

Diseño, desarrollo y caracterización de un generador de CEM de frecuencia extremadamente baja para el trabajo con pequeños animales

N. J. Correa, A. A. Naudi, O. E. Di Liscia, M. C. Pérez, S. Laugero, A. Hiraldo, M. Gómez, E. Bonfils y J. Adur

Autores: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos, Ruta provincial N° 11 - Km 10, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

Contacto: jadur@ingenieria.uner.edu.ar

Resumen

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. Al final del trabajo se presentan los resultados de una prueba piloto trabajando con pequeños animales expuestos a CEM-FEB.

Palabras clave: CEM-EBF, generador, experimentos con pequeños animales

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 para 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 efectos biológicos, de campos de intensidades dentro del rango permitido por la normativa y con la posibilidad de realizar experiencias con valores más elevados.

La prueba y puesta a punto de todo el dispositivo se realizó sobre una experiencia con pequeños animales, donde se analizó el comportamiento de los mismos por medio del test de Morris luego de la exposición de CEM-FEB.

Diseño y construcción del generador de CEM-EBF

Criterios de diseño

Como premisa de diseño se establecieron los siguientes requisitos a cumplir por el sistema generador de CEM:

- Generar 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.
- 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

A partir de un análisis comparativo de distintas configuraciones de bobinas se concluyó que el sistema de Helmholtz es útil cuando se necesita un pequeño volumen de campo uniforme, permitiendo además una fácil manipulación de las muestras y control del ambiente al que se exponen las mismas, características deseables en realización al sistema a construir.

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. 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] x 200 [mm] x 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 la 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% [11-14].

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

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

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

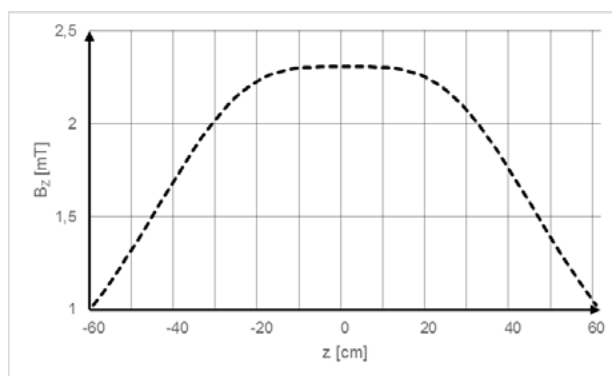


FIGURA 1: Variación de la intensidad del campo magnético a lo largo del eje z.

Es de destacar la serie de datos que se presentan en la TABLA 1.

TABLA 1

z [cm]	B _z [mT]
-15	2,285
0	2,308
15	2,285

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.

La variación porcentual de la componente axial del campo es

$$\epsilon_z = \frac{B_z(z = 0,15 \text{ m}) - B_z(z = 0)}{B_z(z = 0)} \cdot 100 = 0,996 \%$$

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] x 200 [mm] x 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 Figura 2 puede observarse el comportamiento teórico lineal del sistema dentro del rango de corrientes eléctricas que se propone para las experiencias.

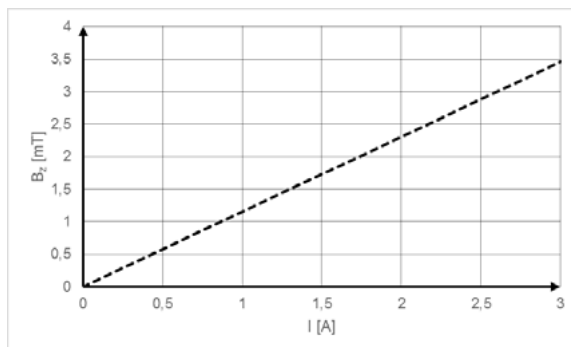


FIGURA 2: Variación de B_z para z=0 en función de la variación de corriente.

Construcción del Sistema Generador

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.

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 voltaje de alimentación a las fuentes para suministrar 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 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 (30x16 x 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 (Nz) y el número de capas (Nr) de cada bobina, obteniéndose valores de 28 [vueltas/capa] para Nz y de 11 capas para Nr.

