos, se opta como dispositivo inteligente un “Procesador de Señales Digitales”, o por sus siglas en inglés “DSP”. Además de esto hizo falta el diseño y construcción de numerosas etapas intermedias. La interconexión entre ellas se diagrama en la Fig. 2.

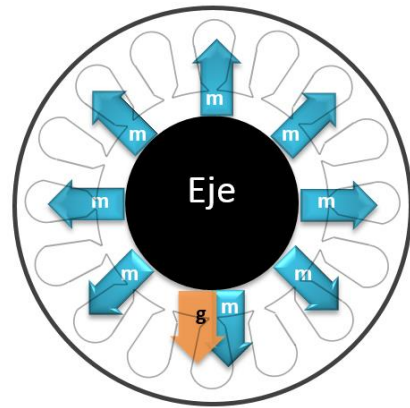


Fig. 1. Diagrama de fuerzas que intervienen en el sistema.

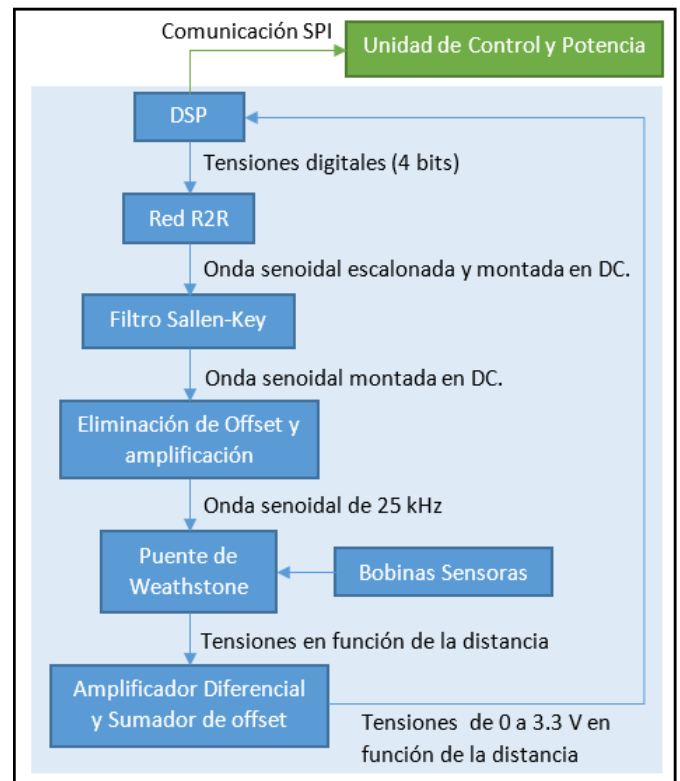


Fig. 2. Diagrama en bloques del sistema de medición.

A continuación se detallan las diferentes etapas del circuito de sensado:

**Red R2R de 4 bits (generación de onda seno de referencia):** dado que en un sensor del tipo inductivo es necesario que la bobina de sensado reciba una señal de corriente alterna. Para generar dicha señal se emplean cuatro puertos digitales del DSP y son aplicados a una red de resistencias R2R. Esta red, al recibir las tensiones digitales correctamente, es capaz de convertir dichos pulsos en una señal analógica alterna similar a una senoidal, aunque con un notable escalonamiento. Se podría decir entonces que este divisor resistivo no es más que un conversor digital-analógico con cuatro bits de resolución. Este bloque se esquematiza en la Fig. 3.

**Filtro Sallen-Key (Fc = 50 KHz):** para poder obtener una señal alterna sinusoidal pura se emplea un filtro activo del tipo Sallen-Key (Fig. 4), el cual es capaz de eliminar todas aquellas frecuencias mayores a la fundamental [5]. En otras palabras, dado a que el efecto de escalonamiento es producido por componentes de mayores frecuencias que los 25 KHz, tras filtrar todas aquellas componentes mayores a dos veces ella (razón por la cual en este caso la frecuencia de corte es 50 KHz), se obtiene una salida senoidal de 25 KHz, aproximadamente estable.

