

PRESENTACIÓN DE TRABAJO COMPLETO

Ingeniería y Tecnología

Desarrollo de una jaula de Helmholtz para la reproducción del campo geomagnético en pruebas de nanosatélites

Autor: Ozuna, Guillermo; guilleozuna@fpuna.edu.py

Coautor(es): Cárdenas, Francisco

Orientador/a: Manabe, Ariel; Quiñonez, Ever; Silva, Norma;

amanabe@pol.una.py; ever.qg@pol.una.py; norma.silva@pol.una.py

Facultad Politécnica

Resumen

La validación de sistemas de determinación y control de actitud en nanosatélites requiere reproducir en laboratorio condiciones magnéticas representativas del entorno geomagnético en órbita terrestre baja (LEO). En Paraguay, la limitada infraestructura para la calibración y validación de sensores magnéticos espaciales representa un desafío para el desarrollo tecnológico de nanosatélites. En este contexto, el objetivo de esta investigación fue diseñar, construir y validar una jaula de Helmholtz de tres ejes ortogonales capaz de generar campos magnéticos controlados para la simulación del campo geomagnético terrestre, orientada a la calibración de sensores magnéticos y pruebas funcionales de nanosatélites de hasta 3U (10 cm × 10 cm × 30 cm). La metodología incluyó el diseño electromagnético y mecánico de una estructura cúbica de 1,00 m × 1,05 m × 1,10 m, conformada por tres pares de bobinas ortogonales de 60, 63 y 66 espiras, respectivamente, así como la implementación de una etapa de alimentación y control basada en fuentes programables DPS5005 e inversión automática mediante una configuración tipo puente H implementada con relés y una interfaz de control y adquisición de datos en lazo abierto. El desempeño se caracterizó mediante un magnetómetro de referencia RM3100, efectuando mediciones en 325 puntos distribuidos dentro de un volumen evaluado de 39 cm × 39 cm × 10 cm. Los resultados evidenciaron la generación de campos magnéticos de hasta $\pm 100 \mu\text{T}$ en los ejes X e Y, y $\pm 92 \mu\text{T}$ en el eje Z, cubriendo el rango típico del campo geomagnético terrestre ($\pm 25 \mu\text{T}$ - $\pm 65 \mu\text{T}$). Asimismo, se obtuvo una uniformidad espacial de 15.210 cm^3 dentro de una tolerancia de $\pm 5 \%$, un error promedio cercano al 1,08 %, una desviación máxima de 2,15 % y una relación lineal entre corriente y campo magnético con coeficientes de determinación superiores a $R^2 > 0,9999$. Se concluyó que la jaula desarrollada constituyó una plataforma adecuada para la calibración de magnetómetros, validación experimental de sistemas de orientación de nanosatélites y estandarización de procedimientos de operación y calibración.

Palabras clave: jaula de Helmholtz, nanosatélites, calibración magnetométrica

Introducción

El desarrollo de nanosatélites ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas debido a la reducción de costos de fabricación, menores tiempos de desarrollo y versatilidad para aplicaciones científicas, tecnológicas y educativas. Particularmente, el estándar CubeSat ha impulsado el diseño de plataformas satelitales compactas destinadas a misiones de observación terrestre, telecomunicaciones, experimentación científica y validación tecnológica (California Polytechnic State University, 2020; National Aeronautics and Space Administration, 2024). En este contexto, uno de los subsistemas de mayor relevancia corresponde al sistema de determinación y control de actitud (Attitude Determination and Control System, ADCS), responsable de estimar y regular la orientación del satélite durante su operación orbital (Markley & Crassidis, 2014).

Dentro de los sistemas de determinación de actitud, los magnetómetros constituyen sensores fundamentales debido a que permiten medir el campo magnético terrestre y emplear esta información para estimar la orientación del satélite respecto a un sistema de referencia orbital. Asimismo, el control de actitud puede realizarse mediante actuadores magnéticos, conocidos como magnetorquers, los cuales interactúan con el campo geomagnético terrestre para generar momentos de control orientados a modificar la actitud del satélite

(Markley & Crassidis, 2014). En consecuencia, la precisión de los sensores magnéticos adquiere un papel crítico, ya que errores en la medición del campo pueden afectar directamente el desempeño de los algoritmos de orientación y control.

Los nanosatélites que operan en órbita baja terrestre (Low Earth Orbit, LEO) se encuentran expuestos a variaciones continuas del campo magnético terrestre, cuya intensidad y dirección dependen de parámetros como altitud, inclinación orbital y posición geográfica (Alken, Thébault, & Beggan, 2021). Por esta razón, la calibración y validación de sensores magnéticos bajo condiciones representativas del entorno espacial constituyen etapas esenciales durante el desarrollo de misiones espaciales. En este sentido, las jaulas de Helmholtz representan una alternativa ampliamente utilizada para la generación controlada de campos magnéticos uniformes en laboratorio, permitiendo reproducir condiciones equivalentes a las observadas en órbita y facilitando la validación experimental de sensores y sistemas ADCS (da Silva, Ishioka, Cappelletti, Battistini, & Borges, 2019).

En Paraguay, la limitada disponibilidad de infraestructura experimental orientada a la calibración y validación de sensores magnéticos espaciales representa una restricción para el desarrollo y ensayo de tecnologías asociadas a nanosatélites. La

ausencia de plataformas locales para reproducir condiciones geomagnéticas controladas dificulta la validación experimental de subsistemas de orientación antes de su implementación en entornos orbitales.

En este contexto, el presente trabajo propone el diseño, construcción y validación de una jaula de Helmholtz triaxial orientada a la calibración de sensores magnéticos y a la reproducción controlada del campo geomagnético terrestre, brindando soporte directo a la misión GUARANISAT-2 y a futuros nanosatélites de hasta 3U.

El sistema integra un magnetómetro RM3100 como instrumento bajo prueba (representativo del hardware de vuelo), junto con una arquitectura de alimentación, control y adquisición de datos. Esta infraestructura está complementada con algoritmos de propagación de trayectorias basados en elementos orbitales de dos líneas (TLE) y el Modelo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF), permitiendo ejecutar simulaciones dinámicas tipo Hardware-in-the-Loop (HWIL) para reproducir con alta fidelidad las condiciones magnéticas representativas de la órbita baja terrestre

Objetivos

Objetivo general:

- Desarrollar una jaula de Helmholtz triaxial para la simulación del entorno geomagnético LEO como infraestructura de soporte para

programas espaciales en Paraguay.

Objetivos específicos:

- Determinar las dimensiones y disposición óptima de las bobinas para generar un campo magnético uniforme adecuado para pruebas de nanosatélites de hasta 3U.
- Diseñar e implementar el sistema de alimentación y control de la jaula de Helmholtz para la generación regulada de campos magnéticos en los tres ejes ortogonales.
- Diseñar e implementar un sistema de medición y adquisición de datos del campo magnético, incluyendo herramientas de monitoreo y registro experimental.
- Caracterizar experimentalmente la relación entre corriente aplicada y campo magnético generado, evaluando linealidad, uniformidad espacial e independencia entre ejes.
- Verificar experimentalmente la capacidad del sistema para reproducir condiciones magnéticas representativas de órbita baja terrestre (LEO) mediante trayectorias obtenidas a partir de TLE y el modelo geomagnético IGRF.
- Elaborar un manual para la operación de la jaula de Helmholtz y la calibración del sistema.

