

DISEÑO, DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN GENERADOR DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE FRECUENCIA EXTREMADAMENTE BAJA

DESIGN, DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF AN EXTREMELY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS GENERATOR

N. J. Correa¹, A. A. Naudi^{*1,2}, E. Diliscia^{1,2}, M. C. Pérez^{1,3,4}, S. Laugero^{1,3}, A. Hiraldo^{1,4}, E. Bonfils^{1,4} y J. F. Adur^{1,3}

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos, Ruta 11, Km. 10, Oro Verde, Entre Ríos (3100), Argentina.

²Cátedra Electricidad y Magnetismo, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos, Ruta 11, Km. 10, Oro Verde, Entre Ríos (3100), Argentina.

³Cátedra Radiaciones No Ionizantes, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos, Ruta 11, Km. 10, Oro Verde, Entre Ríos (3100), Argentina.

⁴Cátedra Electrónica Lineal, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos, Ruta 11, Km. 10, Oro Verde, Entre Ríos (3100), Argentina.

Recibido: 28/18/2018 Aceptado: 06/06/2021

En este trabajo presentamos los resultados del diseño, desarrollo y caracterización de un generador de Campos Electromagnéticos de Frecuencia Extremadamente Baja CEM-FEB para la realización de experimentos con pequeños animales. Para el diseño del sistema de exposición se tuvo como premisa que la configuración permita aplicar a la muestra un CEM que cumpla con criterios de uniformidad e intensidad de campo requeridos pero que además haga posible observar, manipular y ubicar la muestra fácilmente, lo cual impone requisitos de accesibilidad. Para la aplicación futura de distintos protocolos de exposición a CEM, el generador debe permitir realizar emisiones calibradas y homogéneas, bajo condiciones de exposición conocidas. Se presentan resultados del proceso constructivo, en los que se analizan materiales y métodos propuestos, así como de estudios de desempeño del sistema.

Palabras Clave: CEM-EBF, generador, experimentos con pequeños animales.

In this article we present the results of the design, development and characterization of an extremely low frequency electromagnetic fields generator to carry out experiments with small animals. For the design of the exposure system, we took into account that its configuration should allow the application of a electromagnetic fields that meets uniformity and field intensity criteria, while making it possible to observe, manipulate and locate the sample easily, a fact that imposes accessibility requirements. For the application of different electromagnetic fields exposure protocols in the future, the generator must allow calibrated and homogeneous emissions, under known exposure conditions. Results of the constructive process are presented, in which the proposed materials and methods are analyzed, as well as the system performance results.

Keywords: extremely low frequency electromagnetic fields, generator, experiments with small animals.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2021.32.3.62>



ISSN 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

Existen numerosos estudios experimentales sobre los mecanismos de interacción entre los campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja (CEM-FEB) y los sistemas biológicos. Los mismos tienen en general el objetivo de predecir los efectos biológicos a los que se expone la población humana en ambientes residenciales y ocupacionales [1-5].

Dada la variabilidad de las experiencias realizadas en cuanto a dosis y niveles máximos permitidos, se justifica realizar estudios que puedan ser repetidos utilizando fuentes generadoras de CEM-FEB confiables en el tiempo.

En este trabajo se presentan los resultados del diseño, desarrollo y caracterización de un generador de CEM-EBF pa-

ra la realización de experimentos con pequeños animales.

Para el diseño se han tomado como referencia los límites de exposición establecidos por la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) (una densidad de flujo magnético máxima de 1 mT para los trabajadores y de 0.2 mT para el público en general en la zona del espectro de las frecuencias extremadamente bajas) [6] y los resultados de numerosos trabajos realizados principalmente a 50 Hz y a diferentes intensidades de campo magnético (en el rango de μT a mT) aplicados a cultivos celulares, estudios in vitro y in vivo en pequeños animales [1, 5, 7-9].

A partir de esos datos se decidió avanzar en el desarrollo de un generador que permita trabajar en frecuencias de hasta 100 Hz y valores de flujo magnético de hasta 2 mT. Este rango de trabajo permitirá a futuro analizar diferentes

* andres.naudi@uner.edu.ar

efectos biológicos, incluyendo los producidos por campos de intensidades en el orden de los valores máximos permitidos por la normativa en relación a efectos en humanos y con la posibilidad de realizar experiencias con valores más elevados. Los efectos biológicos de esos campos electromagnéticos se estudiarán utilizando modelos biológicos en pequeños animales.

A partir de un análisis comparativo de distintas configuraciones de bobinas se optó por el sistema de Helmholtz para la generación del campo dada su utilidad cuando se necesita un pequeño volumen de campo uniforme, además de permitir una fácil manipulación y control del ambiente al que se exponen las muestras. Otras configuraciones consideradas en la comparación fueron los sistemas de bobinas de Merritt y de Ruben [10].

II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL GENERADOR DE CEM-EBF

Criterios de diseño

Como primer criterio para el diseño se estableció el requisito de que el sistema genere un campo magnético con una densidad de flujo promedio ajustable entre 0 mT y 2 mT, en un rango de frecuencia ajustable entre 0 Hz y 100 Hz, y con un valor nominal de homogeneidad espacial mayor o igual a 90% dentro de un volumen que permite alojar una jaula para pequeños animales (300 mm × 200 mm × 140 mm). Además, el dispositivo debe permitir fácil acceso al volumen irradiado por la fuente.

Estos requisitos hacen que se restrinja el análisis a las disposiciones de bobinas con núcleo de aire, alimentadas por una corriente eléctrica controlada.

Determinación de la configuración del generador: Sistema de bobinas de Helmholtz

El sistema está formado por dos bobinas circulares separadas una distancia igual a su radio. Las bobinas están conectadas en serie y poseen el mismo número de vueltas. Las bobinas de Helmholtz son la configuración más simple para producir un campo magnético relativamente constante [11, 12]. La construcción es relativamente sencilla y permite un fácil acceso al volumen irradiado.

Como parámetros para el diseño del sistema generador se consideraron:

- Intensidad de corriente en las espiras (I)
- Número de vueltas de cada bobinado (N)
- Radio de las bobinas (R)
- Diferencias relativas de densidad de flujo magnético (ϵ , ϵ_z) [10].

El radio de las bobinas se determinó en función de su separación en el sentido axial. En el presente trabajo se planea experimentar con animales pequeños, de modo que el radio de las bobinas estará en relación del volumen de la jaula donde los mismos sean colocados. Entre los tamaños estándar de proveedores consultados se definió trabajar con jaulas de 300 mm × 200 mm × 140 mm. La jaula se ubicará en el centro del sistema de bobinas, con su longitud

mayor paralela al eje z (eje del sistema), de manera de aprovechar de manera significativa la homogeneidad del campo generado.