**Eliminación de offset y control de ganancia:** es necesaria la inclusión de una etapa capaz de quitar la componente de corriente continua que se superponga a la señal de interés y además brindar un control de la ganancia de la misma. En otras palabras, esta etapa es un amplificador de señal alterna cuyo nivel de amplificación es regulable mediante un preset. Su utilidad radica en que permitirá calibrar la respuesta de cada una de las bobinas en sus ejes de acción para distintas distancias con el objetivo, haciéndolas más o menos sensibles a cuerpos ferromagnéticos cercanos a las mismas. Por otro lado, este bloque amplifica únicamente voltajes alternos: aunque la señal de entrada se encuentre afectada por una tensión continua, dicha distorsión no se encontrará a la salida. Esto es necesario también para protección de las bobinas sensoras que requieren únicamente de una señal alterna para operar. El circuito completo para dicha etapa se observa en la Fig. 5.

**Cabeza sensora diferencial (Puente de Wheatstone):** a priori se definió que el sistema debía cumplir con algunos requisitos, los cuales son:

- Distancia máxima de sensado de 10 mm
- Resolución mínima de 50 μm
- Sensores de tamaño reducido y fácil montaje
- Salida lineal

Tras investigar, en el mercado se comercializan sensores inductivos lineales de desplazamiento desde 0,25 mm hasta 15 mm aproximadamente, diseñados para trabajar en ambientes industriales con resoluciones que van desde los 0,02 % hasta 0,002 %. Se tiene la dificultad que dichos sensores no se encuentran en el país y su costo en el exterior es sumamente elevado, por lo que se decidió diseñar e implementar un sensor utilizando los recursos disponibles.

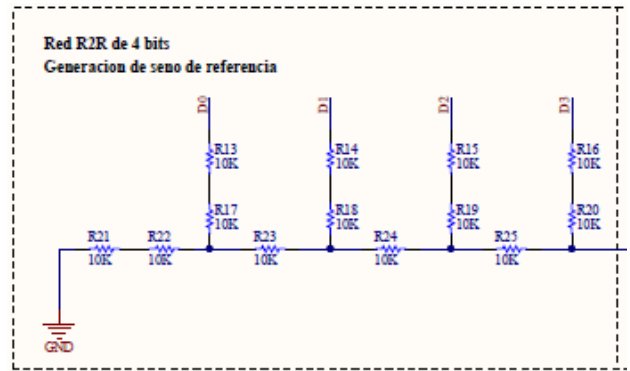


Fig. 3. Circuito Red R2R – Generación de onda seno de referencia.

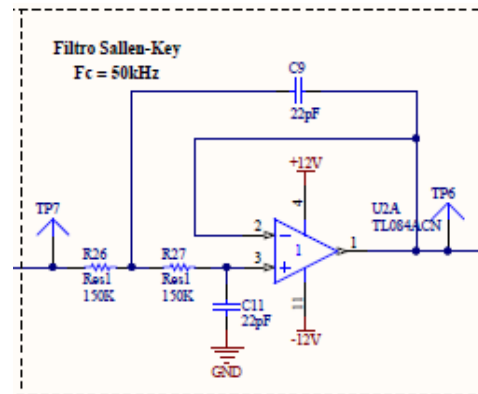


Fig. 4. Filtro Digital Sallen-Key.

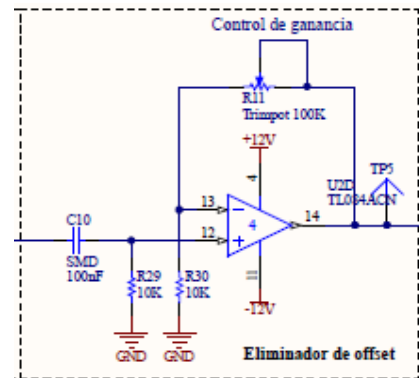


Fig. 5. Circuito Control de Ganancia y eliminación de Offset.

