



# CONTRIBUCIÓN AL CONTROL DE CAMPO MAGNÉTICO DE BAJA MAGNITUD Y FRECUENCIA SOBRE UN VOLUMEN UNIFORME

**Andrés F. Restrepo**

**Universidad del Valle  
Cali, Colombia**

## Resumen

El estudio de los efectos de los campos magnéticos de baja magnitud y frecuencia en los sistemas biológicos se ha convertido en una línea de investigación de gran crecimiento en la comunidad científica que busca determinar posibles efectos benignos o malignos, estos estudios requieren sistemas de generación de campos magnéticos controlados que permitan evaluar los posibles efectos bajo condiciones controladas de exposición. Los sistemas de generación de campos magnéticos controlados buscan compensar las componentes del campo magnético externo que pueden inferir sobre la distribución en el volumen de interés. Estos sistemas implican, además del dispositivo de generación, el uso de un sistema de medición y control para lograr la generación de campos magnéticos controlados.

En los sistemas de generación, compensación y estimulación con campos magnéticos, consultados en la literatura, no se presenta un modelo formal del sistema de generación, no se especifica la estrategia de control y no se realizan estudios de cumplimiento de los requisitos operativos. Este artículo presenta el estudio de una técnica de control que garantiza el cumplimiento de las especificaciones de distribución del campo magnético de baja magnitud y frecuencia sobre un volumen uniforme, utilizando bobinas Helmholtz triaxiales. Esto implica el desarrollo de un modelo adecuado para las bobinas, un método de medición de la distribución del campo magnético y el control del campo magnético con compensación de perturbaciones que permite definir la magnitud y la orientación del campo magnético resultante en el volumen de experimentación, garantizando un entorno controlado para realizar diferentes estudios de estimulación electromagnética.

**Palabras clave:** bobinas Helmholtz tri-axiales; control de campo magnético; medición de campo magnético

## Abstract

*The study of the effects of magnetic fields of low magnitude and frequency on biological systems has become a research line of great growth in the scientific community that looks for possible benign or malignant effects, these studies require field generation systems controlled magnetic that qualifies the effects under controlled conditions of exposure. The generation systems of controlled magnetic fields seek to compensate the components of the external magnetic field that can infer on the distribution in the volume of interest. These systems involve, in addition to the generation device, the use of a measurement system and a control system to achieve a control of the magnetic field.*

*In the systems of generation, compensation and stimulation with magnetic fields, consulted in the literature, a formal model of the generating system is not presented, the control strategy is not specified and studies of compliance with the operating requirements are not carried out. This paper presents the study of a control technique that guarantee the compliance of magnetic field distribution specifications of low magnitude and frequency over a uniform volume, using Helmholtz triaxial air core coils. This involves the development of a suitable model for the coils, a method of measuring the magnetic field distribution and the control of the magnetic field with compensation of disturbances that allows defining the magnitude and orientation of the magnetic field resulting in the volume of experimentation, guaranteeing an adequate environment to perform different studies of electromagnetic stimulation.*

*Keywords: Helmholtz tri-axial coils; magnetic field control; magnetic field measurement*

## 1. Introducción

Existen numerosas aplicaciones en diferentes áreas de estudio donde se requiere la generación de campos magnéticos homogéneos y controlados, una de ellas es la investigación en bioelectromagnéticos (Smith, *et al.*, 2011, Khalil, *et al.*, 2014). Muchos de estos estudios requieren, idealmente, dispositivos capaces de generar campos magnéticos uniformes y, además, garantizar una exposición controlada y repetible a diferentes muestras involucradas en el experimento (Nam, *et al.*, 2015). En este sentido, las disposiciones de las bobinas de núcleo de aire se han utilizado tradicionalmente para este fin, en particular las geometrías circulares y cuadradas (Restrepo, *et al.*, 2014).