En la Figura 3 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 $N = Nz \cdot Nr = 308$ [vueltas].

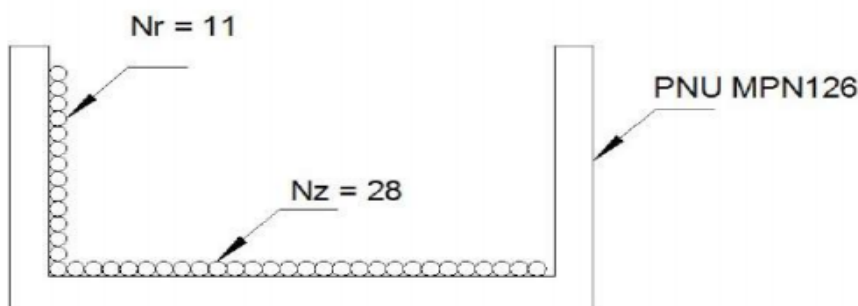


FIGURA 3: Disposición de las espiras sobre la sección libre del perfil U MPN-126

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 corrientes 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 comparando el mismo eje, quedando así definitivamente conformado el sistema de bobinas de Helmholtz (Figura 4).



FIGURA 4: Imagen del sistema de dos pares de bobinas montadas en su soporte.

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 con las siguientes características técnicas:

- Voltaje de entrada: 220 [V]
- Voltaje de salida: ajustable 0 - 250 [V]
- Intensidad máxima: 6 [A]
- Potencia aparente: 1,5 [KVA]

La conexión de las bobinas de cada par se realizó en paralelo, con los devanados de un mismo par conectados a un autotrafo.

La generación de campos magnéticos estáticos se realizó con fuentes regulables de alta precisión de corriente continua, con las siguientes características técnicas:

- Incluye dos fuentes regulables, independientes. Con capacidad de funcionamiento individual, serie y paralelo
- Voltaje de entrada: 220 [V]
- Voltaje de salida (individual): ajustable 0 - 30 [V]
- Intensidad máxima (individual): ajustable 0 - 3 [A]

Caracterización del Sistema de Medición

Sistema de sensado del Campo magnético

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 que se describen a continuación:

Sensor de Campo Magnético 2D:

- Dos elementos de sensado por efecto Hall, orientados perpendicularmente entre sí. Entrega simultánea de ambos valores de campo.
- Rango: +/- 1000 [Gauss].
- Precisión: 5% de la lectura, a 25 [oC], 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%.
- Máxima velocidad de muestreo: 1000 [Hz].

Interfaz digital:

Dispositivo que permite registrar, procesar y analizar información.

- Completamente funcional, sin necesidad de conexión a PC. También trabaja como una interfaz entre los sensores y la PC, cuando se opera desde software compatible.
- Puerto para sensores: 8 en total; para sensor de sonido, de voltaje, 2 de temperatura y 4 abiertos, para cualquier sensor (entre ellos el sensor de campo magnético descrito previamente).
- Dos puertos USB
- Máxima tasa de muestreo: 50.000 [Hz].
- Gráficos en tiempo real y cálculos instantáneos
- Memoria: 12 MB de memoria flash.

Cámara de cero Gauss:

- Cámara metálica de doble pared, con alta permeabilidad. Dos cilindros sin costura de 0,030 [pulgadas] de espesor, de una aleación de Ni-Mo tratada térmicamente, con una permeabilidad relativa a 40 [Gauss] de 50.000.
- Permite tarar el sensor.
- Largo interno 88 [mm]. Diámetro interno 14,4 [mm].

Programa de recopilación, análisis y presentación de datos:

- Compatible con la interfaz digital utilizada.
- Puede mostrar los datos de varias formas, por ejemplo: dígitos, instrumento analógico, gráficos u osciloscopio.

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 (Figura 5).

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. 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.



FIGURA 5: Vista frontal del sistema generador que permite observar la plataforma de posicionamiento del sensor de CM.

Sistema de sensado en condiciones ambientales

Medición de temperatura sobre el par de bobinas y en el centro del sistema

Se realizó mediante sensores de respuesta rápida, con las siguientes especificaciones técnicas:

- Principio de funcionamiento: termistor.
- Rango: - 30 a + 105 [oC].
- Exactitud: ± 0,5 [oC].
- Resolución: 0,01 [oC].