Materiales y Métodos

Diseño electromagnético y mecánico de la jaula

El sistema desarrollado fue diseñado para reproducir perfiles magnéticos orbitales mediante una jaula de Helmholtz triaxial orientada a pruebas de nanosatélites. El procedimiento inicia con el procesamiento de elementos orbitales TLE (Two-Line Element) de satélites reales, utilizados para propagar la órbita y estimar la posición del satélite a lo largo del tiempo. A partir de estos parámetros orbitales, se empleó el modelo geomagnético IGRF (International Geomagnetic Reference Field) para calcular las componentes del campo magnético terrestre (B_x , B_y y B_z) esperadas sobre la trayectoria orbital.

Dado que el sistema no contó con un magnetómetro patrón de alta precisión como referencia absoluta, se adoptó la combinación de los modelos TLE-IGRF como referencia teórica del campo magnético orbital esperado. De esta manera, las consignas generadas a partir de dichos modelos fueron utilizadas como base de comparación para evaluar el desempeño del sistema y la capacidad de reproducción del perfil magnético deseado.

Posteriormente, los datos magnéticos de referencia fueron procesados en una computadora mediante una interfaz de control desarrollada en Python, donde se 15 210 de calibración magnética:

$$B_{corr} = K * (B_{raw} - b)$$

donde K representa la matriz de calibración

del sensor y b el vector de sesgo (bias), permitiendo corregir errores de escala, desalineación y offset del magnetómetro utilizado.

El sistema de control estuvo conformado por tres fuentes programables DPS5005, una por eje, encargadas de suministrar la corriente requerida para generar el campo magnético deseado. Debido a la necesidad de invertir el sentido de circulación de corriente en las bobinas, se implementó un sistema de relés configurados en modo puente H, controlados mediante un microcontrolador, permitiendo establecer polaridades positivas y negativas de manera independiente en cada eje de la jaula.

La planta experimental consistió en una jaula de Helmholtz triaxial de geometría cuadrada, dimensionada a partir de la Ley de Biot-Savart para bobinas cuadradas, con el objetivo de maximizar la uniformidad del campo magnético en la región central de ensayo. La estructura mecánica fue construida utilizando perfiles de aluminio, mientras que las bobinas fueron devanadas con alambre de cobre esmaltado, distribuidas en tres pares ortogonales correspondientes a los ejes X, Y y Z.

Para la medición del campo magnético generado se empleó un magnetómetro RM3100, encargado de registrar las componentes del campo en tiempo real dentro de la región útil de la jaula. Los datos adquiridos fueron transmitidos inalámbricamente mediante módulos XBee

hacia la computadora de control, permitiendo la retroalimentación, almacenamiento y análisis comparativo entre el campo magnético de referencia calculado por el modelo TLE-IGRF y el campo efectivamente generado por el sistema.

La jaula de Helmholtz fue diseñada para la generación controlada de campos magnéticos uniformes en tres ejes ortogonales (X, Y, Z), permitiendo la reproducción de condiciones magnéticas representativas del entorno geomagnético terrestre observado en órbita baja (LEO). La configuración implementada se basó en tres pares de bobinas dispuestas ortogonalmente entre sí, posibilitando la generación independiente de componentes del campo magnético en cada eje espacial y la reproducción vectorial de trayectorias magnéticas.

Los pares de bobinas fueron montados de forma concéntrica y anidada, de modo que el par de menor dimensión se ubicó en el interior de los pares de mayor tamaño. Las dimensiones características de los pares de bobinas fueron de 1,00 m, 1,05 m y 1,10 m, respectivamente, permitiendo conformar una estructura triaxial compacta adecuada para la generación independiente de campos magnéticos controlados. El dimensionamiento de la geometría fue realizado considerando el volumen útil requerido para la evaluación de nanosatélites de hasta 3U, así como la necesidad de mantener una región central

con elevada uniformidad espacial del campo magnético.



Figura 1 - Implementación física de la jaula de Helmholtz triaxial compuesta por tres pares de bobinas ortogonales anidadas.

La estructura mecánica fue construida utilizando perfiles de aluminio, seleccionados por su rigidez estructural, facilidad de ensamblaje y baja interferencia magnética, permitiendo además la integración de los subsistemas electrónicos, fuentes de alimentación y elementos de medición.

La configuración electromagnética de la jaula se estableció mediante tres pares de bobinas correspondientes a los ejes X, Y, Z constituidas por 60, 63 y 66 espiras, respectivamente. La intensidad del campo magnético generado por una configuración ideal de bobinas de Helmholtz puede aproximarse mediante:

$$B = \frac{8\mu_0 N I L^2}{\pi(L^2 + d^2) \sqrt{2L^2 + d^2}}$$

donde (B) corresponde al campo magnético generado en el centro, (μ_0) representa la permeabilidad magnética del vacío, (N) el número de espiras, (I) la corriente aplicada, (L) la longitud lateral de la bobina cuadrada

y (d) la separación entre las bobinas del mismo eje. Esta relación permitió establecer criterios iniciales para el dimensionamiento electromagnético del sistema, mientras que las constantes reales de generación campo-corriente fueron determinadas posteriormente mediante caracterización experimental. La región central de la jaula fue considerada como volumen útil de operación, definiéndose un espacio de evaluación aproximado de 39 cm × 39 cm × 10 cm, suficiente para alojar nanosatélites de hasta 3U y efectuar ensayos magnéticos bajo condiciones controladas.

Tabla 1 - Parámetros físicos y electromagnéticos de la jaula de Helmholtz implementada.

Parámetro	Valor
Configuración	Triaxial ortogonal
Disposición mecánica	Tres pares de bobinas anidadas
Dimensión de bobina eje X	1,00 m
Dimensión de bobina eje Y	1,05 m
Dimensión de bobina eje Z	1,10 m
Número de espiras eje X	60
Número de espiras eje Y	63
Número de espiras eje Z	66
Volumen evaluado	39 cm × 39 cm × 10 cm
Material estructural	Perfil de aluminio tipo U
Campo máximo eje X	±100 μT
Campo máximo eje Y	±100 μT
Campo máximo eje Z	±92 μT

Sistema electrónico y adquisición de datos

El sistema electrónico de la jaula de Helmholtz fue desarrollado para permitir la generación controlada e independiente de campos magnéticos en los tres ejes

ortogonales de operación (X, Y, Z), así como la adquisición y monitoreo de variables magnéticas durante la experimentación. La arquitectura general del sistema, presentada en la Figura 1, integró subsistemas de alimentación, inversión de polaridad, medición, comunicación inalámbrica y adquisición de datos.