Por otro lado, los sistemas de control del campo magnético buscan compensar los componentes del campo magnético externo que pueden generar cambios en la distribución deseada del campo magnético sobre un volumen específico, esta compensación se puede lograr a través de un sistema activo o pasivo (blindaje) (Forte, *et al.*, 2010). La compensación activa consiste en generar un campo magnético en dirección opuesta al campo magnético de referencia para compensar los componentes del campo magnético externo, incluido el campo geomagnético (Restrepo, *et al.*, 2017), esto permite generar el campo magnético deseado sin interferencias. Los sistemas de compensación de campo magnético se utilizan en diferentes aplicaciones, como microscopía, imágenes diagnósticas, posicionamiento, medición de campos magnéticos, estimulación electromagnética, etc.

Los sistemas utilizados en las investigaciones de Martino (Martino, *et al.*, 2010), Park (Park, *et al.*, 2005) y Raganella (Raganella, *et al.*, 1994) se basan, en la mayoría de los casos, en un sistema computarizado como unidad de control de campo magnético. Por otro lado, Novickij (Novickij *et al.*, 2014), y Farina (Farina *et al.*, 2010) utilizan un sistema microcontrolado para generar campos magnéticos controlados con dirección y magnitud específicas, pero éstos no especifican la estrategia de control implementada. En este artículo se propone un sistema de control de campo magnético para aplicaciones de generación campo magnético uniforme de baja magnitud y frecuencia. El sistema propuesto surge como una alternativa de bajo costo y portabilidad para la generación de campos magnéticos controlados.

## 2. Sistema de generación de campo magnético uniforme

El sistema propuesto se controla mediante una técnica de compensación activa y se compone principalmente de tres partes: el sistema de generación de campos magnéticos uniformes que consiste en una serie de bobinas Helmholtz Cuadradas Triaxiales (HCT); el sistema de medición construido con sensores de campo magnético de efecto Hall AD22151 en una configuración triaxial y el sistema de control y acoplamiento basado en el microcontrolador ATmega16, como se muestra en la Figura 1. El principio de funcionamiento del sistema se basa en la compensación del campo magnético en cada eje de coordenadas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) para obtener una compensación global sobre el volumen de interés (Restrepo, *et al.*, 2017). Por lo tanto, la medición de cada componente del campo magnético  $B_x$ ,  $B_y$  y  $B_z$  es necesaria para contrarrestar los efectos de los campos magnéticos externos (naturales y/o artificiales).

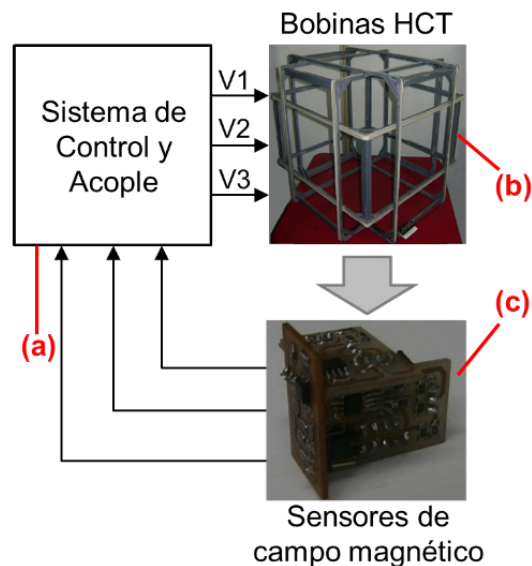


Figura 1. Sistema de control de campo magnético: (a) Sistema de generación. (b) Sistema de medición. (c) Sistema de control y acoplamiento.

### 2.1. Sistema de bobinas HCT

El sistema de bobinas de HCT (Restrepo, *et al.*, 2014) consta de un conjunto de tres pares de bobinas Helmholtz cuadradas, como se muestra en la Figura 1(a), donde cada par está ubicado

en cada eje de coordenadas ( $x, y, z$ ). El estudio del comportamiento del campo magnético  $B$  generado por las bobinas Helmholtz cuadradas se realiza utilizando la ley de Biot-Savart (Tsz-Ka, 2004) para cada hilo conductor finito tal como se presenta en la ecuación (1), donde  $d\vec{l}$  es un segmento infinitesimal del lazo de corriente,  $I$  es la corriente a través del lazo,  $\mu_0$  es la permeabilidad del espacio libre,  $r$  es la distancia desde un extremo del lazo de corriente hasta el punto evaluado y  $\hat{r}$  es un vector unitario.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \right) \quad (1)$$