Medición de temperatura, humedad y presión interna y externa al laboratorio

Se realizó con una estación metereológica con las siguientes especificaciones técnicas:

Sensores externos

- Distancia de transmisión en campo abierto 100 [m]. Frecuencia: 433 [MHz].
- Rango de temperatura: -40 [oC] a +65 [oC].
- Resolución: 0,1 [oC].
- Rango de medición de la humedad relativa: 10% a 90%.

Sensores internos

- Rango de temperatura: 0 [oC] a +50 [oC].
- Resolución: 0,1 [oC].
- Rango de medición de humedad relativa: 10% a 90%.
- Resolución: 1%.

Resultados

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 (Figura 6) así como también para un CM variable en el tiempo, con frecuencia de red (50 [Hz]) (Figura 7).

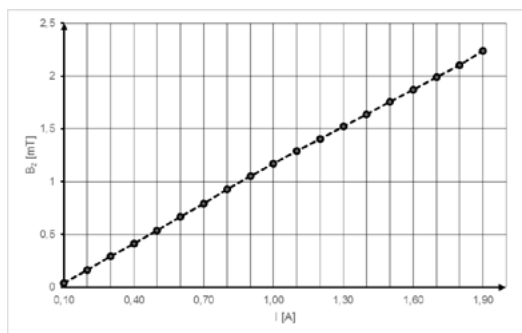


FIGURA 6: Curva de funcionamiento del generador para campos magnéticos estáticos

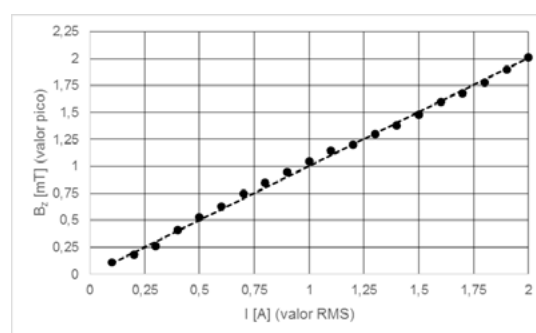


FIGURA 7: curva de funcionamiento del generador para campos magnéticos variables. La gráfica muestra los valores sensados y la línea de tendencia del valor pico del campo axial en función del valor RMS de la corriente.

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.

Campo magnético estático.

Se seteó 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 aplicó el siguiente protocolo para realizar las mediciones:

- Medición de la componente axial de la densidad de flujo magnético B_z .
- Frecuencia de muestro de 1 [Hz]. Cada valor de CM tabulado y luego graficado corresponde al promedio de 60 mediciones realizadas en cada punto espacial.
- Se realizaron las mediciones en un volumen de 40 [cm] x 40 [cm] x 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 Figura 8.

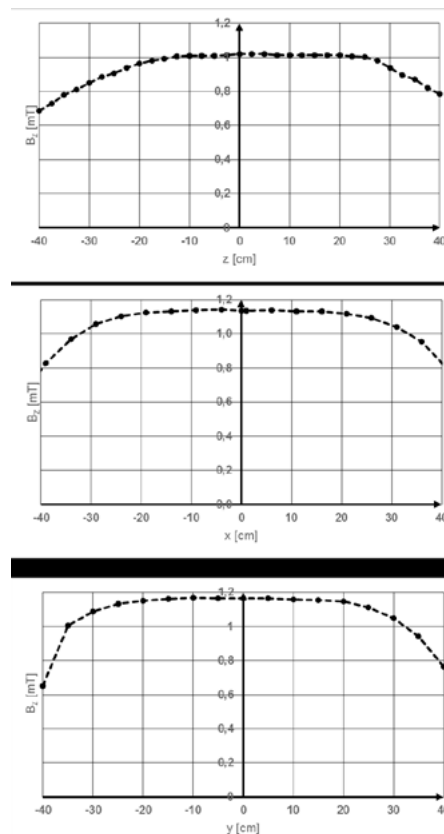


FIGURA 8: Variación del CM axial estático a lo largo de cada uno de los ejes coordenados

