



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de un simulador de campo
magnético terrestre para pruebas del
sistema de determinación y control de
orientación de nanosatélites**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Mecatrónica

P R E S E N T A

Sharon Ruby Reyes Cuallo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Saúl de la Rosa Nieves



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DISEÑO DE UN SIMULADOR DE CAMPO MAGNETICO TERRESTRE PARA PRUEBAS DEL SISTEMA DE DETERMINACION Y CONTROL DE ORIENTACION DE NANOSATELITES que presenté para obtener el título de INGENIERO MECATRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

SHARON RUBY REYES CUALLO
Número de cuenta: 313704349

Resumen

El presente trabajo muestra el diseño de un simulador de campo magnético terrestre como banco de pruebas para el sistema de determinación y control de orientación de nanosatélites, teniendo una zona de pruebas apta para dimensiones máximas de un nanosatélite CubeSat 3U, empleando un arreglo de tres bobinas Helmholtz capaz de reproducir un campo magnético uniforme en la región que ocupará el satélite.

Se realizaron simulaciones previas al diseño de las bobinas Helmholtz con el fin de evaluar los campos magnéticos generados por bobinas con geometría circular y cuadrada, y así determinar la mejor geometría que generara la mayor uniformidad e intensidad de campo magnético para el banco de pruebas.

El diseño se compuso de cuatro bloques: una interfaz gráfica de usuario, una central de control, un sistema de potencia y una jaula Helmholtz, los cuales fueron simulados entregando resultados acordes con los requerimientos del proyecto, dejando para el futuro la construcción e integración del simulador de campo magnético terrestre en su totalidad.

Para ti, Abu, que nunca has soltado mi mano.

Reconocimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi familia: mamá y compa, gracias por su apoyo y guía en toda esta travesía académica. Mamá, gracias por enseñarme a ser una mujer fuerte y a resistir cuando las cosas se ponen difíciles.

Mi Richououo, gracias por estar y alentarme a terminar siempre mis proyectos, gracias por tu amor y ternura durante el camino.

Tía Cupis, Alex, Tan, gracias por su apoyo incondicional en cada etapa, los tres son un gran ejemplo para mí.

Abu, eres mi pilar más grande, gracias por acompañarme y procurarme siempre.

Confito, gracias por siempre estar junto a mí y por estar al pendiente en cualquier momento del día, sin importar la hora.

Dr. Saúl, gracias por confiar en mí y seguir creyendo aun cuando parecía que ya no volvería. Gracias por elegirme a mí, por fijarse en mi emoción desde el primer día en clase de Ovn. . . SCMI y darme la oportunidad de colaborar con usted. Sin duda es una persona a la que admiro bastante, no solo por su destacada trayectoria, sino por su calidad de persona.

Adrián, gracias por interesarte en mi proyecto, fuiste un gran apoyo, definitivamente. Sobre todo, gracias por quedarte.

LIESE-amigos: Ocaña y Badillo, gracias por su guía para la elaboración de este proyecto. Aldair, Beca, Ciro, Lalo, Saint, Joshua, Derian y Ocaña, gracias por acompañarme en este tiempo, para mí fue un placer haber coincidido con ustedes en este laboratorio lleno de grandes proyectos, encabezados por ustedes, grandes ingenieros.

Vicuña: Gracias por ser mi guía más grande en este proyecto y por tu apoyo siempre. Fuiste un segundo asesor en este trabajo y siempre te lo agradeceré. También gracias por ayudarme a tener más determinación, eres un gran ejemplo, Vicuña.

Equipo de Propulsión UNAM: Gracias a todos los de la 1ra, 2da y 3ra generación por ser parte de una muy bonita etapa de mi trayectoria académica y de mi vida. Gracias, Omar, por haber tenido esta loca idea y hacerme parte de ella. Gracias, Az-tatzi, por tus enseñanzas, tu guía y tu apoyo incondicional. René, gracias por estar y

escuchar, gracias por ser mi apoyo cuando las cosas se ponían complicadas. Santi (mi primer P.U. amigo), Natalie y Xime, gracias por su apoyo todo el tiempo.

Cuitláhuac: Gracias por todo tu apoyo dentro y fuera del taller de manufactura, sin duda me llevo muchas enseñanzas, gracias por hacerme parte de ustedes. Me llevo muy buenos recuerdos de estos años.

Alex, Serch y Otis: Gracias por compartir esta etapa universitaria conmigo. Gracias por su bonita amistad y su apoyo siempre.

Luis y Hugo: Gracias por estar y alentarme en todos mis proyectos, son los mejores.

Karen, Anna, David, Jessica y Susy: Gracias por su apoyo y sus palabras siempre.

Sigue construyendo sueños y no olvides que son ellos los que te guían en periodos de incertidumbre.

Índice general

Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIII
1. Introducción	3
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Descripción	3
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo General	5
1.3.2. Objetivos Específicos	5
1.4. Hipótesis	5
1.5. Alcance	5
1.6. Justificación	6
2. Marco Teórico	7
2.1. Campo magnético	7
2.1.1. Ley de Biot-Savart	8
2.2. Bobina	9
2.2.1. Bobina Helmholtz	11
2.2.1.1. Bobinas Helmholtz circulares	11
2.2.1.2. Bobinas Helmholtz cuadradas	13
2.3. Campo magnético terrestre	17
2.3.1. Componentes del campo magnético terrestre	20
2.3.2. Modelo matemático del campo magnético terrestre	21
2.3.3. Modelos Magnéticos	23
2.4. Satélites artificiales	25
2.4.1. Clasificación de satélites artificiales	26
2.4.2. Estándar CubeSat	28
2.5. Mecánica orbital	29
2.5.1. Sistemas de referencia	30
2.5.2. Elementos orbitales	31
2.5.2.1. Formato Two-Line Element	32
2.6. Sistema de Determinación y Control de Orientación (ADCS) de un Satélite	34

2.6.1. Interacción del ADCS con el campo magnético terrestre	36
3. Estado del Arte	37
3.1. Instalación para Experimentos de Control de Orientación	37
3.2. Desarrollo e implementación de un simulador de campo magnético terrestre	39
3.3. Simulación en Tiempo Real del Campo Magnético Terrestre para una Misión Orbital	44
3.4. Banco de pruebas de simulación magnética para proyecto de pequeños satélites estudiantiles de APSCO.	45
3.5. Simulación del campo magnético generado por bobinas Helmholtz con geometría cuadrada	48
3.6. Diseño, manufactura y prueba en tiempo real de un simulador de campo magnético de tres ejes	50
3.7. Simulador de campo magnético terrestre	53
3.8. Análisis del estado del arte	55
3.9. Conclusiones del Estado del Arte	58
4. Diseño	59
4.1. Planeación	59
4.2. Desarrollo de concepto	61
4.3. Diseño a nivel sistema	64
4.4. Diseño de detalle	67
4.4.1. Simulaciones	67
4.4.2. Diseño mecánico y eléctrico	73
4.4.2.1. Material	79
4.4.2.2. Especificaciones mecánicas y eléctricas	82
4.4.3. Diseño de interfaz gráfica del usuario	83
4.4.4. Diseño de sistema de potencia	87
4.4.5. Diseño de Central de control	88
4.4.5.1. Calibración	89
4.4.6. Especificaciones del SCMT	91
5. Modelado de ingeniería e Integración	93
5.1. Modelado de jaula Helmholtz	93
5.2. Integración de sistemas	96
6. Resultados	99
6.1. Resultados de la Interfaz Gráfica de Usuario del SCMT	99
6.2. Resultados de la central de control del SCMT	101
6.3. Resultados de uniformidad de campo magnético en la jaula Helmholtz .	104
6.4. Resultados del modelado de la estructura mecánica y eléctrica de la jaula Helmholtz	106

7. Conclusiones	107
7.1. Trabajo a futuro	109
A. Anexo	111
B. Software	113
B.1. Uniformidad de campo magnético	113
B.2. Funcionamiento de la GUI	115
B.3. Operación del magnetómetro HMC5883L	119
B.3.1. Calibración del magnetómetro HMC5883L	127
C. Planos de Ingeniería	131
Bibliografía	139

Índice de figuras

2.1. Resultados obtenidos por Ampere. [4]	8
2.2. Campo magnético producido en el punto P. [6]	9
2.3. Bobina que produce un campo magnético en el punto P debido a una corriente I . [4]	10
2.4. Diagramas de bobinas.	11
2.5. Bobina Helmholtz circular. [10]	13
2.6. Bobina Helmholtz cuadrada. [11]	14
2.7. Mapa de intensidad del campo geomagnético en la superficie terrestre en nT . Fecha de enero del 2025. [13]	18
2.8. Proyección Miller: declinación magnética en el año 2025. Intervalo entre curvas de nivel de 2 grados; curvas rojas indican valores positivos (este), azules negativos (oeste), y verde representa valores cero. [14]	19
2.9. Líneas de campo magnético de la Tierra. [15]	19
2.10. Componentes vectoriales del campo magnético en el sistema cartesiano.	21
2.11. Mars Reconnaissance Orbiter. [19]	26
2.12. Lanzamientos de nanosatélites. [20]	27
2.13. Familia de CubeSats. [1]	28
2.14. Lanzamientos de nanosatélites CubeSat. [20]	29
2.15. Sistema de referencia perifocal [21].	30
2.16. Sistema de referencia geocéntrico ecuatorial [21].	30
2.17. Marco geocéntrico ecuatorial y parámetros orbitales [21].	31
2.18. Formato del conjunto TLE.	32
2.19. ADCS de un CubeSat. [23]	35
3.1. FACE. [26]	38
3.2. Diseño de plataforma. [25]	39
3.3. Ensamble de plataforma de aire. [28]	42
3.4. Modelado 3D jaula Helmholtz. [8]	43
3.5. Configuración de estructura esférica generadora de campo magnético. [7]	44
3.6. Diagrama del sistema con HiL. [7]	45
3.7. Estructura del banco de pruebas de simulación magnética. [31]	46
3.8. Configuración de bobina Helmholtz cuadrada. [11]	49

ÍNDICE DE FIGURAS

3.9. Diagrama de un conductor finito para el cálculo del campo magnético en el punto P. [11]	49
3.10. Sistema de bobinas Helmholtz en fase de pruebas. [32]	51
3.11. Sistema de control electrónico. [32]	52
3.12. Configuración del simulador de campo magnético y conexión entre dispositivos. [33]	54
3.13. Simulador de campo magnético completo implementado. [33]	55
4.1. Proceso de desarrollo de un producto [34].	59
4.2. Diagrama de bloques simplificado.	64
4.3. Diagrama de bloques a nivel sistema.	65
4.4. Diagrama de flujo de operación del SCMT.	66
4.5. Líneas de campo magnético en el plano yz de espiras circulares.	68
4.6. Mapa en 3D de campo magnético producido por espiras circulares.	69
4.7. Líneas de campo magnético en el plano yz de espiras cuadradas.	69
4.8. Mapa en 3D de campo magnético producido por espiras cuadradas.	70
4.9. Gráfica de campo magnético en el eje z de bobinas circulares.	70
4.10. Gráfica de campo magnético en el eje z de bobinas cuadradas.	71
4.11. Gráfica de variación de distancia entre bobinas de geometría cuadrada.	72
4.12. Volumen de uniformidad dentro de jaula Helmholtz con una longitud de lado de las bobinas de $l = 1.5 [m]$	74
4.13. Esquema geométrico para cálculo de campo magnético generado en cualquier punto P.	77
4.14. Espectro de la señal de campo magnético en z.	79
4.15. Dimensiones de perfil de aluminio.	80
4.16. Módulos de la GUI del SCMT.	84
4.17. Visualización de animación de trayectoria orbital.	85
4.18. Interfaz gráfica del SCMT.	86
4.19. Menú de pestañas de la interfaz del SCMT.	86
4.20. Tarjeta de desarrollo STM32 N-64.	87
4.21. Puente H BTS7960.	87
4.22. Diagrama eléctrico del sistema de potencia del SCMT.	88
4.23. Magnetómetro HMC5883L.	89
4.24. Diagrama eléctrico para la operación del magnetómetro HMC5883L.	90
5.1. Unión entre dos perfiles “U” de aluminio.	94
5.2. Embobinado de bobinas Helmholtz.	94
5.3. Diseño de complementos estructurales de la jaula Helmholtz.	96
5.4. Ingreso de parámetros de simulación en la GUI.	97
5.5. Señales de corriente y voltaje en simulación activa en la GUI	97
5.6. Diagrama de integración del SCMT.	98
6.1. Simulación completa de campo magnético terrestre.	100
6.2. Pantalla de visualización de la trayectoria orbital del satélite.	100

6.3. Pantalla de visualización de la trayectoria orbital del satélite pasando por la AAS.	101
6.4. Medición de campo magnético local empleando el sensor HMC5883L. . .	102
6.5. Gráfica de campo magnético en el eje z mostrando uniformidad mayor al 99%.	104
6.6. Mapa de campo magnético en el eje z del SCMT.	105
6.7. Modelado de ingeniería de la jaula Helmholtz.	106

Índice de tablas

2.1. Modelos magnéticos.	24
2.2. Clasificación de satélites artificiales por su masa y costo. [18]	26
2.3. Definiciones de la línea 1 del formato TLE.	33
2.4. Definiciones de la línea 2 del formato TLE.	34
3.1. Especificaciones FACE.	38
3.2. Especificaciones de sensores implementados de interés.	39
3.3. Especificaciones de actuador implementado de interés.	39
3.4. Parámetros eléctricos obtenidos del prototipo físico.	41
3.5. Campo magnético a lo largo del eje Y de la jaula con una corriente nominal de 6 [A].	43
3.6. Información básica del proyecto APSCO.	47
3.7. Campo magnético del SSS-1/SSS-2A en órbita satelital en [nT].	47
3.8. Posición de órbita satelital y selección de resultados de campo magnético.	47
3.9. Máximo y mínimo campo magnético obtenido.	48
3.10. Parámetros de una bobina para simulación [11].	50
3.11. Parámetros mecánicos y eléctricos de las bobinas [32].	52
3.12. Características mecánicas y eléctricas de las bobinas Helmholtz [33].	55
3.13. Comparación de parámetros de los simuladores.	56
3.14. Comparación de parámetros de los simuladores.	57
4.1. Declaración de la misión.	60
4.2. Necesidades del SCMT.	62
4.3. Métricas del SCMT.	63
4.4. Comparación de uniformidad de campo magnético con geometrías distintas en bobinas Helmholtz.	71
4.5. Cotización de perfiles “U” de aluminio.	80
4.6. Cotización de perfiles “U” de aluminio.	81
4.7. Cotización de alambre de cobre 18 AWG.	81
4.8. Cotización de alambre de cobre 18 AWG.	82
4.9. Longitud de bobinas Helmholtz.	82
4.10. Especificaciones mecánicas y eléctricas de la jaula Helmholtz.	83
4.11. Especificaciones del SCMT.	91

ÍNDICE DE TABLAS

6.1. Mediciones de campo magnético local. 103

- ACM** Attitude Control Magnetometer. [38](#)
- ADCS** Attitude Determination and Control System. [35–37](#), [46](#), [53](#), [106](#)
- AEM** Agencia Espacial Mexicana. [6](#), [60](#)
- AMR** Anisotropic Magneto-Resistance Magnetometer. [38](#)
- ARPS** Address Resolution Protocol System. [41](#)
- AWG** American Wire Gauge. [77](#), [79](#), [80](#), [91](#)
- CM** Control Module. [46](#)
- CREDES** Centro Regional de Desarrollo Espacial. [6](#)
- DC** Direct Current. [41](#)
- EMFS** Earth Magnetic Field Simulator. [39–41](#)
- FACE** The Facility for Attitude Control Experiments. [37](#), [38](#)
- FOGs** Fiber Optical Gyros. [38](#)
- GPIB** General Purpose Interface Bus. [41](#), [53](#)
- GUI** Graphical User Interface. [53](#), [83](#), [84](#), [88](#), [89](#), [96](#), [97](#), [99](#), [108](#), [115](#), [117](#)
- HiL** Hardware in the Loop. [37](#), [44](#), [61](#)
- I2C** Inter-Integrated Circuit. [64](#), [90](#), [98](#)
- IGRF** International Geomagnetic Reference Field. [22](#), [38](#), [46](#), [58](#), [73](#)
- IM** Interface Module. [46](#)
- IMU** Inertial Measurement Unit. [38](#)

- ISS** International Space Station. 99
- LEO** Low Earth Orbit. 4, 27, 40, 50, 59, 73, 75
- LIESE** Laboratorio de Instrumentación Electrónica de Sistemas Espaciales. 75, 81, 87, 101–103, 107
- MST** Magnetic Simulator Testbed. 46
- MTQ** Magnetic Torquer. 38
- NASA** National Aeronautics and Space Administration. 25
- NOAA** National Oceanic and Atmospheric Administration. 74, 101–103
- OBC** On Board Charger. 38
- PLA** Polylactic Acid. 42
- PWM** Pulse Width Modulation. 64, 89
- RWs** Reaction Wheels. 38
- SAA** South Atlantic Anomaly. 17
- SCMT** Simulador del Campo Magnético Terrestre. 61, 62, 64, 66, 73, 84, 86, 88, 91, 98, 99, 101, 103, 105, 109
- SCPI** Standard Commands for Programmable Instruments. 41
- SI** Sistema Internacional de Unidades. 8, 39, 111
- SSS** Small Student Satellite. 45, 46
- SV** Secular Variation. 22
- TBM** Testbed Module. 46
- TLE** Two-Line Element. 32–34, 84, 108
- UART** Universal Asynchronous Receiver-Transmitter. 64, 97, 98
- WLAN** Wireless Local Area Network. 37
- WMM** World Magnetic Model. 40, 41, 45, 46, 58, 73, 91, 96

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Los nanosatélites han tenido gran impacto en la actualidad debido a las ventajas que presentan frente a los satélites, como son su costo reducido, tiempo de desarrollo, modularidad, innovación, experimentación y bajo impacto espacial, entre otras. Un CubeSat es un tipo de nanosatélite que adopta un tamaño estándar y un factor de forma, cuya unidad se define como “ U ”. Un CubeSat 1U es un cubo de 10 [cm] por lado, con una masa de hasta 2 [kg] [1]. Estos pequeños satélites cumplen con diversas tareas, como telecomunicaciones, percepción remota, experimentación científica, entre otras, y para validar estos dispositivos es fundamental que se les realice una serie de pruebas para garantizar un buen funcionamiento y seguridad durante la misión. Entre las distintas pruebas a las que se someten, se encuentran las pruebas ambientales y de funcionalidad; estas involucran exponer el nanosatélite a diversas condiciones ambientales para simular el entorno que enfrentarán sus sistemas durante su operación en órbita. Asimismo, verificar el funcionamiento de todos los sistemas a bordo para asegurar que, en conjunto, lleven a cabo su misión de manera efectiva.

Una condición ambiental a la que se expone un nanosatélite es el campo magnético de la Tierra. Con objeto de simular este campo dada una órbita baja, donde estos satélites operan frecuentemente debido a su cercanía con la Tierra, se requiere del diseño de un simulador de campo magnético que replique con precisión las condiciones donde estará inmerso el satélite.

1.2. Descripción

Un simulador de campo magnético terrestre, como su nombre lo indica, tiene como propósito simular el campo magnético de la Tierra dada una órbita. En el presente trabajo se propone el diseño de un simulador magnético para realizar pruebas con na-

1. INTRODUCCIÓN

nosatélites, percibiendo sus capacidades y analizando su comportamiento en un entorno lo más parecido al ambiente espacial sin necesidad de experimentar en el medio real, debido a los costos, tiempo, mano de obra, riesgos, entre otros, así como conocer los parámetros para poder determinar, estabilizar y orientar la dinámica de dicho satélite. Se pretende reproducir las condiciones de campo magnético en una órbita terrestre baja (LEO, por sus siglas en inglés), ya que en el rango de alturas, de 150 [km] a 2 000 [km] por encima de la superficie terrestre [2], la intensidad de campo magnético tiende a disminuir conforme incrementa la altitud. Puesto que el campo magnético terrestre se genera por corrientes eléctricas en el núcleo externo líquido de la Tierra, sucede que a mayor distancia del núcleo, la intensidad del campo magnético se debilita. Sin embargo, se debe considerar la anomalía del Atlántico Sur, que se extiende desde el sur del Atlántico hasta América del Sur, donde el campo magnético se ve afectado, debilitando su intensidad a aproximadamente un tercio de la que se encuentra cerca de los polos magnéticos. [3]

El simulador permitirá reproducir las condiciones de campo magnético terrestre y, de esta manera, se podrán probar sistemas de determinación y control de orientación de un nanosatélite, conocer su comportamiento y calibrar sensores magnéticos.

En términos generales, el simulador de campo magnético consiste en 3 bobinas de Helmholtz ortogonales entre sí, de tal manera que cada una de ellas genere una componente del vector de campo magnético. Al hacer circular una corriente en la misma dirección en la bobina de Helmholtz, se genera un campo que se concentra en el eje de simetría común de las dos bobinas que componen la bobina de Helmholtz.

Existen distintas configuraciones de posicionamiento para el nanosatélite dentro de la jaula Helmholtz, la más utilizada es una plataforma de aire donde se realizan movimientos de fricción mínima para una mejor simulación. En condiciones más simples, se coloca un cable del cual se suspende el nanosatélite en el centro de la jaula.

Para la operación del simulador primero se define una órbita y se localiza la posición del satélite. Después se ingresa a un modelo de campo magnético a través de una interfaz para conocer el vector de campo magnético en ese instante y en esa posición. El vector obtenido del proceso anterior es utilizado para calcular la intensidad de corriente y el voltaje que ha de suministrarse a cada bobina para poder generar el campo magnético en el simulador. Previamente, el simulador es calibrado empleando sensores magnéticos para, posteriormente, generar el campo magnético solicitado.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un simulador de campo magnético terrestre como banco de pruebas para el sistema de determinación y control de orientación de nanosatélites con un tamaño máximo del estándar CubeSat 3U, capaz de reproducir, con un error menor al 10 %, un campo magnético uniforme dados los parámetros orbitales de una misión en órbita baja de la Tierra.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar el diseño mecánico y eléctrico de una estructura de bobinas Helmholtz con la geometría adecuada para contener un campo magnético uniforme dentro del volumen ocupado por el nanosatélite.
- Realizar un procedimiento para la eliminación del campo magnético presente en la zona de pruebas.
- Elaborar una interfaz para ingreso y procesamiento de datos.
- Proponer un sistema de potencia capaz de energizar las bobinas Helmholtz para la generación de campo magnético.

1.4. Hipótesis

Gracias al diseño del simulador de campo magnético terrestre, se podría construir un banco de pruebas, donde se emularán las condiciones magnéticas en órbita baja, con el propósito de probar sistemas de determinación y control de orientación de nanosatélites. Asimismo, se podría utilizar para calibrar sensores magnéticos y, en general, realizar cualquier tarea que requiera información del simulador.

1.5. Alcance

El alcance de este trabajo contempla el diseño de un simulador de campo magnético terrestre con el objetivo de ser parte de un banco de pruebas para nanosatélites bajo el estándar CubeSat de hasta 3U de entre 1 y 10 [kg]. Ya que el trabajo se enfoca en la generación del campo magnético terrestre empleando bobinas Helmholtz, se dejará para trabajo a futuro el diseño de un controlador que logre tener mayor precisión en la reproducción del campo magnético y una plataforma donde se pueda colocar el nanosatélite en el centro de la jaula para realizar las pruebas correspondientes.

1.6. Justificación

Todos los sistemas espaciales se someten a rigurosas y variadas pruebas antes de ser implementados, y gran parte del costo de estos se debe precisamente a las múltiples pruebas que deben realizarse ya que el equipo suele ser costoso y requiere de personal altamente calificado para efectuar la prueba e interpretar la información obtenida. El probar un sistema espacial es crítico para asegurar que cumplirá con sus funciones de manera correcta en su misión y es por esto que las grandes agencias espaciales del mundo y empresas fabricantes de sistemas espaciales dedican mucho esfuerzo, tiempo y dinero en probar sus productos. El Laboratorio de Instrumentación Electrónica de Sistemas Espaciales (LIESE) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en conjunto con el Centro Regional de Desarrollo Espacial (CREDES) de la Agencia Espacial Mexicana (AEM) ubicado en Atlacomulco, Estado de México, se encuentra actualmente desarrollando distintos sistemas nanosatelitales y, por lo tanto, se requiere de equipamiento especializado para su verificación y aprobación. Con la propuesta del presente trabajo de tesis se pretende contribuir al equipamiento del CREDES de la AEM, específicamente mediante el desarrollo de un banco de pruebas que permita evaluar sistemas de control de nanosatélites, así como calibrar sensores magnéticos y dar paso a nuevas tecnologías espaciales.

Marco Teórico

En esta sección se abordan los temas requeridos para el desarrollo del simulador, así como los principios necesarios para su diseño.

2.1. Campo magnético

El físico francés André Marie Ampère (1775 - 1836) demostró, a través de experimentos, que existen fuerzas entre conductores por los que circulan corrientes eléctricas, siendo dichas fuerzas función de las magnitudes de las corrientes (i_1 e i_2), del ángulo formado por los conductores (θ) y de la distancia existente entre estos (r_{12}); es decir: [4]

$$F_{conds} = f(i_1, i_2, \theta, r_{12})$$

Los resultados de los experimentos de Ampère se ilustran en la Figura 2.1, donde se muestra que dos conductores en paralelo polarizados en el mismo sentido (los cuales se consideran a 0°) poseen fuerzas que se atraen, mientras que dos conductores en paralelo polarizados en sentido opuesto (considerados a 180°) poseen fuerzas que se repelen.

2. MARCO TEÓRICO

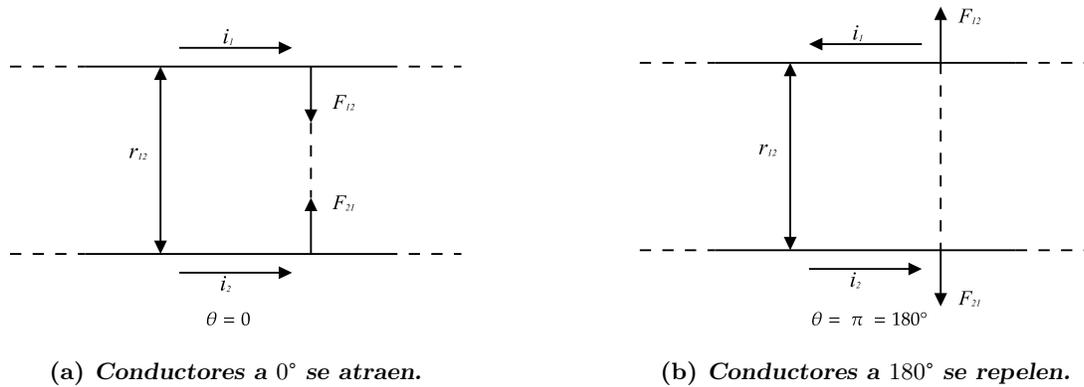


Figura 2.1: Resultados obtenidos por Ampere. [4]

Ampère concluyó que las atracciones y repulsiones observadas difieren de las fuerzas que se presentan entre cuerpos eléctricos en reposo, ya que: [4]

- Cesan cuando cualquiera de las corrientes o ambas se interrumpen.
- En el caso electrostático, cargas del mismo signo se repelen y se atraen si son de diferentes signos; en cambio, si las corrientes van en la misma dirección se atraen y si van en dirección contraria se repelen.

Por lo tanto, se le denominó magnetismo o fuerza de origen magnético a la fuerza que ejerce un conductor por el que circula corriente eléctrica sobre otro que también transporta corriente.

Algunas sustancias, como las aleaciones de hierro, pueden manifestar magnetismo aunque aparentemente no circule corriente a través de ellas. En este caso, el magnetismo se debe a la suma de muchas corrientes diminutas originadas por el movimiento de los electrones orbitando sus núcleos (spin).