La configuración Helmholtz consiste en un par de bobinas ubicadas paralelas a cada lado del área de prueba a lo largo de un eje común (en este caso, el eje  $z$ ), espaciadas a una distancia  $h$  como se muestra en la Figura 2;  $a$  es la longitud media del lado de la bobina,  $P$  es el punto evaluado y  $s$  es la distancia perpendicular desde el eje del lazo de corriente ( $I d\vec{l}$  sobre el eje  $x$ ) a  $P$ . Cada bobina consiste en  $N$  vueltas y la relación entre el lado y la distancia de separación de las bobinas cuadradas Helmholtz viene dada por un factor de 0.5445 ( $h = 1.089a$ ) (Restrepo, et al., 2014), estos parámetros físicos dependen de las restricciones de la aplicación en términos del volumen deseado con un campo magnético uniforme. Las bobinas cuadradas están conectadas en serie generando un campo magnético altamente uniforme en el eje de simetría (eje  $z$ ); por lo tanto, al resolver (1) para  $x=y=0$ , el campo magnético resultante es igual a la componente  $B_z$  ya que las otras componentes ( $B_x$  y  $B_y$ ) son iguales a cero (Tsz-Ka, 2004), este cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación (2):

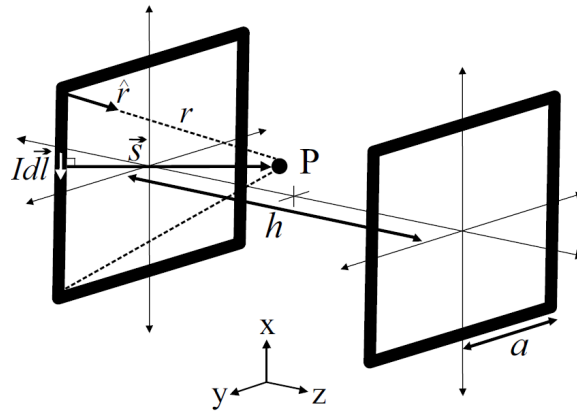


Figura 2. Configuración de bobinas Helmholtz cuadrada.

$$\vec{B}(z) = \frac{2\mu_0 N I a^2}{\pi} \left[ \frac{1}{\left( a^2 + \left( z + \frac{h}{2} \right)^2 \right) \left( 2a^2 + \left( z + \frac{h}{2} \right)^2 \right)^{1/2}} + \frac{1}{\left( a^2 + \left( z - \frac{h}{2} \right)^2 \right) \left( 2a^2 + \left( z - \frac{h}{2} \right)^2 \right)^{1/2}} \right] \quad (2)$$

El modelo equivalente de la bobina HCT, para el sistema propuesto, se considera desacoplado y se construye relacionando directamente el modelo de cada par de bobina con cada componente de campo magnético  $B_{x,y,z}$ . La bobina HCT se dimensionó para estudios sobre sistemas biológicos in vivo e in vitro (Restrepo, et al., 2014). Las longitudes de los lados definidas fueron 0.56 m, 0.58 m y 0.60 m en cada eje de simetría  $x, y$  y  $z$ , respectivamente.

## 2.2. Sistema de medición de campo magnético.

Los sensores del campo magnético se colocan ortogonalmente entre sí para obtener la medida de la intensidad del campo magnético en los tres ejes coordenados  $B_x$ ,  $B_y$  y  $B_z$ , lo que permite determinar la magnitud del campo magnético resultante ( $B_r$ ) (Brodic, 2015) como se presenta en la siguiente ecuación (3):

$$B_r = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3)$$

El arreglo experimental para la detección de cada componente de campo magnético se diseñó de manera modular para permitir un montaje práctico y la perpendicularidad necesaria para obtener la medición del campo magnético resultante. La ventaja más importante del sistema de medición ilustrado en la Figura 1(b), además de su bajo costo, es la implementación con dispositivos de montaje superficial y la posibilidad de tener dos rangos de medición  $\pm 10$  mT y  $\pm 2$  mT a través de un selector, estas características permiten minimizar el tamaño del montaje experimental (Restrepo, *et al.*, 2017).