El diseño del sensor inductivo se basa en colocar dos bobinas en un puente de Wheatstone junto a dos resistencias variables (Fig. 6). Al utilizar este sistema las bobinas sensoras trabajan de forma diferencial por lo que deben colocarse enfrentadas una a otra. Se puede obtener una expresión para la amplitud del voltaje de salida  $V_1$  del puente, la cual es:

$$V_1 = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{r_1 + j\omega_0 L_1}{r_1 + j\omega_0 L_1 + r_2 + j\omega_0 L_2} \right) v_0$$

Hay que aclarar que para poder obtener lecturas de tensión correctas primero hay que realizar una calibración del mismo.

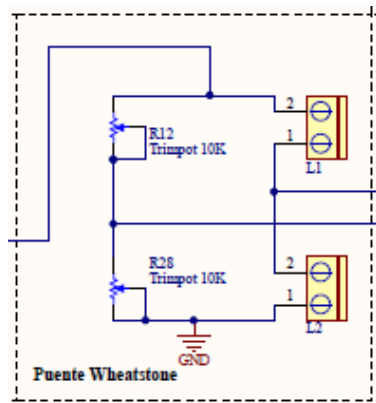


Fig. 6. Circuito Puente de Weathstone.

Para esto es necesario en primera instancia que ambas bobinas posean inductancias de valores lo más cercanos posible. Luego se ajustan ambos preset, para que cuando no haya un objeto ferromagnético cerca la salida sea cero o lo más próxima a éste.

Todo sensor inductivo entrega a su salida una tensión que varía tanto en amplitud (se concluye de la expresión anterior) como también en fase. En este caso la amplitud medida serviría como indicador para saber qué tan cerca se encuentra de una de las bobinas y la fase indica hacia qué bobina es el acercamiento.

**Amplificador diferencial unitario y sumador de offset:** la variación de la tensión de salida es muy pequeña dada la alta resolución que se requiere (50  $\mu\text{m}$ ). Debido a esto la lectura es muy susceptible al ruido eléctrico, por lo que es indispensable emplear una etapa más de amplificación, la cual permite distinguir la variación que se quiere medir del ruido. En otras palabras, este bloque es capaz de rechazar completamente todo agente externo y solo observar la señal de interés, producto del movimiento del rotor en el campo de la bobina. Por otro lado se ha diseñado este bloque de tal manera que se pueda superponer a dicha señal de salida una tensión de continua, también llamado nivel de offset, para así eliminar voltajes negativos. El esquema de circuito se puede ver en la Fig. 7. La necesidad de esto se ha manifestado debido a que luego de este proceso se debe ingresar a la unidad inteligente, un “DSP” de la familia microchip, el cual no acepta voltajes negativos en sus pines. De esta manera, gracias al ajuste de ganancia de la Fig. 5 y el control de offset de este bloque, se puede realizar una calibración para que la señal varíe entre 0 V y 3,3 V, teniendo en este caso la máxima resolución permitida en el procesador digital de señales.

**Unidad inteligente DSP:** se utiliza el dsPIC33FJ128GP802-I/SP de la firma microchip (Fig. 8), cuyas principales características se detallan en su hoja de datos [6]. Este dispositivo realiza la función de muestrear digitalmente la señal proveniente de la etapa anterior con una resolución de 12 bits. Es por esto que dicho voltaje de señal es aplicado entonces a una de sus entradas analógicas, la cual se encuentra configurada como un “ADC” o conversor analógico-digital.