Un criterio de diseño fundamental lo constituye la selección de un adecuado valor de diferencia relativa (o variación porcentual) de la densidad de flujo magnético, tal que asegure altas condiciones de uniformidad en el volumen bajo exposición.

Se puede demostrar que un radio de las espiras (R) de 0.48 m permite que la jaula de las dimensiones indicadas se encuentre dentro de un “cilindro” de uniformidad de campo mayor al 99% [13-16].

Para establecer valores de la magnitud del campo magnético se consideraron los límites de exposición tomados de referencia según el tipo de efectos estudiados, por lo que se considera útil obtener un rango de intensidades de campo a generar hasta de 2 mT.

Para determinar el número de vueltas N de cada bobina se consideró en primer lugar un sistema de dos bobinas en configuración de Helmholtz considerando una intensidad de campo de 1.15 mT en el centro del sistema. Bajo estas condiciones se obtiene $N = 308$ vueltas. Luego, aplicando el principio de superposición se llega a un campo magnético de 2.3 mT con dos bobinas adicionales en la misma configuración, con cada par alimentado en forma independiente.

Modelo teórico del campo magnético generado

Un modelo teórico de la densidad de flujo magnético, generada por el conjunto de bobinas, se puede obtener a partir de la Ley de Biot y Savart, que para la geometría particular del sistema planteado arroja la siguiente expresión para el campo a lo largo del eje de las bobinas en la dirección de dicho eje [14]

$$B_z(z) = \frac{1}{2} \mu_0 N I R^2 \left\{ \left[R^2 + \left(z + \frac{R}{2} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} + \left[R^2 + \left(z - \frac{R}{2} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \right\}. \quad (1)$$

En la Fig. 1 se representa gráficamente la componente axial del campo magnético a lo largo del eje z , que coincide con el eje del sistema de bobinas.

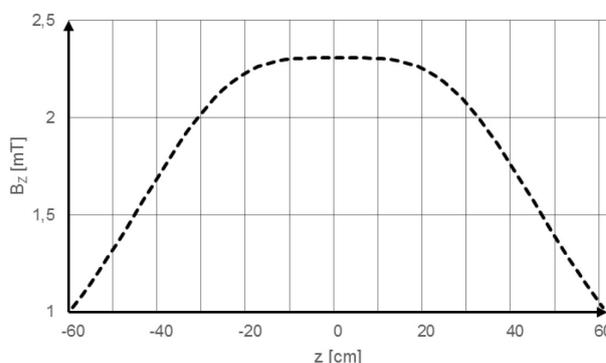


FIG. 1: Variación de la intensidad del campo magnético a lo largo del eje z .

Es de destacar la serie de datos que se presentan en la

Tabla 1. Estos datos, obtenidos del cálculo teórico, corresponden al valor del campo en el centro y extremos de una jaula ubicada en el centro del sistema y cuyo lado de mayor longitud (300 mm) es paralelo al eje del mismo.

TABLA 1: Estimaciones del valor del campo magnético en el centro y extremos de una jaula.

z [cm]	B_z [mT]
-15	2.285
0	2.308
15	2.285

La variación porcentual de la componente axial del campo es

$$\varepsilon_z = \frac{B_z(z = 0.15\text{ m}) - B_z(z = 0)}{B_z(z = 0)} \times 100 = 0.996\%.$$

Así, la diferencia relativa menor a 1% implica que el CEM es prácticamente uniforme a lo largo del lado mayor de una jaula de 300 mm \times 200 mm \times 140 mm si el mismo es ubicado a lo largo del eje del sistema de bobinas.

Otro análisis de interés práctico es la denominada curva de funcionamiento del sistema. Esta consiste en el trazado de la densidad de flujo magnético en función de la corriente por el bobinado. En la Fig. 2 puede observarse el comportamiento teórico lineal del sistema dentro del rango de corrientes eléctricas que se propone para las experiencias.

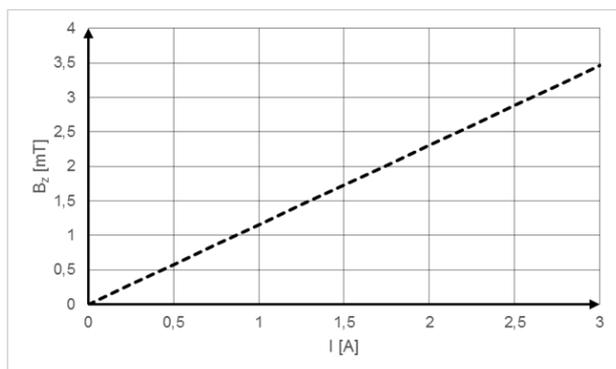


FIG. 2: Variación de B_z para $z = 0$ en función de la variación de corriente.

Construcción del sistema generador

A. Setup para experimentos in vivo

En la Fig. 3 puede observarse el setup del sistema a utilizar regularmente para experiencias in vivo. Para la generación de los campos los pares de bobinas (1) son alimentadas por sendos autotransformadores de salida variable (6). Un sensor (2) y el dispositivo de registro asociado (7) permiten realizar la medición de la intensidad de campo magnético en distintas posiciones en las que puede ubicarse mediante una plataforma de mapeo (3) que permite posicionar el sensor de campo en distintos puntos de coordenadas conocidas.

Dos sensores de temperatura de respuesta rápida y su dispositivo de registro (5) permiten hacer un seguimiento de la evolución de la temperatura en las bobinas y en el centro del sistema durante las experiencias.

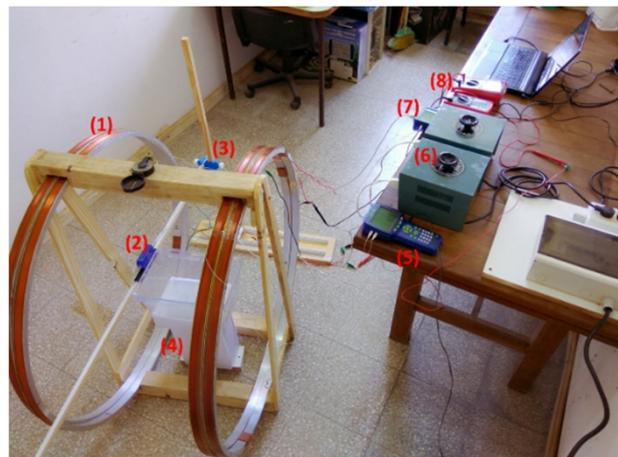


FIG. 3: Setup del sistema a utilizar en experiencias in vivo.