## 2.3. Sistema de control y acoplamiento.

La Figura 3 muestra el sistema de control y acoplamiento que se divide en: etapa de amplificación y acondicionamiento, microcontrolador, convertidores analógicos / digitales (DAC) y etapa de potencia. La etapa de amplificación y acondicionamiento permite que las señales de voltaje entregadas por los sensores, de los campos magnéticos medidos, se ajusten dentro de valores límites para ser digitalizados por los convertidores analógicos/digitales (ADC) del microcontrolador. Por su parte, el microcontrolador ATmega 16 se encarga del procesamiento digital de las variables medidas y del cálculo de la acción de control PI.

Los requisitos generales de control de campo magnético de la bobina de HCT están relacionados con el ancho de banda de 150 Hz, el error de estado estable  $ess=0$ , el margen de ganancia  $> 6$  dB y el margen de fase  $> 30^\circ$  a partir del modelo de cada par bobinas Helmholtz cuadrada. Los controladores PI se diseñaron teniendo en cuenta estos requisitos y ajustando la respuesta de lazo cerrado del sistema de segundo orden resultante a la ecuación característica ( $s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2$ ), donde se seleccionó un amortiguamiento  $\zeta=0.707$  y  $\omega_n=300\pi$  rad/s para garantizar un margen de fase  $> 45^\circ$  y un sobrepaso  $< 5\%$ . La ecuación básica de PI se presenta a continuación; donde  $k_p$  y  $T_i$  son la ganancia proporcional y el tiempo integral respectivamente.

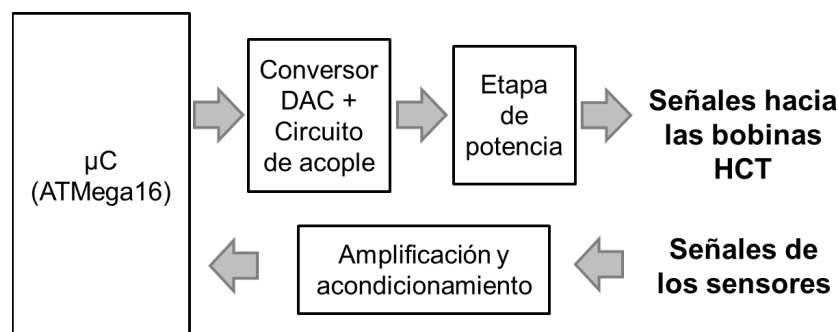


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema de control y acoplamiento.

Los parámetros  $k_p$  y  $T_i$  (para  $j=1, 2, 3$ ) se calcularon para cada bobina HC respectivamente como se presenta a continuación; donde  $k_{SH}$  y  $\tau_{SH}$  son la ganancia y la constante de tiempo del modelo de primer orden de cada par de bobina HC. En la Tabla 1 se presentan los parámetros de los controladores PI diseñados.

$$k_{pj} = (2\zeta\omega_n - 1/\tau_{SHj})/k_{SHj} \quad (4)$$

$$T_{ij} = (k_{pj}k_{SHj})/\omega_n^2 \quad (5)$$

Tabla 1. Parámetros del control PI para cada par de bobinas HC.

<b>Parámetro</b>	<b>Bobina HC 1</b>	<b>Bobina HC 2</b>	<b>Bobina HC 3</b>
Ganancia proporcional ( $k_p$ )	30.585 x10 <sup>3</sup>	28.314 x10 <sup>3</sup>	26.117 x10 <sup>3</sup>
Tiempo integral ( $T_i$ )	5.165 x10 <sup>-4</sup>	5.132 x10 <sup>-4</sup>	5.098 x10 <sup>-4</sup>

### 3. Sistema de control de campo magnético

En esta sección, se presentan la validación por simulación del sistema de generación y los resultados experimentales del control del campo magnético en una aplicación de compensación del campo geomagnético. Para la validación del sistema de medición, se utilizó el medidor de campo magnético MR3 Magnetoresistive Milligauss de la compañía AlphaLab Inc. Es importante remarcar que los resultados experimentales se obtuvieron para condiciones de operación sin material biológico.