La región en la que un imán o un conductor con corriente ejerce sus efectos se conoce como campo magnético, y un campo magnético variable induce un flujo de electrones en un conductor, produciendo así una corriente eléctrica. [5]

Un campo magnético en cualquier punto se define por su dirección y magnitud, de tal forma que es un campo vectorial, también llamado función vectorial de variable vectorial.

La inducción magnética o campo magnético se representa con la letra **B** y su unidad en el SI es el Tesla [T].

2.1.1. Ley de Biot-Savart

La Ley de Biot-Savart permite calcular el campo magnético producido por una corriente que fluye por un conductor.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} d\vec{\ell} \times \hat{r} \quad (2.1)$$

Donde:

$d\vec{B}$ es el vector de campo magnético.

μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío. $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{Wb}/\text{A} \cdot \text{m}]$

$d\vec{\ell}$ es un vector tangente al conductor en cada punto y de igual sentido que la corriente I .

r es la distancia desde cada elemento ($d\ell$) del conductor hacia el punto P en el que deseamos conocer el campo magnético.

\hat{r} es un vector unitario en la dirección r .

El modelo de campo magnético se deduce a partir de la corriente, número de vueltas, tamaño de las bobinas y la distancia óptima entre las mismas. El campo magnético \vec{B} en un punto dado P debido a una intensidad de corriente I se modela mediante la ecuación 2.1 (Fig. 2.2).

El vector diferencial de campo magnético es proporcional a I , $d\vec{\ell}$ y $\text{sen}(\theta)$, e inversamente proporcional a r^2 , donde $d\vec{\ell}$ es un vector diferencial de longitud, r es la distancia a la que se encuentra el punto P , θ es el ángulo entre $d\vec{\ell}$ y \hat{r} . Su dirección y signo vienen dados por la regla del producto cruz.

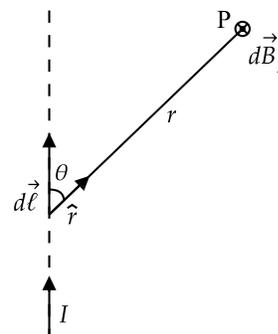


Figura 2.2: Campo magnético producido en el punto P . [6]

2.2. Bobina

Se identifica como bobina a aquel conjunto de espiras formadas por un conductor, necesariamente con un aislamiento en su superficie, cuya diferencia entre los radios exterior (distancia del centro a la última espira de la bobina) e interior (distancia del centro a la primera espira de la bobina) (Δr) y espesor sean mucho menores que el radio medio de la bobina, como se muestra en la Figura 2.3. [4]

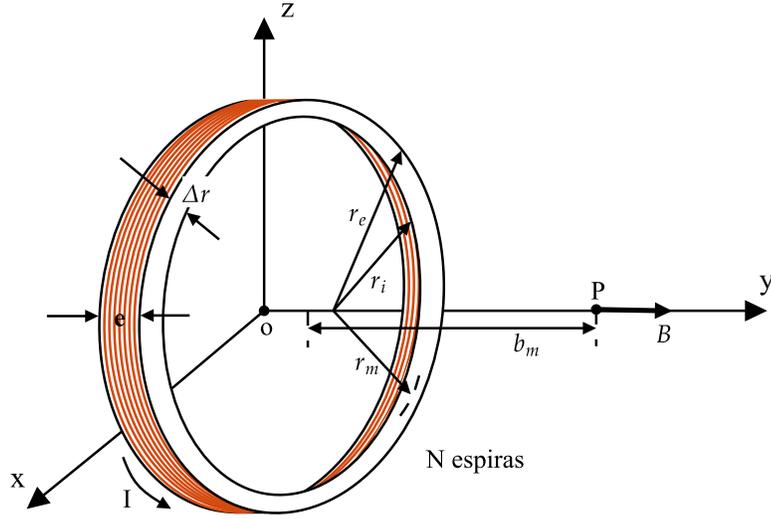


Figura 2.3: Bobina que produce un campo magnético en el punto P debido a una corriente I . [4]

Donde:

- r_m = Radio medio.
- r_e = Radio exterior.
- r_i = Radio interior.
- $\Delta r = r_e - r_i$.
- e = Espesor.

Si $\Delta r \ll r_m$ y $e \ll r_m$, entonces es posible calcular el campo magnético en el punto P de manera aproximada. Por lo tanto, el campo magnético producido por una corriente, I , al fluir en una bobina de devanado uniforme, se obtiene empleando el siguiente modelo: [4]

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I r_m^2 N}{2(r_m^2 + b_m^2)^{3/2}} \hat{j} [T] \quad (2.2)$$

Se puede observar de la ecuación 2.2 que el campo magnético en el punto P se debe a N espiras de radio r_m cuyo centro se encuentra a una distancia b_m del punto de interés.

2.2.1. Bobina Helmholtz

La bobina de Helmholtz consiste en un par de bobinas idénticas que comparten sus ejes de simetría. Cuando estas poseen una geometría circular (Fig. 2.4 a), se colocan comúnmente a una distancia R una de la otra, en donde R es igual al radio de las bobinas, cada una con N vueltas [7]. En el caso de una geometría cuadrada (Fig. 2.4 b), se colocan a una distancia óptima de 0.5445 veces la longitud de las aristas del cuadrado [8]. Al hacer circular una corriente en la misma dirección en ambas bobinas, se genera un campo magnético que se concentra en el eje de simetría común de estas.

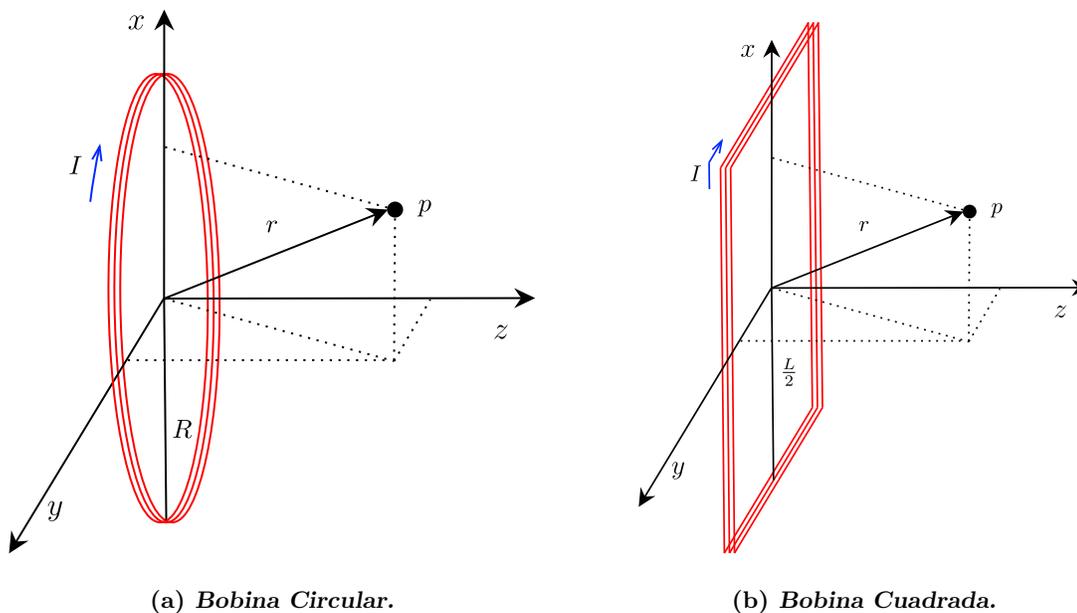


Figura 2.4: Diagramas de bobinas.

Dado que el uso de las bobinas Helmholtz se enfoca en aplicaciones científicas y de ingeniería (como la calibración de sensores magnéticos, la simulación de condiciones ambientales, el estudio de materiales magnéticos y las pruebas de compatibilidad electromagnética, entre otras), se busca generar con ellas campos magnéticos uniformes dentro de un volumen reducido del espacio.

2.2.1.1. Bobinas Helmholtz circulares

El principio de superposición establece que el campo creado por diferentes fuentes es la suma vectorial de los campos magnéticos producidos por cada uno de ellos. Por lo tanto, el campo total de un arreglo de bobinas puede expresarse como la superposición

2. MARCO TEÓRICO

del campo creado por cada una de las bobinas [9].

El campo generado por una espira en forma de circunferencia de radio R ubicado en el plano xy por la que circula una corriente constante I se puede calcular en cualquier punto del espacio empleando la ecuación 2.1, empleando el tipo de coordenadas que se requiera. En coordenadas cartesianas, el modelo está dado por [10]:

$$B_x = \frac{\mu_0 I x z}{2\pi\beta\rho^2} \left[\frac{R^2 + r^2}{\alpha^2} E(k^2) - K(k^2) \right] \quad (2.3)$$

$$B_y = \frac{y}{x} B_x \quad (2.4)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi\beta} \left[\frac{R^2 - r^2}{\alpha^2} E(k^2) - K(k^2) \right] \quad (2.5)$$

Donde:

$$\alpha^2 \equiv R^2 + r^2 - 2R\rho$$

$$\beta^2 \equiv R^2 + r^2 + 2R\rho$$

$$k^2 \equiv 1 - \frac{\alpha^2}{\beta^2}$$

Los elementos $K(k^2)$ y $E(k^2)$ representan integrales elípticas de primer y segundo orden, respectivamente. Aún si el problema se resuelve en coordenadas cilíndricas, aparecen integrales elípticas, siendo el componente acimutal el único que desaparece debido a la simetría.

Estableciendo el origen del sistema de coordenadas en el punto medio de las bobinas, como se muestra en la Fig. 2.5, en lugar del centro de una de ellas, el campo magnético en el eje z viene dado por [10]:

$$B(z\hat{k}) = \frac{\mu_0 N I R^2}{2} \left\{ \frac{1}{\left[R^2 + \left(z + \frac{R}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{\left[R^2 + \left(z - \frac{R}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\} \hat{k} \quad (2.6)$$

Una característica importante de las bobinas Helmholtz es que el campo magnético resultante en la región entre las bobinas es uniforme. Esto se puede mostrar fácilmente, ya que dB/dz y d^2B/dz^2 son ambos cero en el punto intermedio entre las bobinas, por lo que podemos concluir que el campo magnético en esa pequeña región es uniforme.

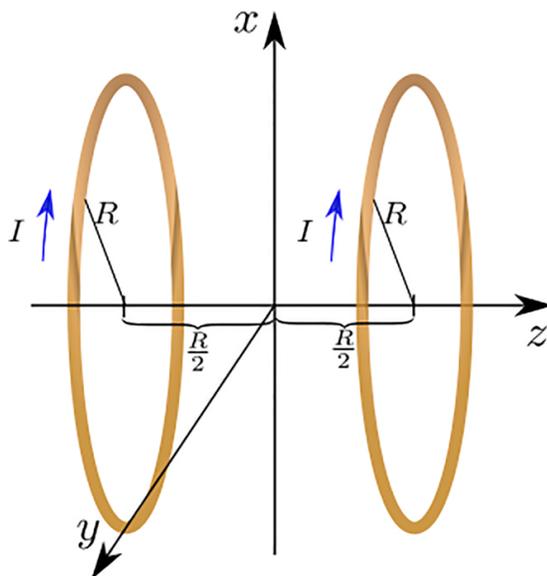


Figura 2.5: Bobina Helmholtz circular. [10]

2.2.1.2. Bobinas Helmholtz cuadradas

El modelo de campo magnético mostrado a continuación se obtuvo del artículo [11], el cual indica que el campo magnético presente en un punto $P(x, y, z)$ que se encuentra entre las dos bobinas cuadradas, $H1$ y $H2$, separadas por una distancia d (fig. 2.6), se calcula considerando dos tipos de conductores: los horizontales, paralelos al eje y , y los verticales, paralelos al eje x . El campo magnético en P será entonces la superposición del campo magnético generado por cada uno de los conductores en la bobina de Helmholtz.

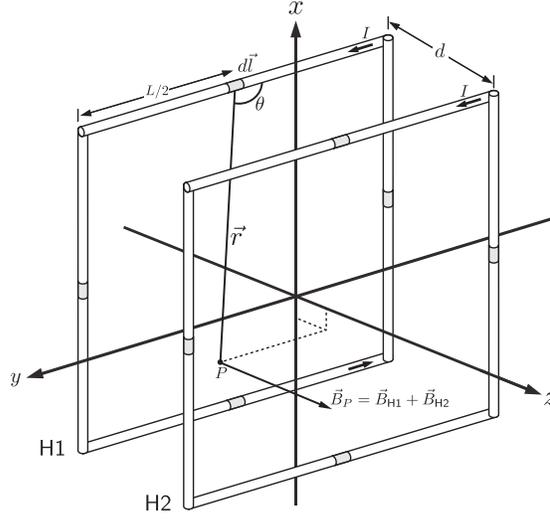


Figura 2.6: Bobina Helmholtz cuadrada. [11]

Suponiendo conductores con una longitud finita L por los cuáles fluye una corriente I , se puede calcular el campo magnético producido por los conductores horizontales partiendo de la ecuación 2.1, que se puede reescribir de la siguiente manera

$$\vec{B} = N \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \theta_2 + \cos \theta_1) \hat{\phi} \quad (2.7)$$

Los valores de los términos de a , $\cos \theta_1$, $\cos \theta_2$ y $\hat{\phi}$ se muestran a continuación. El término a representa la distancia del conductor al punto P .

$$a_h = \sqrt{\left(x - \frac{L}{2}\right)^2 + \left(z - \frac{d}{2}\right)^2} \quad (2.8)$$

El vector unitario del ángulo está definido:

$$\hat{\phi}_h = \cos \phi_h \hat{Z} + \sin \phi_h \hat{X}, \quad (2.9)$$

donde,

$$\cos \phi_h = \frac{X - \frac{L}{2}}{a} \quad (2.10)$$

$$\sin \phi_h = \frac{Z - \frac{d}{2}}{a}$$

Las expresiones de $\cos \theta_1$ y $\cos \theta_2$ de la ecuación 2.7 se pueden escribir de la siguiente

manera:

$$\cos \theta_{1h} = \frac{\frac{L}{2} + y}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + y\right)^2 + a_h^2}} \quad (2.11)$$

$$\cos \theta_{2h} = \frac{\frac{L}{2} - y}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} - y\right)^2 + a_h^2}}$$

Con estos términos, la ecuación 2.7 se reescribe ahora así:

$$\vec{B}_h = B_0(\vec{B}_{hz} + \vec{B}_{hx}), \quad (2.12)$$

donde

$$B_0 = N \frac{\mu_0 I}{4\pi a_h} (\cos \theta_{2h} + \cos \theta_{1h})$$

$$\vec{B}_{hz} = \frac{X - \frac{L}{2}}{a_h} \hat{Z} \quad (2.13)$$

$$\vec{B}_{hx} = \frac{Z - \frac{d}{2}}{a_h} \hat{X}$$

De este modo, las ecuaciones 2.12 y 2.13 modelan el campo magnético generado por los conductores horizontales.

Para el cálculo del campo magnético producido por los conductores verticales se sigue el mismo razonamiento que con los conductores horizontales, la distancia al conductor, el vector unitario del ángulo y las expresiones para $\cos \theta_1$ y $\cos \theta_2$ como se muestra:

$$a_v = \sqrt{\left(y - \frac{L}{2}\right)^2 + \left(z - \frac{d}{2}\right)^2} \quad (2.14)$$

$$\hat{\phi}_h = \cos \phi_v \hat{Z} + \sin \phi_v \hat{Y}, \quad (2.15)$$

$$\cos \phi_v = \frac{Y - \frac{L}{2}}{a_v} \quad (2.16)$$

$$\sin \phi_v = \frac{Z - \frac{d}{2}}{a_v}$$

$$\cos \theta_{1v} = \frac{\frac{L}{2} + x}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + x\right)^2 + a_v^2}} \quad (2.17)$$

$$\cos \theta_{2v} = \frac{\frac{L}{2} - x}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 + a_v^2}}$$

Ahora la ecuación del campo magnético se reescribe como:

$$\vec{B}_v = B_{0v}(\vec{B}_{vy} + \vec{B}_{vz}), \quad (2.18)$$

donde

$$B_{0v} = N \frac{\mu_0 I}{4\pi a_v} (\cos \theta_{2v} + \cos \theta_{1v})$$

$$\vec{B}_{vy} = \frac{Z - \frac{d}{2}}{a_v} \hat{Y} \quad (2.19)$$

$$\vec{B}_{vz} = \frac{Y - \frac{L}{2}}{a_v} \hat{Z}$$

Finalmente, el campo magnético en P será la superposición de los campos generados por cada conductor horizontal y vertical.

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \vec{B}_h + \vec{B}_v \\ &= B_{0h}(\vec{B}_{hx} + \vec{B}_{hz}) + B_{0v}(\vec{B}_{vy} + \vec{B}_{vz}) \end{aligned} \quad (2.20)$$

2.3. Campo magnético terrestre

En el núcleo de la Tierra se encuentran materiales magnéticos fundidos, como el hierro y el níquel, los cuales, al estar en constante movimiento, generan corrientes eléctricas que dan origen a un campo magnético (efecto dínamo) que se extiende hasta el espacio, el cual desvía las partículas cargadas ionizantes que provienen del Sol, protegiendo así la atmósfera del planeta.

La teoría del dínamo de campos magnéticos describe cómo un fluido conductor en movimiento puede inducir y sostener un campo magnético en cuerpos celestes, a través de la inducción electromagnética.

En el caso de la Tierra, se generan movimientos del fluido compuesto de aleaciones de hierro y níquel debido a la propia rotación del planeta y a la convección térmica en su interior. Estos movimientos arrastran líneas de campo magnético creando corrientes eléctricas que, a su vez, generan más campo magnético reforzando el ya existente.

Las líneas de campo magnético son líneas curvas imaginarias que emergen del polo norte magnético y convergen en el polo sur magnético, creando un patrón continuo y cerrado, tal como sucede en un imán (ver Figura 2.9). La densidad de líneas de campo y su distribución representan la fuerza del campo magnético en un punto determinado.

El intervalo de intensidad del campo magnético en la superficie terrestre se encuentra en el intervalo de $25 - 65 [\mu T]$ y se debilita gradualmente conforme aumenta la altitud. Sin embargo, existe una región que comprende desde el Pacífico oriental hasta Sudáfrica, abarcando latitudes entre 15 y 45° S, donde la intensidad del campo geomagnético puede tener un valor mínimo de $22.5 [\mu T]$, cerca de la ciudad de Asunción, Paraguay. Esta anomalía magnética se ha podido medir, gracias a instrumentos precisos de medición, desde hace 400 años y se le conoce como Anomalía del Atlántico Sur (SAA, por sus siglas en inglés), esta se le caracteriza por una alta radiación cercana a la superficie terrestre debido a la debilidad del campo geomagnético local (ver Figura 2.7). Esta región representa la principal vía de entrada de partículas de alta energía a la magnetosfera, junto con las regiones polares. Este efecto resulta problemático en órbitas bajas, donde los satélites u otros objetos que se encuentran orbitando la Tierra se ven afectados por una alta densidad de partículas de rayos cósmicos al pasar por la región de la SAA. Por otra parte, a nivel de superficie, las comunicaciones pueden verse alteradas debido a las corrientes inducidas en las líneas de transmisión durante las tormentas geomagnéticas. [12]

2. MARCO TEÓRICO

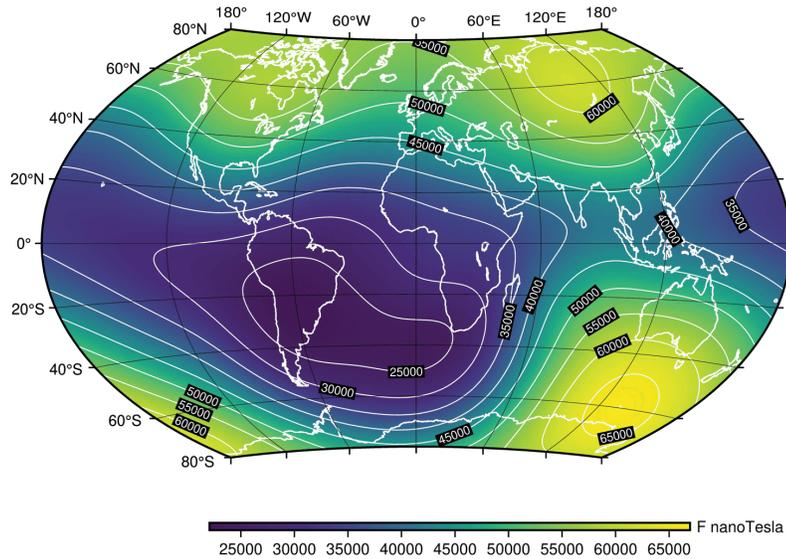


Figura 2.7: Mapa de intensidad del campo geomagnético en la superficie terrestre en nT . Fecha de enero del 2025. [13]

Es importante recordar que el eje magnético no está alineado con el eje de rotación de la Tierra; este tiene una inclinación aproximada de 11° con respecto al eje de rotación, la cual se denomina *declinación magnética*. La declinación magnética se considera positiva al este del norte geográfico y negativa al oeste, y cambia con el tiempo y la ubicación (ver Figura 2.8). Por ejemplo, actualmente en la Ciudad de México, la declinación magnética es de $\approx 0.9^\circ$ Este, lo que significa que el polo norte magnético se encuentra a aproximadamente 0.9° al este del polo norte geográfico desde la CDMX.

El eje magnético puede ser representado como un imán de barra colocado en el centro de la Tierra orientado a 11° con respecto al eje de rotación. Debido a la interacción de polos magnéticos, el polo norte magnético representa, en realidad, el polo sur geográfico y, de manera inversa, el polo sur magnético corresponde al polo norte geográfico, tal como se muestra en la Figura 2.9, donde el norte del imán es atraído hacia el sur magnético.

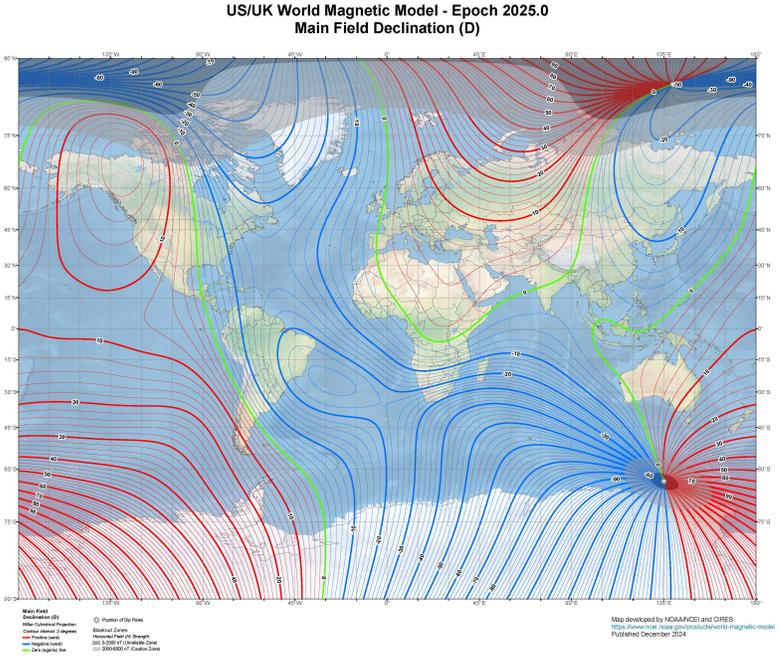


Figura 2.8: Proyección Miller: declinación magnética en el año 2025. Intervalo entre curvas de nivel de 2 grados; curvas rojas indican valores positivos (este), azules negativos (oeste), y verde representa valores cero. [14]

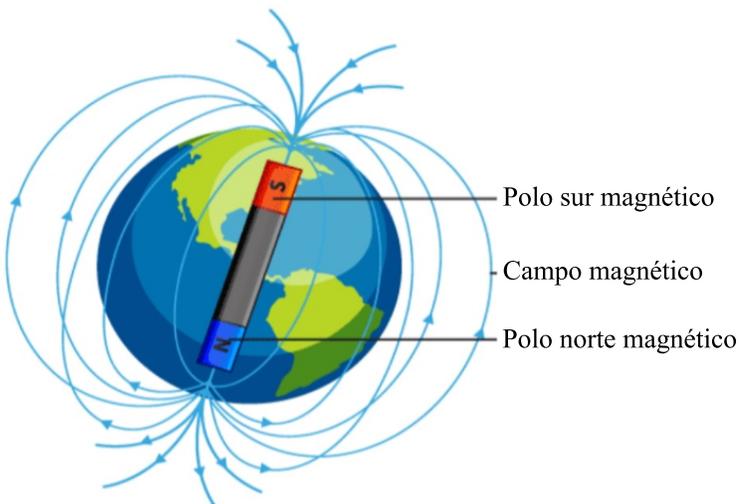


Figura 2.9: Líneas de campo magnético de la Tierra. [15]

Actualmente (2024 - 2025), el polo norte magnético se ubica en el océano Ártico, al norte de Siberia, avanzando hacia el oeste-suroeste a aproximadamente $35-50$ [km/año], mientras que el polo sur magnético se ubica fuera de la costa de la Antártida, sobre el Océano Austral. Su desplazamiento es más lento, de alrededor de $5-10$ [km/año]. [13]

2.3.1. Componentes del campo magnético terrestre

El vector de campo magnético, \mathbf{B} , se describe mediante tres componentes y cuatro elementos derivados de las tres primeras, tal como se muestra en la Figura 2.10.

Las tres componentes del vector, \mathbf{B} , en un sistema cartesiano son: la componente hacia el norte, X , la componente hacia el este, Y , y la componente vertical, Z (positiva hacia abajo). De estas componentes se derivan los elementos: intensidad magnética horizontal, H , intensidad magnética total, F , el ángulo de inclinación magnética, I (medido desde el plano horizontal hasta el vector \mathbf{B} , positivo hacia abajo) y el ángulo de declinación magnética, D (medido en el sentido de las agujas del reloj desde el norte verdadero hasta la componente horizontal del vector del campo).

Estos últimos cuatro elementos se obtienen de las siguientes relaciones: [16]

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2},$$

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2},$$

$$D = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right),$$

$$I = \tan^{-1} \left(\frac{Z}{H} \right).$$

Considerando lo anterior, el vector de campo magnético en un punto B_p se puede calcular teniendo tres elementos: X, Y, Z o F, I, D .

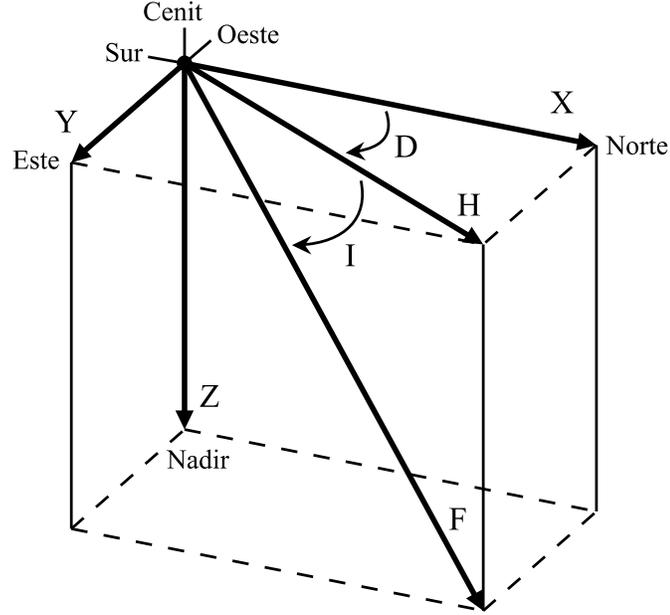


Figura 2.10: Componentes vectoriales del campo magnético en el sistema cartesiano.

2.3.2. Modelo matemático del campo magnético terrestre

El campo magnético terrestre puede representarse analíticamente mediante una serie de armónicos esféricos que incluye coeficientes gaussianos y polinomios de Legendre asociados. Por lo tanto, existen modelos de expansión con distintos grados (N), cuya precisión depende de dónde se limite la serie y de qué tan precisos sean los coeficientes gaussianos medidos.