El soporte para la muestra (4), construido con materiales sin efectos magnéticos, permitirá posicionar las jaulas con pequeños animales en la región en la que el campo magnético puede considerarse uniforme. Instrumental estándar (8) permite medir la corriente eléctrica en cada par de bobinados.

B. Bobinado y estructura de soporte

Como se mencionó previamente, la disposición final elegida se basa en dos pares de bobinas de Helmholtz. Cada bobina de 308 vueltas de alambre conductor.

Para la estructura sobre la cual realizar el bobinado se decidió utilizar perfiles de Aluminio normalizados en forma de U. La elección del material se basa fundamentalmente en dos cuestiones: la adecuada maleabilidad del Aluminio y su buena capacidad de disipación de calor. La primera de las propiedades facilita el rolado de los perfiles necesario para obtener los anillos del diámetro requerido, mientras la segunda favorece la disipación del calor generado por efecto Joule en el bobinado.

El perfil en U más adecuado se seleccionó teniendo en cuenta la sección efectiva que ocupará el bobinado sobre este. Se seleccionó el perfil U MPN-126 (30 \times 16 \times 2 mm), con una sección libre de 364 mm², que se ajusta a la sección efectiva de 205.33 mm² calculada a partir del número de vueltas, la corriente máxima a entregar a las bobinas y la densidad de corriente máxima a soportar por el alambre del bobinado si la corriente se aplica en forma permanente.

El alambre esmaltado elegido para construir el bobinado fue el AWG N° 19, con 0.912 mm de diámetro y 0.6533 mm² de sección transversal. Seleccionado el alambre se determinó el número de vueltas en sentido axial (N_z) y el número de capas (N_r) de cada bobina, obteniéndose valores de 28 vueltas/capa para N_z y de 11 capas para N_r . En la Fig. 4 se puede observar la disposición de las espiras de conductor sobre el perfil de aluminio. Se verifica que el número de capas de bobinado no supera la altura del perfil. Por lo tanto, el número de vueltas total N está dado por $N = N_z \cdot N_r = 308$ vueltas.

Durante el doblado de los perfiles, los extremos fueron unidos mediante un volumen con sección transversal en U de material aislante, para de esta manera disminuir las co-

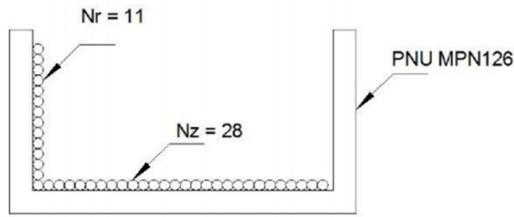


FIG. 4: Disposición de las espiras sobre la sección libre del perfil U MPN-126.

rientes parásitas que se pudieran originar por efecto de la inducción electromagnética. Estas corrientes generarían un campo magnético que interferiría con el de interés, además de generar calor por efecto Joule sobre el Aluminio, ambos efectos no deseados.

El soporte de las bobinas, construido de madera, se diseñó de manera de facilitar el libre acceso por los laterales al centro del sistema, donde se colocarán las muestras durante la experimentación.

Por último, se realizó el montaje de los devanados sobre el soporte de madera, alineados compartiendo el mismo eje, quedando así definitivamente conformado el sistema de bobinas de Helmholtz, como se muestra en la Fig. 5.



FIG. 5: Imagen del sistema de dos pares de bobinas montadas en su soporte.

Si bien es cierto que la misma intensidad de campo magnético se podría lograr con sólo un par de bobinas esto traería aparejado que por cada bobina se aumente al doble el número de vueltas, es decir a 616 vueltas. Es esperable que esta duplicación del número de vueltas, aumente la impedancia total de cada bobina estableciendo así mayores requisitos de tensión de alimentación a las fuentes para sumi-

nistrar la corriente especificada (aprox. 2 A). Este no es un aspecto que se pueda despreciar fácilmente, debido a que, si también se tiene en cuenta que la impedancia aumenta con la frecuencia, el requerimiento de tensión impuesto a la fuente podría ser muy alto y complejizar su desarrollo si tenemos en cuenta que se pretende realizar estudios con campos electromagnéticos dependientes del tiempo.

Para calcular en forma teórica el valor de la autoinductancia de una de las bobinas hicimos uso de la fórmula empírica [17]:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[FN^2 2R - \frac{12.57}{10^4} N^2 R \frac{w}{l} (0.693 + B) \right] \quad (2)$$

En la expresión F es un factor cuyo valor empírico depende de la relación $2R/l$. R es el radio del bobinado y l su longitud, w su espesor dado por el producto del diámetro del conductor empleado y el número de capas. N es el número de vueltas y B un factor de corrección que depende de la relación l/w .

Para los parámetros de diseño considerados, y para una frecuencia de 50 Hz se obtuvo un valor de aproximadamente 236 mH.

Con los mismos parámetros de diseño se calculó la resistencia (R) de una bobina haciendo uso de la fórmula

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (3)$$

en la que l es la longitud total del alambre del bobinado, S su sección transversal y ρ la resistividad del material conductor, obteniéndose para la resistencia un valor teórico de 24.82Ω .

A partir de los valores calculados en (2) y (3), la impedancia compleja (en unidades de Ω) de una de las bobinas para una frecuencia f dada en Hz puede expresarse como

$$Z = R + j X_L = 24.82 + j(2\pi f 0.236), \quad (4)$$

de manera que el módulo de la impedancia será

$$|Z| = \sqrt{24.82^2 + (2\pi f 0.236)^2}. \quad (5)$$

Para 50 Hz la impedancia compleja y su módulo toman valores particulares de $(24.82 + j 74.14) \Omega$ y 78.18Ω , respectivamente.

Si se duplica el número de vueltas, manteniendo el resto de los parámetros de diseño, la inductancia y la resistencia adoptan los valores teóricos 885 mH y 48.75Ω , respectivamente. La impedancia compleja y su módulo, en función de la frecuencia serán

$$Z = R + j X_L = 48.75 + j(2\pi f 0.885), \quad (6)$$

$$|Z| = \sqrt{48.75^2 + (2\pi f 0.885)^2}. \quad (7)$$

Para 50 Hz sus valores particulares serán respectivamente $(48.75 + j 278.03) \Omega$ y 282Ω .

En la Fig. 6 se presentan los valores teóricos de la resistencia y de la reactancia inductiva para los casos de bobinados de 308 vueltas (R1 y XL1) y 616 vueltas (R2 y XL2)

respectivamente, en el rango de frecuencia hasta 300 Hz.