#### 3.1. Campo magnético uniforme

Con el propósito de verificar la distribución y uniformidad de cada componente del campo magnético  $B_x$ ,  $B_y$  y  $B_z$  en el volumen de interés, se diseñó un modelo computacional 3D de las bobinas de HCT en COMSOL Multiphysics® (ver Figura 4), el cual consta de tres pares de bobinas Helmholtz cuadradas y un cubo suficientemente grande al que se asigna el potencial cero para el análisis electromagnético mediante el módulo AC/DC (Olivares, 2010). Teniendo en las condiciones operativas del sistema de bobinas HCT ( $N = 50$  vueltas, corriente eléctrica para cada par de bobinas de 1.5 A, 1.45 A y 1.4 A de la más grande a la más pequeña, respectivamente), se realiza la simulación energizando cada par de bobinas de forma independiente (para obtener  $B_{x,y,z} = 200 \mu\text{T}$ ), generando los mapas de contorno de la densidad de flujo magnético que se muestran en la Figura 4.

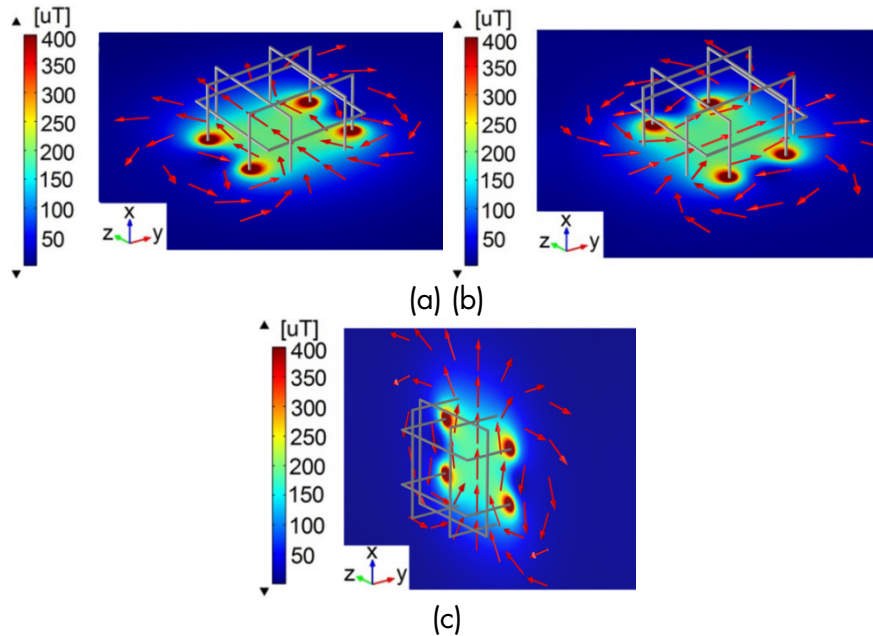
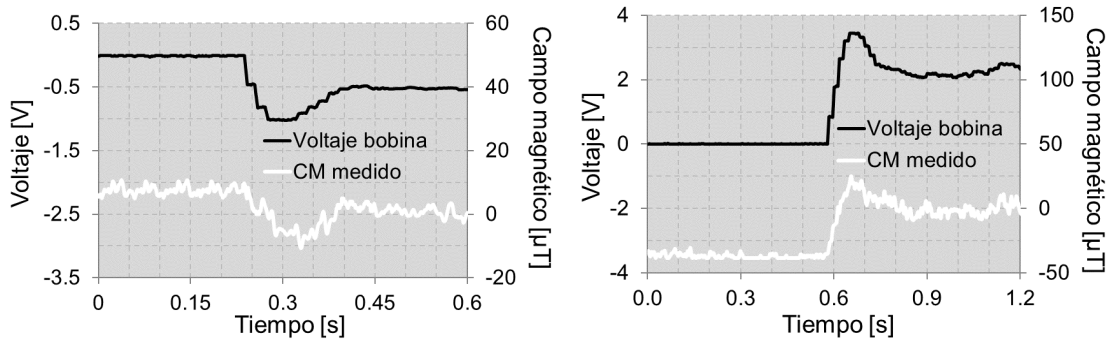


Figura 4. Simulación de líneas de flujo de campo magnético y área uniforme en las bobinas de HCT: (a) Par 1- $B_z$ . (b) Par 2- $B_y$ . (c) Par 3- $B_x$ .