Campo magnético sinusoidal

Se seteó una corriente alterna con frecuencia de red en 0,9 [A] (RMS), para generar un CM central de 1 [mT] (pico) aproximadamente. Luego, se aplicó el siguiente protocolo para realizar las mediciones:

- Medición de la componente axial de la densidad de flujo magnético B_z .
- Frecuencia de muestro de 250 [Hz]. Cada valor de CM tabulado y luego graficado corresponde al promedio de las mediciones de los valores pico luego de permanecer el sensor fijo sobre cada punto espacial sentido.

Los resultados se presentan en la Figura 9.

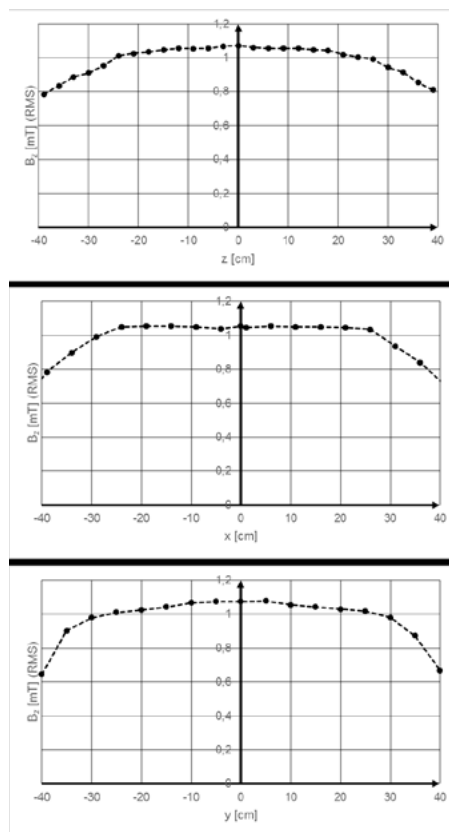


FIGURA 9: Variación del CM axial generado con CA a lo largo de cada uno de los ejes coordenados

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] x 200 [mm] x 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

- Campo magnético sinusoidal de 50 [Hz].
- Frecuencia de muestro de 250 [Hz]. Cada valor de CM tabulado y luego graficado corresponde al promedio de las mediciones de los valores pico luego de permanecer el sensor fijo en cada punto espacial sentido.
- Medición de la componente axial de la densidad de flujo magnético B_z .
- Sensado de 27 puntos en un volumen de 300 [mm] x 200 [mm] x 140 [mm], sin jaula.
- Mapeo para tres densidades de flujo magnético axial central: 0,5 [mT], 1 [mT] y 1,5 [mT], valores RMS.

Protocolo dos - con jaula

- Campo magnético sinusoidal de 50 [Hz].
- Frecuencia de muestro de 250 [Hz]. Cada valor de CM tabulado y luego graficado corresponde al promedio de las mediciones de los valores pico luego de permanecer el sensor fijo en cada punto espacial sentido.
- Medición de la componente axial de la densidad de flujo magnético B_z .

- Sensado de 11 puntos en un volumen de 300 [mm] x 200 [mm] x 140 [mm], con jaula.
- Mapeo para tres densidades de flujo magnético axial central: 0,5 [mT], 1 [mT] y 1,5 [mT], valores RMS.
- El mapeo se hizo en forma manual, sin la plataforma de sensado, debido al impedimento físico de la jaula. Se priorizó medir algunos puntos de referencia y aquellos más cercanos a las paredes de la jaula.

En la TABLA 2 se presentan los resultados sin jaula y en la TABLA 3 los registros en presencia de la misma:

TABLA 2: 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 3: 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

Evaluación de temperatura en condiciones de funcionamiento continuo durante doce horas

Estas pruebas tuvieron el objetivo de cuantificar en que medida los principales parámetros ambientales pueden cambiar durante el funcionamiento del sistema generador. Para ello se implementó el siguiente protocolo:

- Funcionamiento continuo del sistema generador durante 12 [hs].
- Seteo de la densidad de flujo magnético axial central en 2 [mT] (RMS).
- Campo magnético sinusoidal de 50 [Hz].
- Medición de 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 Figura 10 y en la Figura 11.