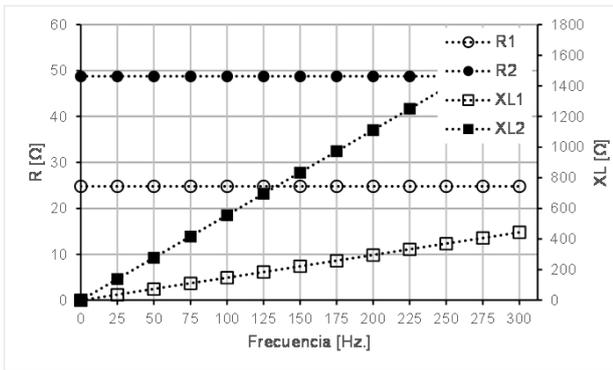


FIG. 6: Resistencia y Reactancia calculada del sistema de dos pares de bobinas montadas en su soporte.

En la Fig. 7 se presentan los valores de los correspondientes módulos de las impedancias complejas en el mismo rango frecuencial.

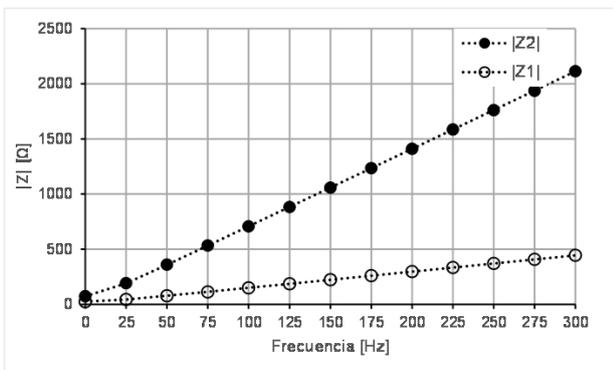


FIG. 7: Módulo de la impedancia compleja calculada del sistema de dos pares de bobinas montadas en su soporte.

Del análisis de ambas figuras se concluye que la duplicación del número de vueltas en cada bobinado causa un aumento en la tasa de crecimiento del módulo de la impedancia compleja en el rango de frecuencias considerado.

En la Tabla 2 se exponen los resultados de caracterizar, en forma práctica, los parámetros de cada uno de los devanados que componen el sistema generador. Para estimar la resistencia se conectó cada bobina a una fuente de CC y se procedió a medir tensión y corriente.

De la misma forma, pero con un autotransformador se estimó el módulo de la impedancia. Luego, con estos datos se calculó la reactancia inductiva y la inductancia. Esta última, además, se midió con un téster.

Sistema de alimentación de las bobinas

Para realizar diferentes pruebas de funcionamiento del sistema de Helmholtz es necesario contar con fuentes de alimentación capaces de suministrar la corriente adecuada para cada tipo de prueba.

Para la generación de campos magnéticos variables de 50 Hz se utilizaron dos autotransformadores de salida variable, en tanto la generación de campos magnéticos estáticos se realizó con fuentes regulables de alta precisión de corriente continua. Las características técnicas de los autotransformadores y fuentes de corriente continuas utilizadas se presentan en la Tabla 3.

TABLA 2: Valores experimentales de la resistencia (R), inductancia (L), reactancia inductiva (X_L) y módulo de la impedancia compleja ($|Z|$) para cada bobinado.

Bobinado 1			
R [Ω]	L [H]	X_L [Ω]	$ Z $ [Ω]
26.1 ± 0.7	0.251 ± 0.006	79 ± 2	83 ± 2
Bobinado 2			
R [Ω]	L [H]	X_L [Ω]	$ Z $ [Ω]
25.7 ± 0.8	0.251 ± 0.006	79 ± 2	83 ± 2
Bobinado 3			
R [Ω]	L [H]	X_L [Ω]	$ Z $ [Ω]
25.6 ± 0.7	0.250 ± 0.006	79 ± 2	83 ± 2
Bobinado 4			
R [Ω]	L [H]	X_L [Ω]	$ Z $ [Ω]
25.6 ± 0.7	0.250 ± 0.006	79 ± 2	83 ± 2

TABLA 3: Características técnicas de autotransformadores y fuentes de tensión continua utilizadas el sistema de alimentación de las bobinas. * Los datos corresponden a cada fuente individual.

Autotransformadores				
Frecuencia [Hz]	Tensión de entrada [V]	Tensión de salida ajustable [V]	Intensidad máxima de salida [A]	Potencia Aparente [KVA]
50	220	0 – 250	6	1.5
Fuentes regulables de tensión continua (dos fuentes regulables, independientes, con capacidad de funcionamiento individual, serie y paralelo*)				
Frecuencia [Hz]	Tensión de entrada [V]	Tensión de salida ajustable [V]	Intensidad máxima de salida [A]	Potencia Aparente [KVA]
–	220	0 – 30	0 – 3	90

La conexión de las bobinas de cada par se realizó en paralelo, con los devanados de un mismo par conectados a un autotransformador (ver esquema de conexión en Fig. 8).

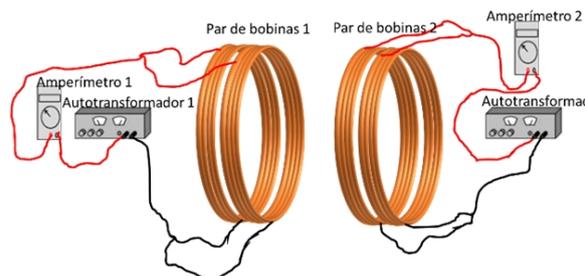


FIG. 8: Esquema de conexión eléctrica de los pares de bobinas que conforman el sistema de Helmholtz.

III. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

Sistema de sensado del campo magnético

A. Instrumental de medición y registro

Para la medición y registro de la intensidad del campo magnético en distintos puntos del volumen de interés se utilizaron los elementos cuyas principales características se presentan en la Tabla 4.

Se utilizó una cámara de cero Gauss para poner a cero la lectura del sensor antes de cada serie de medidas. Esta con-

siste en una cámara metálica de doble pared, con alta permeabilidad (permeabilidad relativa a 40 Gauss de 50.000). Sus dimensiones, largo interno 88 mm y diámetro interno 14.4 mm, permiten introducir el sensor de campo en un volumen del espacio en el que puede considerarse aislado de campos magnéticos externos.

TABLA 4: Características técnicas del sensor de campo magnético y el dispositivo de registro utilizados para la medición de la intensidad de campo en el volumen de interés.