Los resultados experimentales aseguran un volumen cúbico promedio de longitud de lado de 0.12 m (homogeneidad de 0.45 %) con un campo magnético uniforme alrededor del centro de las bobinas de HCT. El campo magnético medido promedio obtenido fue de  $204 \mu\text{T}$  en el centro de separación de cada par de bobinas con un error máximo de 7.4%, y una resolución  $1 \mu\text{T}$ .

### 3.2. Control de campo magnético





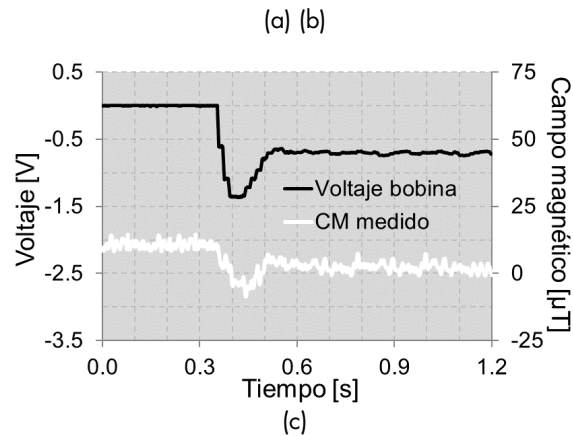


Figura 5. Compensación del campo geomagnético sobre los ejes coordenados: (a) Par 1- $B_z$ . (b) Par 2- $B_y$ . (c) Par 3- $B_x$

Una de las características principales del sistema de control de campo magnético es la posibilidad de compensar el campo geomagnético o los campos magnéticos ambientales. En este caso, se ajusta un campo magnético de referencia igual a 0 mT en cada componente del campo magnético  $B_x$ ,  $B_y$  y  $B_z$ . La Figura 5 muestra los resultados de la compensación del campo geomagnético en cada eje de coordenadas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Es importante destacar que la componente horizontal del campo magnético terrestre ( $B_{TH}$ ) se ubicó en el plano  $zy$ , correspondiente a los ejes de simetría de los pares 1 y 2 del sistema de bobinas de HCT como se muestra en la Figura 4 (a) y la Figura 4 (b) respectivamente. Por lo tanto, el valor promedio de  $B_{TH}$  obtenido experimentalmente fue de 38.1  $\mu\text{T}$ ; este valor cambia constantemente debido a las pequeñas variaciones que ocurren naturalmente durante el día o por equipos eléctricos cercanos a la región de medición, como computadoras, fuentes de voltaje, sistemas de iluminación, etc. Los resultados de la Figura 5 permiten verificar el correcto funcionamiento del sistema de compensación del campo geomagnético. Las magnitudes obtenidas y compensadas de las componentes del campo magnético fueron  $B_z = 6.3 \mu\text{T}$ ,  $B_y = 37.6 \mu\text{T}$  y  $B_x = 10.2 \mu\text{T}$  respectivamente.

#### 4. Conclusión

Se construyó un sistema de compensación de campo geomagnético simple basado en un microcontrolador y la integración de un sistema de bobinas HCT con sensores ortogonales. Este sistema permite, a través de un control simple, no solo la generación de un campo magnético controlado sino también la compensación del campo geomagnético o campos magnéticos ambientales (varios  $\mu\text{T}$ ) en todos los componentes alrededor de un volumen uniforme. El sistema propuesto permite realizar varios estudios de estimulación electromagnética de baja magnitud y frecuencia para experimentos biológicos in vivo o in vitro con diferentes enfoques.

#### 5. Agradecimientos

Este estudio se realizó gracias a la financiación de la Universidad del Valle a través del proyecto IC 2900 de la Convocatoria de apoyo a estudiantes de doctorado. El autor extiende su gratitud al Tecnoparque Nodo Cali del Centro ASTIN – SENA por el apoyo en el desarrollo tecnológico



del proyecto, al Programa de Postgrado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) a través de su Programa Nacional de Capacitación en Investigación Estudio de Doctorado en Colombia – 528.