Considerando lo anterior, se puede describir el campo magnético terrestre, \mathbf{B} , como el gradiente negativo de una función potencial magnética escalar, V ; [17]

$$B(r, \phi, \theta) = -\nabla V(r, \phi, \theta) [T].$$

Esta función potencial puede ser representada por una serie de armónicos esféricos:

$$V(r, \phi, \theta) = R_e \sum_{n=1}^N \left(\frac{R_e}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)] P_n^m(\theta), \quad (2.21)$$

donde R_e es el radio ecuatorial de la Tierra, g_n^m y h_n^m son coeficientes gaussianos (n corresponde al grado y, m al orden), r , ϕ y θ son la distancia geocéntrica, co-elevación y longitud Este desde Greenwich, respectivamente, que pueden definir cualquier punto en el espacio, y P_n^m se refiere a los polinomios de Legendre en función del ángulo polar θ .

2. MARCO TEÓRICO

El conjunto de coeficientes gaussianos que se utilizan en los modelos analíticos que describen el campo magnético de la Tierra se denomina Campo de Referencia Geomagnético Internacional (IGRF, por sus siglas en inglés). Cada cinco años, un grupo de la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA, por sus siglas en inglés) examina la alta calidad y las observaciones distribuidas globalmente del campo geomagnético y produce nuevos coeficientes en unidades de nanotesla (nT). [17] La última actualización es el modelo IGRF-14, el cual empleó información de observatorios geomagnéticos globales y misiones espaciales, incluyendo Swarm de la Agencia Espacial Europea y el satélite espacial Macao Science-1. Dado que el campo geomagnético varía con el tiempo, el modelo IGRF también incluye los llamados coeficientes de variación secular (SV, por sus siglas en inglés), de modo que, para los cinco años posteriores a la época más reciente, dicha variación puede utilizarse para una extrapolación lineal hacia el futuro (del 2025 al 2030). Por lo tanto, el IGRF se actualiza cada cinco años para tener en cuenta los cambios en el campo magnético de la Tierra, asegurando la continuidad de precisión para aplicaciones científicas y de navegación.

Debido a la naturaleza conservativa de un campo magnético estático ($\vec{\nabla} \times \vec{B} = \vec{0}$), el campo magnético terrestre en coordenadas esféricas se obtiene a partir del gradiente de la función potencial (ec. 2.21), como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 B_r &= -\frac{\delta V}{\delta r} = \sum_{n=1}^N \left(\frac{R_e}{r}\right)^{n+2} (n+1) \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)] P_n^m(\theta), \\
 B_\theta &= -\frac{1}{r} \frac{\delta V}{\delta \theta} = -\sum_{n=1}^N \left(\frac{R_e}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)] \frac{\delta P_n^m(\theta)}{\delta \theta}, \\
 B_\phi &= \frac{-1}{r \sin \theta} \frac{\delta V}{\delta \phi} = -\frac{1}{\sin(\theta)} \sum_{n=1}^N \left(\frac{R_e}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [-m g_n^m \sin(m\phi) + m h_n^m \cos(m\phi)] P_n^m(\theta).
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

donde $P_n^m(\theta)$ y $\frac{\delta P_n^m(\theta)}{\delta \theta}$ son funciones de Legendre y sus derivadas asociadas.

Una vez que se obtienen los polinomios de Legendre y sus derivadas asociadas en la forma normalizada de Gauss ($P^{n,m}$), se calculan los coeficientes gaussianos también en la forma normalizada de Gauss ($g^{n,m}, h^{n,m}$). Después, se obtienen los coeficientes para los cinco años posteriores a la época presente empleando los términos SV mencionados anteriormente y, finalmente, es posible calcular el campo magnético terrestre como se muestra a continuación: [17]

$$B_r = \sum_{n=1}^N \left(\frac{R_e}{r} \right)^{n+2} (n+1) \sum_{m=0}^n [g^{n,m} \cos(m\phi) + h^{n,m} \sin(m\phi)] P^{n,m}(\theta),$$

$$B_\theta = \sum_{n=1}^N \left(\frac{R_e}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [g^{n,m} \cos(m\phi) + h^{n,m} \sin(m\phi)] \frac{\delta P^{n,m}(\theta)}{\delta \theta},$$

$$B_\phi = -\frac{1}{\sin(\theta)} \sum_{n=1}^N \left(\frac{R_e}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [-mg^{n,m} \sin(m\phi) + mh^{n,m} \cos(m\phi)] P^{n,m}(\theta).$$

2.3.3. Modelos Magnéticos

Existen modelos magnéticos que describen el campo magnético de la Tierra siguiendo el modelo matemático presentado anteriormente. Sin embargo, algunos modelos tienen aplicaciones diferentes.

La Tabla 2.1 muestra los modelos más utilizados en el mundo, así como las características que los describen.

En la tabla mencionada se muestra el parámetro “Orden” (m), el cual hace referencia al número de líneas nodales meridionales ($2m$) indicando las variaciones longitudinales. El orden se incrementa con la complejidad de la serie de armónicos esféricos. La resolución del modelo se relaciona con el grado de la expansión de armónicos esféricos. El grado hace referencia al número de líneas nodales circulares (n), el cual indica las variaciones latitudinales. Al tener un grado “ n ” de gran magnitud, se tiene una mayor discretización del modelo, resultando en una mejor resolución.

En cuanto al tiempo de actualización, se refiere al tiempo que tardan las organizaciones en actualizar los valores de campo magnético para el siguiente período. Recordando que se cuenta con coeficientes que predicen los valores de campo magnético para ese mismo período de tiempo posterior al momento de actualización.

El tipo de modelo se refiere a los tres modelos en los que se pueden agrupar por su cobertura. Se presenta el global, que representa el campo magnético en toda la Tierra, incluidos sus cambios en el tiempo; el regional, que es capaz de capturar variaciones más pequeñas de campo magnético causadas por geología local o anomalías magnéticas en zonas específicas; y el externo, que representa campos generados por corrientes eléctricas fuera del núcleo terrestre (en la ionosfera o magnetosfera).

Finalmente, la aplicación indica el uso de cada modelo magnético.

2. MARCO TEÓRICO

Tabla 2.1: Modelos magnéticos.

Modelo (Organización)	Orden	Resolución [km]	Tiempo de actualización	Tipo de modelo	Aplicación
WMM (NOAA y UK)	12	3,334	5 años	Global	Navegación civil, GPS, dispositivos móviles
IGRF (IAGA)	13	3,077	5 años	Global	Navegación, ciencia
CHAOS (DTU Space)	110 - 130	300	6 -12 meses	Global	Investigación
LCS-1 (NASA/GSFC y GFZ Potsdam)	185	220	Estático (2013)	Global	Investigación
CM5 (IPGP y CEA-Leti)	80ext 14int	2,500ext 500int	Estático (2013)	Global (externo+ inducido)	Ambiente espacial, satélites
BGGM (BGS)	50	800	1 año	Regional	Industria petrolera y de gas
EMM (NOAA/NGA)	790	50	5 años	Global (+litosférico)	Estudios geofísicos, navegación polar
HDGM (Vector Magnetics LLC) Privado	-	1-10 variable por región	Variable	Local/ Regional	Sector energético

2.4. Satélites artificiales

Un satélite artificial es cualquier objeto construido por seres humanos con la finalidad de orbitar algún cuerpo celeste con una misión específica [18]. Los satélites están compuestos de diversos subsistemas que hacen posible cumplir con su misión. Los subsistemas que conforman un satélite son:

- Sistema de potencia, el cual se encarga de generar, almacenar y distribuir energía a todos los subsistemas del satélite que lo requieran.
- Sistema de determinación y control de orientación, el cual determina y controla la orientación del satélite en órbita, permitiendo estabilizar y apuntar en la dirección que se requiera.
- Sistema de regulación térmica, el cual mantiene la temperatura del satélite dentro de los límites de operación.
- Sistema estructural, el cual soporta todos los subsistemas y los protege del ambiente espacial.
- Sistema de telecomunicaciones, el cual permite el intercambio de información entre el satélite y las estaciones terrenas.
- Sistema de comando y manejo de información (computadora a bordo), el cual coordina todos los subsistemas, ejecuta comandos y gestiona los datos.
- Sistema de propulsión, el cual permite realizar maniobras orbitales o corregir la posición del satélite (no siempre presente).
- Carga útil, es el artefacto o instrumento que desempeña la misión principal del satélite.

Las aplicaciones de los satélites artificiales abarcan desde servicios básicos como la transmisión de televisión, radio y telefonía móvil, hasta usos más complejos, entre los que se incluyen los sistemas de geolocalización y los algoritmos de percepción remota, los cuales, mediante el uso de cámaras multispectrales, permiten evaluar el estado de los cultivos y monitorear áreas naturales [18].

Por ejemplo, en la Figura 2.11 se observa el satélite de reconocimiento que orbita Marte, llamado “Mars Reconnaissance Orbiter” por la NASA, el cual tiene como misión buscar evidencia de que el agua persistió en la superficie de Marte durante un largo periodo de tiempo.



Figura 2.11: Mars Reconnaissance Orbiter. [19]

2.4.1. Clasificación de satélites artificiales

A través de los años, los satélites artificiales se han ido clasificando según los objetivos de cada misión, los cuales están vinculados con la naturaleza de su carga útil. Por otro lado, también se han clasificado por su dimensión, masa y costo de desarrollo, construcción y lanzamiento. Específicamente por su masa y costo, como se muestra en la Tabla 2.2. [18]

Tabla 2.2: Clasificación de satélites artificiales por su masa y costo. [18]

Clase	Masa [kg]	Costo [M £]
Satélite grande convencional	> 1,000	> 100
Satélite pequeño convencional	500 – 1,000	25 – 100
Minisatélite	100 – 500	7 – 25
Microsatélite	10 – 100	1 – 7
Nanosatélite	1 – 10	0.1 – 1
Picosatélite	< 1	< 0.1

La construcción de satélites pequeños se ha vuelto tendencia en las últimas décadas debido a la necesidad de reducir costos y tiempo en el desarrollo y lanzamiento de satélites artificiales, así como de tener una mayor accesibilidad por parte de pequeñas organizaciones y universidades. La aparición de satélites cada vez más pequeños ha sido posible gracias a avances tecnológicos, principalmente en el desarrollo de electrónica, estrategias operativas y un mayor interés por diversos sectores de la población. La creación de satélites artificiales tan pequeños ha dado lugar a constelaciones de satélites, es decir, grupos de satélites miniatura que operan en conjunto para brindar distintos tipos de servicios, resultando en cobertura global, redundancia de datos, tolerancia a fallas, entre otros.

Siguiendo esta tendencia, en los últimos años se ha observado un incremento en el desarrollo de nanosatélites (ver Figura 2.12), los cuales poseen ventajas representativas frente a los demás tipos de satélites artificiales, como la adopción de estándares modulares (formato CubeSat), costo de desarrollo y lanzamiento, y versatilidad operativa, ya que pueden ser lanzados como carga secundaria en cohetes portadores principales, o bien mediante vehículos dedicados al despliegue de pequeñas cargas útiles.

La mayoría de los nanosatélites operan en órbitas terrestres bajas (LEO, por sus siglas en inglés), en un rango aproximado de 300 a 1,000 kilómetros de altitud. Aunque su vida útil es limitada (6 meses - 3 años), desempeñan de manera efectiva sus tareas, teniendo una comunicación rápida con la estación terrena. Al término de su operación, muchos de estos satélites se desintegran en el reingreso a la atmósfera terrestre, minimizando el riesgo de generación de desechos espaciales.

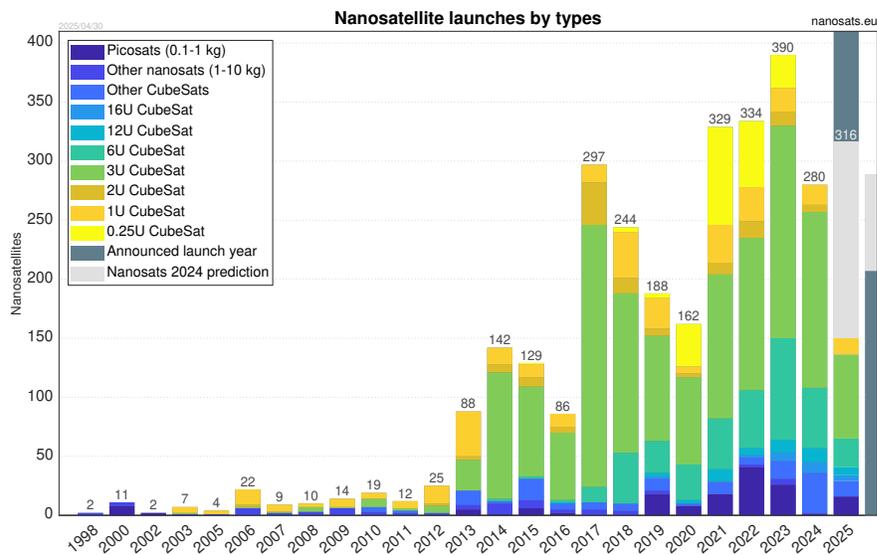


Figura 2.12: Lanzamientos de nanosatélites. [20]

2.4.2. Estándar CubeSat

Con el fin de seguir reduciendo costos y tiempos de desarrollo, así como incrementar la accesibilidad al espacio y mantener lanzamientos frecuentes, en 1999 se realizó un proyecto que más tarde se volvería un estándar. [18]

El estándar CubeSat se basa en unidades cúbicas U , de $10 \times 10 \times 10$ [cm], las cuales facilitan la integración de sistemas, ensamblaje, despliegue económico en lanzamientos colectivos y compatibilidad con sistemas de lanzamiento comerciales. Se pueden generar distintas configuraciones de nanosatélites CubeSat, juntando y apilando dos o más unidades U (ver Figura 2.13) con el fin de obtener mayor capacidad para la carga útil y los subsistemas, dependiendo de la misión.

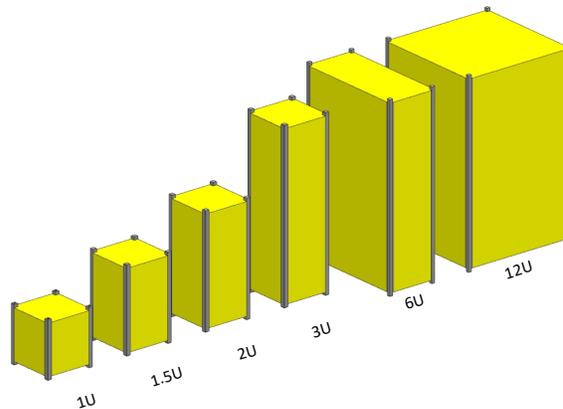


Figura 2.13: Familia de CubeSats. [1]

En este sentido, la interfaz de lanzamiento Poly Picosatellite Orbital Deployer (P-POD, por sus siglas en inglés) es un sistema de despliegue estándar que asegura que el diseño de nanosatélites bajo el estándar CubeSat cumple con los requerimientos descritos en el *CubeSat Design Specification*.

Debido a las grandes ventajas que presenta este estándar, se realizaron cada vez más lanzamientos siguiendo este formato. En la Figura 2.14 se muestra el número de lanzamientos de nanosatélites realizados y por realizar hasta el año 2025.

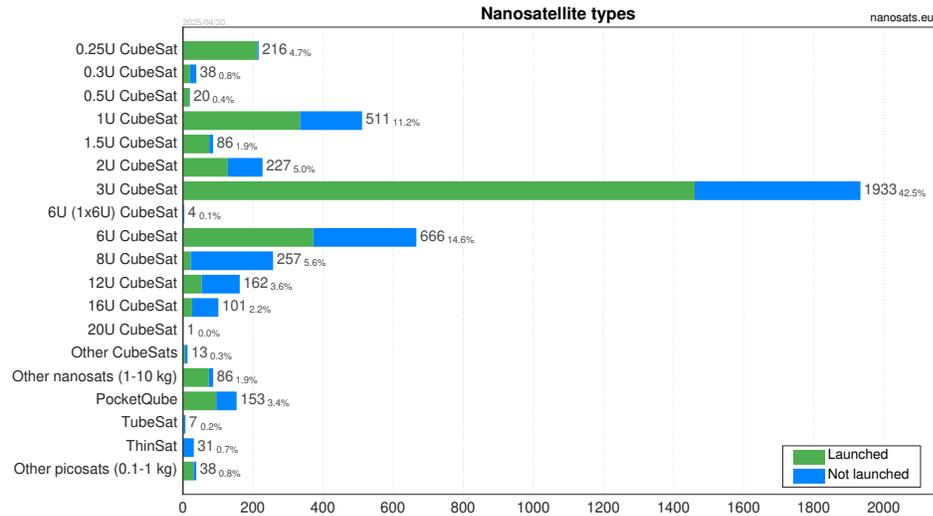


Figura 2.14: Lanzamientos de nanosatélites CubeSat. [20]

2.5. Mecánica orbital

La mecánica orbital estudia el movimiento de los cuerpos en el espacio basado en las leyes de Newton y la ley de gravitación universal, las cuales permiten predecir la trayectoria de los objetos alrededor de cuerpos más grandes a lo largo de intervalos de tiempo.

El caso más estudiado es un sistema de dos cuerpos donde el cuerpo pequeño orbita alrededor del más grande, así la trayectoria de una de las masas con respecto a la otra es una sección cónica (círculo, elipse, parábola o hipérbola), cuya forma está determinada por la excentricidad. Varias propiedades fundamentales de los distintos tipos de órbitas se analizan con la ayuda de las leyes de conservación del momento angular y de la energía. Estas propiedades incluyen el período de las órbitas elípticas, la velocidad de escape asociada a trayectorias parabólicas y la energía característica de las trayectorias hiperbólicas [21]. A partir de la presentación de los cuatro tipos de órbitas, se introduce el sistema de referencia perifocal, el cual se utiliza para describir órbitas en tres dimensiones y el sistema de referencia geocéntrico ecuatorial, para describir órbitas alrededor de la Tierra en tres dimensiones. Además, se presentan los elementos orbitales, los cuales definen la forma y orientación de una órbita. Estos son esenciales para la determinación de posición y velocidad del objeto en una órbita en un instante de tiempo dado.

2.5.1. Sistemas de referencia

Sistema de referencia perifocal

Es el “sistema natural” para una órbita. Está centrado en el foco de la órbita. Su plano xy corresponde al plano orbital, y su eje x está dirigido desde el foco hacia el periapsis, como se muestra en la Fig. 2.15. El vector unitario a lo largo del eje x (la línea de los ápsides) se denota como \hat{p} . El eje y , con vector unitario \hat{q} , se encuentra a 90° de la anomalía verdadera respecto al eje x . El eje z es perpendicular al plano de la órbita y apunta en la dirección del vector de momento angular [21].

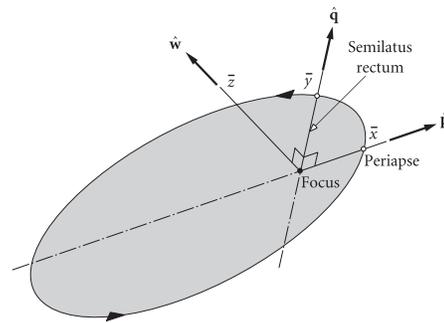


Figura 2.15: Sistema de referencia perifocal [21].

Sistema de referencia geocéntrico ecuatorial

Es un sistema de coordenadas cartesianas no rotatorio utilizado como marco de referencia inercial para el problema de dos cuerpos entre la Tierra y un satélite, como se muestra en la Fig. 2.16. El eje X apunta en la dirección del equinoccio de primavera. El plano XY corresponde al plano ecuatorial de la Tierra, y el eje Z coincide con el eje de rotación terrestre, apuntando hacia el norte. Los vectores unitarios \hat{I} , \hat{J} y \hat{K} forman una tríada dextrógira [21].

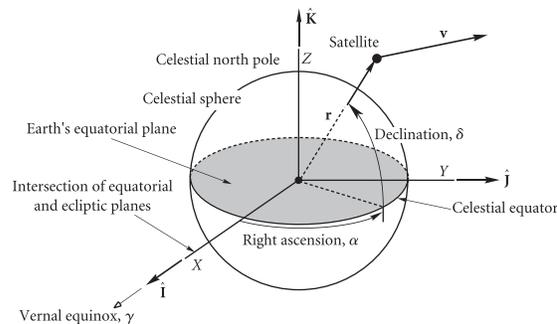


Figura 2.16: Sistema de referencia geocéntrico ecuatorial [21].

2.5.2. Elementos orbitales

La definición de una órbita en el plano requiere dos parámetros: excentricidad e y el semieje mayor a . Estos dos parámetros determinan el tamaño y la forma de la órbita. La ubicación de un punto en la órbita requiere de un tercer parámetro: la anomalía verdadera θ , que es el ángulo medido en el plano orbital en el sentido del movimiento entre el perigeo y la posición del satélite. Para describir la orientación de una órbita en tres dimensiones se requieren tres parámetros adicionales, llamados ángulos de Euler, los cuales se muestran en la Fig. 2.17 [21]. Estos ángulos son:

- Ascensión derecha del nodo ascendente Ω : el ángulo entre el eje positivo X y la línea de nodos. ($0^\circ - 360^\circ$).
- Inclínación i : el ángulo diedro entre el plano orbital y el plano ecuatorial, también es el ángulo entre el eje positivo Z y la normal al plano orbital ($0^\circ - 180^\circ$).
- Argumento del perigeo ω : el ángulo entre el vector de la línea de nodos N y el vector que apunta al perigeo e medido desde el plano orbital ($0^\circ - 360^\circ$).

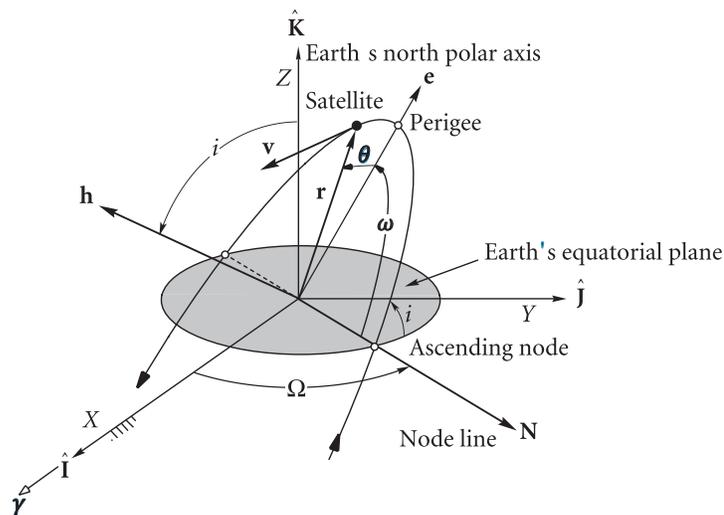


Figura 2.17: Marco geocéntrico ecuatorial y parámetros orbitales [21].

2.5.2.1. Formato Two-Line Element

Un conjunto de elementos orbitales de dos líneas (TLE, por sus siglas en inglés) del comando de defensa aeroespacial norteamericano (NORAD, por sus siglas en inglés) es el formato de dos líneas de datos de 69 caracteres cada una, que pueden utilizarse junto con el modelo orbital SGP4/SDP4 para determinar la posición y velocidad de un satélite en órbita en un momento específico en el tiempo, llamado época. Los únicos caracteres válidos en un conjunto TLE son los números del 0 al 9, las letras mayúsculas de la A a la Z, el punto, el espacio y los signos más y menos; ningún otro carácter es válido.

No todos los caracteres válidos pueden usarse en todas las columnas del conjunto de elementos. La Fig. 2.18 muestra qué tipo de caracter es válido para cada columna. A continuación, se muestra el significado de la nomenclatura y las Tablas 2.3 y 2.4 que definen cada uno de los campos individuales para las líneas 1 y 2, respectivamente [22].

Nomenclatura:

- Espacio o punto, no pueden contener otro caracter.
- N, número del 0 - 9 o, en algunos casos, un espacio.
- A, letra de la A a la Z o un espacio.
- C, caracter que represente la clasificación del conjunto de elementos: normalmente una 'U' para datos no clasificados o una 'S' para datos secretos.
- + o -, signo +, - o un espacio.

```
1 NNNNNC NNNNAAA NNNNN.NNNNNNNNN +.NNNNNNNN +NNNNN-N +NNNNN-N N NNNNN
2 NNNNN NNN.NNNN NNN.NNNN NNNNNNNN NNN.NNNN NNN.NNNN NN.NNNNNNNNNNNNNNN
```

Figura 2.18: Formato del conjunto TLE.

Tabla 2.3: Definiciones de la línea 1 del formato TLE.

Campo	Columna	Descripción
1.1	01	Número de línea del formato TLE (1).
1.2	02	Espacio en blanco.
1.3	03-07	Número de satélite.
1.4	08	Clasificación.
1.5	09	Espacio en blanco.
1.6	10-17	Designador internacional. 10-11: Dos últimas cifras del año de lanzamiento. 12-14: Número de lanzamiento del año. 15-17: Identificación del componente del lanzamiento.
1.7	18	Espacio en blanco.
1.8	19-32	Época. 19-20: Dos últimas cifras del año. 21-32: Día del año y fracción del día.
1.9	33	Espacio en blanco.
1.10	34-43	Primera derivada de la velocidad orbital media: $\dot{n}/2(\text{revs}/\text{día}^2)$.
1.11	44	Espacio en blanco.
1.12	45-52	Segunda derivada de la velocidad orbital media: $\frac{1}{6}\ddot{n}(\text{revs}/\text{día}^3)$.
1.13	53	Espacio en blanco.
1.14	54-61	Término de resistencia, $B * (\text{en } R_e^{-1}, \text{ donde } R_e \text{ es el radio de la Tierra})$.
1.15	62	Espacio en blanco.
1.16	63	Número 0.
1.17	64	Espacio en blanco.
1.18	65-68	Número de elemento.
1.19	69	Suma de verificación (en formato del 0-9).

Tabla 2.4: Definiciones de la línea 2 del formato TLE.

Campo	Columna	Descripción
2.1	01	Número de línea del formato TLE (2).
2.2	02	Espacio en blanco.
2.3	03-07	Número de satélite.
2.4	08	Espacio en blanco.
2.5	09-16	Inclinación (°).
2.6	17	Espacio en blanco.
2.7	18-25	Ascensión derecha del nodo ascendente (°).
2.8	26	Espacio en blanco.
2.9	27-33	Excentricidad.
2.10	34	Espacio en blanco.
2.11	35-42	Argumento del perigeo (°).
2.12	43	Espacio en blanco.
2.13	44-51	Anomalía media (°).
2.14	52	Espacio en blanco.
2.15	53-63	Velocidad orbital media (revs/día).
2.16	64-68	Número de revoluciones en la época.
2.17	69	Suma de verificación (en formato del 0-9).

2.6. Sistema de Determinación y Control de Orientación (ADCS) de un Satélite

El control de orientación se refiere a las acciones para manipular la dirección de un objeto con respecto a un sistema de referencia inercial u otra entidad. El término es especialmente utilizado para referirse al conjunto de sensores, actuadores y algoritmos para controlar la orientación de las naves espaciales (tripuladas o no, como es el caso de los satélites artificiales). Para controlar la orientación de un vehículo u objeto es preciso disponer de: sensores para medir su dinámica y posición, algoritmos para determinar su orientación y ordenar a los actuadores realizar las maniobras necesarias con base

2.6 Sistema de Determinación y Control de Orientación (ADCS) de un Satélite

en las mediciones de los sensores, y actuadores para aplicar los pares requeridos para estabilizar y reorientar al objeto de forma que adopte la estabilización y apuntamiento requeridos (ver Figura 2.19).

El sistema ADCS se divide en dos áreas principales: determinación de orientación y control de orientación. La determinación de orientación consiste en calcular la posición angular del satélite con respecto a un sistema de referencia inercial o a un cuerpo celeste de interés. Este proceso se basa en la integración de algoritmos y modelos magnéticos, los cuales permiten corregir la orientación del satélite en la etapa de control. El hardware involucrado incluye sensores absolutos, tales como magnetómetros, sensores solares, sensores de horizonte, cámaras estelares y giroscopios.