Sensor de campo magnético	
Direccionalidad	2 D – Permite medir el campo en dos direcciones mutuamente perpendiculares (axial/radial).
Rango [Gauss]	± 1000
Precisión	5% de la lectura, a 25°C, después de dejar estabilizar térmicamente 4 min y poniéndolo a cero con una cámara de cero Gauss.
Resolución	0.01 Gauss tomando 10 muestras/s
Repetitividad	0.05%
Frecuencia de muestreo máxima [Hz]	1000
Dispositivo para registro y procesamiento de datos	
Puertos para sensores	8 en total. 1 para sensor de diferencia de potencial. 2 para sensores de temperatura. 4 para sensores de distintas magnitudes, entre ellos sensores de campo magnético.
Puertos USB	2
Frecuencia de muestreo máxima [Hz]	50000
Memoria	12 MB de memoria flash
Interfaz	Gráficos en tiempo real y cálculos instantáneos.

B. Plataforma para el mapeo del campo magnético

Con el objetivo de realizar el mapeo del campo magnético se construyó una plataforma que permita posicionar el sensor de campo magnético en puntos discretos sobre un volumen de interés. El registro del campo magnético se hizo en referencia a un sistema de ejes coordenados, con origen en el centro del sistema de Helmholtz.

La plataforma está formada por un listón horizontal de madera de 150 cm de largo. Este se encuentra montado sobre dos listones verticales de 100 cm de alto, a través de un sistema de clampeo que favorece el posicionamiento vertical (eje y) del sensor (ver Fig. 9). Ambos listones verticales están adosados a una base de aluminio, que se desliza sobre rieles del mismo material. Esto permite el movimiento a lo largo del eje axial. Estas guías o rieles, a su vez, están fijadas a soportes de madera en contacto con el piso. Por último, el sensor se acopla a una guía sobre el listón horizontal que facilita el desplazamiento sobre el eje x. De este modo, se obtienen los tres movimientos espaciales que permiten el registro discreto del CM.



FIG. 9: Vista frontal del sistema generador que permite observar la plataforma de posicionamiento del sensor de CM.

Sistema de sensado de condiciones ambientales

Para la caracterización de las condiciones ambientales durante las distintas pruebas se hizo uso de dos sistemas de sensado independientes, destinados uno a la medición de temperatura sobre el par de bobinas y en el centro del sistema de Helmholtz y el otro (una estación meteorológica) a la medición de variables ambientales internas y externas al laboratorio. En la Tabla 5 se resumen las principales características de uno y otro sistema.

TABLA 5: Características técnicas de dispositivos utilizados para la medición de variables ambientales. *Utilizan el mismo dispositivo para registro y procesamiento de datos cuyas características técnicas se presentan en la Tabla 4.

Sensores de respuesta rápida para medición de temperatura sobre las bobinas y en el centro del sistema de Helmholtz *	
Principio de funcionamiento	Termistor
Rango [°C]	-30 a +105
Exactitud [°C]	± 0.5
Resolución [°C]	0.01
Estación meteorológica para medición de variables ambientales internas y externas al laboratorio	
Sensores externos	
Distancia de transmisión en campo abierto [m]	100
Frecuencia de transmisión [MHz]	433
Rango de temperatura [°C]	-40 a +65
Resolución [°C]	0.1
Rango de medición de la humedad relativa	10% a 90%
Sensores internos	
Rango de temperatura [°C]	0 a 50
Resolución [°C]	0.1
Rango de medición de la humedad relativa	10% a 90%
Resolución medición de humedad	1%

IV. RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

Pruebas de Funcionamiento del Sistema Generador

El objetivo fue caracterizar el funcionamiento del sistema de Helmholtz. Para esto se trazó una curva de densidad de flujo magnético axial en el centro del sistema en función de la corriente suministrada a cada bobina. Este procedimiento se realizó para un CM constante (Fig. 10) así como también para un CM variable en el tiempo, con frecuencia de red (50 Hz) (Fig. 11).

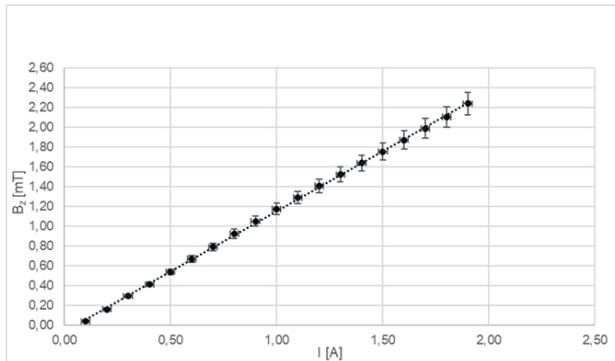


FIG. 10: Curva de funcionamiento del generador para campos magnéticos estáticos.

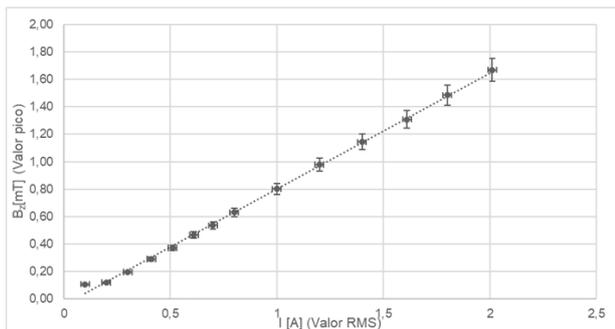


FIG. 11: curva de funcionamiento del generador para campos magnéticos variables. La gráfica muestra los valores sensados y la línea de tendencia del valor pico del campo axial en función del valor RMS de la corriente.

Pruebas de uniformidad del campo magnético

La uniformidad es una medida de que tan homogéneo es el campo magnético dentro de una región de interés. Cuanto mayor sea la uniformidad mayor es también la calidad del sistema obtenido. Estrictamente hablando, se tomó esta característica como la variación porcentual del CM axial entre el valor central y valores correspondientes a diferentes puntos espaciales. A continuación, se detallan los procedimientos llevados a cabo para cuantificar este parámetro, para diferentes condiciones.

A. Campo magnético estático

Se setó una corriente continua de 0.885 A por cada bobina, para generar un CM en el centro del sistema de 1 mT aproximadamente. Luego se midió la componente axial de la densidad de flujo magnético B_z .

Se realizaron las mediciones en un volumen de 40 cm \times 40 cm \times 40 cm cuyo centro coincide con el punto a la mitad de la distancia sobre el eje z entre ambos pares de bobinas. Los resultados se muestran en la Fig. 12.