La alimentación de las bobinas se realizó mediante tres fuentes programables DPS5005, una asignada a cada eje de generación magnética, permitiendo el control independiente de corriente y voltaje aplicado a los pares de bobinas correspondientes a los ejes X, Y, Z. Esta configuración posibilitó la regulación individual de las componentes del campo magnético generado y la reproducción de trayectorias vectoriales representativas del entorno geomagnético terrestre.

Con el propósito de generar componentes magnéticas positivas y negativas, se implementó un sistema de inversión automática de polaridad mediante una configuración tipo puente H implementada con relés. El control de conmutación fue realizado mediante una tarjeta de desarrollo Arduino Nano, encargada de coordinar la activación secuencial de relés y sincronizar los cambios de polaridad requeridos según las consignas magnéticas definidas por el sistema de control.

Para la medición del campo magnético generado se empleó un magnetómetro RM3100 como sensor de referencia,

seleccionado debido a su sensibilidad y estabilidad para aplicaciones de caracterización magnética. El sensor fue ubicado en el volumen útil de la jaula, correspondiente a la región central de mayor uniformidad espacial del campo magnético, permitiendo la adquisición de mediciones vectoriales de las componentes B_x , B_y y B_z .

La transmisión de datos desde el interior de la jaula hacia la computadora se realizó mediante módulos de comunicación inalámbrica Xbee, configurados en un esquema emisor-receptor. Esta arquitectura permitió desacoplar físicamente el sistema de medición del entorno inmediato de las bobinas, minimizando interferencias por cableado y facilitando la adquisición continua de datos magnéticos.

Asimismo, se desarrolló una interfaz gráfica en Python orientada al control, monitoreo y registro experimental del sistema. La interfaz permitió configurar consignas magnéticas, supervisar el estado de operación de las fuentes DPS5005, visualizar mediciones provenientes del RM3100 y registrar automáticamente las variables experimentales para su posterior análisis.

Tabla 2 - Componentes electrónicos implementados en el sistema de control y medición de la jaula de Helmholtz.

Componente	Cantidad	Función
DPS5005	3	Alimentación independiente por eje
Arduino Nano	1	Control de relés e inversión de polaridad

Módulo de relés	1	Configuración tipo puente H
RM3100	1	Magnetómetro de referencia
XBee	2	Comunicación inalámbrica
Hub USB	1	Interconexión de dispositivos
Computadora	1	Control, adquisición y monitoreo

Interfaz de control y generación de consignas

Se desarrolló una interfaz gráfica de usuario en Python orientada al control integral de la jaula de Helmholtz, permitiendo la configuración de parámetros experimentales, adquisición de datos magnéticos y generación automática de consignas de campo magnético. La interfaz fue diseñada para centralizar el control de las fuentes programables DPS5005, la adquisición de mediciones provenientes del sensor RM3100 y el registro experimental de variables asociadas al comportamiento del sistema.

Asimismo, la interfaz permitió supervisar el estado operativo del sistema y visualizar las variables relacionadas con el comportamiento del campo magnético generado, facilitando el monitoreo y el almacenamiento automatizado de datos para su posterior análisis.

La generación de consignas magnéticas se realizó a partir de elementos orbitales de dos líneas (Two-Line Element, TLE), utilizados para representar trayectorias orbitales de nanosatélites en órbita baja terrestre (LEO). A partir de dichos elementos orbitales se efectuó la

propagación orbital del satélite, permitiendo estimar parámetros orbitales y la posición espacial en función del tiempo.

Posteriormente, se empleó el modelo geomagnético internacional de referencia (International Geomagnetic Reference Field, IGRF) para calcular las componentes vectoriales del campo magnético terrestre esperadas en cada punto de la trayectoria orbital simulada. Las componentes magnéticas B_x , B_y , y B_z obtenidas fueron utilizadas como referencias de campo magnético objetivo para la operación experimental de la jaula de Helmholtz.

campo magnético objetivo y las corrientes requeridas en cada eje se realizó mediante coeficientes de calibración obtenidos durante el proceso de caracterización lineal del sistema, conforme a:

$$I_x = \frac{B_x}{Z_x}, \quad I_y = \frac{B_y}{Z_y}, \quad I_z = \frac{B_z}{Z_z}$$

Donde I_x , I_y , e I_z corresponden a las corrientes aplicadas en cada eje de la jaula, B_x , B_y , y B_z representan las componentes del campo magnético objetivo, y K_x , K_y , y K_z corresponden a los coeficientes de proporcionalidad campo-corriente obtenidos.

La regulación del sistema fue implementada mediante una estrategia de control en lazo abierto, en la cual las consignas de corriente calculadas fueron enviadas automáticamente a las fuentes programables DPS5005. Asimismo, el sistema gestionó de forma automática la inversión de polaridad mediante relés cuando las componentes del campo magnético objetivo requerían inversión de signo, permitiendo la reproducción de trayectorias magnéticas bipolares representativas del entorno geomagnético orbital.

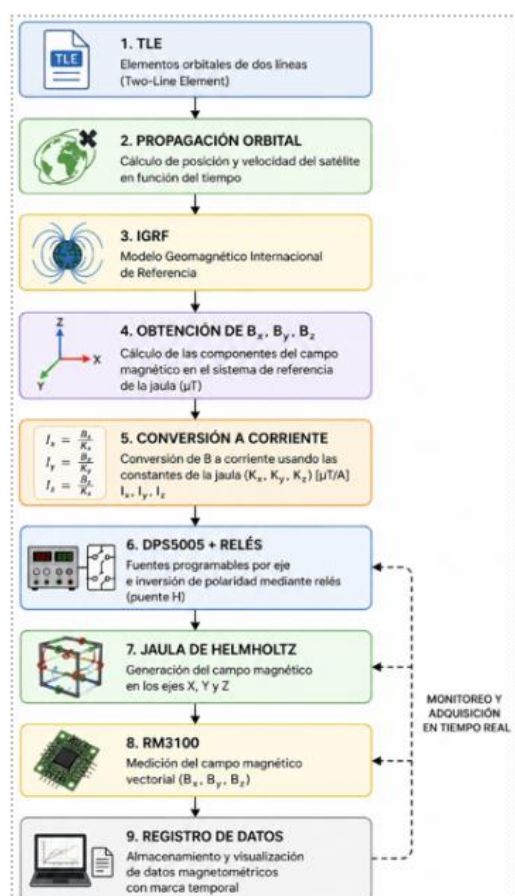


Figura 2 - Flujo metodológico para la reproducción de perfiles magnéticos orbitales mediante TLE-IGRF en la jaula de Helmholtz

La conversión entre las componentes del

Metodología experimental

La metodología experimental fue desarrollada con el propósito de caracterizar el comportamiento electromagnético de la jaula de Helmholtz y evaluar su capacidad para reproducir condiciones magnéticas representativas del entorno geomagnético terrestre en órbita baja (LEO). El procedimiento experimental fue organizado en cuatro etapas secuenciales: caracterización de linealidad, independencia entre ejes, uniformidad espacial de la jaula y validación dinámica mediante trayectorias orbitales.