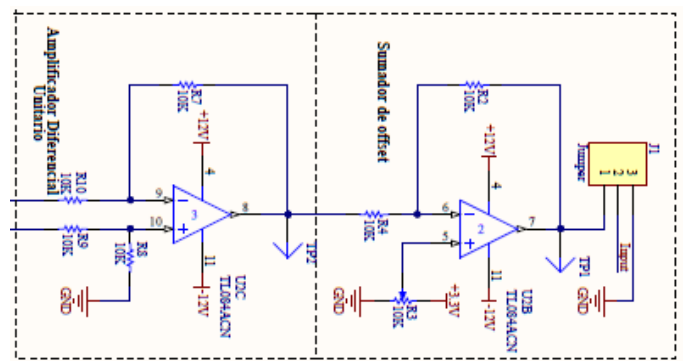


Fig. 7. Amplificador Diferencial Unitario y Sumador de Offset.

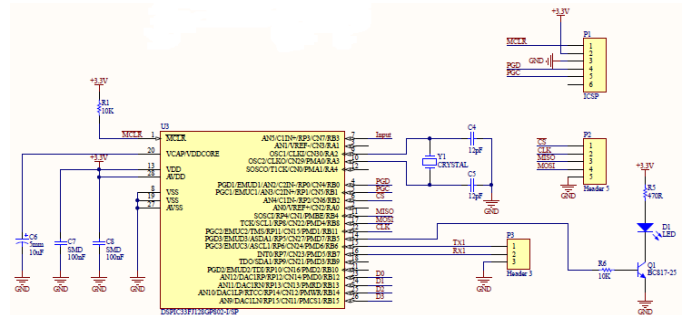


Fig. 8. Unidad Inteligente DSP.

Por otro lado este dispositivo es capaz de emular, gracias al software que posee almacenado en su memoria flash, a un “Lock-In Amplifier”. Este tipo especial de amplificador entrega a la salida dos valores, por un lado la magnitud de la señal analizada (indica la cercanía con uno de los bobinados) y por otro lado la fase de la misma (identifica de qué bobina se trata). Este dispositivo es el mismo que el empleado para generar una salida digital senoidal de cuatro bits de resolución, que es aplicada a la red R2R [7] [8].

Se han implementado además todos los componentes necesarios para el correcto funcionamiento del mismo. Entre ellos se encuentra el conjunto de cristal y capacitores correspondientes al oscilador, la resistencia que mantiene a nivel alto el pin MCLR, capacitores de filtrado en la alimentación y pines de programación.

Por último, este bloque se comunicará al resto del prototipo con la sección de control y potencia empleando una interfaz SPI.

**Alimentación:** de manera obvia, existe una etapa que energiza todas las etapas anteriores a su nivel de tensión correspondiente, incluyendo el bloque de regulación que es usado para conseguir los 3,3 V demandados por el DSP.

Una vez definidas todas las etapas y determinados todos los componentes que las integran, se procede al diseño del circuito PCB, integrando cada una de ellas, tal como se observa en la Fig. 9.

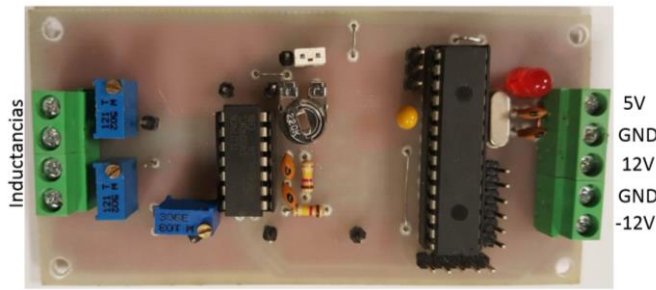


Fig. 9. PCB del circuito de medición.

#### IV. MEDICIONES Y RESULTADOS

Dado que cada etapa estudiada previamente cuenta con un pin de acceso, es posible ver cada una de las señales presentes en ellas y así calibrar el circuito o detectar posibles fallas.