## 6. Referencias

- Brodic, D. (2015). Measurement of the extremely low frequency magnetic field in the laptop neighborhood. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, No. 76, pp. 39–45.
- Farina M. *et al.* (2010). ELF-EMFs induced effects on cell lines: Controlling ELF generation in laboratory. *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 24, pp. 131–153.
- Forte, G. O., Farrher, G., Canali, L. R. and Anardo, E. (2010). Automatic shielding-shimming magnetic field compensator for excluded volume applications. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 18, No. 4, pp. 976–983.
- Khalil, I., Abelmann, L. and Misra, S. (2014). Magnetic-based motion control of paramagnetic microparticles with disturbance compensation. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 10, pp. 1–10.
- Nam, J. K., Jeon, S. M., Lee, W. S. and Jang, G. H. (2015). Control of a three-dimensional magnetic force generated from a magnetic navigation system to precisely manipulate the locomotion of a magnetic microrobot. *Journal of Applied Physics*, Vol. 117, No. 17, pp. 1–6.
- Novickij, V., Grainys, A., Novickij, J. and Lucinskis, A. (2014). Programmable pulsed magnetic field system for biological applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 11, pp. 1–4.
- Martino, C. F., Portelli, L., McCabe, K., Hernandez, M. and Barnes, F. (2010). Reduction of the Earth's magnetic field inhibits growth rates of model cancer cell lines. *Bioelectromagnetics*, Vol. 31, No. 8, pp. 649–655.
- Olivares, J. C., Campero, E., Escarela, R., Magdaleno, S. and Blanco, E. (2010). Coil systems to generate uniform magnetic field volumes. *COMSOL Conference, Boston, USA*, pp. 1–7.
- Park, P. G., Shifrin, V.Y., Kirn, Y. G., Kim, M. S., Kim, K. T. (2005). Automatic compensation of the Earth's magnetic field and a calibration system for magnetometers below 1 mT. *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 47, No. 4, pp. 583–585.
- Raganella, L., Guelfi, M. and D'Inzeo, G. (1994). Triaxial exposure system providing static and low-frequency magnetic fields for in vivo and in vitro biological studies. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, Vol. 35, No. 1-2, pp. 121–126.
- Restrepo, A. F., Franco, E. and Pinedo, C. R. (2014). Metodología de diseño e implementación de un sistema para generación de campos magnéticos uniformes con bobinas Helmholtz cuadrada tri-axial. *Información Tecnológica*, Vol. 25, No. 2, pp. 3–14.
- Restrepo A. F., Franco, E., Cadavid, H. and Pinedo, C. R. (2017). A simple geomagnetic field compensation system for uniform magnetic field applications. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, No. 83, pp. 65–71.
- Smith, A., Anderson, B. E., Chaudhury, S. and Jessen, P. S. (2011). Three-axis

measurement and cancellation of background magnetic fields to less than 50  $\mu\text{G}$  in a cold atom experiment. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, Vol. 44, No. 20.

- Tsz-Ka, T., (2004). Tri-axial Square Helmholtz coil for Neutron EDM Experiment. University of Hong Kong. Consultado el 25 de septiembre 2015 en [http://www.phy.cuhk.edu.hk/sure/comments\\_2004/thomasli.pdf](http://www.phy.cuhk.edu.hk/sure/comments_2004/thomasli.pdf)

## Sobre los autores

- **Andrés F. Restrepo:** Ingeniero Electrónico, Magister en Ingeniería con énfasis en Automática y candidato a Doctor en Ingeniería énfasis en Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Profesor Hora Catedra - Universidad del Valle, Gestor de la Línea de Electrónica y Telecomunicaciones – Tecnoparque Nodo Cali (SENA). [andres.restrepo@correounivalle.edu.co](mailto:andres.restrepo@correounivalle.edu.co) [afrestrepoa@sena.edu.co](mailto:afrestrepoa@sena.edu.co)

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)