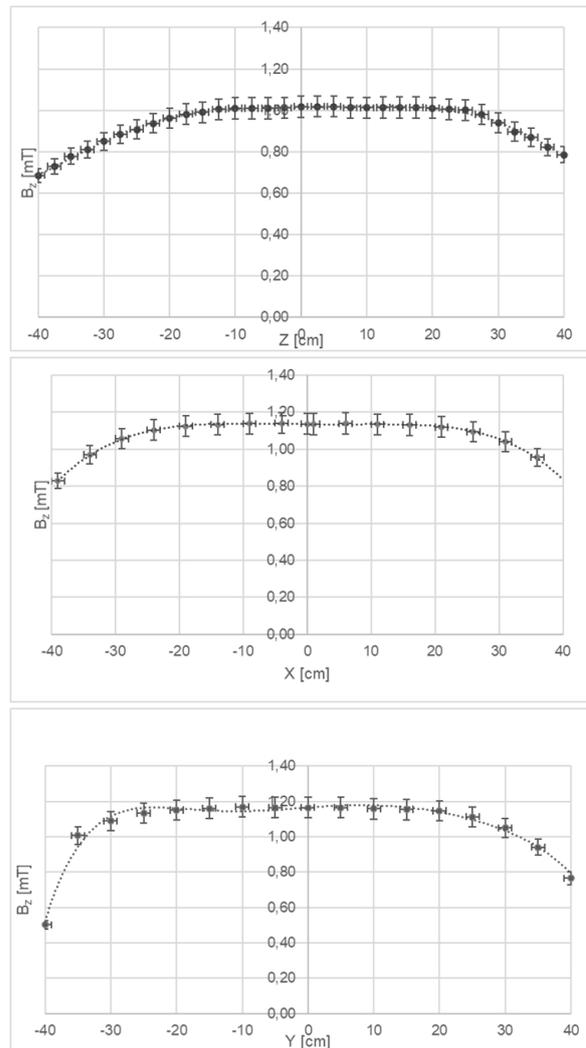


FIG. 12: Variación del CM axial estático a lo largo de cada uno de los ejes coordenados. Cada valor de CM graficado corresponde al promedio de 60 mediciones realizadas en cada punto espacial.

B. Campo magnético sinusoidal

Se setó una corriente alterna con frecuencia de red en 0.98 A (RMS) en cada par de bobinas, para generar un CM central de 1 mT (RMS) aproximadamente, debido a todo el conjunto. Luego, se midió la componente axial de la densidad de flujo magnético B_z . Cada valor de CM graficado corresponde al promedio de las mediciones de los valores pico luego de permanecer el sensor fijo sobre cada punto espacial sensado. Los resultados se presentan en la Fig. 13.

C. Uniformidad en volumen de interés

Se determinó la uniformidad de campo sobre una región de interés la cual se corresponde con el volumen ocupado por una jaula contenedora estándar para pequeños animales. Para esto, se propuso hacer mediciones del CM sobre el centro y varios puntos de un prisma de 300 mm \times 200 mm

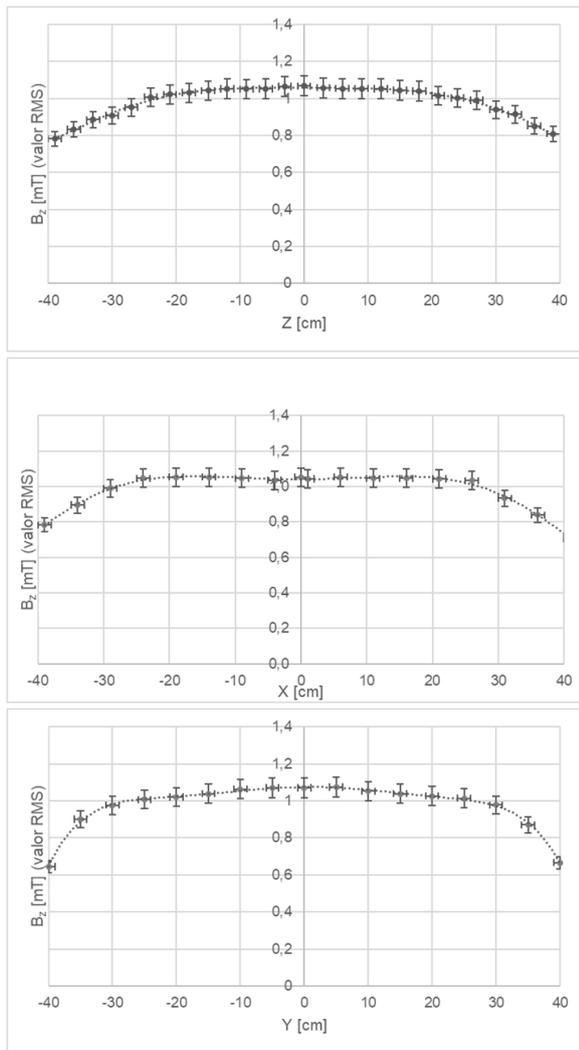


FIG. 13: Variación del CM axial generado con CA a lo largo de cada uno de los ejes coordenados.

× 140 mm, el cual se situó en el centro del sistema con su lado mayor paralelo al eje z.

Se implementaron dos protocolos para realizar estas mediciones:

■ **Protocolo uno - sin jaula**

Se generó un campo magnético sinusoidal de 50 Hz, seteándose la corriente en el sistema de alimentación para tener un flujo magnético axial central de 0.5 mT (valor RMS).

Luego se midió la componente axial de la densidad de flujo magnético B_z en 27 puntos en un volumen de 300 mm × 200 mm × 140 mm, sin jaula.

Cada valor de CM considerado para el cálculo corresponde al promedio de las mediciones de los valores RMS luego de permanecer el sensor fijo en cada punto espacial sensado.

Se repitió el mismo procedimiento para otras dos densidades de flujo magnético axial central: 1mT y 1.5 mT, valores RMS.

■ **Protocolo dos - con jaula**

Se implementó un protocolo similar al anterior para el estudio de la uniformidad del campo magnético con

una jaula para pequeños animales posicionada en el centro del sistema. El sensado de la componente axial del campo se realizó en 11 puntos en un volumen de 300 mm × 200 mm × 140 mm.

En la Tabla 6 se presentan los resultados sin jaula y en la Tabla 7 los registros en presencia de la misma.

TABLA 6: Variación porcentual del CM para diferentes intensidades de campo, sin jaula.

$B_z(0)$ [mT] (RMS)	Variación porcentual mínima [%]	Variación porcentual máxima [%]	Variación porcentual media [%]
0.5	-0.379	-3.544	-1.377
1	-0.635	-1.905	-1.077
1.5	-0.329	-1.269	-0.745

TABLA 7: Variación porcentual del CM para diferentes intensidades de campo, con jaula.