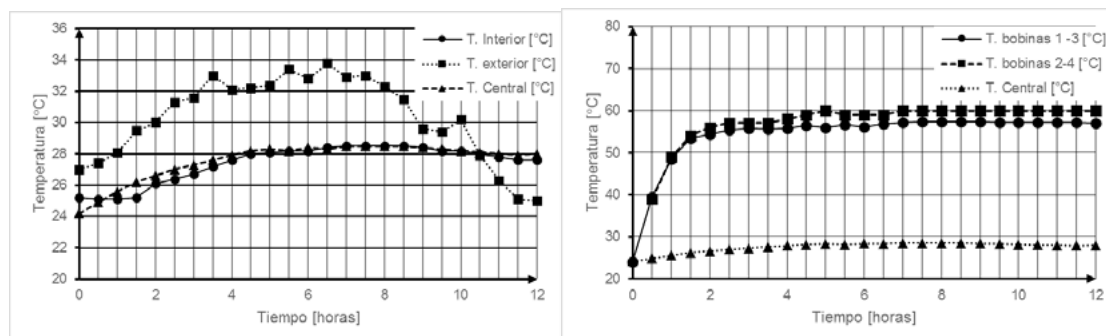


FIGURA 10: Variación de la temperatura central (punto central del sistema de bobinas), exterior e interior al laboratorio en función del tiempo.

FIGURA 11: Variación de la temperatura en ambos pares de bobinados en comparación con la central, en función del tiempo.

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. El protocolo empleado para tal propósito fue el siguiente:

- Funcionamiento continuo del sistema generador durante 4 [hs] al día (de 9 [hs] a 13 [hs]), durante 4 días.
- Seteo de la densidad de flujo magnético axial central en 2 [mT] (RMS).
- Campo magnético sinusoidal de 50 [Hz].
- 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.
- Medición de la componente axial de la densidad de flujo magnético B_z , en 7 puntos dentro de un volumen de 300 [mm] x 200 [mm] x 140 [mm], con jaula.
- Frecuencia de muestro de 250 [Hz]. Cada valor de CM tabulado corresponde al promedio de las mediciones de los valores pico luego de permanecer el sensor fijo en cada punto espacial sensado.

Las coordenadas de los siete puntos en los que se evaluó el CM se presentan en la TABLA 4. Todos los puntos se encuentran dentro del volumen correspondiente a una jaula estándar para experimentación con pequeños animales.

TABLA 4: Coordenadas de los puntos en los que se realizó la prueba de seguimiento de la uniformidad del campo magnético.

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

Conclusiones sobre el generador de CEM-FEB

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 (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 5 y 6).

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 [mm] x 200 [mm] x 140 [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.

TABLA 5: 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 6: 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

A partir de los datos de TABLA 2 y TABLA 3, 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:

- A medida que aumenta 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 Figura 10 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.

- De la Figura 11 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 generado por las bobinas no influirá significativamente, minimizándose los riesgos de efectos debidos al estrés térmico 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 $\varepsilon = -1,882\%$.

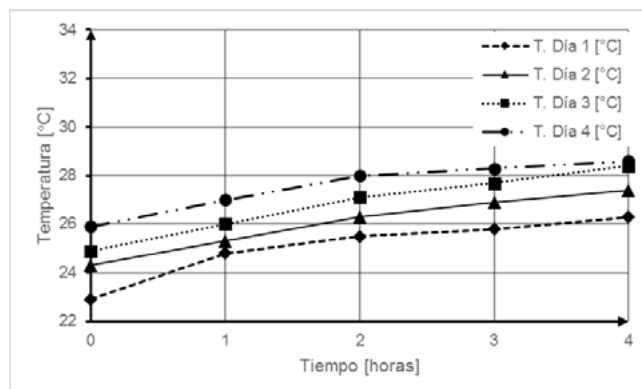


FIGURA 12: Variación de la temperatura central en función del tiempo, para cada día de prueba.