Por otra parte, el control de orientación es el proceso de reorientar el satélite a una dirección deseada, y se divide en dos áreas: la estabilización de orientación, que consiste en mantener una orientación contrarrestando las perturbaciones del ambiente espacial, y la maniobra de orientación, que consiste en pasar de la orientación actual a una dirección de apuntamiento deseada. No obstante, cada área necesita de la otra para desempeñar su tarea. [18]

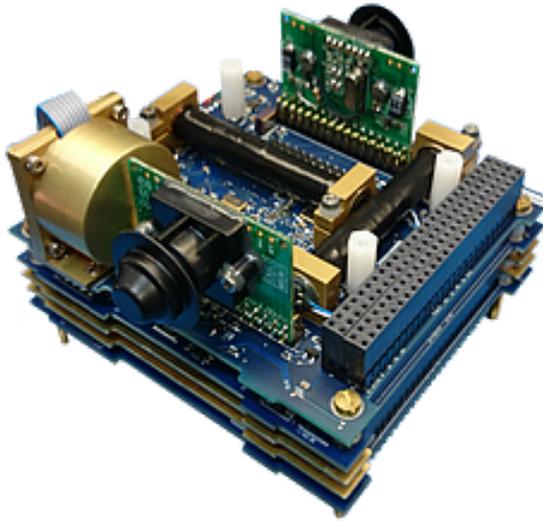


Figura 2.19: ADCS de un CubeSat. [23]

2.6.1. Interacción del ADCS con el campo magnético terrestre

El campo magnético terrestre es uno de los recursos que se utilizan para el diseño del ADCS de nanosatélites, ya que ayuda a conocer y controlar la orientación de un nanosatélite en órbitas bajas sin necesidad de combustible.

La primera interacción que se tiene del sistema con el campo magnético terrestre es inmediatamente después del despliegue del nanosatélite, debido a que se requiere medir el campo magnético empleando un magnetómetro para su calibración posterior, así como la de actuadores magnéticos que se utilizarán después para el control de orientación.

En la etapa de determinación de orientación se emplea un magnetómetro con el fin de aportar el vector de referencia: el campo magnético terrestre. Este se compara con el valor teórico del modelo geomagnético seleccionado, dada una posición en órbita, para conocer la orientación del nanosatélite.

Asimismo, se utilizan otros sensores, como sensores solares, de estrellas, giroscopios, entre otros, que también aportan valores de referencia. Sin embargo, debido al propio ambiente espacial, el campo magnético terrestre es la única referencia que se mantiene constante en cualquier momento del tiempo.

Teniendo dos o más vectores de referencia, se emplean algoritmos (por ejemplo, TRIAD o filtro de Kalman extendido) que estiman de manera precisa la orientación del nanosatélite. [24]

En la etapa de control de orientación, para la estabilización del nanosatélite (comúnmente al despliegue), se emplea la técnica de “*Detumbling*” o proceso de reducción de rotación no controlada, la cual utiliza un algoritmo (B-Dot) que involucra las variaciones del campo magnético medidas por un magnetómetro con el fin de generar pares en barras magnéticas que disipen la energía rotacional. En cuanto a las maniobras de orientación, de igual manera, el campo geomagnético se mide continuamente para calcular la corriente necesaria que se deberá suministrar a los magnetopares para generar el momento de fuerza que oriente al nanosatélite en la dirección requerida. [24]

Cuando se utilizan ruedas de reacción en el ADCS, estas se suelen acompañar de magnetopares que ayuden cuando las ruedas se saturen. Los magnetopares pueden descargar las ruedas mediante la generación de pares opuestos al momento residual.

En sistemas de control pasivo (por ejemplo, imanes permanentes o barras de histéresis) se emplea un magnetómetro que se encuentra monitoreando la orientación del nanosatélite. Estos casos ocurren cuando se requiere que una cara apunte al norte magnético o hacia el campo magnético terrestre, por ejemplo, para telemetría.

Estado del Arte

Se presenta una recopilación de información sobre los simuladores de campo magnético terrestre desarrollados en todo el mundo en la actualidad con el fin de conocer parámetros de diseño que sirvan de pauta para el presente trabajo. Asimismo, identificar el tipo de sensores y actuadores magnéticos empleados para cada proyecto. Finalmente, se concluye con una tabla comparativa de los parámetros y características de los simuladores existentes con la intención de definir requerimientos y especificaciones del simulador de campo magnético.

3.1. Instalación para Experimentos de Control de Orientación

La Instalación para Experimentos de Control de Orientación (FACE, por sus siglas en inglés) se implementó en el Instituto de Sistemas Espaciales del Centro Aeroespacial Alemán en Bremen, Alemania (Fig. 3.1) [25]. El objetivo de la instalación fue desarrollar, validar y probar el ADCS de pequeños satélites de 100 a 200 [kg] de masa en un entorno realista de órbita terrestre baja.

FACE consiste en un soporte de aire hemisférico con una plataforma de componentes satelitales, simulador solar preliminar y simulador de campo magnético. La influencia ambiental deseada del campo magnético de la Tierra y/o la iluminación solar puede emplearse para el objetivo específico del experimento.

La plataforma proporciona un sistema de distribución de energía de múltiples salidas y una interfaz de comando de red de área local inalámbrica (WLAN, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, un satélite autosostenible, es decir, un satélite que mantenga sus funciones operativas durante un periodo prolongado sin necesidad de intervenirlo, es colocado en la plataforma, el cual puede ser sometido a varias pruebas. Se puede realizar una prueba de HiL utilizando componentes de vuelo simplemente montando el sensor o actuador deseado en la plataforma.

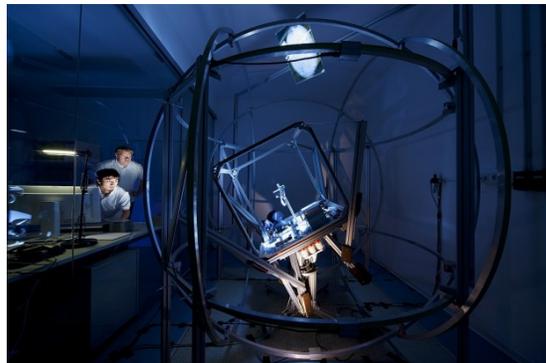


Figura 3.1: FACE. [26]

Los componentes principales de FACE son la computadora central, componentes a bordo; una computadora industrial integrada que se utiliza como cargador de a bordo (OBC), giroscopio de fibra óptica (FOGs), magnetómetro de control de orientación (ACM), ruedas de reacción (RWs), magnetómetro de magnetorresistencia anisotrópica (AMR), magnetopares (MTQ), y una unidad de medición inercial (IMU), la plataforma del satélite sobre el soporte de aire, el simulador solar preliminar y el simulador de campo magnético.

Este último simulador está compuesto por 3 pares de bobinas Helmholtz circulares de 2.4 [m] de diámetro que generan un ambiente magnético lo más parecido al entorno espacial cancelando el campo magnético local. La intensidad de campo magnético de salida es de ± 210 [μT] con una precisión del 1 % por par de bobinas (Tabla 3.1). La generación de campo magnético es posible con un software de control que se basa en el modelo de órbita SGP4 y el modelo de campo magnético IGRF.

Tabla 3.1: Especificaciones FACE.

Componente	Especificaciones	
Batería	Salida	3.3 - 30 [V]
Simulador de Campo Magnético	Diámetro de bobina	2.4 [m]
	Rango de salida de campo magnético	± 210 [μT]

El diseño de la plataforma y componentes a bordo, descritos anteriormente, se muestran en la figura 3.2. En las tablas 3.2 y 3.3 se muestran las especificaciones de los componentes que son de interés (ACM, AMR, IMU y MTQ) para la verificación y validación del simulador de campo magnético terrestre.

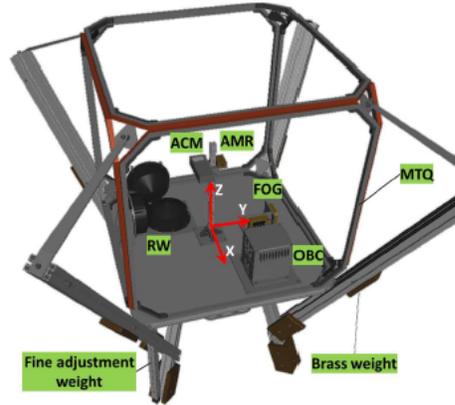


Figura 3.2: Diseño de plataforma. [25]

Tabla 3.2: Especificaciones de sensores implementados de interés.

Sensor	Tamaño	Masa	Rango	Ruido	Observaciones
ACM	$138 \times 55 \times 21 [mm^3]$	250 [g]	$\pm 180 [\mu T]$	$< 100 [pT/\sqrt{Hz}]$	± 0.05 [%] linealidad
AMR	$56 \times 36 \times 17 [mm^3]$	55 [g]	$\pm 250 [\mu T]$	$< 1 [pT/\sqrt{Hz}]$	$< \pm 0.1$ [%] linealidad

Tabla 3.3: Especificaciones de actuador implementado de interés.

Actuador	Tamaño	Desempeño	Observaciones
MTQ	$800 \times 800 [mm^2]$	$6 [Am^2]^a$	Estructura de plataforma integrada.

^aUnidad de momento magnético en el SI. Ver anexo.

3.2. Desarrollo e implementación de un simulador de campo magnético terrestre

Este sistema es presentado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Brasilia [27] [8] [28] [6]. El desarrollo e implementación de un simulador de campo magnético terrestre (EMFS, por sus siglas en inglés) permite replicar el campo magnético de la Tierra que se experimenta en una órbita mediante el control de la

3. ESTADO DEL ARTE

corriente que fluye a través de tres pares de bobinas en una configuración ortogonal alineada con los ejes x , y , z de un sistema de coordenadas rectangular formando una jaula Helmholtz. Además, implementando una plataforma de tres grados de libertad, se complementa el banco de pruebas considerando así las condiciones espaciales.

Con base en mediciones de campo magnético en el eje principal de un par de bobinas y diferentes puntos del simulador, es posible diseñar una estrategia de medición de volumen de uniformidad de campo y observar cómo los vectores de campo magnético se dirigen hacia diferentes puntos en la jaula.

Se hicieron distintos usos del simulador, entre los que destacaron:

- Simulación de campo magnético orbital y calibración de sensores magnéticos.
- Desarrollo de un sistema de control de orientación de 3 ejes usando magnetopares.
- Desarrollo de un procedimiento de calibración para magnetómetros triaxiales.

El requisito principal del simulador propuesto en este trabajo es la capacidad de generar los perfiles magnéticos de una órbita de nanosatélites típica LEO. La intensidad del campo magnético terrestre disminuye con la altitud, por lo tanto, si el EMFS es capaz de recrear el campo a altitudes muy bajas, también podrá recrear condiciones de órbitas más altas. Esto se logra con el efecto de todas las bobinas.

El EMFS debe tomar como entrada un punto que represente la posición orbital de un satélite alrededor de la Tierra. Los puntos de órbita se definen por los parámetros de longitud, latitud y altitud, el campo magnético de la Tierra en esas posiciones se puede obtener a partir de mapas disponibles públicamente, como el WMM. Teniendo en cuenta el objetivo general anterior, el EMFS debe abordar algunos requisitos específicos:

- El campo magnético generado debe ser suficientemente homogéneo dentro de una región alrededor del centro de la jaula. Esta región debe ser lo suficientemente grande como para contener la plataforma y cualquier equipo bajo prueba.
- El campo magnético generado por la jaula debe superar los campos magnéticos del entorno.
- El sistema debe poder producir un campo magnético en cualquier dirección en el centro de la jaula.
- Las capacidades del EMFS simularán el campo magnético de la Tierra lo suficientemente bien como para probar tecnologías de nanosatélites, los magnetopares y las técnicas de determinación de orientación basadas en magnetómetros.

Requisitos del diseño eléctrico del EMFS

- 3 Fuentes de poder DC.
Cada uno de los tres pares de bobinas son conectadas a la fuente programable (6,032 [A] modelo Agilent). Cada fuente proporciona hasta 60 [V] o 50 [A] hasta el límite de 1,000 [W]. Las fuentes son conectadas a una sola computadora a través de interfaces GPIB.
- Uso de lenguajes de comando SCPI y ARPS.
- El entorno usado para programar las fuentes es MATLAB.

Tabla 3.4: Parámetros eléctricos obtenidos del prototipo físico.

Eje	Espigas	Longitud [m]	Ω	Corriente [A]	Voltaje [V]	Potencia [W]
X	20	2.5	6.6 ± 0.1	5.98	40	239.2
Y	20	2.5	6.8 ± 0.1	5.76	40	230.4
Z	20	2.5	6.9 ± 0.1	5.76	40	230.4

Software EMFS

MATLAB funciona como un entorno de simulación unificado para EMFS, cuenta con herramientas de control de instrumentos, que permite la comunicación entre una computadora y los instrumentos GPIB, y la función wrldmagn. El último se fundamenta en las bases de datos WMM actualizadas cada 5 años, ya que el campo magnético de la Tierra cambia con el tiempo.

Función MATLAB wrldmagn toma como entradas información de la altitud, latitud y longitud además del año de cuando la simulación sea realizada. Las salidas de la función wrldmagn son el campo magnético de la Tierra como un objeto vectorial del entorno MATLAB, la intensidad horizontal del campo, un ángulo de declinación, un ángulo de inclinación y la intensidad total del campo. Con el vector de campo, el software EMFS calcula las corrientes eléctricas que las fuentes de alimentación deben proporcionar a las bobinas. La homogeneidad del campo se calcula a partir de las derivadas de $B(z)$.

Construcción EMFS

- Plataforma con soporte de aire.
La plataforma con soporte de aire fue construida para probar los sistemas de determinación y control de orientación, y los algoritmos de control para nano-satélites. Esta mesa desarrollada en el Laboratorio de Aplicación e Innovación en

3. ESTADO DEL ARTE

Ciencia Aeroespacial es una placa que está montada directamente en la semiesfera del conjunto portador de aire. Una desventaja importante de esta configuración es la limitación de la extensión de los ángulos de balanceo y cabeceo, que no excederá los 45° (Fig. 3.3).



Figura 3.3: Ensamble de plataforma de aire. [28]

- Diseño mecánico de jaula Helmholtz
La estructura de la jaula Helmholtz está hecha de barras metálicas de aluminio con perfil en U, que es un material paramagnético, es decir, un material con baja permeabilidad magnética (fig. 3.4).
- Magnetopares
Para el desarrollo del sistema triaxial, se diseñaron bobinas electromagnéticas. Cada bobina genera un campo magnético orientado al eje del cuerpo del sistema espacial xyz. Para los ejes x, y, se realizó el devanado en barras cilíndricas con apoyo de un rotor en cada lado de la barra y se aseguró que en cada capa todos los giros estuvieran alineados y cerca uno del otro. Se empleó pegamento para facilitar el desarrollo de un dispositivo más robusto, donde los devanados difícilmente se podrían romper o deformar. [29] Para la fabricación de la bobina orientado al eje z, el alambre de cobre esmaltado se aplicó directamente a su soporte estructural permanente. En esta versión del actuador, los soportes estructurales y la placa se imprimieron en 3D en PLA, lo que permitió un prototipado rápido.

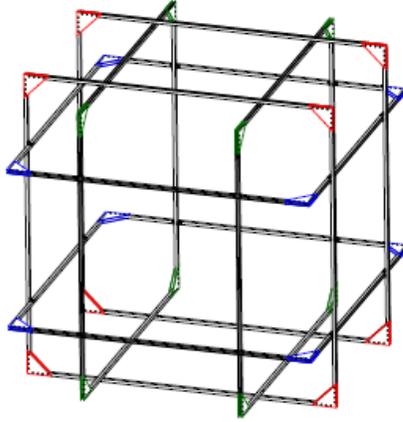


Figura 3.4: Modelado 3D jaula Helmholtz. [8]

Validación del EMFS

Calibración de magnetómetro

Experimentos

- 1: La uniformidad del campo se analiza con el magnetómetro LSM303, que se emplea en el simulador de nanosatélites. También se aborda la influencia de la generación de campo en un eje para los demás.
- 2: La uniformidad del campo se analiza en el eje normal al plano de las bobinas con la ayuda de un magnetómetro de alta precisión (HMR2300). [30]
- 3: Se realiza un breve experimento para verificar el vector de campo magnético dentro de la jaula en puntos específicos de la misma.

Después de configurar correctamente el tiempo de muestreo de la simulación, se realizó una simulación de órbita, que representa la órbita LEO de un nanosatélite. Se calculó el porcentaje de error entre los campos magnéticos deseados y medidos para cada paso de simulación, dando no más del 4%. [8]

Tabla 3.5: Campo magnético a lo largo del eje Y de la jaula con una corriente nominal de 6 [A].

Distancia en el eje [cm]	-100	-80	-60	-40
Campo magnético [μT]	-112.57	126.33	136.14	140.13
Variación con el centro (%) ^b	-19.81 %	-10.01 %	-3.02 %	-0.18 %

3. ESTADO DEL ARTE

-20	0 ^a	20	40	60	80	100
140.69	140.39	139.93	139.59	135.57	127.81	114.15
+0.22 %	0 %	-0.32 %	-0.56 %	-3.42 %	-8.95 %	-18.69 %

^b : El valor en el centro se tomó como la media del rango $[-16; 16]$ *cm* para mitigar efectos de ruido en las mediciones.

3.3. Simulación en Tiempo Real del Campo Magnético Terrestre para una Misión Orbital

Este es un desarrollo de la Fuerza Aérea Argentina [7]; consiste en la simulación del campo magnético terrestre para dos misiones orbitales definidas. Esta representación fue llevada a cabo mediante un software de simulación de misión, conectado a un dispositivo generador de campos que opera bajo un esquema HiL.

La configuración del generador de campo es una estructura esférica, diseñada para producir un campo magnético uniforme, de intensidad conocida y controlable, en su centro. El sistema se compone de tres bobinas Helmholtz ubicadas ortogonalmente, formando una esfera de radio $R = 1$ [m] adecuada para las dimensiones del microsatélite bajo prueba (fig. 3.5). Cada embobinado fue construido con 40 espiras (n) de alambre de cobre.

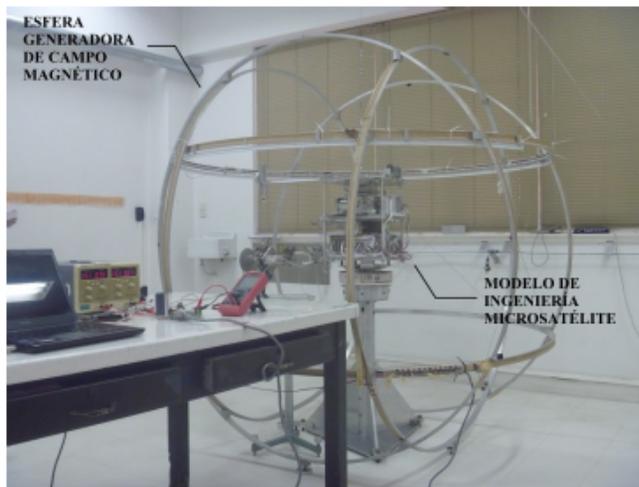


Figura 3.5: Configuración de estructura esférica generadora de campo magnético. [7]

3.4 Banco de pruebas de simulación magnética para proyecto de pequeños satélites estudiantiles de APSCO.

En la parte de potencia se utilizó un amplificador, el cual está limitado a una capacidad máxima de generación de corriente de $+/- 1 [A]$ para cada par de bobinas. Dentro de estos valores de corriente, el amplificador se comporta de una forma lineal.

Se empleó el magnetómetro digital(Honeywell tipo HMC5883L) de tres ejes para las mediciones de campo magnético dentro de la esfera Helmholtz.

Las pruebas de campo magnético se realizaron en dos instancias sucesivas. Primero, como resultado de la predicción del software desarrollado empleando el modelo magnético WMM y luego como resultado de la generación real del campo en laboratorio (fig. 3.6).

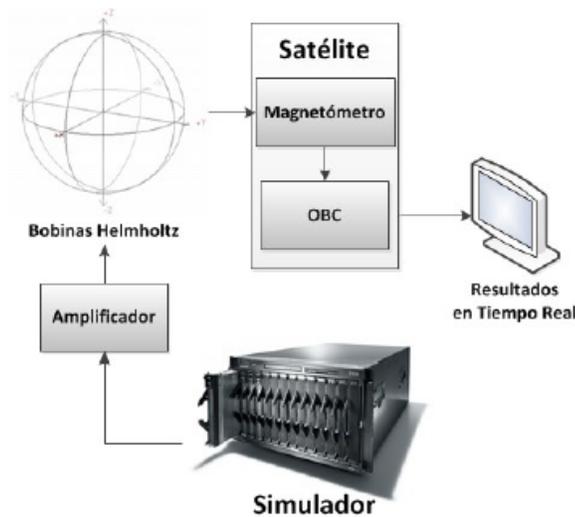


Figura 3.6: Diagrama del sistema con HiL. [7]

3.4. Banco de pruebas de simulación magnética para proyecto de pequeños satélites estudiantiles de APSCO.

El Pequeño Satélite Estudiantil (SSS, por sus siglas en inglés) [31] es un proyecto universitario compuesto por un microsátélite (SSS-1) y dos CubeSats 3U (SSS-2A y SSS-2B). Con respecto a SSS-1 y SSS-2A se tiene un control de orientación magnética de 3 ejes con magnetopares para estabilización y control en los tres ejes X, Y y Z. Cada magnetopar genera un campo magnético que interactúa con el de la Tierra para modificar su orientación.

El desarrollo del banco de pruebas de simulador magnético para los satélites SSS-1 y SSS-2A se realizó utilizando tres pares de bobinas Helmholtz, una por cada eje de rotación (X, Y, Z), para realizar las pruebas de estabilización y control de orientación, y

3. ESTADO DEL ARTE

garantizar el correcto funcionamiento del ADCS después de poner al satélite en órbita. Se diseñó con las siguientes especificaciones: radio $0.8 [m]$, $N = 80$ e $I = 2 [A]$. Esta configuración genera un campo magnético máximo de $0.000179 [T]$ y la intensidad del campo magnético dentro de la esfera estable se puede modificar simplemente variando la intensidad de la corriente que fluye a través de las bobinas de Helmholtz.

El software Matlab se usó en la primera etapa para generar la simulación de la órbita en los satélites estudiados y luego, se calculó el campo magnético de la Tierra alrededor de esa órbita. Para esto, se usó el Modelo magnético mundial estándar (WMM) de la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de los Estados Unidos, también se tomó en cuenta el Modelo del Campo Internacional de Referencia Geomagnética (IGRF).

El sistema de banco de pruebas de simulación magnética (MST, por sus siglas en inglés), en general, se compone de tres módulos; el módulo de control (CM, por sus siglas en inglés), el módulo de interfaz (IM, por sus siglas en inglés) y el módulo de banco de pruebas (TBM, por sus siglas en inglés)(Fig. 3.7). El CM se encarga de llevar a cabo el seguimiento orbital de los satélites SSS-1 / SSS-2A y el cálculo del campo magnético a lo largo de la órbita, de acuerdo con la tasa de muestreo. El IM es responsable de la conexión e intercambio de información entre el CM y el TBM. El TBM es el hardware de tres pares de bobinas Helmholtz, esto simula el campo magnético de la Tierra en cualquier dirección y órbita, de acuerdo con los cálculos generados por el CM. (Tabla 3.6)

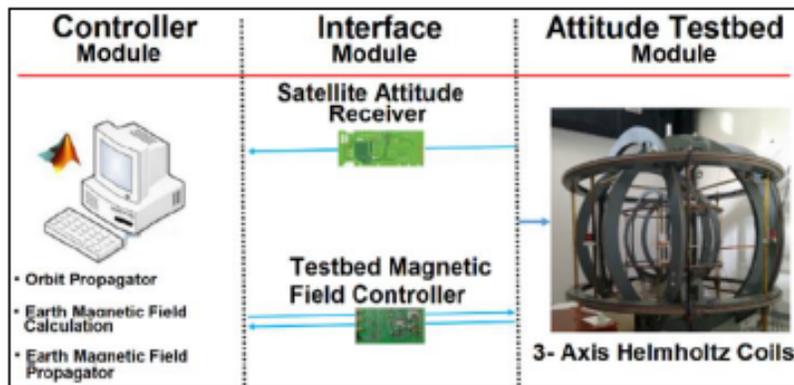


Figura 3.7: Estructura del banco de pruebas de simulación magnética. [31]

3.4 Banco de pruebas de simulación magnética para proyecto de pequeños satélites estudiantiles de APSCO.

Tabla 3.6: Información básica del proyecto APSCO.

Altitud de órbita simulada	500 [km]
Hora local en el nodo descendente para la órbita	10:30 AM
Dimensión SSS-1	350 * 350 * 650 [mm]
Masa SSS-1	30 [kg]
Dimensión SSS-2A	100 * 100 * 300 [mm]
Masa SSS-2A	4 [kg]
Sistema de control ADCS (SSS-1 y SSS-2A)	Magnético
Inclinación	97.4065°
Excentricidad	0

Tabla 3.7: Campo magnético del SSS-1/SSS-2A en órbita satelital en [nT].

Valor	B_x	B_y	B_z
Máximo	$2.8135E + 04$	$1.0448E + 04$	$4.6365E + 04$
Mínimo	$-9.2951E + 03$	$-1.26646E + 04$	$-5.1846E + 04$

Tabla 3.8: Posición de órbita satelital y selección de resultados de campo magnético.

Lat	Lon	Alt [km]	Resultados de campo magnético en órbita [nT]			
			X	Y	Z	F
-68.178	144.91	500	-1,571.56	1,676.99	-51,558.81	51,610.01
7.518	45.921	500	27,788.43	55.68	516.93	27,793.29
40.098	-59.187	500	18,933.78	3,521.16	29,246.22	35,017.54

Tabla 3.9: Máximo y mínimo campo magnético obtenido.

Valor	B_T [nT]	B_T [T]	Latitud	Longitud
Máximo	51,926.54197	0.00005193	-64.57	148.220
Mínimo	20,494.51779	0.00002049	-34.09	-16.263

3.5. Simulación del campo magnético generado por bobinas Helmholtz con geometría cuadrada

El proyecto de una configuración de bobinas Helmholtz cuadradas para la generación de campos magnéticos, desarrollado en la Universidad Sergio Arboleda en Bogotá, Colombia [11], describe el procedimiento para determinar la magnitud y dirección de un campo magnético en cualquier punto alrededor de un conjunto de conductores que forman una bobina Helmholtz de geometría cuadrada, basándose en la ley de Biot-Savart. El objetivo de este proyecto fue entender cómo calibrar sensores de campo magnético como los que se usan en los nanosatélites CubeSat.

Tras una comparación de geometrías (circular y cuadrada), se llegó a la conclusión de optar por una geometría cuadrada, ya que, a pesar de que la geometría circular genera una mayor magnitud de campo magnético, la geometría cuadrada ofrece, tanto homogeneidad del campo magnético en el volumen de estudio, como facilidad de manufactura.

La configuración de bobinas Helmholtz se realizó a partir de cuatro conductores por bobina: dos horizontales, los cuales son paralelos al eje y y dos verticales, los cuales son paralelos al eje x . Se consideró un punto $P(x, y, z)$ que estuviera entre las dos bobinas, H1 y H2, las cuales están separadas por una distancia $d = 0.4$ [m], tal como se muestra en la Figura 3.8. El campo magnético en el punto P es la superposición del campo magnético generado por cada uno de los conductores de la bobina Helmholtz.

Para el cálculo del campo magnético generado por un conductor horizontal se consideró un conductor recto de longitud finita L por el que fluye una corriente I , como el que se muestra en la Figura 3.9. De manera similar, se calculó el campo magnético generado por un conductor vertical con las mismas características, considerando distinto el eje paralelo al conductor.