Cada una de las pruebas se realizaron utilizando un osciloscopio “OWON SDS 5052E” conectado a una PC. En la Fig. 10 se presenta la onda de salida luego de aplicarse a la red R2R y del filtro Sallen-Key, en ella se observa una onda senoidal de 25 KHz sin deformaciones, aunque desplazada como tensiones positivas. Luego, se tiene la onda proveniente del circuito encargado de eliminar el offset y aplicar un circuito de ganancia mayor a la unidad, observándose esto en la Fig. 11. Finalmente, se realizó una serie de pruebas de funcionamiento de la placa completa, consistiendo en acercar o alejar un material ferromagnético a cada una de las bobinas y observar la señal de salida de ésta última etapa. En la Fig. 12 se muestra la onda con el material ferromagnético aproximadamente equidistante de cada bobina, mientras que en la Fig. 13 se simula una situación en la que el eje se encuentre desplazado hacia un lado; como se ve, la amplitud de la onda de la Fig. 13 es mayor que la de la Fig. 12. También se realizó una prueba deslizando el objeto hacia el lado opuesto, llegándose a la misma conclusión.

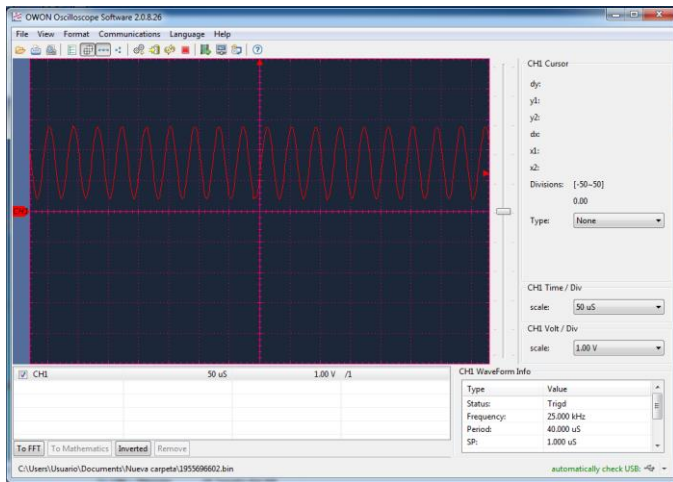


Fig. 10. Onda luego del circuito R2R y filtro Sallen-Key.

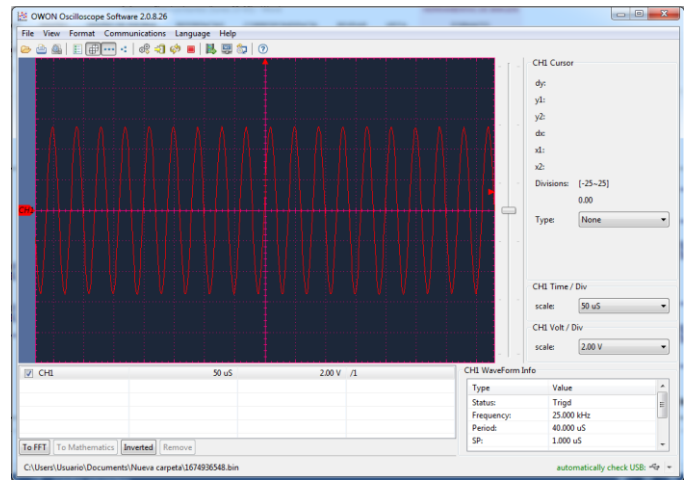


Fig. 11. Onda luego de la amplificación y eliminación de offset.

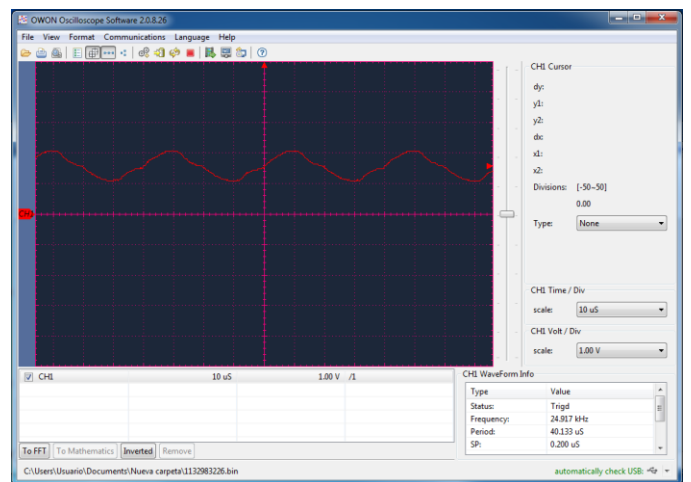


Fig. 12. Onda de salida con el eje centrado entre las bobinas.