Pruebas de evaluación con pequeños animales

Se dividieron los animales en dos grupos: un grupo control (3 ratones) y un grupo de experimentación (4 ratones), el cual fue sometido a campo magnético. Durante el primer día de la experiencia, los ratones fueron entrenados en el tanque de Morris. En los siguientes 3 días se colocaron los ratones del grupo control (3 horas/día, 9 a 12 hs.) en la jaula entre las bobinas, sin someterse a campo magnético. Y se repitió el procedimiento con el grupo de experimentación (3 horas/día, 13 a 16 hs.) con un campo electromagnético de 1.7mT y 50Hz. En el cuarto día, inmediatamente finalizado el período de exposición, se realizó una segunda prueba en el laberinto de Morris con ambos grupos de ratones. Finalmente se compararon los resultados obtenidos en la prueba del grupo control vs el grupo de experimentación.

Primer día: Entrenamiento de los ratones

Se entrenaron los ratones en el tanque. Se colocó el ratón sobre la base por un minuto. Luego se colocó el ratón en el tanque con agua en un lugar al azar y se esperó a que éste encuentre la base. Si pasado 1 minuto el ratón no encontró la base, entonces se lo colocó en la base durante 1 minuto. Si el ratón llega a la base, se lo hace permanecer allí durante 1 minuto. Pasado el tiempo en la base, se retiró el ratón y se lo colocó en la batea al azar. Este procedimiento se repitió 10 veces.

Días de exposición:

De mañana (9 a 12hs) se colocó el grupo de control en la jaula y esta se ubicó entre las 2 bobinas durante 3 horas continuas sin campo. Luego se colocó el grupo de experimentación (13 a 16 hs) durante 3 horas continuas sometido a un campo electromagnético de 1.7mT y 50Hz. Este procedimiento se repitió durante 3 días.

Cuarto Día: Observación del comportamiento

Terminado el período de exposición, se procedió a realizar la prueba del test de Morris a cada ratón de la siguiente forma.

- Se colocó el ratón sobre la base por un minuto.
- Luego se colocó en el tanque con agua en un lugar al azar y se esperó a que éste encuentre la base.
- Si pasados 2 minutos el ratón no encuentra la base, entonces se lo coloca en la base durante 1 minuto.
- Si el ratón llega a la base, se lo hace permanecer allí durante 1 minuto.
- Pasado el tiempo en la base, se retira el ratón y se lo coloca en la batea al azar.
- Este procedimiento se repitió 3 veces.
- Se registraron en los videos las trayectorias de las 3 pruebas realizadas con los 7 ratones.

Procesamiento de los videos

Para cada una de las 3 trayectorias obtenidas para cada ratón se determinó:

- Si llegó o no a la base.
- Tiempo de la trayectoria (seg)
- Distancia recorrida (cm)
- Velocidad promedio (cm/s)

En algunos casos, las trayectorias no se pudieron determinar debido al tamaño del archivo y a problemas relacionados con el movimiento brusco de la cola del ratón que producía una pérdida de la marca del mismo y velocidades no representativas del desplazamiento del cuerpo. A continuación se presentan los resultados para las diferentes pruebas realizadas con cada animal

Ratón 1

Prueba	Llegó a la base (si/no)	Tiempo (seg)	Distancia (cm)	Velocidad Promedio (cm/seg)
Trayectoria 1	Si	10,67	9,14	13,181
Trayectoria 2	Si	5,5	124,12	18,74
Trayectoria 3	Si	44,9		

Ratón 2

Prueba	Llegó a la base (si/no)	Tiempo (seg)	Distancia (cm)	Velocidad Promedio (cm/seg)
Trayectoria 1	Si	67,65	1089,90	15,09
Trayectoria 2	Si	20,44	265,86	12,33
Trayectoria 3	Si	43,2		

Ratón 3

Prueba	Llegó a la base (si/no)	Tiempo (seg)	Distancia (cm)	Velocidad Promedio (cm/seg)
Trayectoria 1	Si	6,50	146,75	24,42
Trayectoria 2	Si	10,30	259,74	29,75
Trayectoria 3	Si	8,07	224,49	27,05