Etapas 1 — Caracterización de linealidad

La evaluación de la linealidad del sistema se realizó asumiendo la corriente real inyectada como la variable independiente trazable. Para caracterizar la función de transferencia de cada eje y cuantificar la no-linealidad integral (INL) y la histéresis direccional, se ejecutaron barridos de corriente bipolares en secuencias de $-2\text{ A} \rightarrow 2\text{ A} \rightarrow -2\text{ A} \rightarrow 2\text{ A} \rightarrow 0\text{ A}$. Este procedimiento aseguró la cobertura del rango de campo magnético orbital máximo esperado $\pm 100\text{ }\mu\text{T}$. El registro del campo magnético en el estado estacionario de cada escalón de corriente permitió aislar la respuesta electromagnética de las bobinas de los transitorios eléctricos de las fuentes programables.

Etapas 2 — Independencia entre ejes

Dado que la estructura física introduce tolerancias de ortogonalidad mecánica, se implementó test de calibración para

desacoplar la interferencia cruzada entre los ejes X, Y y Z. Se excitó el sistema comandando vectores de campo magnético en múltiples orientaciones espaciales para obtener una esfera tridimensional. A partir de los datos recolectados, se calculó una matriz de transformación de calibración 3×3 y un vector de sesgo (*bias*) para el magnetómetro. Con estos datos se construyó un modelo empírico que permitió corregir simultáneamente los errores de factor de escala, las desviaciones angulares de ensamble y absorber matemáticamente el campo geomagnético estático de fondo presente en el laboratorio.

Etapas 3 — Uniformidad espacial

Para garantizar que el volumen útil sea apto para pruebas con nanosatélites de hasta 3U, se procedió al mapeo de la homogeneidad del campo magnético. Se definió un paralelepípedo virtual en el centro geométrico de la jaula, evaluando un total de 325 nodos de medición distribuidos en un volumen de $39 \times 39 \times 10\text{ cm}$. En cada nodo, el magnetómetro RM3100 registró la intensidad vectorial del campo para identificar gradientes de deformación espacial y determinar la caída del campo magnético respecto al punto nominal de máxima uniformidad.

Etapas 4 — Validación dinámica mediante TLE/IGRF

La etapa final consistió en someter a la jaula a pruebas funcionales dinámicas bajo un esquema Hardware-in-the-Loop (HWIL).

Utilizando elementos orbitales de dos líneas (TLE) de misiones análogas en órbita baja terrestre (LEO), se propagó la trayectoria del satélite simulado. Paralelamente, se computó el Modelo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF) para extraer el vector objetivo del campo geomagnético en cada instante de la simulación. La jaula generó de manera continua este perfil dinámico, y el error metrológico residual del sistema fue cuantificado comparando el campo medido por el RM3100 frente al vector orbital objetivo, validando así la fidelidad de seguimiento, la exactitud y la precisión de la plataforma.

ajuste empleado para cuantificar la no linealidad del sistema.

Resultados y Discusión

La caracterización lineal de la jaula de Helmholtz fue realizada con el propósito de evaluar la relación entre la corriente aplicada y el campo magnético generado en cada eje de operación. Para ello, se efectuaron barridos independientes de corriente utilizando el magnetómetro RM3100 como instrumento de medición, registrando las componentes del campo magnético sin aplicar corrección magnetométrica (campo crudo), conforme a la metodología establecida para la caracterización metrológica del sistema.

Las Figuras 3a, 3b, 4a, 4b, 5a y 5b presentan la relación entre corriente aplicada y campo magnético medido para los ejes X, Y y Z, respectivamente, junto con el análisis de residuos respecto a la recta de

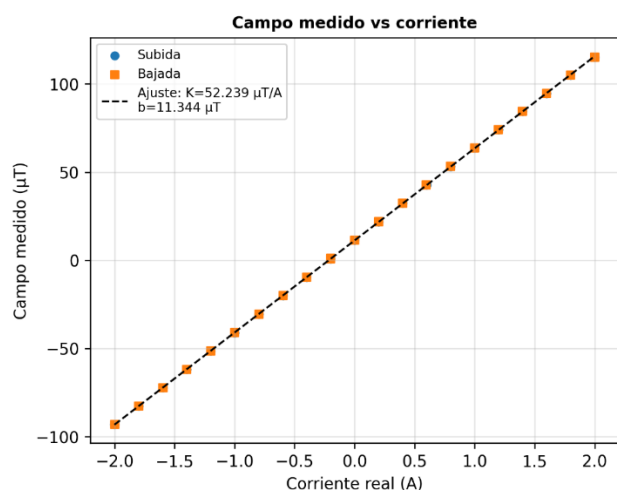


Figura 3a. Eje X - Campo vs Corriente

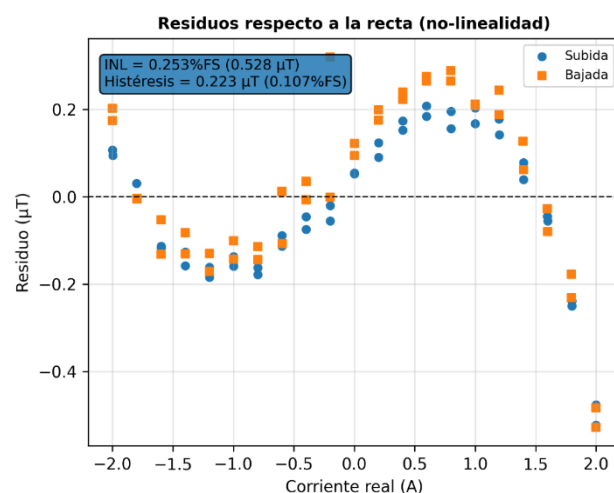


Figura 3b. Eje X - Residuos (no linealidad)

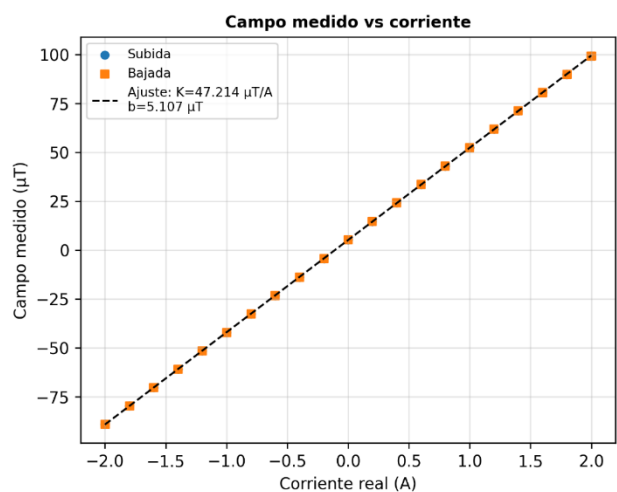


Figura 4a. Eje Y - Campo vs Corriente

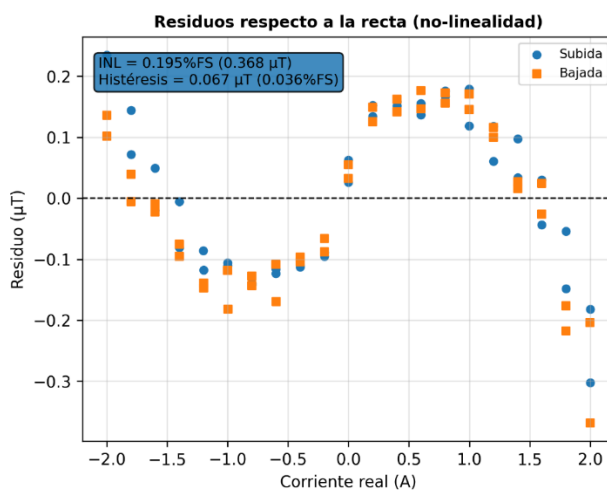


Figura 4b. Eje Y - Residuos (no linealidad)