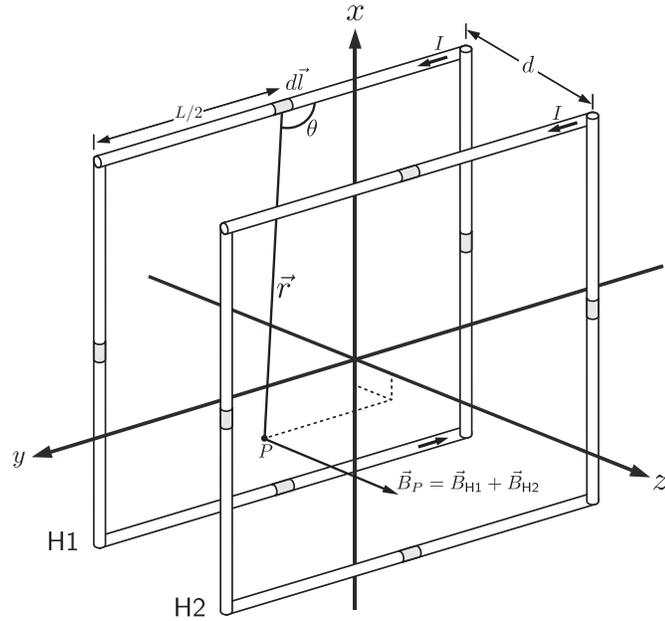


Figura 3.8: Configuración de bobina Helmholtz cuadrada. [11]

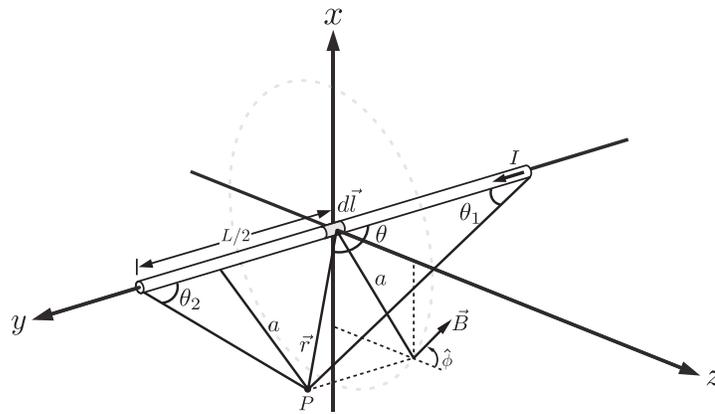


Figura 3.9: Diagrama de un conductor finito para el cálculo del campo magnético en el punto P. [11]

Los parámetros que se consideraron para la simulación de la bobina Helmholtz se muestran en la [Tabla 3.10](#).

Tabla 3.10: Parámetros de una bobina para simulación [11].

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Longitud de conductor	L	1.00	m
Corriente	I	0.5	A
Número de espiras	n	100	-
Diámetro del alambre	rw	1.02	mm

Al final del proyecto, se concluyó de la simulación que la distancia óptima de separación entre bobinas es $d = 0.55[m]$, obteniendo un campo magnético máximo homogéneo de $200 [\mu T]$ en un volumen prueba de $10 \times 10 \times 10 [cm]$. Las mediciones experimentales fueron acordes a la simulación, obteniendo un error máximo de 6 %.

3.6. Diseño, manufactura y prueba en tiempo real de un simulador de campo magnético de tres ejes

El diseño, manufactura y prueba del simulador de campo magnético de tres ejes para aplicaciones espaciales, realizados en la Universidad de Bolonia, Italia [32], tuvo como objetivo principal reproducir las condiciones del campo magnético orbital en un volumen definido.

El simulador permite llevar a cabo el proceso de calibración en tierra de los sensores y actuadores magnéticos de un microsatélite y puede utilizarse en simulaciones del sistema de control de orientación que incorporan dispositivos "hardware-in-the-loop". Asimismo, el simulador se dimensionó para reproducir las condiciones magnéticas en LEO, teniendo en cuenta el módulo, la magnitud de la orientación, la variación de esta y la velocidad angular del campo geomagnético.

El sistema puede conectarse a una PC o utilizarse como un sistema autónomo capaz de almacenar datos orbitales y de orientación del microsatélite. La interfaz con la PC permite simular prácticamente cualquier régimen orbital y variación de orientación en tiempo real mediante un propagador orbital y de orientación, mientras que la capacidad de almacenamiento permite aprovechar datos generados por distintos propagadores comerciales.

Este sistema está conformado por seis bobinas cuadradas acopladas, de $50 [cm]$ de cada lado, con sus ejes alineados en direcciones mutuamente perpendiculares, como se muestra en la Figura 3.10 y con control de corriente independiente para cada una. A este arreglo de bobinas por eje se le denomina: bobina Helmholtz, y en conjunto al-

3.6 Diseño, manufactura y prueba en tiempo real de un simulador de campo magnético de tres ejes

bergan el volumen de un cubo de $15 \times 15 \times 15$ [cm] para el proceso de pruebas, donde el campo magnético es prácticamente homogéneo. Además, este sistema se basa en un único microprocesador integrado, el cual es capaz, de manera autónoma, de alimentar las bobinas, cerrar el lazo de control utilizando mediciones de referencia de un magnetómetro y registrar los datos del experimento.

Este proyecto hizo énfasis en la eliminación del campo magnético local, ofreciendo como solución agregar un desfase u “*offset*” de igual magnitud al campo magnético local.

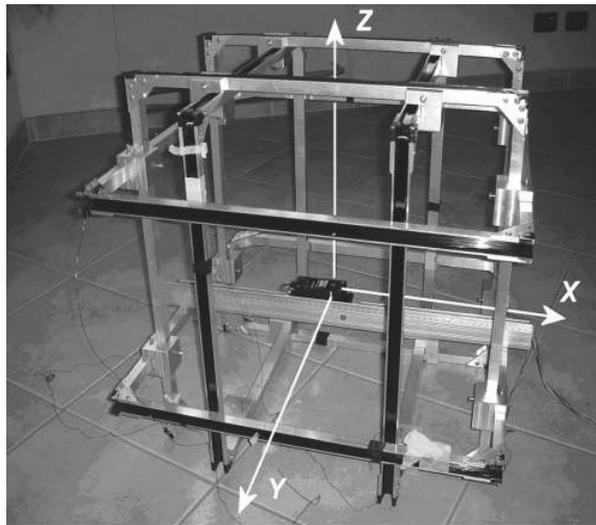


Figura 3.10: Sistema de bobinas Helmholtz en fase de pruebas. [32]

Se seleccionó una geometría cuadrada para las bobinas debido a una manufactura rápida y práctica al ensamblar, además de proporcionar un gran volumen de campo magnético homogéneo, asegurando una forma homogénea muy similar a las geometrías de los dispositivos a probar, la cual fue confirmada por una simulación realizada posteriormente.

Se realizaron simulaciones numéricas para determinar las dimensiones finales de las bobinas Helmholtz y sus características eléctricas: 50 [cm] promedio por lado, 100 vueltas de alambre para bobina de 0.511 [mm] de diámetro nominal y una intensidad de corriente máxima de 0.47 [A] para generar un campo magnético de hasta 1.5 [G] por eje. Adicionalmente, en la Tabla 3.11, se muestran más características mecánicas y eléctricas por bobina Helmholtz.

3. ESTADO DEL ARTE

Tabla 3.11: Parámetros mecánicos y eléctricos de las bobinas [32].

Parámetro	X	Y	Z
Longitud de la bobina [cm]	47	50	53
Longitud de alambre [m]	188	200	212
Resistencia teórica [Ω]	15.75	16.76	17.76
Resistencia medida [Ω]	17.5	18.4	19.4

El sistema de control electrónico se encarga de dos tareas: ajustar la corriente en cada par de bobinas y leer las mediciones del campo magnético por medio de un magnetómetro. El circuito de control está conectado a la PC mediante una interfaz RS232, a través de la cual se realiza la simulación orbital en tiempo real, se establecen los niveles de campo magnético requeridos y, al mismo tiempo, se almacenan las lecturas del magnetómetro. Este sistema de control se integró con un microcontrolador ATMe-ga128, un circuito de control y una memoria de solo lectura programable y borrable eléctricamente (EEPROM, por sus siglas en inglés) (ver Figura 3.11).

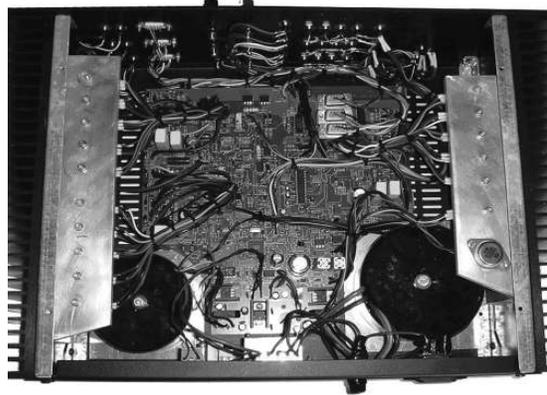


Figura 3.11: Sistema de control electrónico. [32]

Finalmente, se utilizó una fuente de alimentación de 20 [V] para el suministro de energía y se diseñó un circuito capaz de conmutar la polaridad de la carga para invertir la dirección de la corriente que fluye por las bobinas.

3.7. Simulador de campo magnético terrestre

El desarrollo de un simulador de campo magnético terrestre se llevó a cabo en la Universidad de Granada, España [33], con el objetivo de tener una zona de pruebas, para el ADCS de un picosatélite, en la que se puedan simular y controlar las condiciones electromagnéticas que se encuentran en órbita.

El proyecto aborda el desarrollo y fabricación de un generador de campos electromagnéticos en los tres ejes, empleando bobinas Helmholtz, que incorpora un CubeSat en su interior y que anula el campo magnético terrestre local. Asimismo, se muestra el proceso de selección de un sensor magnético triaxial capaz de adaptarse y funcionar en condiciones del satélite en órbita. También se aborda el desarrollo de un software de control mediante una GUI de MATLAB, un software de control del sensor magnético y la caracterización de un magnetopar excitado por una fuente de corriente.

La solución que se encontró en este proyecto para cumplir sus objetivos fue emplear bobinas Helmholtz cuadradas debido a que permiten una mayor homogeneidad, mejor uso del volumen, menor susceptibilidad a errores de construcción y facilidad de fabricación usando un material ferromagnético. Se optó por usar una fuente de alimentación Agilent N6705A, puesto que dispone de información y librerías con las que se puede realizar el control del sistema. Asimismo, se seleccionó Arduino modelo Mega 2560 como el microcontrolador en la parte de control, por la facilidad de intercambio de datos con la PC y la obtención y acceso a código libre en la red. Finalmente, se usó MATLAB para elaborar la GUI, ya que se puede controlar la fuente de alimentación fácilmente mediante GPIB, además de la sencillez de tener una conexión con Arduino para el control del sensor magnético por medio de puerto serie. Adicionalmente, se tienen puentes H con el fin de obtener corrientes negativas de las fuentes de alimentación. En la Figura 3.12 se observa la configuración del sistema y la conexión entre dispositivos.

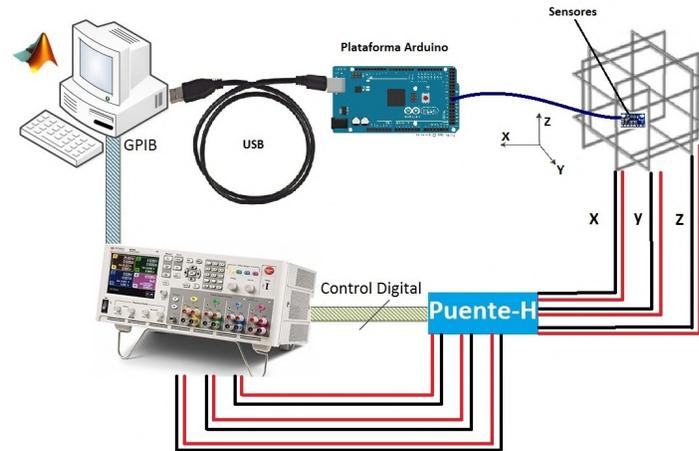


Figura 3.12: Configuración del simulador de campo magnético y conexión entre dispositivos. [33]

Se seleccionó un sensor magnético capaz de medir el campo magnético en las tres direcciones (triaxial): el sensor LSM303DLHC. Este se conecta al Arduino, el cual se conecta por puerto USB a la computadora; además, se añadió otro magnetómetro (HMC5883L) que toma mediciones en el mismo instante de tiempo que el anterior, con el propósito de justificar las mediciones realizadas.

Para la generación del campo magnético terrestre, primero se caracterizó el generador de campos magnéticos: estudiando cada una de las seis bobinas por separado y su posición en el arreglo completo de las bobinas. Posteriormente, se calibró el sistema mediante la relación entre la corriente suministrada y el campo magnético generado por eje. En este proceso también se llevó a cabo la anulación del campo magnético local, la cual se realizó mediante una regresión lineal para cada eje.

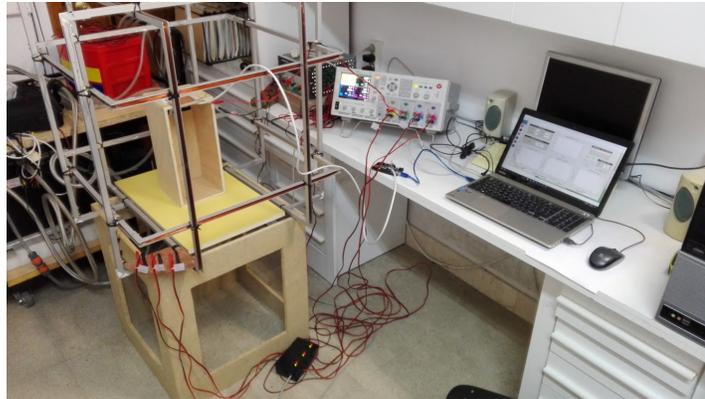
El embobinado se realizó con un alambre de cobre de $0.5 [mm]$ de diámetro con una resistencia de $0.0838 [\Omega/m]$ y para la estructura de la bobina se usaron perfiles “U” de aluminio.

En la Tabla 3.12 se muestran las características mecánicas y eléctricas de las bobinas Helmholtz que conforman el simulador de campo magnético terrestre.

Tabla 3.12: Características mecánicas y eléctricas de las bobinas Helmholtz [33].

Característica	X	Y	Z
Lado de la bobina, a [cm]	73.2	76.2	70.9
Número de vueltas N	146	144	149
Longitud de cobre [m]	426.32	437.76	417.2
Separación entre bobinas, D [cm]	40.02	41.38	38.38
Resistencia, R [Ω]	37.72	38.18	36.95

Se realizaron mediciones de intensidad de corriente y el campo magnético generado por las bobinas Helmholtz construidas y todos los sistemas integrados (ver Figura 3.13), y se obtuvieron valores de $I = 1.026$ [A] y $B = 2.56$ [G] (máximo).

**Figura 3.13:** Simulador de campo magnético completo implementado. [33]

3.8. Análisis del estado del arte

En la Tabla 3.13 se muestra la comparativa de los parámetros de interés de los simuladores estudiados que servirán como pauta para el diseño del simulador de campo magnético terrestre de este proyecto.

3. ESTADO DEL ARTE

Tabla 3.13: Comparación de parámetros de los simuladores.

Instituto o laboratorio	Geometría de bobinas	Longitud de bobinas	Número de espiras	Intensidad de corriente	Tamaño de satélite
Instituto S. E. Bremen	Circulares	4.8 [m]	-	-	Minisatélites
Universidad B. Brasil	Cuadradas	2.5 [m]	40	6 [A]	Nanosatélites (hasta 3U)
Fuerza Aérea Argentina	Circulares	2 [m]	40	Uso amplificado r: 1 [A]	Microsatélites
APSCO	Circulares	1.6 [m]	80	2 [A]	Nanosatélites y microsateélites
Universidad S. A. Colombia	Cuadradas	1 [m]	100	0.5 [A]	CubeSats (hasta 3U)
Universidad B. Italia	Cuadradas	0.5 [m]	100	0.47 [A]	Microsatélites
Universidad G. España	Cuadradas	0.73 [m]	146	1.026 [A]	Picosatélites

Tabla 3.14: Comparación de parámetros de los simuladores.

Magnetómetro	Calibre alambre	Plataforma para satélite	Error máximo obtenido	Modelo de campo magnético	Campo magnético máximo obtenido
ACM por Magson GmgH y AMR por ZARM Technik	-	Mesa de aire	-	Modelo orbital SGP4 e IGRF	± 210 [μT] por par de bobinas con 1 [%] de precisión
HMR2300 Honeywell y LSM303 chip	14 AWG	Mesa de aire	4 %	WMM	± 140 [μT]
HMC5883L Honeywell	-	Mesa de aire	17.5 % sobre eje z	WMM	Órbita polar: $B_z = \pm 20$ [μT]. Órbita ecuatorial: $B_z = \pm 9$ [μT]
-	-	-	0.3 %	WMM e IGRF	± 179 [μT]
HMC5883L Honeywell	18 AWG	-	6 %	-	± 200 [μT]
Magnetómetro triaxial (N. E.)	24 AWG	-	- (1.5 % por 1° desalineado)	-	± 150 [μT]
LSM303DLHC y HMC5883L Honeywell	24 AWG	-	-	IGRF	± 256 [μT]

3.9. Conclusiones del Estado del Arte

Se ha presentado una tabla comparativa de los parámetros más significativos de distintos simuladores realizados alrededor del mundo. Se destaca que la mayoría de los casos estudiados usan bobinas Helmholtz cuadradas; pues, a pesar de que una geometría circular simplifica el proceso de devanado, su manufactura y sus uniones de seguridad son más complejas, resultando más costoso y con una flexibilidad de diseño menor. En cambio, se menciona que una geometría cuadrada es una buena opción por su facilidad de construcción y procedimiento de ensamblaje, además de tener una mayor región de uniformidad que las bobinas circulares del mismo tamaño. Sin embargo, ya que no se tienen los mismos requerimientos de diseño en todos los artículos y trabajos consultados, es pertinente realizar una comparación exhaustiva entre ambas geometrías que permita determinar el mejor criterio de acuerdo con los requerimientos del simulador de campo magnético. La longitud de las bobinas oscila entre los 1.6 [m] y 2.5 [m], ya que esta dependió del tamaño de satélite que se deseó probar (nano, micro y minisatélites) y por consiguiente, el volumen de campo magnético que se requirió dentro de la jaula Helmholtz. Los magnetómetros empleados fueron de núcleo saturado o Fluxgate triaxiales y la diferencia entre ellos solo radicó en características como resolución, masa, fabricante, precio, entre otros. El banco de pruebas de la mayoría de las fuentes consultadas utilizó soportes con cojinetes de aire, de esa manera redujeron la fricción y el efecto de la gravedad dentro del área de pruebas. Los modelos de campo magnético más usados fueron el WMM y IGRF, ambos ofrecen la ventaja de acceder a ellos por medio de una función de MATLAB que posteriormente sirve para calcular los valores necesarios de potencia, y así, simular el vector de campo magnético dado un punto dentro de una órbita terrestre, asimismo, ambos tienen intervalos de actualización de 5 años, proporcionando mediciones precisas al momento.

Parámetros como el número de vueltas por bobina (40 a 146 vueltas) e intensidad de corriente ($0.47 - 6$ [A]) dependieron del campo magnético de referencia que se deseaba obtener. El calibre del alambre para bobina se seleccionó acorde a la intensidad de corriente que se debía suministrar. Los errores máximos del campo magnético obtenidos fueron del 0.3% al 17.5% con respecto a las mediciones obtenidas de los sensores magnéticos empleados y el campo magnético solicitado. El campo magnético obtenido resultó de la combinación de parámetros como la longitud de las bobinas, el número de espiras y la intensidad de corriente.

Se presenta el diseño del simulador de campo magnético siguiendo la Metodología de Ulrich [34], la cual mezcla perspectivas de marketing, diseño y manufactura en un solo planteamiento del desarrollo del producto. De igual manera, se remarcan etapas de diseño, como lo son: diseño conceptual, diseño a nivel sistema y diseño de detalle.

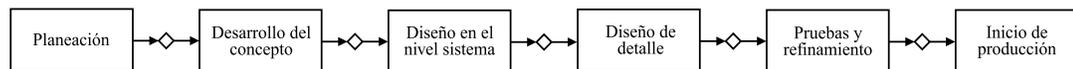


Figura 4.1: Proceso de desarrollo de un producto [34].

4.1. Planeación

Se ha hecho una investigación previa del estado del arte para conocer los distintos tipos de simuladores existentes en el mundo; asimismo, se elaboró una tabla comparativa de los parámetros más importantes de acuerdo con los objetivos del proyecto presente.

- Declaración de la misión: Simulador de campo magnético para pruebas del sistema de determinación y control de orientación de nanosatélites con un tamaño máximo del estándar CubeSat 3U en LEO.

4. DISEÑO

Tabla 4.1: Declaración de la misión.

Declaración de la misión: Simulador de campo magnético para pruebas del sistema de determinación y control de orientación de nanosatélites con un tamaño máximo del estándar CubeSat 3U en LEO.	
Descripción	- Estructura compuesta de 3 pares de bobinas Helmholtz, un par por cada eje coordenado (x, y, z).
Propuesta de valor	- Pruebas con nanosatélites estándar CubeSat (1U – 3U).
Objetivos clave del proyecto	- Ser parte de un banco de pruebas para los sistemas de determinación y control de orientación de satélites. - Primera introducción de un simulador de campo magnético en el Centro de Innovación y Desarrollo Espacial Mexicano. - Generar bajo impacto ambiental.
Mercado primario	- Proyectos nanosatelitales de la AEM en el Centro Regional de Desarrollo Espacial (CREDES).
Mercado secundario	- Didactismo.
Suposiciones y restricciones	- Materiales y manufactura accesibles. Algunos componentes electrónicos importados.*
Involucrados	- Proveedores. - Operadores.

- Objetivo del simulador: Reproducir el vector de campo magnético de la Tierra dados los parámetros de una órbita baja.

- Metas de desempeño: Lograr uniformidad de campo magnético dentro del volumen ocupado por el nanosatélite.
- Limitaciones: Manufactura, costos y tiempo de elaboración.

4.2. Desarrollo de concepto

Estructura simétrica compuesta de 3 pares de bobinas Helmholtz, un par por cada eje coordenado (x, y, z) , las cuales tendrán la función de reproducir un campo magnético uniforme y estable dentro de la región encerrada por las mismas. Por medio de una interfaz, se ingresarán los parámetros keplerianos de la órbita deseada para que un software determine el campo magnético en la órbita y, posteriormente, se calcule la corriente y el voltaje necesarios que deben suministrar las fuentes de poder a las bobinas Helmholtz para generar el campo magnético de acuerdo con los datos ingresados. Finalmente, un sensor estará midiendo el campo magnético para verificar la precisión con la que se estará reproduciendo dicho campo. Una vez validado el SCMT, se podrán realizar pruebas HiL del sistema de determinación y control de orientación del nanosatélite posicionado dentro de la jaula Helmholtz.

Se identifican las necesidades del proyecto con base en los objetivos planteados anteriormente.

- Necesidades
 - Las bobinas Helmholtz son capaces de reproducir el campo magnético máximo solicitado.
 - El campo magnético obtenido es uniforme dentro del volumen ocupado por el nanosatélite.
 - Se genera un campo magnético que contrarresta el campo magnético presente en la zona de pruebas.
 - El ingreso de datos es sencillo.
- Jerarquía de necesidades
 1. Se genera un campo magnético que contrarresta el campo magnético presente en la zona de pruebas.
 2. Las bobinas Helmholtz son capaces de reproducir el campo magnético máximo solicitado.
 3. El campo magnético obtenido es uniforme dentro del volumen ocupado por el nanosatélite.
 4. El ingreso de datos es sencillo.

4. DISEÑO

Se establece una relación entre necesidades y métricas, como se muestra en las tablas 4.2 y 4.3, así como su nivel de importancia, siendo 3 el más importante y 1 el menos importante, unidades y valores marginales e ideales. Una vez concluido el diseño, se determinan las especificaciones del SCMT.

Tabla 4.2: Necesidades del SCMT.

Num. de necesidad	Num. de necesidad por jerarquía	Necesidad
1	1	Se genera un campo magnético que contrarresta el campo magnético presente en la zona de pruebas.
2	2	Las bobinas Helmholtz son capaces de reproducir el campo magnético máximo solicitado.
3	3	El campo magnético obtenido es uniforme en el volumen ocupado por el nanosatélite.
4	4	El ingreso de datos es sencillo.

Tabla 4.3: Métricas del SCMT.

Num. de métrica	Métrica	Importancia	Unidades	Valor marginal	Valor ideal
1	Sensibilidad de sensor magnético.	3	[mG/LSB]	1 – 0.1	0.1
2	Calibre de alambre conductor.	3	AWG	14 - 24	24
3	Variación de vectores de campo magnético en volumen det.	2	[uT]	0 – 1	0
4	Tiempo.	1	[s]	30 – 60	30 – 40
	Número de operaciones.		[1]	7 – 15	8 – 10

Se tiene para cada una de las necesidades mencionadas una métrica asociada para dar solución, de tal manera que, para contrarrestar el campo magnético presente en la zona de pruebas, se requiere un sensor magnético con alta sensibilidad, del cual, se tomarán los valores de campo magnético para después operarlos con los valores del campo en órbita y reproducir el campo magnético en Tierra de manera acertada. En el caso del embobinado, se requiere de un calibre de alambre conductor que admita la corriente máxima que se podría solicitar. En cuanto a la uniformidad de campo magnético, se pretende que no haya variación de este en el volumen determinado por el espacio que ocupa el nanosatélite más grande a probar (3U) dentro de la jaula Helmholtz. Finalmente, la última necesidad se define como la facilidad que tiene el usuario para operar la interfaz, la cual se puede traducir en el tiempo y número de operaciones para iniciar una simulación.

Los valores marginales e ideales se obtuvieron a partir del Estado del Arte y de un pequeño estudio de mercado.

4.3. Diseño a nivel sistema

El diseño del simulador presenta una arquitectura modular de ranura, es decir, cada uno de los módulos o subsistemas compuestos por bloques (conjunto de elementos físicos) es de un tipo diferente con respecto a los otros, de modo que estos no se pueden intercambiar; sin embargo, la arquitectura modular permite hacer cambios en el diseño y reemplazar componentes en un bloque sin afectar a los demás, de modo que el simulador puede seguir funcionando correctamente. Los bloques hacen posible llevar a cabo las operaciones y transformaciones que contribuyen al rendimiento general del simulador.

- Diseño a bloques del SCMT.

Se presenta un diseño a bloques donde se puede apreciar la descomposición del simulador en subsistemas para definir las especificaciones de cada uno posteriormente.

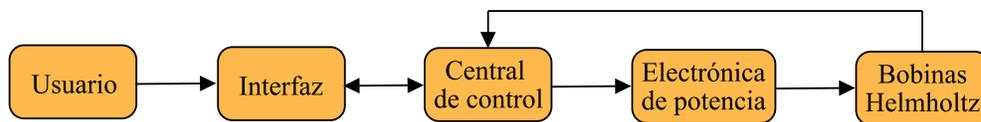


Figura 4.2: Diagrama de bloques simplificado.

- Especificación funcional de cada uno de los subsistemas del simulador.

En el diagrama de bloques a nivel sistema del SCMT (Fig 4.3) se observa el ingreso de datos de órbita y simulación por medio del usuario, a continuación, se tiene la obtención de los valores de campo magnético en MATLAB, así como los valores de corriente y voltaje. Estos valores se envían por comunicación serial a la central de control para proporcionar las señales PWM necesarias a tres puentes H, los cuales están conectados a una fuente de alimentación de tres canales, uno por cada bobina Helmholtz en el eje coordenado correspondiente. Los puentes H sirven para poder controlar el sentido de la corriente de las fuentes por medio de un bus de control digital, y así reproducir el campo magnético solicitado. Finalmente, se encuentra un magnetómetro, el cual desempeña dos tareas, la primera es medir el campo magnético presente en la zona de pruebas para realizar la calibración del sistema antes de cualquier simulación. La segunda es medir el campo magnético en el centro de la jaula una vez que las bobinas estén en funcionamiento, los valores de campo magnético se enviarán al microcontrolador por medio del protocolo I2C y, posteriormente, por UART a la interfaz en MATLAB, para compararlos con los valores ingresados y decidir si se debe hacer alguna corrección en la calibración previa. Si los valores son admitidos, se procede a la verificación y validación del SCMT.