$B_z(0)$ [mT] (RMS)	Variación porcentual mínima [%]	Variación porcentual máxima [%]	Variación porcentual media [%]
0.5	-0.992	-2.553	-1.773
1	-0.494	-1.270	-0.811
1.5	-0.423	-1.269	-0.761

Pruebas de evaluación de condiciones ambientales

A. Evaluación de temperatura en condiciones de funcionamiento continuo durante doce horas

Estas pruebas tuvieron el objetivo de cuantificar en qué medida los principales parámetros ambientales pueden cambiar durante el funcionamiento del sistema generador. Para ello se dejó el sistema generador en funcionamiento continuo durante 12 hs. Se estableció una densidad de flujo magnético axial central de 2 mT (RMS), para una forma de onda sinusoidal de 50 Hz.

Se midió la temperatura cada 30 min en los siguientes puntos: centro del sistema, dentro de la jaula; sobre las bobinas, uno sobre un par y otro sobre par opuesto; en el ambiente interno del laboratorio, con estación meteorológica; en el ambiente externo al laboratorio, con estación meteorológica. Los resultados de esta prueba se presentan en la Fig. 14 y en la Fig. 15.

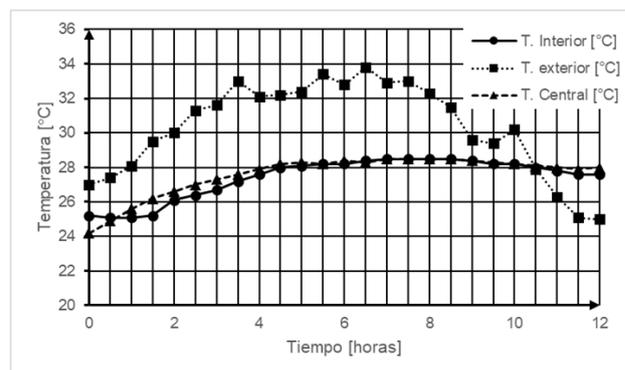


FIG. 14: Variación de la temperatura central (punto central del sistema de bobinas), exterior e interior al laboratorio en función del tiempo.

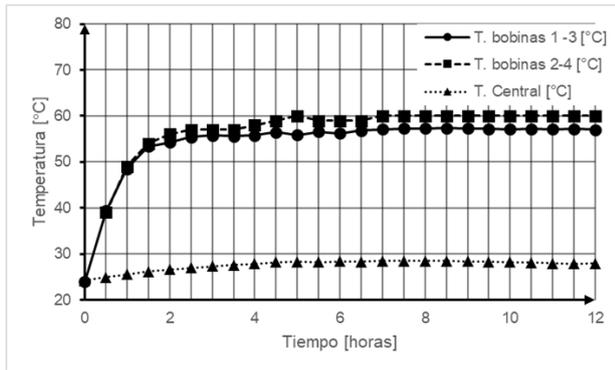


FIG. 15: Variación de la temperatura en ambos pares de bobinas en comparación con la central, en función del tiempo.

B. Prueba de seguimiento

El objetivo fue realizar un seguimiento, tanto de la uniformidad de CM como de las condiciones ambientales durante un lapso del día, durante varios días. De esta forma se hizo un monitoreo y registro de una serie de parámetros de importancia para planificar futuras experiencias. Esta prueba es la que más se asemejaría a un “setup” regular durante una experiencia in vivo. Se mantuvo el generador en funcionamiento continuo durante 4 hs al día (de 9 hs a 13 hs), durante 4 días. Previamente se seteó el sistema de alimentación para obtener una densidad de flujo magnético axial central en 2 mT (RMS), para un campo magnético sinusoidal de 50 Hz.

Se llevó a cabo el sensado de temperatura cada 1 hora en los siguientes puntos: centro del sistema, dentro de la jaula; sobre las bobinas, uno sobre un par y otro sobre el par opuesto; en el ambiente interno del laboratorio, con estación meteorológica; en el ambiente externo al laboratorio, con estación meteorológica (Fig. 16).

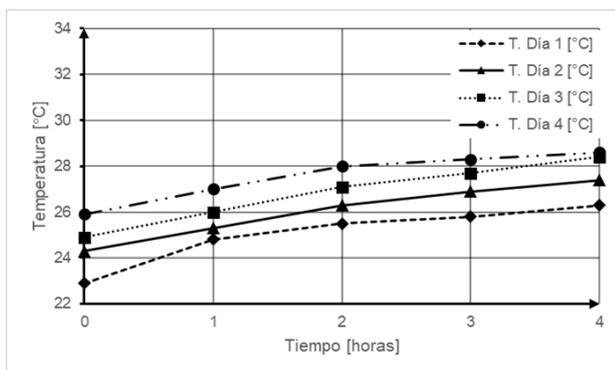


FIG. 16: Variación de la temperatura central en función del tiempo, para cada día de prueba.

Se midió también la componente axial de la densidad de flujo magnético B_z en 7 puntos dentro de un volumen de $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$, con jaula.

Las coordenadas de los siete puntos en los que se evaluó el CM se presentan en la Tabla 8. Todos los puntos se encuentran dentro del volumen correspondiente a una jaula estándar para experimentación con pequeños animales.

TABLA 8: Coordenadas de los puntos en los que se realizó la prueba de seguimiento de la uniformidad del CM.

Posición	x [cm]	y [cm]	z [cm]
1	0	0	0
2	0	15	0
3	0	-15	0
4	10	0	0
5	-10	0	0
6	0	0	7
7	0	0	-7

V. CONCLUSIONES

Pruebas de funcionamiento

De las pruebas de funcionamiento se puede observar que el sistema desarrollado posee las características lineales esperadas.

Los registros obtenidos se aproximan de manera aceptable a los valores esperables desde la teoría. Cuando se analizan las diferencias entre los mismos, para cada punto sensado, se tiene una diferencia máxima de 0.0768 mT.

Pruebas de uniformidad de campo

Para concluir a partir de los resultados de estas pruebas, resulta de utilidad práctica determinar a partir de que puntos la variación porcentual del CM es menor que el 10% (valor que surge de las especificaciones de diseño). Luego, se confeccionaron dos tablas (Tablas 9 y 10, una para cada tipo de CM) y se encontraron los puntos espaciales sobre cada eje, a partir de los cuales se cumple dicha condición.

TABLA 9: Puntos de cada eje en los que la variación porcentual del CM estático respecto al centro es menor que 10%.

Eje	Posición (+) [cm]	Variación porcentual [%]	Posición (-) [cm]	Variación porcentual [%]
x	31	-8.443	-29	-7.124
y	30	-9.871	-30	-6.609
z	30	-7.671	-22.5	-7.888

TABLA 10: Puntos de cada eje en los que la variación porcentual del CM variable respecto al centro es menor que 10%.