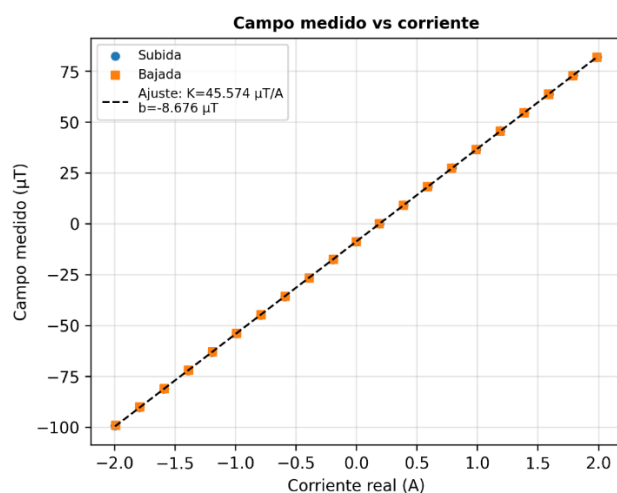


Figura 5a. Eje Z - Campo vs Corriente

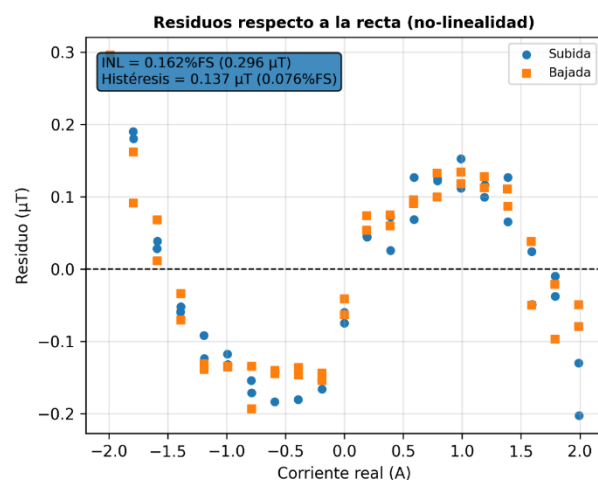


Figura 5b. Eje Z - Residuos (no linealidad)

Los parámetros obtenidos a partir de los ajustes lineales experimentales se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros obtenidos mediante caracterización lineal de la jaula de Helmholtz.

Eje	K ($\mu\text{T/A}$)	Intercepto (μT)	R ²	INL (%FS)
X	52,239	11,343	0,99	0,253
Y	47,213	5,107	1	0,195
Z	45,574	-8,676	1	0,162

Los resultados evidenciaron un comportamiento altamente lineal entre corriente aplicada y campo magnético generado en los tres ejes de la jaula, obteniéndose coeficientes de determinación superiores a $R^2 > 0,9999$ en todos los casos. Las constantes de proporcionalidad campo–corrientes obtenidas fueron de 52,239 $\mu\text{T/A}$ para el eje X, 47,213 $\mu\text{T/A}$ para el eje Y y 45,574 $\mu\text{T/A}$ para el eje Z, indicando diferencias moderadas entre ejes atribuibles a variaciones geométricas, número de espiras y características constructivas particulares de cada par de bobinas.

El análisis de residuos respecto a la recta de ajuste mostró desviaciones reducidas a lo largo del rango experimental evaluado, evidenciando un comportamiento electromagnético estable y repetible. Los valores de no linealidad integral (INL) obtenidos fueron inferiores a 0,3 % del rango total de medición (FS) en los tres ejes, alcanzando valores máximos de 0,253 %FS, 0,195 %FS y 0,162 %FS para los ejes X, Y y Z, respectivamente. Estos resultados

indican un bajo nivel de desviación respecto al comportamiento lineal ideal, validando el empleo de modelos lineales para la conversión entre consignas de campo magnético y corriente aplicada.

Asimismo, el análisis de las curvas de subida y bajada evidenció valores reducidos de histéresis magnética, inferiores a 0,11 %FS en todos los casos, indicando una baja dependencia del comportamiento electromagnético respecto al historial de excitación de corriente aplicado. Los interceptos obtenidos reflejan principalmente la influencia del campo magnético ambiente presente durante la experimentación, sin afectar significativamente la proporcionalidad lineal entre corriente aplicada y campo magnético generado.

Calibración magnética del sistema

Con el propósito de corregir errores sistemáticos asociados a escala, desalineación entre ejes, sensibilidad cruzada (cross-axis) y sesgo magnetométrico, se realizó una calibración del sistema de medición empleando un modelo afín multivariable basado en matriz de corrección y vector de sesgo.

La calibración fue desarrollada utilizando mediciones experimentales obtenidas mediante el magnetómetro RM3100, estableciendo como referencia los campos magnéticos comandados experimentalmente por la jaula de Helmholtz.

El modelo de corrección implementado fue definido conforme a:

$$B_{corr} = K(B_{raw} - b)$$

Donde B_{corr} corresponde al vector de campo magnético corregido, B_{raw} representa las mediciones magnéticas sin calibración, K corresponde a la matriz de corrección asociada a factores de escala y sensibilidad cruzada, y b representa el vector de sesgo (bias) experimental del sistema.

Matriz de corrección K :

$$K = \begin{bmatrix} 0,9968 & -0,0244 & 0,0046 \\ -0,0130 & 0,9973 & 0,0087 \\ -0,0096 & -0,0169 & 0,9991 \end{bmatrix}$$

Vector de sesgo b [μT]:

$$b = \begin{bmatrix} 11,3847 \\ 5,0273 \\ -8,7488 \end{bmatrix}$$

La validación de la calibración fue realizada mediante conjuntos independientes de ajuste y validación, comparando el desempeño del sistema antes y después de aplicar la corrección magnética. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Desempeño del sistema antes y después de la calibración magnética

Conjunto	RMSE antes (μT)	RMSE después (μT)	Reducción (%)
Ajuste	15,291	0,101	99,34
Validación	15,137	0,088	99,42

Los resultados evidenciaron una mejora significativa del desempeño magnético del sistema tras la calibración. En términos de error cuadrático medio (Root Mean Square Error, RMSE), se observó una reducción superior al 99% tanto en ajustes como en validación, disminuyendo desde aproximadamente 15 μT hasta valores inferiores a 0,1 μT .