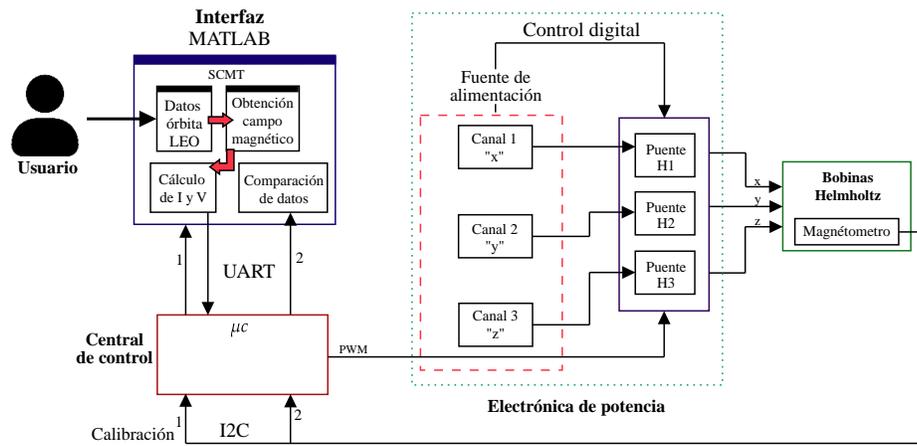


Figura 4.3: Diagrama de bloques a nivel sistema.

4. DISEÑO

- Diagrama de flujo.

El siguiente diagrama (Fig. 4.4) muestra el proceso de funcionamiento del SCMT.

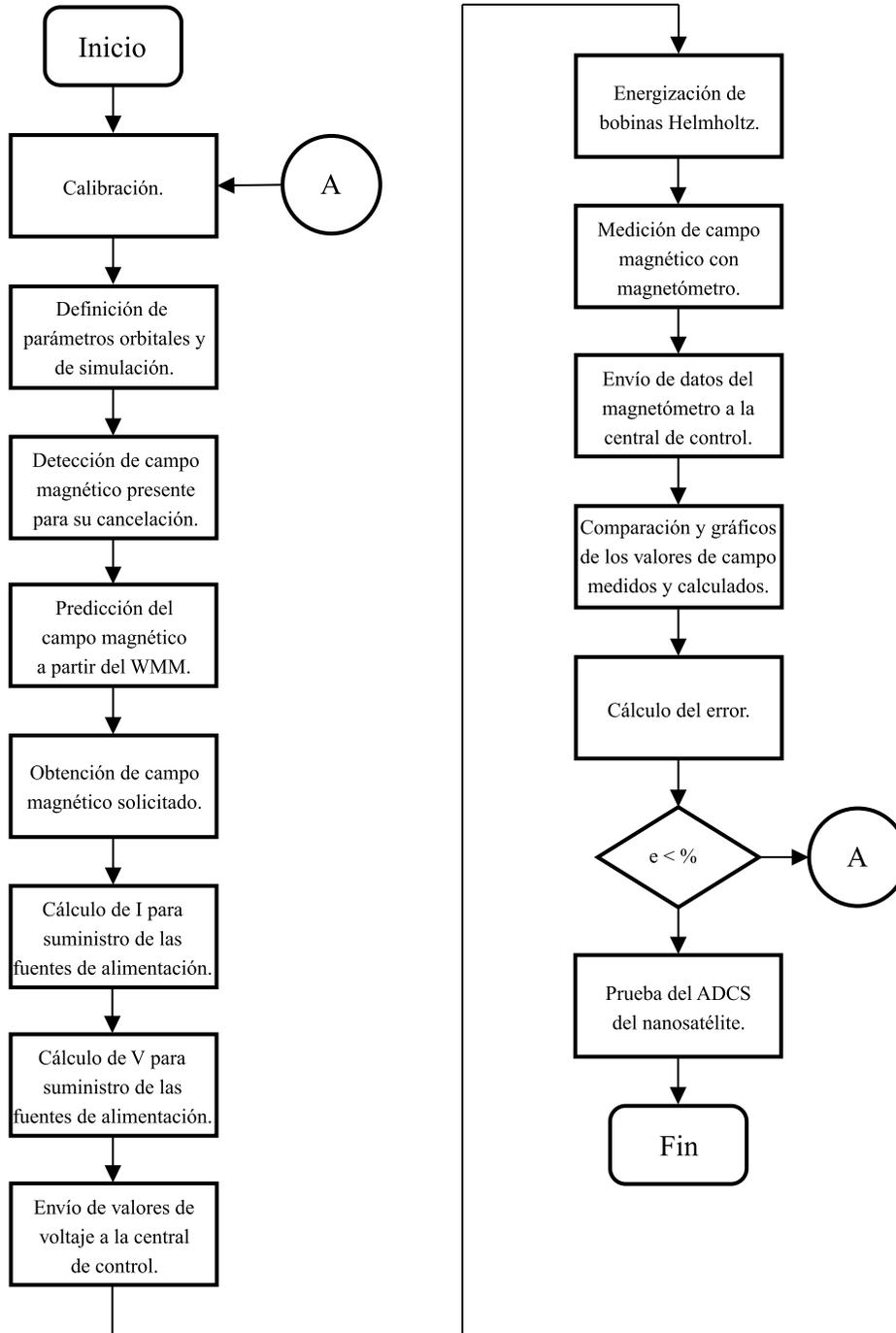


Figura 4.4: Diagrama de flujo de operación del SCMT.

4.4. Diseño de detalle

Se realizaron simulaciones en MATLAB para seleccionar la geometría de las bobinas Helmholtz tomando en cuenta las conclusiones del estado del arte y las necesidades del proyecto. Posterior a ello, se determinaron las características mecánicas, eléctricas, el proceso de manufactura y el ensamble de la jaula completa.

4.4.1. Simulaciones

Las simulaciones que se presentan a continuación se realizaron con el objetivo de comparar las propiedades del campo magnético que generan las dos geometrías más empleadas en la actualidad (circulares y cuadradas). A partir de los resultados obtenidos, se eligió la configuración que mostró una mayor uniformidad de campo en el centro de la jaula Helmholtz, cubriendo en su totalidad el nanosatélite a probar.

Las simulaciones se elaboraron con las siguientes condiciones para ambos tipos de geometría:

- Misma corriente.
- Número de espiras iguales.
- Mismo factor de separación entre bobinas ($dz = 0.5445$).
- Mismas dimensiones ($R = L/2$) de tal manera que el volumen uniforme cubriera un CubeSat 3U.

Se propusieron las dimensiones para cada tipo de bobina de manera que el volumen de uniformidad fuera capaz de cubrir el volumen de un CubeSat 3U, ya que es el tamaño máximo de nanosatélite que se podrá probar. Se simuló solo un par de bobinas, debido a que por superposición se puede considerar el mismo comportamiento para los otros dos pares de bobinas. También se eligió un valor de distancia entre bobinas dependiendo de su geometría conforme a lo descrito en el Estado del Arte, donde se desarrolla el procedimiento para obtener dichos valores [7][8], además de que estos se verificaron directamente en MATLAB.

Se simularon los modelos de campo magnético de las geometrías de las estructuras estudiadas en las secciones 2.2.1.1 y 2.2.1.2, y a partir de las simulaciones se obtuvieron las gráficas de propagación del campo magnético, en donde se puede apreciar la región de uniformidad en un intervalo del 90 % al 100 % de la totalidad del campo generado a lo largo del eje z del par de bobinas, donde el punto máximo se encuentra en el centro de éstas.

En las figuras 4.5 y 4.7 se ilustran las líneas de campo magnético para las bobinas Helmholtz circular y cuadrada, respectivamente. La distancia simulada entre bobinas

4. DISEÑO

fue de $d = R$, donde R es el radio de la circunferencia para el caso de la bobina circular, y para el caso de la bobina cuadrada $d = 0.5409L$, donde L es la longitud de la bobina. Las curvas del campo magnético muestran cómo aumenta la magnitud del campo magnético y su uniformidad dentro de la bobina. Se observa que estas curvas permanecen paralelas en regiones cercanas al centro de la bobina.

Las figuras 4.6 y 4.8 muestran el comportamiento del campo magnético en el eje z de la bobina para las geometrías circular y cuadrada, respectivamente. Se aprecia que en la configuración circular se tiene una mayor área de uniformidad en la parte superior (representa el campo máximo) que en la configuración cuadrada; sin embargo, con una geometría cuadrada se observa que se logra reproducir una mayor magnitud de campo magnético y un mayor volumen uniforme.

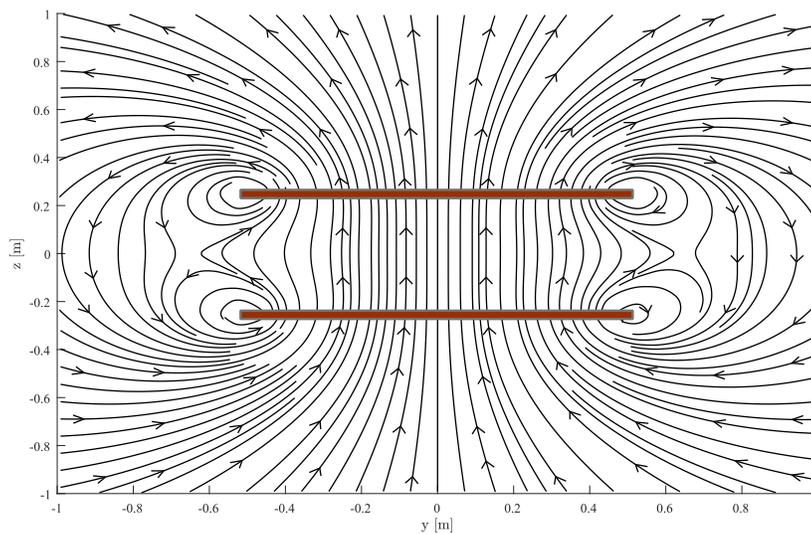


Figura 4.5: Líneas de campo magnético en el plano yz de espiras circulares.

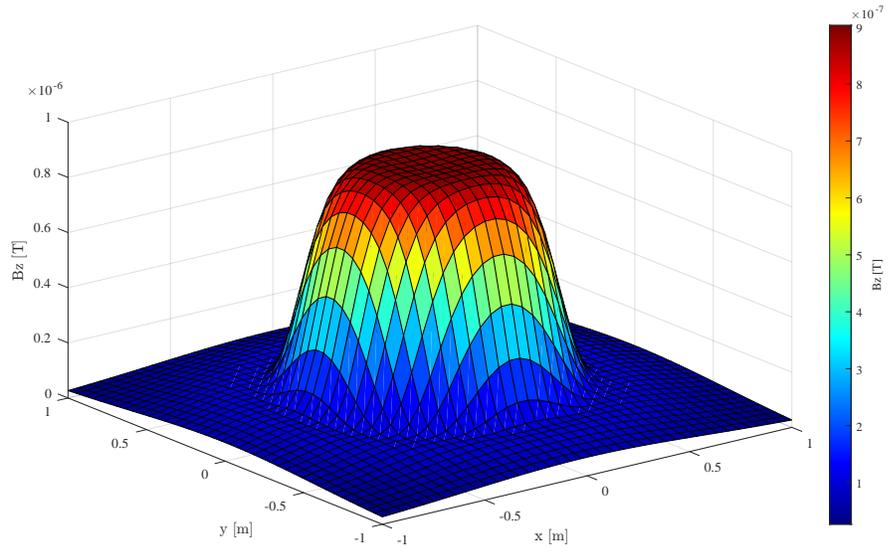


Figura 4.6: Mapa en 3D de campo magnético producido por espiras circulares.

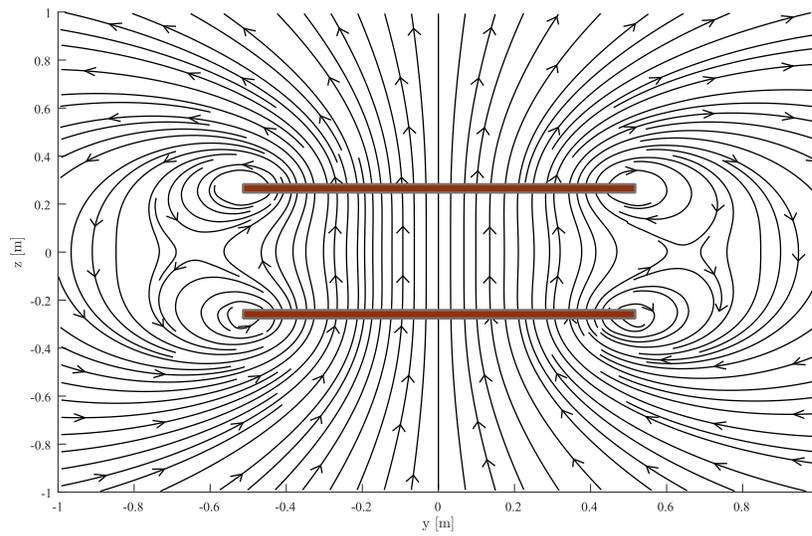


Figura 4.7: Líneas de campo magnético en el plano yz de espiras cuadradas.

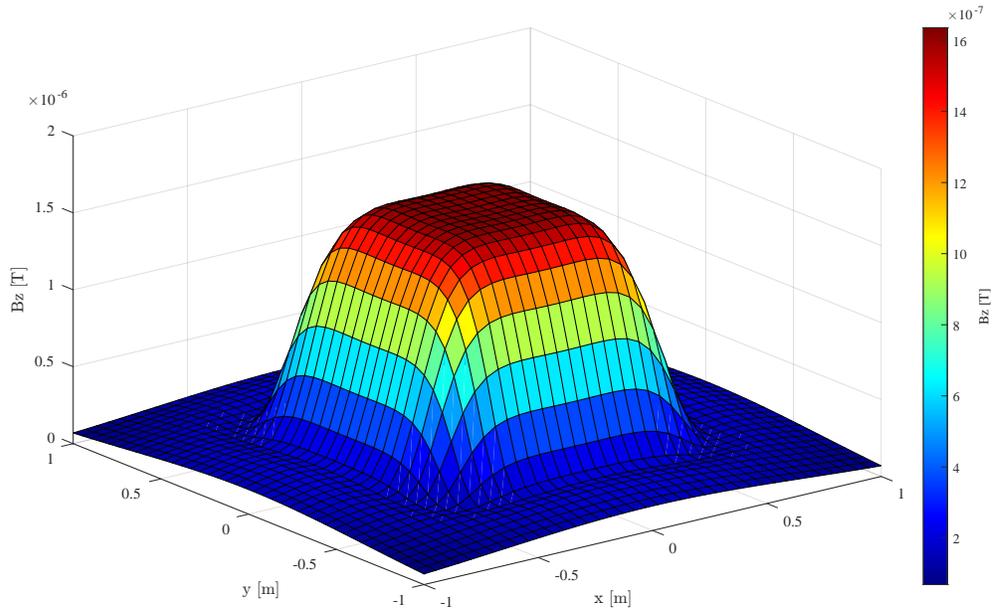


Figura 4.8: Mapa en 3D de campo magnético producido por espiras cuadradas.

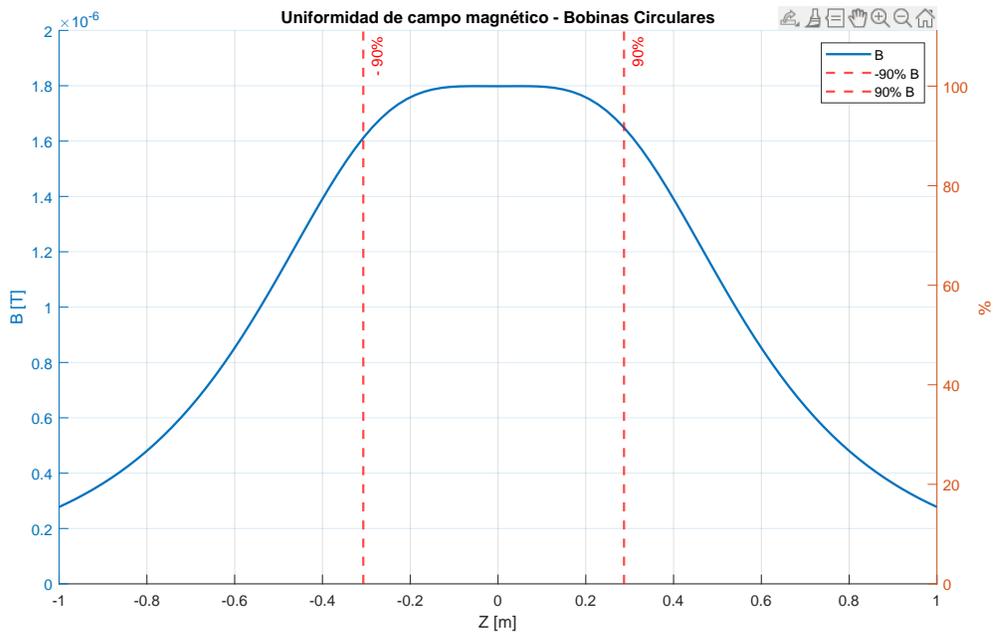


Figura 4.9: Gráfica de campo magnético en el eje z de bobinas circulares.

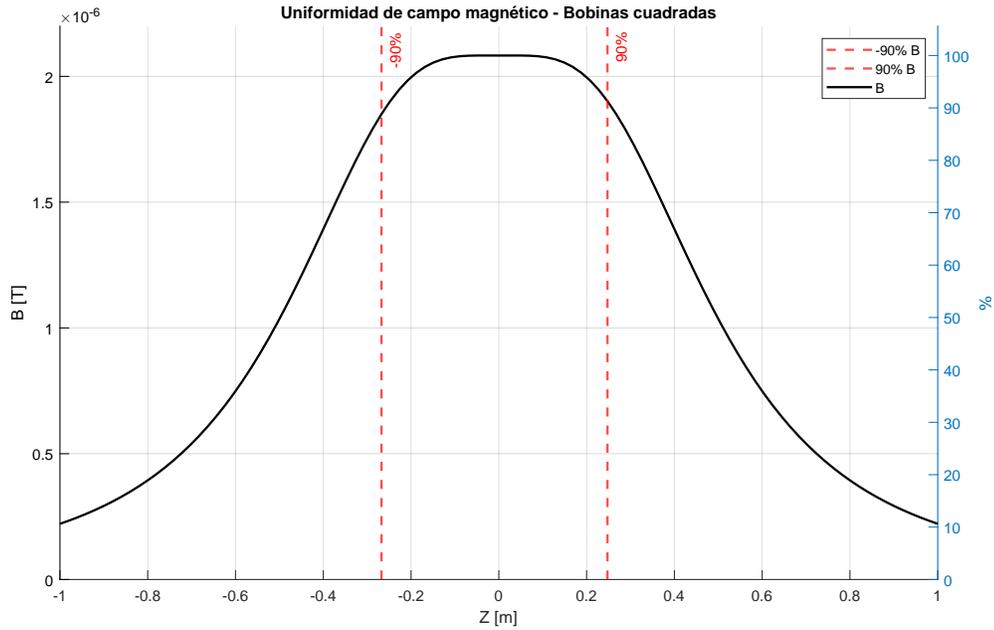


Figura 4.10: Gráfica de campo magnético en el eje z de bobinas cuadradas.

De las figuras 4.9 y 4.10 se puede determinar el valor máximo del campo magnético en el centro del eje z, también la variación del campo magnético a lo largo del eje z en un intervalo del 90 % al 100 % de su totalidad y la distancia que existe del centro de la jaula al punto donde se encuentra el 90 % del campo magnético, la cual se emplea para determinar el volumen de uniformidad de campo dentro de la jaula Helmholtz.

Tabla 4.4: Comparación de uniformidad de campo magnético con geometrías distintas en bobinas Helmholtz.

	Circulares	Cuadradas
%	90.6	90.9
B_{max} [μT]	1.7982	2.0747
Δ_z [m]	0.3	0.26
Volumen [m^3]	0.1131	0.1406

Se puede concluir de la tabla 4.4 que las bobinas de geometría cuadrada presentan un campo máximo mayor al de geometría circular, además de que el volumen en esta

4. DISEÑO

geometría en el centro de la jaula es levemente mayor. Así mismo, ya que la propia geometría de los nanosatélites sigue un patrón de polígono, es congruente que el volumen de uniformidad que se forme dentro de la jaula Helmholtz también sea un polígono. Igualmente, se busca tener un ensamblaje sencillo y una baja susceptibilidad a errores de construcción, por lo que una geometría cuadrada satisface estos requerimientos. Por consiguiente, se optó por diseñar una estructura cuadrada para el simulador de campo magnético terrestre.

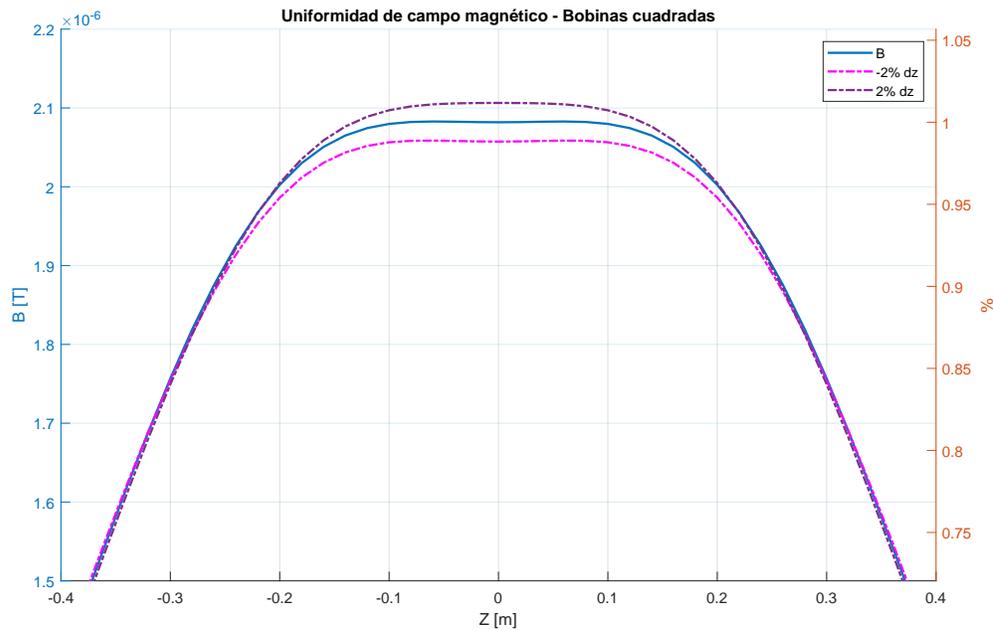


Figura 4.11: Gráfica de variación de distancia entre bobinas de geometría cuadrada.

En la gráfica 4.11 se puede apreciar la variación del campo magnético cuando se colocan las bobinas a una distancia desde el origen $0.5l$ [m] multiplicada por un factor $dz = 0.5445$ [8] y modificando el mismo un $\pm 2\%$ sobre el eje z , donde se observa una buena uniformidad con el valor nominal. Sin embargo, se pudo obtener un factor más preciso por medio de iteraciones utilizando MATLAB, donde se tiene un solo valor máximo (no se tienen picos de valores máximos) del campo magnético, conservando una buena uniformidad, el cual fue $dz = 0.5409$ [m], variando 3.6 [mm] con respecto al valor nominal.

4.4.2. Diseño mecánico y eléctrico

El primer paso para dar solución a los requerimientos del SCMT es definir los parámetros de diseño para la construcción de las bobinas Helmholtz y la reproducción del campo magnético. El primer parámetro que se definió fue el tamaño de las bobinas Helmholtz, tomando en cuenta el volumen de trabajo en el que se debe tener un campo magnético uniforme para albergar el nanosatélite dentro de la jaula. Ya que los nanosatélites que pueden ser probados siguen el estándar CubeSat (1U - 3U), se tomaron las dimensiones del nanosatélite de tres unidades de acuerdo al *CubeSat Design Specification* [1] para calcular el tamaño de las bobinas, puesto que es el objeto más grande que puede ser sometido a pruebas.

Una vez que se tuvieron las dimensiones, se consideró el espacio que ocupa el nanosatélite en el centro de la jaula, independientemente de la orientación en la que se coloque. De esta manera, se obtuvo el volumen de uniformidad con el que debería cumplir el arreglo de bobinas Helmholtz.

$$V = (340.5 \times 10^{-3})^3 [m^3],$$

$$V = 0.0395 [m^3].$$

Se llevó a cabo una simulación en MATLAB (Fig.4.12), en la cual se ingresó el volumen de uniformidad del campo magnético que debe cumplirse en el centro de la jaula, así como el valor máximo de campo magnético que puede generar el arreglo de bobinas Helmholtz. Este valor se obtuvo mediante la calculadora de campo magnético de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) [35], que emplea la versión más reciente del WMM y el IGRF. El resultado obtenido corresponde al campo magnético máximo al que un nanosatélite en LEO podría estar expuesto al atravesar el polo sur magnético. A partir de la simulación, se determinó que la longitud de las bobinas Helmholtz es $l = 1.5 [m]$, asegurando el cumplimiento de los parámetros de uniformidad y magnitud del campo magnético requeridos.

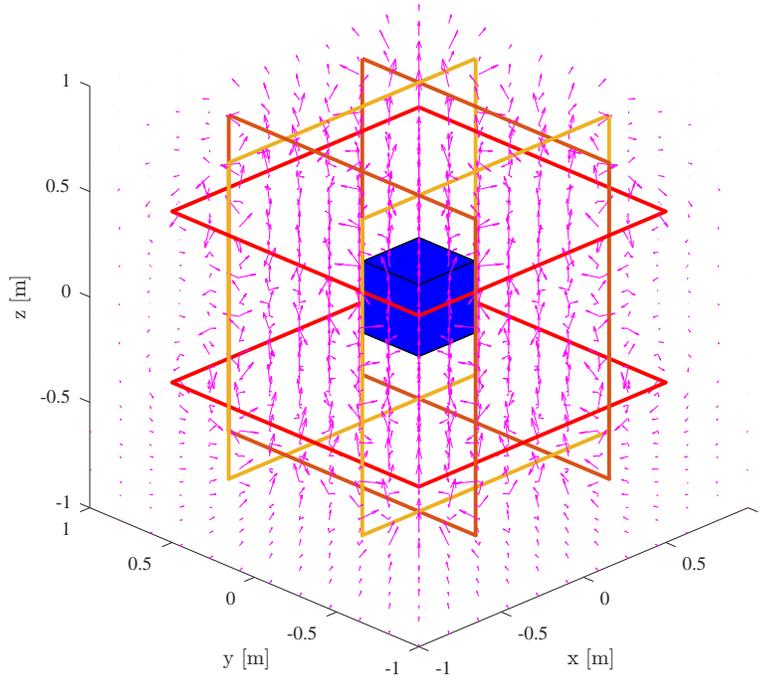


Figura 4.12: Volumen de uniformidad dentro de jaula Helmholtz con una longitud de lado de las bobinas de $l = 1.5 [m]$.

Los siguientes parámetros que se definieron fueron corriente y voltaje. La intensidad de corriente máxima se determinó a partir del campo magnético máximo que se puede solicitar y del campo magnético presente en la zona de pruebas. Para obtener los valores de campo magnético, se acudió a la calculadora del NOAA para la fecha de abril de 2024.

Coordenadas (campo magnético máximo):

$$\begin{aligned} h &= 150 [km], \\ lat &= -63.7^\circ, \\ lon &= 135^\circ. \end{aligned}$$

Campo magnético en cada componente (x,y,z) y total (F):

$$\begin{aligned} F_x &= 42.1 [nT], \\ F_y &= 268.9 [nT], \\ F_z &= -61,781.9 [nT], \\ F &= 61,782.5 [nT]. \end{aligned}$$

Estos resultados indican que la magnitud máxima se encuentra en el polo sur magnético, el cual, debido a la deriva polar, se localiza geográficamente en un punto cercano a la costa de la Antártida, a la altura más baja de LEO. Esto es congruente, ya que en los polos magnéticos las líneas de campo magnético son prácticamente perpendiculares a la superficie de la Tierra, lo cual aumenta la densidad del flujo magnético por unidad de área comparado con latitudes más bajas, y por consecuencia, el campo en esa región es más fuerte.