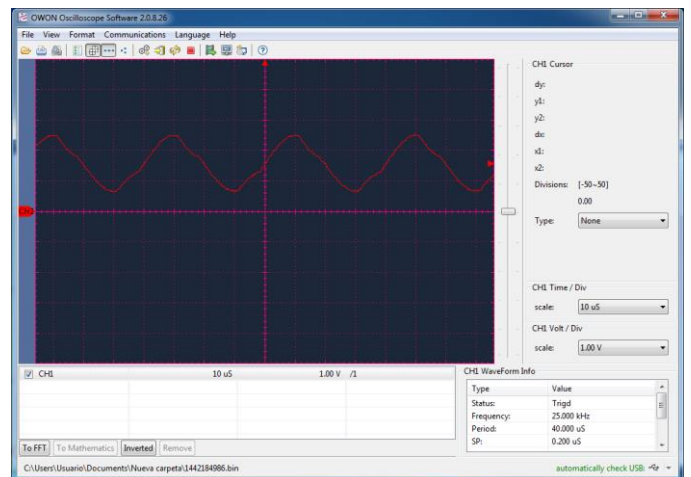


Fig. 13. Onda salida con el eje desplazado hacia una de las bobinas.

Teniendo en cuenta que el montaje no es el definitivo, se han realizado pruebas poco rigurosas, no obstante demuestran que existe una correspondencia entre la señal percibida con el dato esperado. Aun así no se tiene definido un detalle numérico de la linealidad del sistema, ni de la resolución luego de su conversión digital en el DSP.

Montaje de las bobinas de sensado: dado que el circuito de medición cumple con las expectativas de funcionamiento, se procede a realizar el montaje de las bobinas de sensado a una distancia óptima al eje. Para obtener un prototipo funcional que permita realizar todas las pruebas necesarias, se realizó una pieza en Solid Works para posteriormente imprimirla en 3D con las características requeridas.

El diseño obtenido se compone de dos tapas con las cavidades para la ubicación de las bobinas y perforaciones para el montaje en la estructura de soporte del estator. En la Fig. 14 se visualizan cada una de las tapas separadas, presentando la ubicación que deberían tener las bobinas utilizadas para la medición de distancia. Tal como puede deducirse, el eje se ubica de manera ortogonal al plano dado por las bobinas.

En la Fig. 15 se tiene una fotografía en la que puede observarse cada una de las placas que componen el proyecto de levitación magnética (placas de medición y placas de control-potencia), también se presentan los estatores bobinados y el eje situado en su interior. Este montaje permitirá realizar la contrastación debida de la medición con una mayor rigurosidad. También es el que se utilizará para realizar cada una de las futuras pruebas y es el soporte sobre el cual se efectuarán modificaciones, si fuese necesario.

## V. CONCLUSIONES

Analizando el proyecto desde un punto de vista técnico, debido a todas las pruebas realizadas con éxito en cada una de las etapas y que en su conjunto presenta el funcionamiento esperado, se concluye favorablemente. No obstante, es necesario verificar la linealidad en la respuesta “Tensión-Distancia” del instrumento realizado, con métodos más minuciosos que los realizados hasta el momento, para luego pasar a incluirlo en el proyecto de levitación magnética (Fig. 15). En el caso de detectar cierta falta de linealidad en las mediciones, no se descarta su utilización ya que realizando una curva de error estos efectos podrían compensarse por software. Desde un enfoque de formación de recursos humanos, el trabajo implicó el aporte y la coordinación del trabajo entre alumnos y docentes de la carrera de Ingeniería Electrónica, obteniéndose un resultado positivo debido al compromiso asumido por cada una de las partes. Cabe destacar la fuerte participación de los alumnos en el diseño y desarrollo del proyecto.