Estos resultados indican una corrección efectiva de errores sistemáticos asociados al offset magnético, diferencias de escala entre ejes y acoplamiento cruzado del sistema de medición.

Asimismo, la matriz de corrección obtenida presentó predominancia diagonal, con coeficientes cercanos a la unidad en los términos principales y magnitudes reducidas fuera de la diagonal, indicando una baja sensibilidad cruzada entre ejes y un comportamiento magnético consistente. El vector de sesgo obtenido evidenció la presencia de componentes de campo ambiente y desplazamientos instrumentales, los cuales fueron compensados adecuadamente mediante el modelo de calibración implementado.

Independencia entre ejes

La independencia entre ejes de generación magnética fue evaluada mediante ensayos de excitación individual, aplicando corriente únicamente en uno de los ejes de la jaula y registrando simultáneamente la respuesta magnética cruzado (cross-axis coupling) presente entre bobinas ortogonales y verificar el grado de independencia de

operación del sistema.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5, donde los elementos diagonales representan la sensibilidad principal campo-corriente correspondiente al eje excitado, mientras que los términos fuera de diagonal representan contribuciones inducidas en ejes no excitados.

Tabla 5. Matriz experimental de acoplamiento entre ejes de la jaula de Helmholtz ($\mu\text{T/A}$).

Campo medido	Corriente eje X (A)	Corriente eje Y (A)	Corriente eje Z (A)
$B_x(\mu\text{T})$	52,37	0,12	-0,20
$B_y(\mu\text{T})$	1,72	47,35	-0,29
$B_z(\mu\text{T})$	0,47	0,73	45,56

Los resultados evidenciaron una clara predominancia de los términos diagonales respecto a los términos fuera de diagonal, observándose sensibilidades principales de aproximadamente $52,37 \mu\text{T/A}$, $47,35 \mu\text{T/A}$ y $45,56 \mu\text{T/A}$ para los ejes X, Y y Z, respectivamente. Por otro lado, las contribuciones cruzadas permanecieron reducidas, con magnitudes inferiores a $2 \mu\text{T/A}$ en todos los casos.

Estos resultados indican un bajo nivel de acoplamiento entre ejes y validan experimentalmente la capacidad de la jaula para generar campos magnético predominantemente independientes en cada dirección espacial, condición necesaria para la reproducción controlada de trayectorias geomagnéticas y calibración de sensores magnéticos tridimensionales.

Evaluación del volumen útil y uniformidad espacial

En la figura 6 se muestra la uniformidad espacial del campo magnético generado por la jaula de Helmholtz fue evaluada dentro de un volumen representativo de un nanosatélite de hasta 3U, correspondiente a unas dimensiones de $39 \text{ cm} \times 39 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, equivalentes a un volumen total de 15.210 cm^3 . Para ello, se realizaron mediciones magnéticas en 325 puntos distribuidos espacialmente dentro del volumen evaluado de 15.210 cm^3 , organizados en 13 planos de medición no uniformemente espaciados a lo largo del eje de análisis, ubicados en las posiciones en el eje z de (-5; -4,1; -3,2; -2,3; -1,4; -0,5; 0; 0,9; 1,8; 2,7; 3,6; 4,5 y 5) cm respecto al centro geométrico de la jaula, utilizando como referencia el campo magnético medido en dicho centro.

Durante la prueba, se estableció un vector objetivo de campo magnético cercano a $100 \mu\text{T}$ de magnitud, registrándose las componentes medidas B_x , B_y y B_z en cada punto del volumen. La uniformidad fue cuantificada mediante el cálculo del error vectorial relativo respecto al punto central, expresado porcentualmente para cada posición de medición.

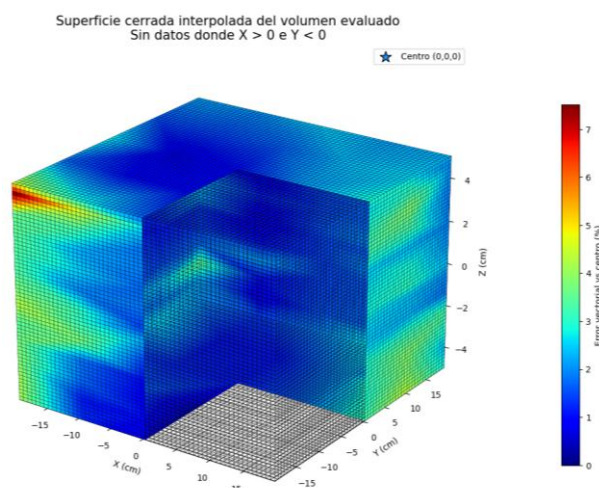


Figura 6 - Distribución espacial interpolada del error vectorial dentro del volumen evaluado de la jaula de Helmholtz

Considerando que el volumen requerido para alojar un CubeSat 3U es de aproximadamente 3000 cm^3 ($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$), los resultados evidencian que la jaula genera una región uniforme significativamente superior a la necesaria para este tipo de plataformas, proporcionando un margen espacial adecuado para pruebas de validación de sensores magnéticos, magnetómetros y sistemas de determinación y control de actitud (ADCS). Este aspecto resulta especialmente relevante, ya que permite realizar ensayos sin requerir una ubicación extremadamente precisa del dispositivo bajo prueba dentro de la región útil, reduciendo posibles efectos asociados a gradientes espaciales del campo magnético.

Experimentalmente, se obtuvo un error promedio de 1,08 % y una desviación máxima de 2,15 %, evidenciando un

comportamiento altamente homogéneo y estable del campo magnético en el volumen analizado. Asimismo, se estimó un comportamiento uniforme en los 15.210 cm^3 bajo un criterio de tolerancia de $\pm 5 \%$, valor considerado adecuado para pruebas magnéticas en plataformas CubeSat y consistente con metodologías de validación de jaulas de Helmholtz reportadas en la literatura. Estos resultados confirman que la plataforma desarrollada posee capacidades suficientes para la simulación controlada de condiciones magnéticas orientadas a nanosatélites de hasta 3U.

Como se puede apreciar en las figuras 7, 8 y 9 la exactitud del sistema en el punto central fue además evaluada mediante métricas de error absoluto medio (MAE) y raíz del error cuadrático medio (RMSE). Se obtuvieron valores RMSE de $0,737 \mu\text{T}$, $2,090 \mu\text{T}$ y $2,614 \mu\text{T}$ para los ejes X, Y y Z, respectivamente, mientras que el error asociado a la magnitud vectorial del campo fue de $0,670 \mu\text{T}$, evidenciando una adecuada capacidad de reproducción del campo magnético objetivo dentro del volumen de trabajo.