Coordenadas LIESE:

$$\begin{aligned}h &= 2.240 \text{ [km]}, \\lat &= 19.32802^\circ, \\lon &= -99.18243^\circ.\end{aligned}$$

Campo magnético en cada componente (x,y,z) y total (F):

$$\begin{aligned}Fx &= 1,886.7 \text{ [nT]}, \\Fy &= 26,973.6 \text{ [nT]}, \\Fz &= 28,838.2 \text{ [nT]}, \\F &= 39,531.9 \text{ [nT]}.\end{aligned}$$

Para determinar el campo magnético máximo que debe reproducir la jaula Helmholtz, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Anular las componentes de campo magnético local mediante la generación de un campo magnético del mismo valor en sentido opuesto.
2. A los valores de campo magnético generados en el punto 1 se le suman los valores de campo magnético máximo ubicado en el polo sur magnético a 150 km de altura.

Con el objetivo de determinar la intensidad máxima de corriente que deberá inducirse en las bobinas Helmholtz, se consideraron los valores del campo magnético total, debido a que no se cuenta con la jaula construida. Esto permitirá identificar el campo magnético total máximo a reproducir y, a partir de ello, obtener la corriente máxima necesaria, contemplando un margen de corriente superior para evitar cualquier incidente por sobrecorriente. Una vez construida la jaula Helmholtz y colocado un sensor magnético en su centro, alineado con los ejes de las bobinas, será posible realizar una medición precisa del campo magnético local durante la calibración.

4. DISEÑO

Obteniendo la magnitud del campo magnético máximo a generar por la jaula Helmholtz:

$$B = B_l + B_{max} [nT].$$

Donde B_{max} corresponde a la magnitud del campo magnético máximo y B_l corresponde a la magnitud del campo magnético local.

$$B = 101,314.4 [nT].$$

La corriente I_{max} puede calcularse mediante la siguiente expresión propuesta en [11]:

$$B = N \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos(\theta_2) + \cos(\theta_1)) [T]. \quad (4.1)$$

Donde:

$$a = \sqrt{(x - xc)^2 + (z - dz)^2},$$

$$\cos(\theta_1) = \frac{\left(\frac{L}{2+y}\right)}{\sqrt{\left(\frac{L}{2+y}\right)^2 + a^2}},$$

$$\cos(\theta_2) = \frac{\left(\frac{L}{2-y}\right)}{\sqrt{\left(\frac{L}{2-y}\right)^2 + a^2}},$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m],$$

$$N = 40.$$

El término a representa la distancia desde un conductor al centro de la jaula Helmholtz $P(x, y, z) = P(0, 0, 0)$, las expresiones $\cos(\theta_2)$ y $\cos(\theta_1)$ son las distancias desde los extremos de un lado de la bobina también al centro de la jaula como se muestra en la Fig.4.13. μ_0 se define como la permeabilidad del vacío y N el número de espiras de la primera bobina Helmholtz, el cual se propuso a partir de los valores en el Estado del Arte, sin aumentar dicho número con el fin de mantener una baja inductancia.

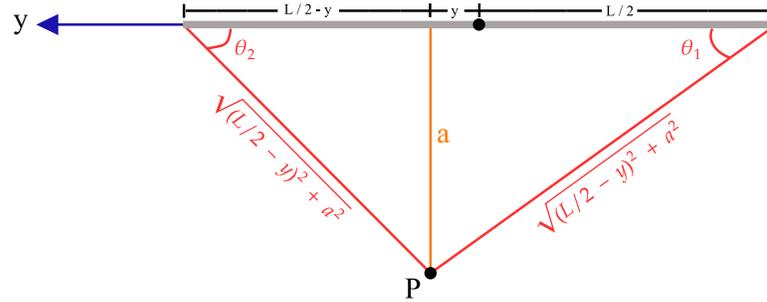


Figura 4.13: Esquema geométrico para cálculo de campo magnético generado en cualquier punto P.

De la Ec.4.1 se obtiene la corriente I_{max} para una bobina Helmholtz:

$$I_{max} = \frac{4\pi a B}{8\mu_0(\cos(\theta_2) + \cos(\theta_1))} [A]. \quad (4.2)$$

$$I_{max} = 2.32 [A].$$

Con este valor de corriente máxima se puede seleccionar el calibre del alambre, el cual se sugiere que sea del 17 – 21 AWG de acuerdo con el Estado del Arte.

La selección del tipo de alambre y sus características representan un factor clave para el cumplimiento de los objetivos del simulador de campo magnético terrestre. Por consiguiente, se seleccionó alambre de cobre para el embobinado debido a su baja resistividad, de esta manera se minimizan pérdidas resistivas. Se optó por el calibre 18 AWG, el cual cumple con el requerimiento de soportar la corriente máxima previamente calculada. Asimismo, se tomó en consideración la inductancia, ya que de tener una inductancia alta, esta causaría una respuesta lenta de la corriente ante cambios en el voltaje aplicado, afectando la uniformidad temporal del campo magnético. Este retraso sería más notorio al encender las bobinas Helmholtz.

Para obtener la inductancia, son necesarias las características del alambre conductor seleccionado. Primero se calcula la resistencia (R) de cada bobina [33]:

$$R = \frac{\rho l}{s} [\Omega]$$

Donde:

- ρ es la resistividad del cobre ($\rho_{cobre} = 1.7 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$).
- l es la longitud del alambre [m].

4. DISEÑO

- s es la sección transversal del alambre [m^2].

$$R = 4.99 \approx 5 [\Omega]$$

A continuación, se procede al cálculo de la inductancia de la bobina Helmholtz considerando su inductancia serie y mutua. Es importante señalar que no hay un acople de inductancias mutuas de los otros dos pares de bobinas que conforman la jaula sobre una bobina Helmholtz [36].

$$L = L_s + M = \frac{4\mu DN^2}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2D}{d} \right) - 0.465 \right] [H]$$

Donde:

- D es la longitud del lado de la bobina [m].
- N es el número de espiras.
- d es el diámetro del alambre [m].

$$L = 14.4 [mH].$$

Para la frecuencia de operación, se calcula el tiempo de subida del campo magnético en la bobina que corresponde al valor entre el 10 % y 90 % de la máxima intensidad de campo magnético [36].

$$\tau_{(10\%-90\%)} = 2.2 \left(\frac{L}{R} \right) [s]$$

$$\tau_{(10\%-90\%)} = 6.3 [ms]$$

Obteniendo la frecuencia:

$$f = \frac{1}{\tau_{(10\%-90\%)}} [Hz]$$

$$f = 157.8 [Hz]$$

A través de un análisis espectral del perfil de corriente se pudo comprobar que la magnitud de las componentes armónicas que conforman el perfil del campo magnético

se encuentra dentro del ancho de banda del circuito RL, como se muestra en la Fig. 4.14, por lo tanto, se asegura que la jaula Helmholtz es capaz de reproducir el campo magnético solicitado.

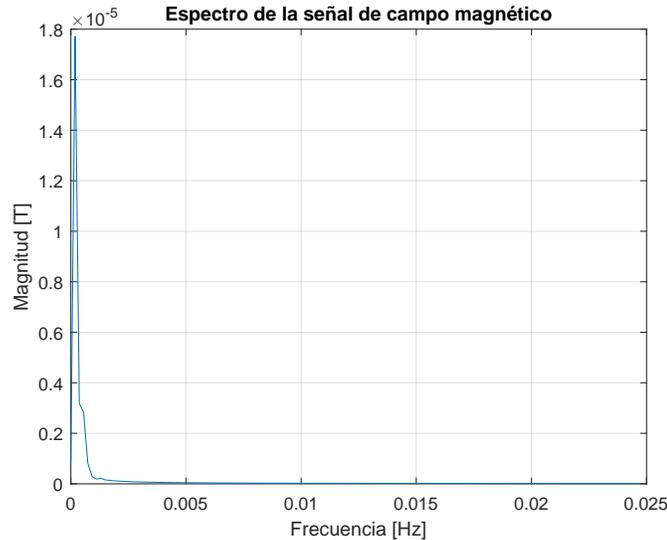


Figura 4.14: Espectro de la señal de campo magnético en z.

4.4.2.1. Material

Se requiere de un material paramagnético para la construcción de las bobinas Helmholtz, ya que se pretende tener uniformidad y precisión de campo magnético dentro de la jaula, minimizando pérdidas por histéresis y evitando saturación magnética. Por esta razón, se decidió emplear aluminio, ya que este no afecta significativamente el campo magnético que las bobinas Helmholtz están diseñadas para producir. Asimismo, gracias a las propiedades mecánicas de este material, es posible manejar y ensamblar de manera sencilla. A su vez, el aluminio puede ser unido con diversas técnicas, lo que permite diseñar y construir bobinas complejas de gran tamaño a bajo costo.

La estructura se conformará de perfiles “U” o canales de aluminio que formarán la geometría cuadrada de las bobinas. Para las dimensiones del canal (ver Fig.4.15), se consideró el diámetro del alambre seleccionado y el número de espiras, de manera que el devanado no sobresaliera del perfil.

Se realizó una búsqueda de perfiles de aluminio y de alambre de cobre 18 AWG con distintos proveedores, para encontrar la mejor opción en cuanto a costo y aprovechamiento del material, tomando en cuenta que cada bobina Helmholtz tendrá una longitud distinta dependiendo de lo alto del perfil seleccionado (medida “B” de la Fig.4.15), partiendo de la longitud base $l = 150 [cm]$ del primer par de bobinas, esto por razones de ortogonalidad entre las bobinas. Asimismo, la longitud del alambre de cobre también

4. DISEÑO

variará, con base en las dimensiones de los otros dos pares de bobinas.

Por lo tanto, se contempló una longitud de $l_{al} = 156 [cm]$ por lado de cada bobina para la cotización de los perfiles de aluminio y una longitud total de alambre de cobre de $l_{cu} = 125 [m]$ por 40 vueltas de cada bobina.

Estos centímetros adicionales se consideraron con la intención de sesgar la búsqueda de perfiles de una medida “B” menor a 1 [cm], puesto que se conoce el diámetro del alambre 18 AWG y el número de espiras, se pudo hacer una estimación del espacio que ocuparía el embobinado.

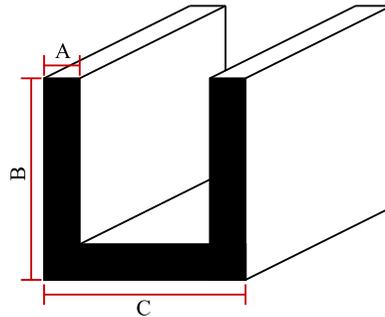


Figura 4.15: Dimensiones de perfil de aluminio.

Tabla 4.5: Cotización de perfiles “U” de aluminio.

Proveedor	Aleación	Dimensiones AxBxC [mm]	Longitud [m]	Precio perfil	Precio metro	Envío
Superfil	6063	1.6x12.7x12.7	6	\$99.46	\$16.57	\$232
Metales Díaz	6061	1.0x9.0x9.0	3.66	\$70.00	\$19.13	\$0.00
Alucentro	6063	1.6x9.5x9.5	6	\$87.00	\$14.26	No disponible

Tabla 4.6: Cotización de perfiles “U” de aluminio.

Proveedor	Cantidad perfiles	Sobrante [cm]	Total
Superfil	7	694.16	\$928.05
Metales Díaz	10	20	\$700.00
Alucentro	7	694.16	\$609.00

De las tablas 4.5 y 4.6 se puede concluir que la mejor opción para adquirir los perfiles de aluminio es la que ofrece Metales Díaz, ya que se tiene un mejor aprovechamiento del espacio dentro del canal de acuerdo con sus dimensiones, a pesar de ser \$91.00 más costoso que la opción más económica. Además, es la opción con menor sobrante de material, el cual se puede designar a otros proyectos del LIESE.

Tabla 4.7: Cotización de alambre de cobre 18 AWG.

Proveedor	Peso [kg]	Longitud [m]	Diámetro [mm]	Precio	Precio metro	Envío
Magnetomex	1	216	1.02	\$479.00	\$2.22	No disponible
Alambre Mayen	1	216	1.02	\$490.00	\$2.27	No disponible
Magnetic Wire	1	216	1.02	\$460.00	\$2.13	No disponible

Tabla 4.8: Cotización de alambre de cobre 18 AWG.

Proveedor	Peso total [kg]	Sobrante [m]	Total
Magnetomex	6	561.8	\$2,874.00
Alambre Mayen	3.5	0	\$1,715.00
Magnetic Wire	6	561.8	\$2,760.00

De las tablas 4.7 y 4.8 se puede concluir que la mejor opción para adquirir el alambre para el embobinado es la que ofrece Alambre Mayen, ya que a pesar de que el costo por kilo es mayor que las demás opciones, se puede obtener la cantidad exacta en un solo carrete, lo que reduce el costo total y hace posible un embobinado continuo en las dos bobinas que conforman la bobina Helmholtz, a diferencia de las otras opciones, en las que se tiene que unir el embobinado de cada una para que sea una conexión en serie.

4.4.2.2. Especificaciones mecánicas y eléctricas

Partiendo de las dimensiones del perfil comercial seleccionado, se puede determinar la longitud real de cada bobina Helmholtz (tabla 4.9).

Tabla 4.9: Longitud de bobinas Helmholtz.

	BH_x	BH_y	BH_z
Longitud [cm]	150	151.8	153.6

Para calcular el número de espiras de las dos bobinas Helmholtz restantes, se utiliza la siguiente expresión [33]:

$$N_2 = \frac{N_1 a_2}{a_1},$$

$$N_2 = 40.48 \approx 40 \text{ vueltas.}$$

Obteniendo N_3 :

$$N_3 = \frac{N_1 a_3}{a_1},$$

$$N_3 = 40.96 \approx 41 \text{ vueltas.}$$

Finalmente, se puede obtener una tabla con todas las especificaciones mecánicas y eléctricas de cada bobina que conforma la bobina Helmholtz por eje (tabla 4.10).

Tabla 4.10: Especificaciones mecánicas y eléctricas de la jaula Helmholtz.

	B_x	B_y	B_z
Longitud bobinas [m]	1.50	1.518	1.536
Número de espiras	40	40	41
Longitud alambre [m]	240	242.9	251.9
Separación entre bobinas [m]	0.8113	0.8211	0.8308
Resistencia [Ω]	5	5.05	5.24
Inductancia [mH]	14.4	14.6	14.8

4.4.3. Diseño de interfaz gráfica del usuario

Se presenta el diseño de la interfaz gráfica de usuario (GUI), desarrollada en App Designer de MATLAB, la cual permite el ingreso de datos para iniciar la simulación del campo magnético terrestre, así como la visualización en tiempo real de sus valores y su representación gráfica. Asimismo, se muestran los módulos realizados para llevar a cabo la simulación.

La simulación consiste en crear la órbita en la que se desea ubicar el satélite, proporcionando distintos parámetros (descritos a continuación) con el fin de obtener, en tiempo real, datos de posición, campo magnético, intensidad de corriente y voltaje que deberán suministrarse a las bobinas Helmholtz.

El diseño se basó en módulos desarrollados en MATLAB (Fig.4.16), los cuales se conectan con el entorno visual y hacen posible la simulación del campo magnético terrestre, así como la obtención de los parámetros eléctricos necesarios para generarlo.

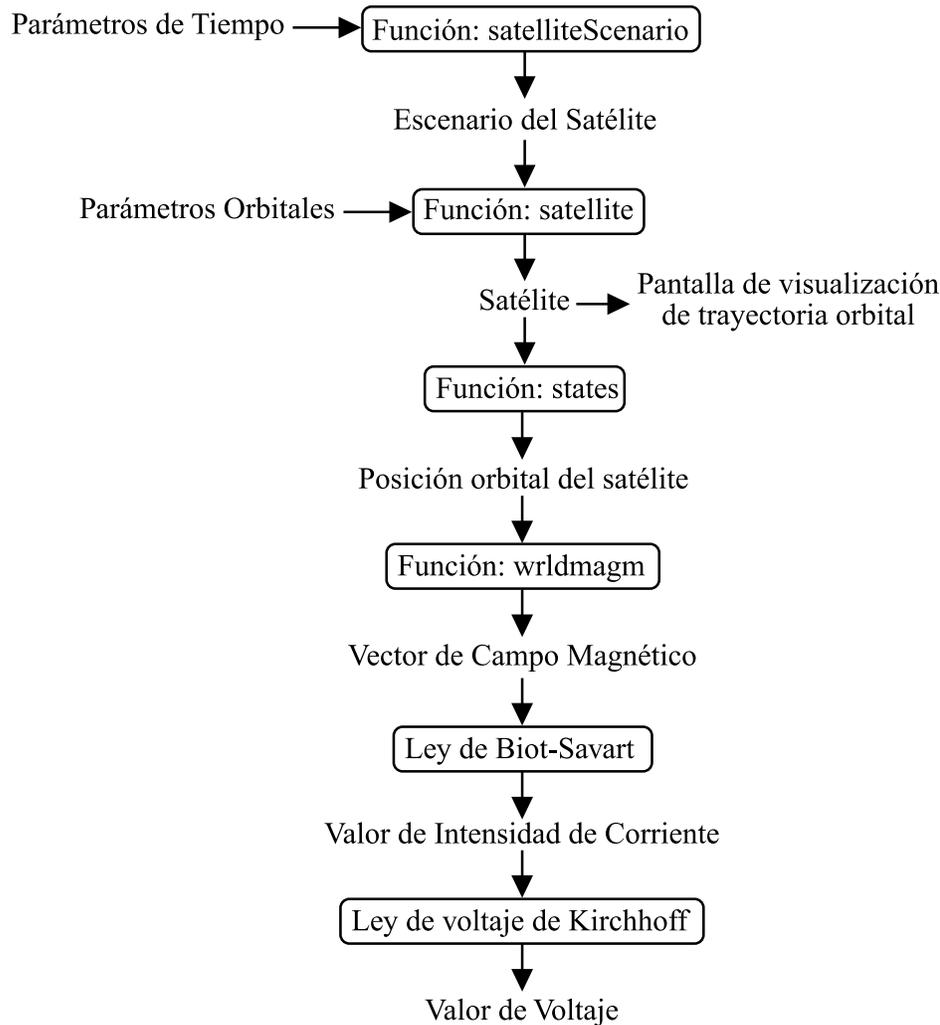


Figura 4.16: Módulos de la GUI del SCMT.

Las entradas que se necesitan ingresar, por medio del usuario, para iniciar la simulación, son los parámetros de tiempo (fecha, duración y tasa de muestreo) y los parámetros orbitales. Los primeros entran a la función “satelliteScenario” del Satellite Communications Toolbox de MATLAB que representa satélites, estaciones terrestres y las interacciones entre ellos. Esta función proporciona la salida de un escenario del satélite a crear; posteriormente, se toman los parámetros orbitales y este escenario para definir una órbita satelital basada en TLE, el cual es el formato de datos que se utiliza para describir la órbita de un satélite en un momento específico en el tiempo, llamado época [37]. Se ingresa la órbita satelital a la función “satellite” para la creación de un objeto (satélite) que seguirá la trayectoria orbital antes descrita; al mismo tiempo, se genera una visualización de esta trayectoria, como la que se muestra en la Fig.4.17. A continuación se accede a la función “states” del satélite creado para obtener la posi-

ción en cada instante de tiempo definido. Esta posición se usa para acceder a la función “wrlmagn”, la cual determina el vector de campo magnético en cada posición dada; después, este vector de campo se usa para determinar cada valor de intensidad de corriente mediante la ley de Biot-Savart, y finalmente, cada valor de intensidad de corriente se emplea para calcular su respectivo valor de voltaje por medio de la ley de voltaje de Kirchhoff, asumiendo un circuito RL.

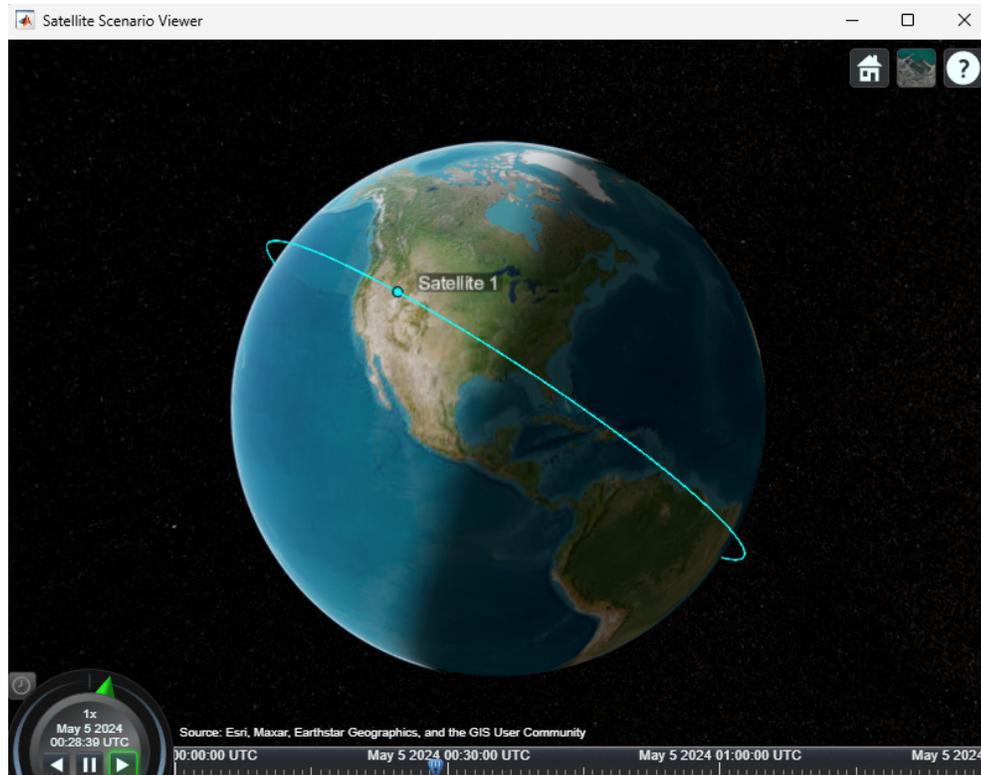


Figura 4.17: Visualización de animación de trayectoria orbital.

Se colocaron los campos para el ingreso de parámetros keplerianos para definir la órbita de la misión (semi-eje mayor, excentricidad, inclinación, RAAN, argumento del periapsis y anomalía verdadera), así como la fecha. Se incluyeron también los campos para definir la duración, tasa de muestreo y velocidad de la simulación. Todos estos campos se encuentran en recuadros sombreados para su distinción.

4. DISEÑO

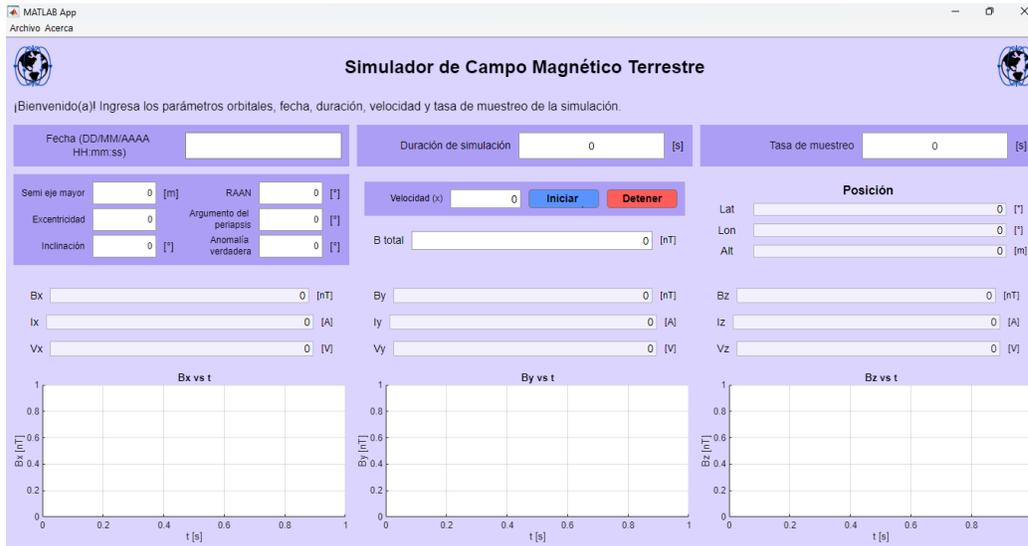


Figura 4.18: Interfaz gráfica del SCMT.

En la barra superior de la ventana se observan dos pestañas, “Archivo” y “Acerca”, de las cuales se despliega un pequeño menú, en donde se encuentran las opciones de “Guardar” y “Créditos”, respectivamente. La opción “Guardar” guarda todos los valores de la simulación en una hoja de Excel, mientras que la opción “Créditos” abre un documento en donde se muestra más información sobre la interfaz y el proyecto.

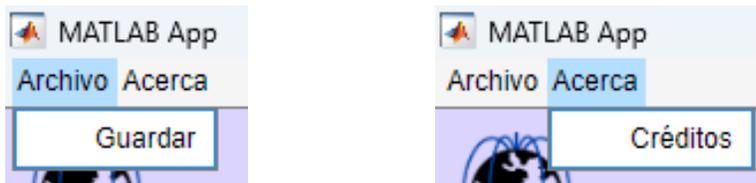


Figura 4.19: Menú de pestañas de la interfaz del SCMT.

Los valores de posición, campo magnético, intensidad de corriente, voltaje y las gráficas de campo magnético varían en tiempo real, según lo ingresado en los campos de tasa de muestreo, velocidad y duración.

En el siguiente capítulo se describirá la operación de esta interfaz al momento de una simulación.

4.4.4. Diseño de sistema de potencia

El sistema de potencia estará compuesto por una fuente de alimentación de tres canales de mínimo $10[V]$ y $8[A]$, ya sea que se adquiriera o se construya. Estos valores fueron previamente determinados para la generación del campo magnético máximo, considerando un suministro de energía a las bobinas Helmholtz en paralelo. Se conectarán tres puentes H a la fuente, los cuales permitirán controlar la salida de voltaje y la dirección de la corriente en las bobinas y, de este modo, generar el campo magnético requerido según la posición del nanosatélite para, finalmente, conectar los puentes H a la jaula Helmholtz, uno por cada bobina Helmholtz en su eje. Para el control de las señales se usará la tarjeta de desarrollo STM32 Nucleo-64 con microcontrolador STM32F446RE de la familia ST con su IDE (Fig.4.20).

El uso de esta tarjeta fue un requerimiento dado por el LIESE.



Figura 4.20: Tarjeta de desarrollo STM32 N-64.

La elección del Puente H se basó, principalmente, en la intensidad de corriente máxima que demandan las bobinas, de modo que se buscó un driver de alta potencia. El Puente H BTS7960 [38] (Fig.4.21) está diseñado para operaciones de alta potencia, puede manejar hasta $43[A]$ de forma continua, cuenta con protección avanzada y control preciso con PWM, compatible con señales PWM de hasta $25 [kHz]$, además de su facilidad de uso, sin necesidad de algún componente adicional.

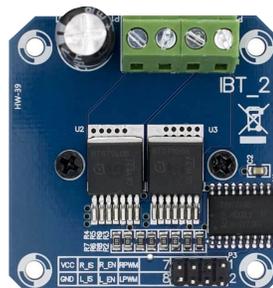


Figura 4.21: Puente H BTS7960.

4. DISEÑO

A continuación se presenta el diagrama eléctrico del sistema de potencia del SCMT (Fig.4.22) donde se pueden observar las conexiones de cada uno de los elementos descritos anteriormente, así como los pines del driver BTS7960 que serán utilizados, los cuales son las señales de modulación de ancho de pulso, PWM, derecho e izquierdo, habilitación de las entradas derecha e izquierda, alimentación y tierra. También se tienen las conexiones de alimentación por la fuente y las salidas a la bobina Helmholtz, la cual se aprecia como dos inductores en serie con sus marcas de polarización; estas nos indican que la corriente fluye en el mismo sentido en ambas bobinas.