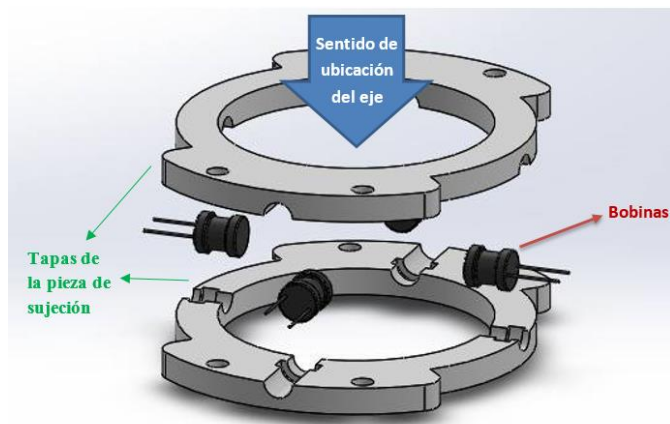


Fig. 14. Montaje de los sensores y ubicación respecto al eje.

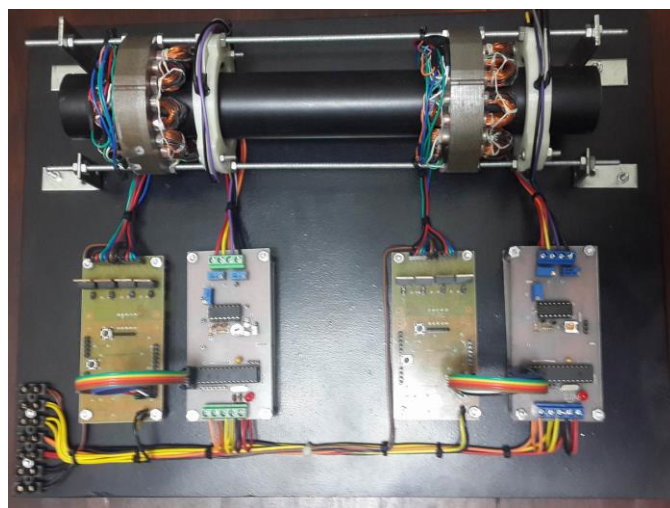


Fig. 15. Fotografía del sistema de ejes levitantes.

## VI. BIBLIOGRAFÍA Y SITIOS WEB

- [1] Barie W., (1996), Linear and nonlinear state-space controllers for magnetic levitation, Int. Journal of Systems Science
- [2] Dan C. et al., (1993), Sliding Mode and Classical Control for Magnetic Levitation System, IEEE control Systems.
- [3] El Hajjaji A., (2001), Modeling and Nonlinear Control of Magnetic Levitation Systems, IEEE Trans. On Industrial Electronics.
- [4] LION PRECISION. Comparing Capacitive and Eddy-Current Sensors. [www.lionprecision.com/tech-library/technotes/article-0011-cve.html](http://www.lionprecision.com/tech-library/technotes/article-0011-cve.html)
- [5] Aplicaciones de Amplificadores Operacionales, Texas Instruments: [www.ti.com/lit/an/sboa092b/sboa092b.pdf](http://www.ti.com/lit/an/sboa092b/sboa092b.pdf)
- [6] Hoja de datos del DSP: [ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70291G.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70291G.pdf)
- [7] Sensor Design Using the Microchip dsPIC, 1st Edition
- [8] Programming 16-Bit PIC Microcontrollers in C, 2nd Edition

Nota: última visita a cada sitio web el día 25/09/2016.