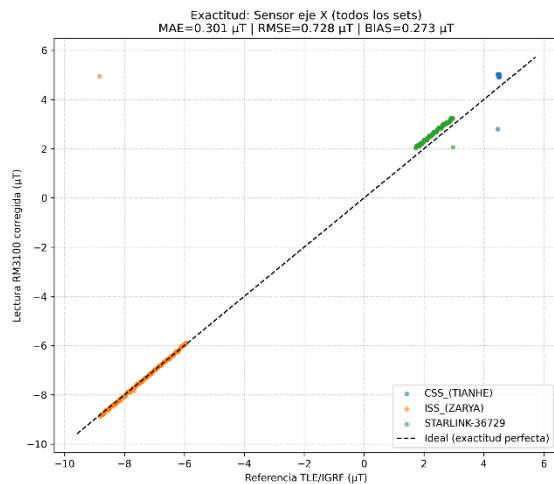


Figura 7. Exactitud eje X

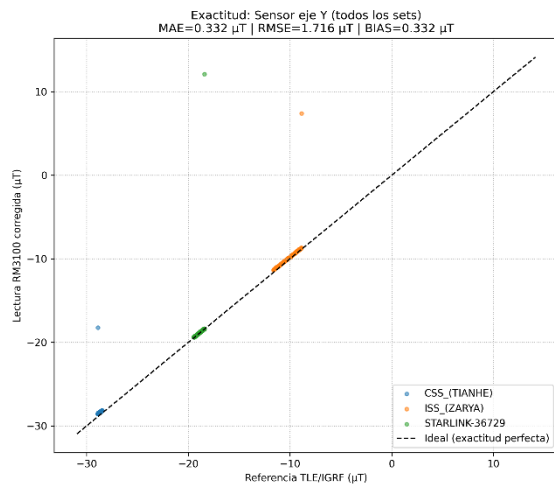


Figura 8. Exactitud eje Y

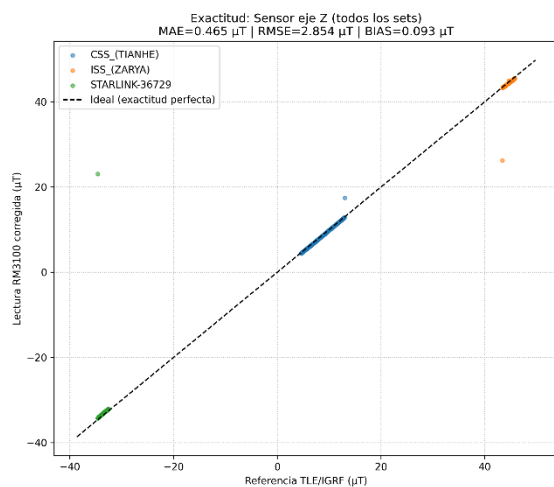


Figura 9. Exactitud eje Z

Validación dinámica mediante TLE/IGRF

Con el propósito de verificar experimentalmente la capacidad del sistema para reproducir perfiles magnéticos representativos de órbita terrestre baja (LEO), se realizó una validación dinámica empleando la trayectoria orbital del satélite ISS (ZARYA). La propagación orbital fue efectuada a partir de elementos orbitales de dos líneas (TLE), mientras que el campo geomagnético de referencia fue calculado mediante el Modelo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF).

A partir de las componentes geomagnéticas propagadas (B_x, B_y, B_z), el sistema calculó automáticamente las corrientes requeridas para cada eje de la jaula utilizando las constantes de proporcionalidad experimentales obtenidas durante la caracterización lineal. La generación del campo fue realizada mediante el control independiente de las fuentes DPS5005 y la inversión automática de polaridad, permitiendo reproducir trayectorias magnéticas variables en el tiempo.

Las Figuras 10, 11, 12 y 13 presentan la comparación entre el campo magnético propagado y el medido experimentalmente mediante el magnetómetro RM3100, así como la evolución temporal del error en cada eje espacial.

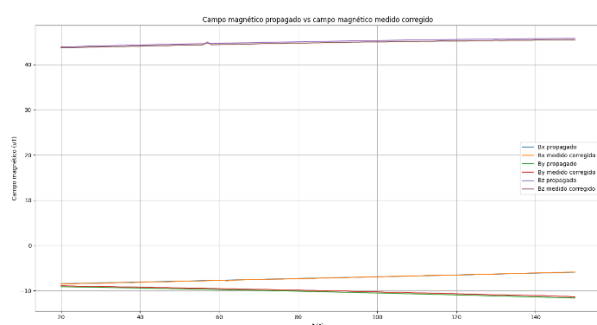


Figura 10 - Comparación campo propagado vs medido.

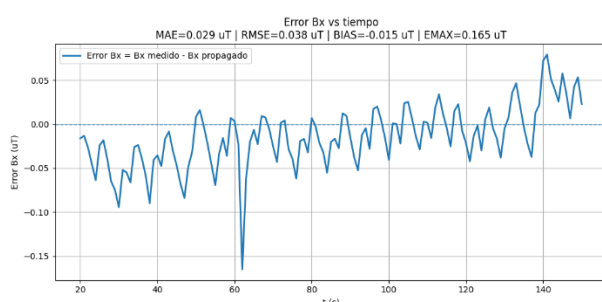


Figura 11 - Error temporal eje X.

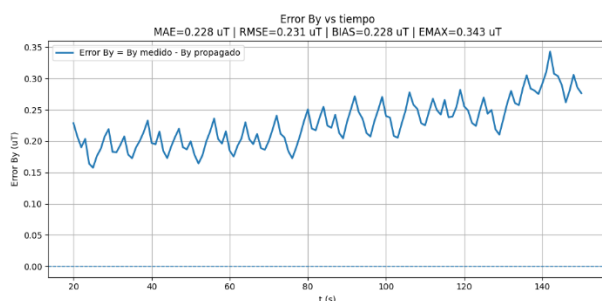


Figura 12 - Error temporal eje Y.

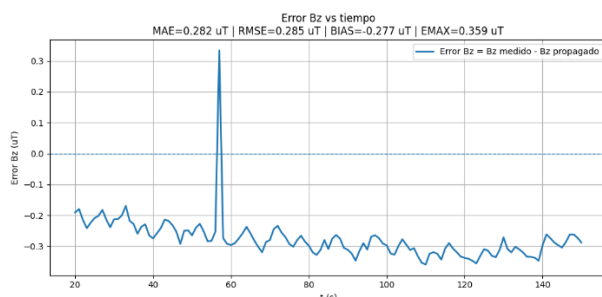


Figura 13 - Error temporal eje Z.

Los resultados mostraron una alta fidelidad de reproducción del perfil geomagnético propagado, observándose un seguimiento cercano entre señales objetivo y medidas. Las métricas cuantitativas obtenidas (Tabla 6) evidenciaron errores reducidos en los tres ejes, con valores máximos de RMSE de $0,285 \mu\text{T}$ y errores máximos absolutos inferiores a $0,36 \mu\text{T}$.

El eje X presentó el mejor desempeño, alcanzando un RMSE de $0,038 \mu\text{T}$, mientras que los ejes Y y Z mostraron pequeños sesgos sistemáticos de $\pm 0,3 \mu\text{T}$ aproximadamente, atribuibles a efectos residuales de calibración magnética, no idealidades geométricas y limitaciones propias de adquisición y conmutación del sistema. No obstante, dichos errores permanecieron considerablemente inferiores al rango típico del campo geomagnético terrestre en LEO ($\pm 25 \mu\text{T}$ a $\pm 65 \mu\text{T}$), validando experimentalmente la capacidad de la jaula para reproducir condiciones magnéticas representativas de órbita baja terrestre con alta precisión.