Ratón 4

Prueba	Llegó a la base (si/no)	Tiempo (seg)	Distancia (cm)	Velocidad Promedio (cm/seg)
Trayectoria 1	No	-		
Trayectoria 2	No	-		
Trayectoria 3	No	-		

Ratón 5

Prueba	Llegó a la base (si/no)	Tiempo (seg)	Distancia (cm)	Velocidad Promedio (cm/seg)
Trayectoria 1	Si	18,97	261,58	12,64
Trayectoria 2	Si	7,27	136,58	21,62
Trayectoria 3	si	5,90	135,37	21,76

Ratón 6

Prueba	Llegó a la base (si/no)	Tiempo (seg)	Distancia (cm)	Velocidad Promedio (cm/seg)
Trayectoria 1	si	69,62	1242,04	20,68
Trayectoria 2	si	81,3		
Trayectoria 3	si	13,9		

Ratón 7

Prueba	Llegó a la base (si/no)	Tiempo (seg)	Distancia (cm)	Velocidad Promedio (cm/seg)
Trayectoria 1	si	30,41	546,62	16,94
Trayectoria 2	si	27,67	611,70	20,44
Trayectoria 3	si	54,5	217,50	20,20

A continuación se presentan en forma demostrativa las trayectorias de un ratón del grupo control (Figura 13) y uno del grupo de experimentación (Figura 14), teniendo como referencia el centro y la circunferencia del tanque. El círculo pequeño en azul representa la base. Del análisis de las mismas se pueden observar las diferencias en los caminos recorridos, apreciándose un camino más recto/simple para los ratones control y uno más tortuoso/curvo para el caso del ratón expuesto.

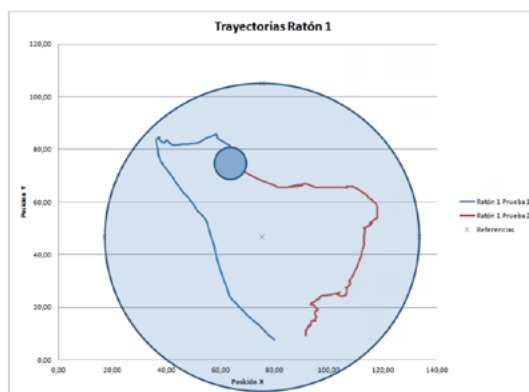


FIGURA 13

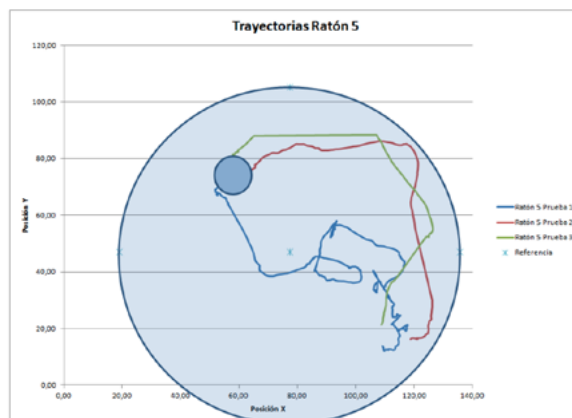


FIGURA 14

Conclusiones

Las diferentes pruebas de control realizadas sobre el sistema de espiras respondieron correctamente, no detectándose cambios bruscos de temperatura ni vibraciones perturbadoras. El sistema está trabajando según lo diseñado y planificado, pudiendo variar la frecuencia entre 0 y 100 Hz y entregar valores estables de campo magnético hasta 2 mT en un volumen equivalente a dos cajas portadora de animales.

Todo el sistema puede ser utilizado por varias horas en forma continua y durante varios días, sin que se modifiquen las condiciones de campo; ni se afecten los valores de temperatura y humedad en el volumen donde se encuentran los animales.

En relación a la experimentación con pequeños animales; todo el sistema se comportó adecuadamente y respetando los estándares para este tipo de trabajo. El primer protocolo de exposición testeado, limitado en tiempo, brindo resultados alentadores. Puesto que es la primera vez, según nuestra experiencia, que se realizan este tipo de estudios en el país. El experimento del laberinto de Morris, permitió obtener los primeros indicios en relación a los efectos producidos por los campos. No obstante, otros experimentos y protocolos de experimentación deberán ser testeados para poder inferir que los campos son los causales de la pérdida en la orientación de los animales.