Eje	Posición (+) [cm]	Variación porcentual [%]	Posición (-) [cm]	Variación porcentual [%]
x	26	-1.806	-29	-5.969
y	30	-8.692	-30	-8.823
z	27	-7.378	-24	-5.618

Al analizar los datos tabulados, se puede concluir que el volumen donde la uniformidad del CM es mayor al 90% es de varias veces el de una jaula para pequeños animales ($300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$). De este modo en el momento de realizar las experiencias se podrían colocar varias jaulas en lugar de sólo una. Esto, sin dudas, resulta muy útil desde el punto de vista del diseño estadístico de los experimentos.

A partir de los datos de Tablas 6 y 7, en los que se presenta la variación porcentual del CM para diferentes intensidades de campo, con y sin jaula de experimentación colocada en el centro del sistema, se puede concluir que a medida que

umenta la intensidad de CM mejoran las condiciones de homogeneidad. Esto probablemente se deba a que a medida que se incrementa la densidad de flujo magnético, mejora la relación señal/ruido.

El hecho de que se coloque o no la jaula, no modifica las condiciones de homogeneidad. Si bien, hay pequeñas diferencias entre los valores tabulados, seguramente esto se debe al proceso de medición y/o precisión del sensor y no a la jaula en sí. Esto es esperable ya que la misma está fabricada de policarbonato, material que no posee propiedades magnéticas.

Pruebas de evaluación de condiciones ambientales

En la Fig. 14 se puede notar que la temperatura en el interior del laboratorio sigue, salvando las distancias, a la del exterior. Además, la temperatura en el centro del sistema de bobinas es prácticamente la misma que la del interior del laboratorio a lo largo del estudio.

En la Fig. 15 se observa que, si bien la temperatura de las bobinas aumenta considerablemente, la temperatura central del sistema se mantiene en los mismos valores que la del interior del laboratorio. Este dato es de suma importancia, ya que en la medida de que la jaula se encuentre en la cercanía del centro, el calor generador por las bobinas no influirá significativamente, minimizándose los riesgos de efectos debidos al estrés térmico en las muestras vivas, relacionado al calor generado por efecto Joule en las bobinas.

Las pruebas de seguimiento permiten concluir que el funcionamiento continuo del sistema no genera cambios en las condiciones ambientales que puedan afectar notoriamente a los resultados experimentales. Además, como se indicó anteriormente, la variación porcentual máxima se mantuvo constante, para todos los días en $\varepsilon = -1.882\%$.

REFERENCIAS

- [1] Y. Cui, Z. Ge, J. D. Rizak, C. Zhai, Z. Zhou, S. Gong e Y. Che. Deficits in water maze performance and oxidative stress in the hippocampus and striatum induced by extremely low frequency magnetic field exposure. *PLoS One* **7**, e32196 (2012).
- [2] K. Kitaoka, M. Kitamura, S. Aoi, N. Shimizu y K. Yoshizaki. Chronic exposure to an extremely low-frequency magnetic field induces depression-like behavior and corticosterone secretion without enhancement of the hypothalamic–pituitary–adrenal axis in mice. *Bioelectromagnetics* **34**, 43-51 (2013).
- [3] T. Balassa, P. Varró, S. Elek, O. Drozdovszky, R. Szemerszky, I. Világi y G. Bárdos. Changes in synaptic efficacy in rat brain slices following extremely low-frequency magnetic field exposure at embryonic and early postnatal age. *Int. J. Dev. Neurosci.* **31**, 724-730 (2013).
- [4] S. Kumar, S. Jain, T. Velpandian, Y. Petrovich Gerasimenko, V. D. Avelev, J. Behari, M. Behari y R. Mathur. Exposure to extremely low-frequency magnetic field restores spinal cord injury-induced tonic pain and its related neurotransmitter concentration in the brain. *Electromagn Biol. Med.* **32**, 471-483 (2013).
- [5] M. S. Celik, K. Güven, V. Akpolat, M. Z. Akdağ, M. Nazıroğlu, R. Gül-Güven, M. Y. Çelik y S. Erdoğan. Extremely low-frequency magnetic field induces manganese accumulation in brain, kidney and liver of rats. *Toxicol. Ind. Health* **31**, 576-580 (2015).
- [6] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection and others. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys.* **99**, 818-836 (2010).
- [7] B. M. Tenorio, M. B. A. Ferreira Filho, G. C. Jimenez, R. N. d. Moraes, C. A. Peixoto, R. d. A. Nogueira y V. A. d. Silva Junior. Extremely low-frequency magnetic fields can impair spermatogenesis recovery after reversible testicular damage induced by heat. *Electromagn. Biol. Med.* **33**, 139-146 (2014).
- [8] N. M. Fournier, Q. H. Mach, P. D. Whissell y M. A. Persinger. Neurodevelopmental anomalies of the hippocampus in rats exposed to weak intensity complex magnetic fields throughout gestation. *Int. J. Dev. Neurosci.* **30**, 427-433 (2012).
- [9] S. Das, S. Kumar, S. Jain, V. D. Avelev y R. Mathur. Exposure to ELF-magnetic field promotes restoration of sensorimotor functions in adult rats with hemisection of thoracic spinal cord. *Electromagn. Biol. Med.* **31**, 180-194 (2012).
- [10] S. Magdaleno-Adame, J. Olivares-Galvan, E. Campero-Littlewood, R. Escarela-Perez y E. Blanco-Brisset. Coil systems to generate uniform magnetic field volumes. Excerpt from the proceedings of the COMSOL conference **13**, 401-411 (2010).
- [11] W. G. Fano, R. Alonso y G. Quintana. El campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz y sus aplicaciones a calibración de sondas. *Elektron* **1**, 91-96 (2017).
- [12] E. L. Bronaugh. Helmholtz coils for calibration of probes and sensors: limits of magnetic field accuracy and uniformity. *Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 72-76 (1995).
- [13] A. F. R. Alvarez, E. Franco-Mejia y C. R. Pinedo-Jaramillo. Study and analysis of magnetic field homogeneity of square and circular Helmholtz coil pairs: A Taylor series approximation. *2012 VI Andean Region International Conference*, 77-80 (2012).
- [14] J. Wang, S. She y S. Zhang. An improved Helmholtz coil and analysis of its magnetic field homogeneity. *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 2175-2179 (2002).
- [15] G. B. Bell y A. A. Marino. Exposure system for production of uniform magnetic fields. *Journal of Bioelectricity* **8**, 147-158 (1989).
- [16] D. J. DeTroye y R. J. Chase. *The calculation and measurement of Helmholtz coil fields* inf. téc. (Army Research Lab Adelphi MD, 1994).
- [17] F. E. Terman. *Radio Engineers' Handbook* pag. 60 (McGraw-Hill, New York, 1943).