Tabla 6. Métricas de desempeño durante la validación dinámica con trayectoria orbital ISS (ZARYA).

Métrica	Eje X (μT)	Eje Y (μT)	Eje Z (μT)
MAE	0,029	0,228	0,282
RMSE	0,038	0,231	0,285
Bias	-0,015	0,228	-0,277
Error máximo absoluto	0,165	0,343	0,359

Discusión general del desempeño del sistema

Los resultados obtenidos permitieron validar experimentalmente el desempeño de la jaula de Helmholtz desarrollada, evidenciando un comportamiento electromagnético estable y adecuado para aplicaciones de calibración magnética y futura validación funcional de sistemas de determinación y control de actitud (ADCS) en nanosatélites de hasta 3U.

En primer lugar, los ensayos de linealidad mostraron una relación altamente proporcional entre la corriente aplicada y el campo magnético generado en los tres ejes del sistema, alcanzándose coeficientes de determinación superiores a $R^2 > 0,9999$, lo cual confirma un comportamiento lineal altamente predecible dentro del rango operacional evaluado. Asimismo, los valores de no linealidad integral (INL) y de

histéresis se mantuvieron reducidos, indicando una baja dependencia respecto al sentido de excitación de corriente y una respuesta electromagnética consistente.

La implementación de una calibración magnética basada en una matriz de corrección permitió compensar errores sistemáticos asociados a sensibilidad, sesgo y acoplamiento entre ejes. La validación de esta corrección evidenció reducciones del error RMSE superiores al 99 %, demostrando una mejora sustancial en la exactitud del sistema de medición y permitiendo obtener lecturas corregidas altamente consistentes respecto al campo objetivo.

Por otra parte, la validación dinámica mediante un esquema Hardware-in-the-Loop (HIL) utilizando trayectorias orbitales derivadas de elementos orbitales tipo TLE e integradas con el modelo geomagnético IGRF demostró la capacidad de la jaula para reproducir perfiles temporales representativos del entorno magnético terrestre en órbita baja (LEO). La prueba realizada utilizando la órbita de la Estación Espacial Internacional (ISS) mostró un seguimiento estable del vector geomagnético propagado, obteniéndose errores reducidos en los tres ejes y manteniéndose desviaciones inferiores a $0,36 \mu\text{T}$, lo cual evidencia una adecuada fidelidad temporal del sistema.

Respecto al volumen útil, la evaluación espacial realizada sobre un volumen

representativo de 39 cm × 39 cm × 10 cm, correspondiente a un nanosatélite de configuración 3U, evidenció un comportamiento uniforme del campo magnético dentro de toda la región evaluada. Los errores vectoriales observados respecto al punto central se mantuvieron comprendidos entre 0,00 % y 3,91 %, manteniéndose todas las mediciones dentro del criterio de aceptación de ± 5 %, lo que permitió validar experimentalmente el uso del volumen completo para pruebas funcionales de nanosatélites de hasta 3U.

Finalmente, el sistema desarrollado demostró capacidad suficiente para reproducir el rango típico del campo geomagnético terrestre, alcanzándose campos máximos de aproximadamente ± 100 μT en los ejes X e Y, y ± 92 μT en el eje Z, cubriendo adecuadamente el rango magnético esperado en aplicaciones espaciales de órbita baja. En conjunto, los resultados obtenidos respaldan la viabilidad de la plataforma como herramienta experimental para calibración de magnetómetros.

Conclusiones

El diseño y la validación de la jaula de Helmholtz de tres ejes ortogonales permitió desarrollar una plataforma experimental orientada a pruebas de determinación y control de orientación de nanosatélites, integrando subsistemas de alimentación, inversión de polaridad, adquisición magnética y control computacional para la generación controlada de campos magnéticos tridimensionales.

La caracterización electromagnética evidenció un comportamiento altamente lineal entre la corriente aplicada y el campo magnético generado, alcanzándose coeficientes de determinación superiores a $R^2 > 0,99$ en los tres ejes. Asimismo, los bajos valores de no linealidad integral (INL) e histéresis confirmaron una respuesta electromagnética estable y reproducible dentro del rango operacional evaluado.

La calibración magnética realizada permitió reducir significativamente los errores sistemáticos del sistema de medición, obteniéndose reducciones superiores al 99 % del RMSE, lo cual validó la efectividad del modelo de corrección basado en matriz de calibración y compensación de sesgo para mejorar la exactitud de las mediciones magnéticas.

La evaluación espacial del campo magnético permitió validar experimentalmente un volumen útil representativo de un nanosatélite de hasta

3U, verificándose el cumplimiento del criterio de uniformidad de $\pm 5\%$ en el 100 % del volumen evaluado (39 cm $\times$ 39 cm $\times$ 10 cm). Estos resultados confirmaron la viabilidad del sistema para la realización de pruebas magnéticas bajo condiciones controladas de uniformidad espacial.

Finalmente, la validación dinámica mediante un esquema Hardware-in-the-Loop (HIL) utilizando trayectorias orbitales propagadas a partir de TLE y el modelo geomagnético IGRF evidenció la capacidad del sistema para reproducir perfiles magnéticos representativos de órbita terrestre baja (LEO), obteniéndose errores reducidos y un seguimiento estable del campo geomagnético durante las pruebas realizadas con la órbita de la Estación Espacial Internacional (ISS).

En conjunto, los resultados obtenidos permitieron demostrar que la jaula de Helmholtz desarrollada constituye una plataforma experimental adecuada para la calibración de magnetómetros, validación de subsistemas de determinación y control de actitud (ADCS) y realización de pruebas funcionales orientadas a nanosatélites de hasta 3U.

Finalmente, la elaboración de un manual de operación y calibración contribuyó a facilitar la utilización del sistema desarrollado y favorecer la reproducibilidad de los procedimientos.

Referencias Bibliográficas

- Alken, P., Thébault, E., & Beggan, C. (2021). International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth, Planets and Space*, 73(1), 49. doi:10.1186/s40623-020-01288-x
- California Polytechnic State University. (2020). *CubeSat Design Specification*. California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA.
- da Silva, R. C., Ishioka, I. S., Cappelletti, C., Battistini, S., & Borges, R. A. (2019). Helmholtz cage design and validation for nanosatellites HWIL testing. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 55(6), 5806–5817. doi:10.1109/TAES.2019.2902599
- Markley, F., & Crassidis, J. (2014). *Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control*. New York: Springer.
- National Aeronautics and Space Administration. (2024). *State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology*. Obtenido de <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/>

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a al Grupo de Investigación en Electrónica y Mecatrónica (GIEM) de la Facultad Politécnica por el apoyo brindado en el desarrollo del trabajo.

Financiamiento

El desarrollo del presente trabajo fue financiado por el Programa de Fortalecimiento para el Desarrollo de la Ciencia, Tecnología e Innovación de la Facultad Politécnica de la Universidad Nacional de Asunción (FP-UNA), correspondiente al año 2024.