Referencias

- 1- CUI, Y., Z. Ge, J.D. Rizak, C. Zhai, Z. Zhou, S. Gong y 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(5) (2012).
- 2- KITAOKA K., Kitamura M., Aoi S. an, Shimizu N. y Yoshizaki K., "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(1), 43-51 (2013).
- 3- BALASSA T., Varró P., Elek S., Drozdovszky O., Szemerszky R., Világi I. y Bárdos G., "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(8), 724-730 (2013).
- 4- KUMAR S., Jain S., Velpandian T., Petrovich Gerasimenko Y., Avelev V. D, Behari J., Behari M. y Mathur R., "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(4), 471-483 (2013).
- 5- CELIK M.S., Guven K., Akpolat V., Akdag M.Z., Naziroglu M., Gul-Guven R., Celik M.Y. y Erdogan S., "Extremely low-frequency magnetic field induces manganese accumulation in brain, kidney and liver of rats", *Toxicol Ind Health*, 31(6), 576-580 (2013).
- 6- NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP), International Commission on: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz), *Health Physics*, 99(6), 818-836 (2010).
- 7- TENORIO B.M., Ferreira Filho G. C., Jimenez R.N., Peixoto C.A., Nogueira Rde A. y da Silva Junior V.A., "Extremely low-frequency magnetic fields can impair spermatogenesis recovery after reversible testicular damage induced by heat", *Electromagn Biol Med*, 32(2), 139-146 (2014).
- 8- FOURNIER, N.M., Mach Q.H., Whissell P.D. y Persinger M.A., "Neurodevelopmental anomalies of the hippocampus in rats exposed to weak intensity complex magnetic fields throughout gestation", *Int J Dev Neurosci*, 30(6), 427-433 (2012).
- 9- DAS S., Kumar S., Jain S., Avelev V. D. y Mathur R., "Exposure to ELF- magnetic field promotes restoration of sensori-motor functions in adult rats with hemisection of thoracic spinal cord.", *Electromagn Biol*

Med, 31(3), 180–194 (2012)

- 10- MAGDALENO-Adame S., Olivares-Galvan J. C., Campero-Littlewood E., Escarela-Perez R. y Blanco-Briset E., "Coil Systems to Generate Uniform Magnetic Field Volumes", Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, (2010).
- 11- RESTREPO-ALVAREZ A. F., Franco-Mejia E. y Pinedo-Jaramillo C. R., "Study and Analysis of Magnetic Field Homogeneity of Square and Circular Helmholtz Coil Pairs: A Taylor Series approximation", ResearchGate (2012).
- 12- WANG J., She S. y Zhang S., "An improved Helmholtz coil and analysis of its magnetic field homogeneity", Review of Scientific Instruments, 73(5), 2175–2179 (2002).
- 13- BELL G. B. y Marino A. A., "Exposure system for production uniform magnetic fields", Journal of Bioelectricity, 8(2), 147–158 (1989).
- 14- DETROYE D. J. y Chase R. J., "The Calculation and Measurement of Helmholtz Coil Fields", ARMY RESEARCH LABORATORY (1994).

PID 6158

Denominación del Proyecto

Diseño, desarrollo, e implementación de un generador de campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja. Experimentación en trabajos con pequeños animales

Director

ADUR, Javier

Codirector

NAUDI, Andrés

Unidad de Ejecución

Facultad de Ingeniería

Cátedras

Radiaciones No Ionizantes; Electricidad y Magnetismo y Electrónica no Lineal

Dependencia

Universidad Nacional de Entre Ríos

Contacto

jadur@ingenieria.uner.edu.ar

Integrantes del proyecto

Correa, N. J.; Di Liscia, O. E.; Pérez, M. C.; Laugero, S.; Hiraldo, A.; M. Gómez; Bonfils, E.

Fechas de iniciación y de finalización efectivas

10/09/2015 y 09/03/2019

Aprobación del Informe Final por Resolución CS N° 084/19 (16/05/2019)