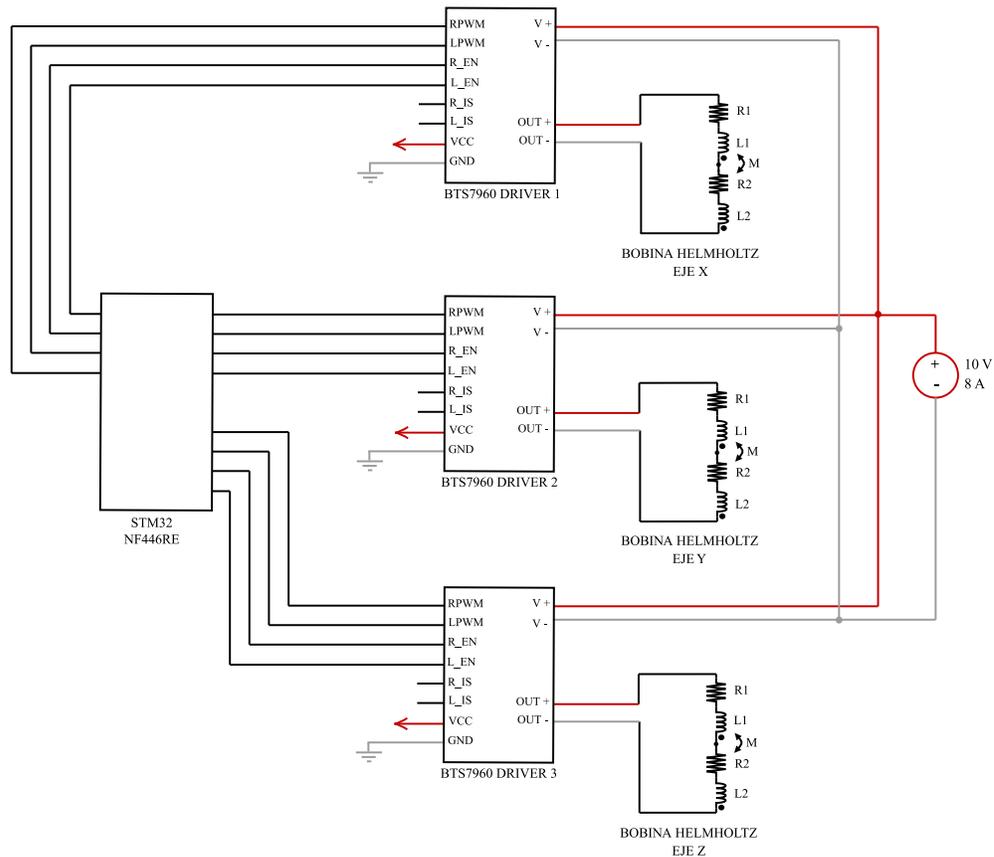


Figura 4.22: Diagrama eléctrico del sistema de potencia del SCMT.

4.4.5. Diseño de Central de control

Se diseñó una central de control empleando dos tarjetas de desarrollo STM32F446RE, la primera recibe señales de campo magnético mediante el magnetómetro HMC5883L para la calibración de la jaula Helmholtz (eliminación del campo magnético local) y, posteriormente, para el monitoreo del campo magnético en la ejecución de las simulaciones. Estas señales son procesadas y enviadas a la GUI, para el ajuste de la ecuación

de la recta que describirá los valores de voltaje que habrá de suministrar a las bobinas Helmholtz por medio de la fuente de alimentación. El segundo microcontrolador estará recibiendo las señales de voltaje, de parte de la GUI, que se deberán enviar por PWM a los puentes H; estos permitirán reproducir el campo magnético solicitado en ambos sentidos.

Los diagramas 4.22 y 4.23 muestran la interacción de la central de control, conformada por los dos microcontroladores, con el sistema de potencia y con el magnetómetro que proporciona las mediciones del campo magnético.

4.4.5.1. Calibración

Se requiere una calibración del sistema de bobinas Helmholtz con el fin de eliminar el campo magnético local y llevar a cabo una reproducción precisa del campo magnético en el centro de la jaula. La calibración se realizará antes de la primera simulación; esta consistirá en una muestra de n valores de campo magnético en la que se irá variando el voltaje de manera gradual para hacer una medición en cada muestra. Teniendo estos valores, se realizará una regresión lineal mediante el método de mínimos cuadrados para ajustar los valores medidos con los valores de referencia. De esta manera, se asegura que se tendrá el campo magnético solicitado en el centro de la jaula Helmholtz.

Para la medición del campo magnético se investigaron distintos sensores y se encontró el magnetómetro digital triaxial HMC5883L de Honeywell [39] (fig. 4.23) debido a su confiabilidad y rango de medición en los tres ejes, además de su bajo costo, el cual se puede configurar para tener un rango de medición de $0.88 [G]$ ($88,000 [nT]$) ofreciendo la mayor sensibilidad de $0.73 [mG/LSb]$.



Figura 4.23: Magnetómetro HMC5883L.

Se llevó a cabo la medición del campo local para probar su funcionamiento y se realizó una calibración previa del mismo sensor para mejorar la precisión de la medición, debido a que el sensor se puede ver afectado por interferencias magnéticas del

4. DISEÑO

entorno. Los resultados de las mediciones se observarán más adelante, en el capítulo 6. La comunicación del magnetómetro se realizó por medio del protocolo I2C, empleando la misma tarjeta de desarrollo que se mencionó anteriormente, en el sistema de potencia, la STM32 Nucleo-64 con microcontrolador STM32F446RE. A continuación, se muestra el diagrama eléctrico para la operación del magnetómetro (Fig.4.24).

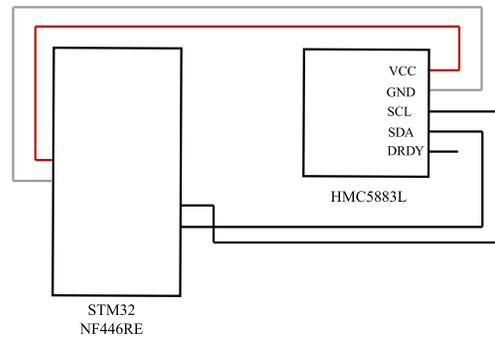


Figura 4.24: Diagrama eléctrico para la operación del magnetómetro HMC5883L.

Se realizarán nuevas mediciones del campo magnético en el centro de la jaula Helmholtz durante la ejecución de la simulación, con el fin de verificar que el campo magnético generado coincida con el valor solicitado.

4.4.6. Especificaciones del SCMT

Una vez concluido el diseño de los sistemas del SCMT, se presenta una tabla de especificaciones (Tabla 4.11), la cual servirá para el modelado 3D de la jaula Helmholtz y, posteriormente, para su construcción. En general, con estas especificaciones se tiene un resumen técnico de la composición del proyecto.

Tabla 4.11: Especificaciones del SCMT.

Geometría de bobinas	Cuadrada
Longitud	150 [cm]
Calibre de alambre de cobre	18 AWG
Número de espiras	40
Intensidad de corriente máxima	2.3 [A]
Tamaño de satélite para pruebas	Nanosatélites (hasta CubeSats 3U)
Magnetómetro	HMC5883L
Modelo de campo magnético	WMM
Material de la estructura	Aluminio 6061
Dimensiones del perfil	1.0x9.0x9.0 [mm]

Modelado de ingeniería e Integración

5.1. Modelado de jaula Helmholtz

La importancia de realizar un modelado de ingeniería o modelo 3D radica en tener una visualización realista de las bobinas Helmholtz, haciendo énfasis en el dimensionamiento de las piezas y su manufactura, así como en el ensamblaje total de la jaula. De esta manera, se observa el resultado preliminar de cada etapa de diseño para, finalmente, llegar a su validación. Además, tener un modelo hace posible una mejor comunicación de ideas ante los lectores y el público.

A continuación, se presenta el ensamblaje completo y el diseño de piezas adicionales destinadas a mejorar la estabilidad de la jaula Helmholtz.

El primer modelado fue el de la estructura conformada por perfiles de aluminio. Las uniones entre perfiles se realizaron mediante un corte transversal a 45° en cada perfil, de modo que fuera posible ensamblarlos y conseguir la geometría cuadrada requerida, tal como se muestra en la Figura 5.1. El método de unión para estas esquinas será mediante un adhesivo estructural, ya que permite un volumen limpio, ideal para un embobinado homogéneo.

Una vez modeladas las tres bobinas Helmholtz de manera ortogonal, con la separación entre bobinas determinada en el capítulo anterior, se procedió al embobinado con el número de vueltas correspondiente.

En la Figura 5.2 se puede observar que el embobinado no sobresale de la altura del perfil seleccionado, validando así las dimensiones del canal.

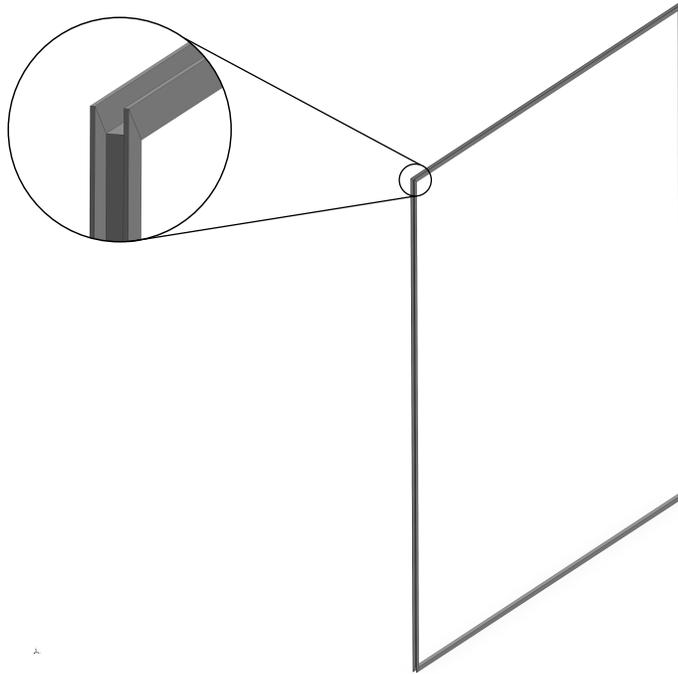


Figura 5.1: Unión entre dos perfiles “U” de aluminio.

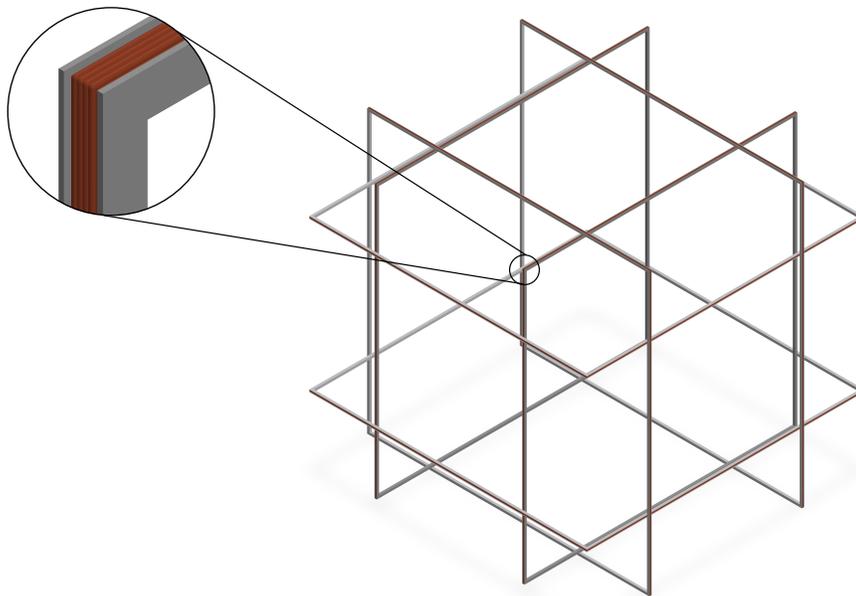


Figura 5.2: Embobinado de bobinas Helmholtz.

Ya que las esquinas de la estructura solo están unidas por un adhesivo, se sugiere agregar una escuadra de aluminio, que refuerce esta unión (también unida con adhesivo), pues, a pesar de que la estructura no está soportando una carga que comprometa la integridad del ensamble, se busca tener una mayor resistencia en la unión, además de mantener la perpendicularidad de ambos perfiles (Fig.5.2(a)). También se diseñó una abrazadera en cruz (o doble) preliminar (se propone fabricarla de PET o PETG), que mantenga la ortogonalidad entre bobinas Helmholtz, aportando estabilidad y rigidez al ensamble (Fig.5.2(b)); esta se compone de dos piezas: una abrazadera doble y una tapa. Asimismo, se diseñaron cuatro bases de aluminio para la bobina externa de la jaula Helmholtz; estas sujetan los perfiles y se colocan contra el suelo. Las bases tienen una mayor área de contacto con el suelo en comparación con el área de los perfiles, que es muy pequeña; de esta manera, se tiene un mejor soporte de toda la estructura (Fig.5.2(c)). Finalmente, se modeló una placa (se propone fabricarla de PET o PETG) que permitirá la conexión entre las terminales del sistema de potencia y el embobinado de cada bobina Helmholtz de manera sencilla (Fig.5.2(d)). Esta placa estará unida, por medio de tornillos y tuercas M6, a dos piezas en “L” o ángulos de aluminio con una escuadra integrada (Fig. 5.2(e)) que estarán reforzando la unión perpendicular de dos perfiles.

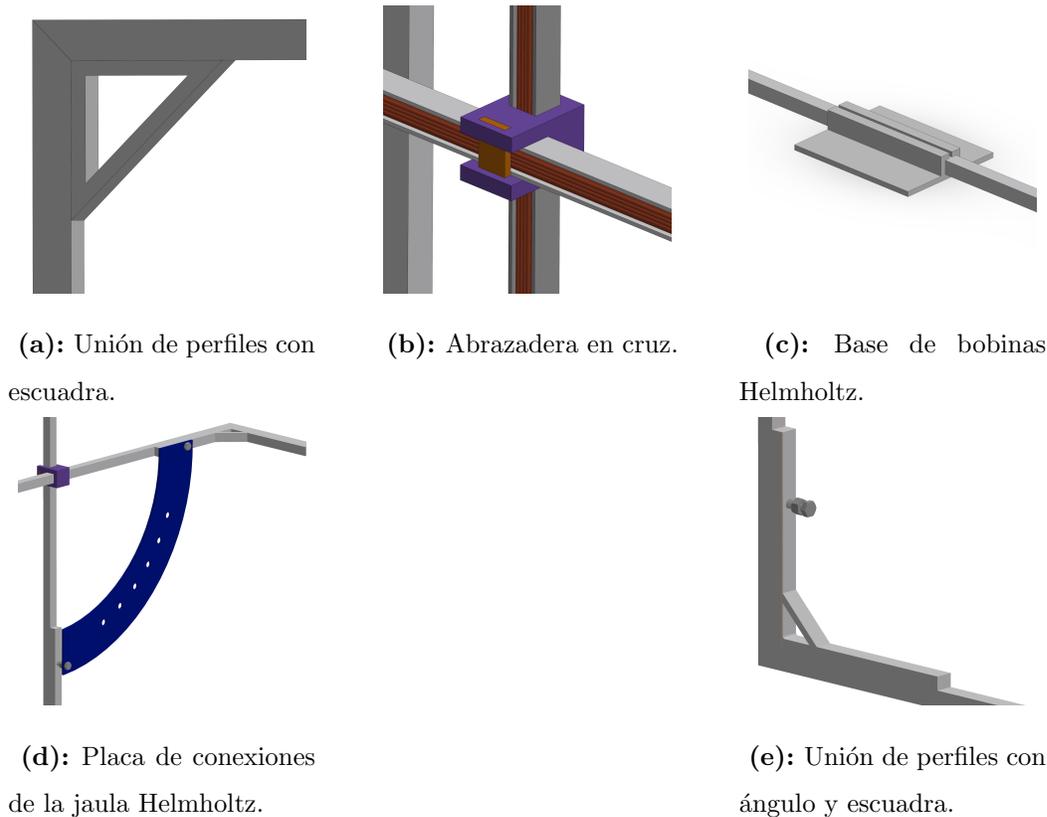


Figura 5.3: Diseño de complementos estructurales de la jaula Helmholtz.

5.2. Integración de sistemas

Esta sección consiste en tener una planificación de cómo se comunicarán los sistemas y cuál será la interacción entre ellos.

Como se dio a conocer en el Diseño a nivel sistema, en el capítulo anterior, cada sistema tiene su propia manera de comunicarse y funcionar.

La primera interacción que se tiene es la del usuario al ingresar los datos de la órbita deseada en la GUI. Por ejemplo, se puede observar en la Fig.5.4 que se han ingresado los parámetros de la simulación para un satélite que recorre una trayectoria orbital muy similar a la de la Estación Espacial Internacional. Al dar clic en el botón “Iniciar”, el programa obtendrá la posición del satélite en cada muestra de tiempo que se haya ingresado, de acuerdo con la órbita creada; asimismo, se accederá al WMM para obtener los valores del campo magnético en cada posición y calcular los valores de intensidad de corriente y voltaje correspondientes. De igual manera, en cada muestra de tiempo se irán graficando los valores de campo magnético con el fin de obtener una curva comple-

ta del comportamiento de dicho campo magnético en la duración total de la simulación.

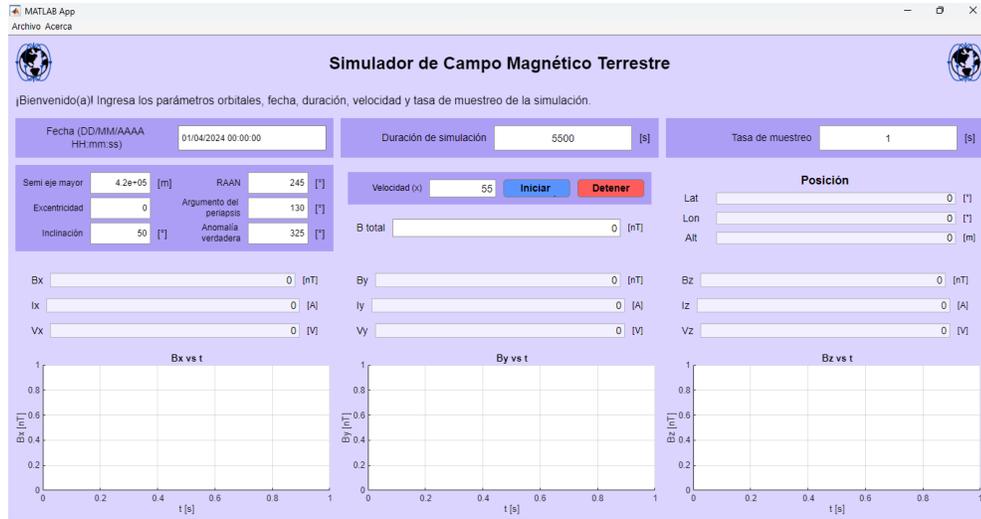


Figura 5.4: Ingreso de parámetros de simulación en la GUI.

En la Fig.5.5 se observan los primeros segundos de la simulación. En cada instante de tiempo definido, se estará enviando una señal de intensidad de corriente y voltaje a la central de control por medio de UART.

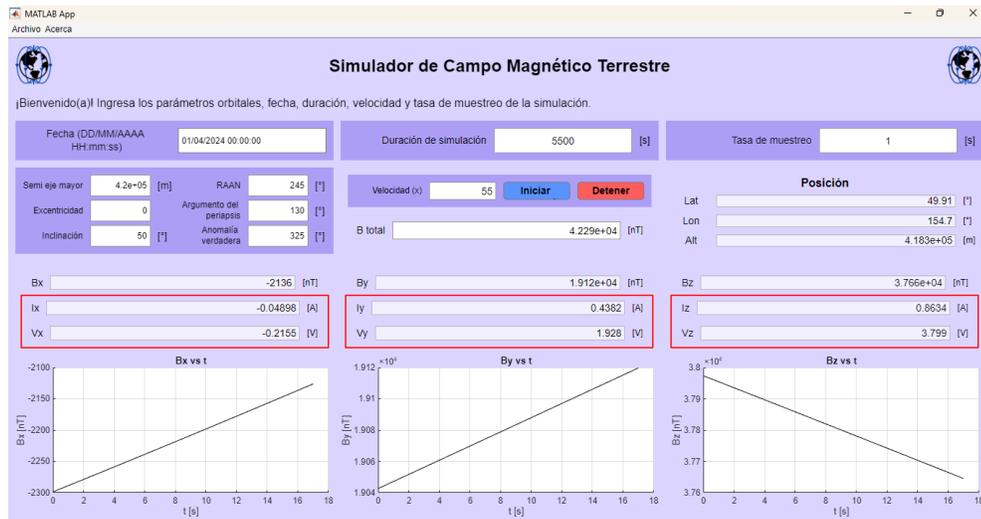


Figura 5.5: Señales de corriente y voltaje en simulación activa en la GUI

Cada canal de la fuente de alimentación estará conectado a su respectivo puente H, y estos estarán conectados a las bobinas Helmholtz, mediante la placa de conexiones

5. MODELADO DE INGENIERÍA E INTEGRACIÓN

presentada anteriormente. Las dos bobinas que conforman la bobina Helmholtz estarán conectadas en serie.

Finalmente, para la medición del campo magnético durante la simulación, el magnetómetro HMC5883L estará posicionado en el centro de la jaula Helmholtz, comunicado por medio de I2C con el microcontrolador, para enviar los valores del campo magnético generado a MATLAB por medio de UART, y compararlos con los valores solicitados.

En la Fig.5.6 se muestra el diagrama de integración de los sistemas del SCMT. La fuente de alimentación observada es de la marca KEYSIGHT [40] y se usó como ejemplo para indicar la conexión con los puentes H. Además, se pueden observar todas las conexiones en conjunto de los sistemas electrónicos, junto con la estructura de la jaula Helmholtz.

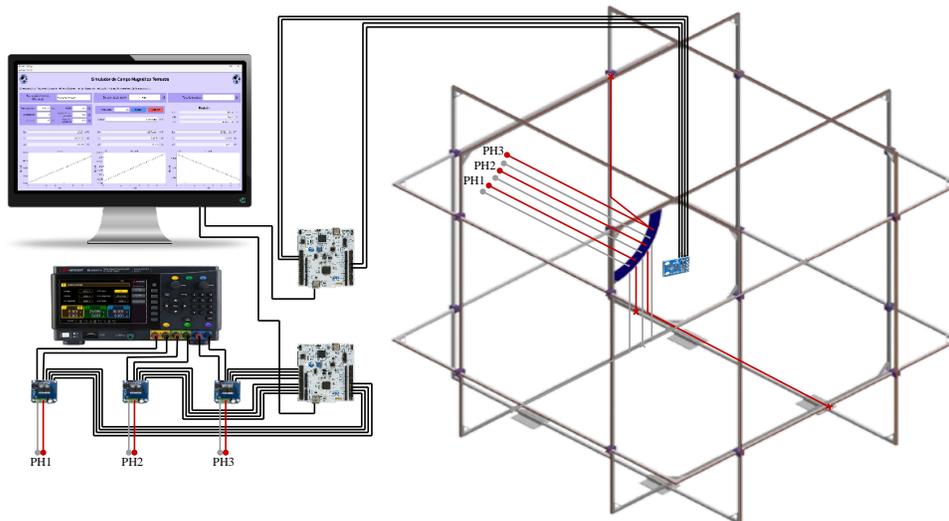


Figura 5.6: Diagrama de integración del SCMT.

Resultados

Este capítulo presenta los resultados del diseño del simulador del campo magnético terrestre, el cual está compuesto de una GUI, una central de control, un sistema de electrónica de potencia y la jaula Helmholtz.

6.1. Resultados de la Interfaz Gráfica de Usuario del SCMT

Se realizó una simulación empleando la GUI diseñada en MATLAB. La simulación se planteó para la fecha del 01 de abril del 2024 a las 00:00:00 hrs, con una duración de 5,500 segundos, con una tasa de muestreo de 1 segundo y una velocidad de $\times 55$. Los parámetros orbitales ingresados fueron similares a los parámetros que describen la trayectoria orbital de la ISS, como se observa en la Fig. 6.1. En esta imagen se muestran los últimos valores de posición, campo magnético, intensidad de corriente y voltaje de la simulación, así como las gráficas del perfil de campo magnético terrestre en cada componente (x,y,z) a lo largo de toda la trayectoria orbital (ver Fig. 6.2).

6. RESULTADOS

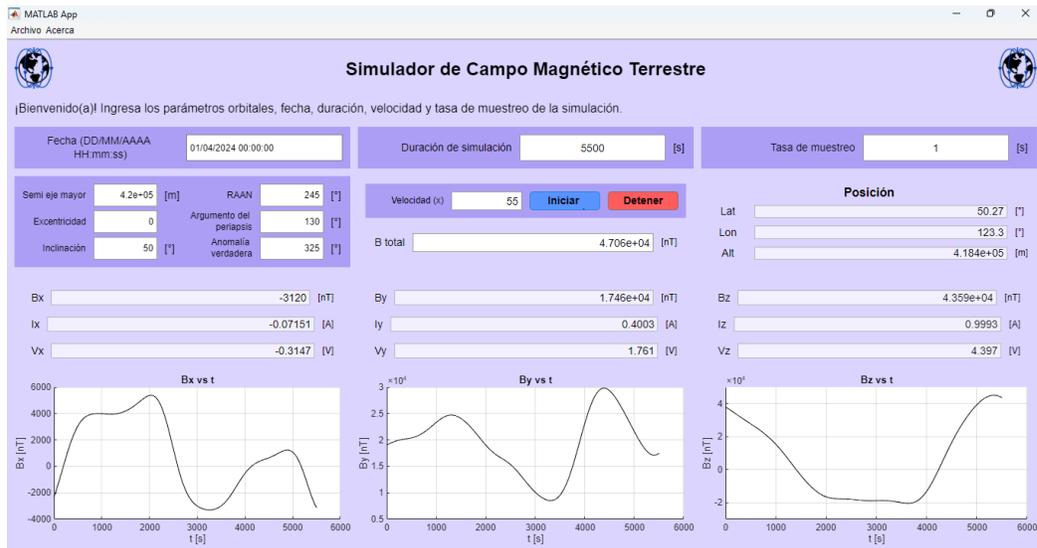


Figura 6.1: Simulación completa de campo magnético terrestre.

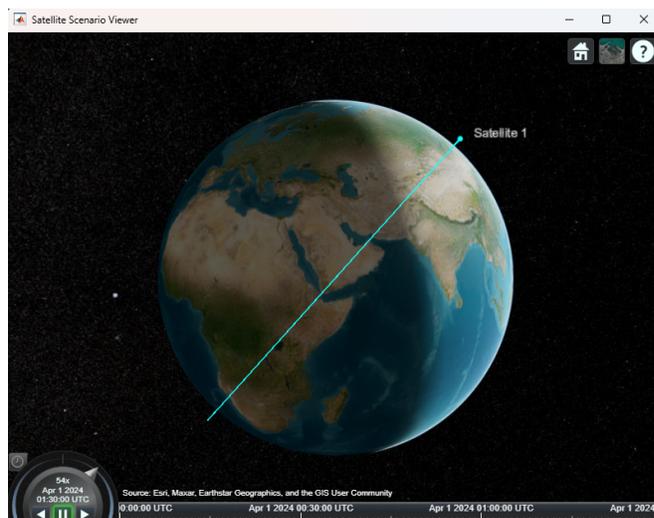


Figura 6.2: Pantalla de visualización de la trayectoria orbital del satélite.

Se puede apreciar en las gráficas del perfil de campo magnético, el comportamiento del mismo al recorrer distintas regiones de la Tierra. En el eje z, por ejemplo, se puede percibir claramente la influencia de la anomalía del Atlántico Sur que debilita el campo magnético al pasar por esa zona, como se muestra en la Fig. 6.3. De igual manera, se puede observar este cambio en las gráficas de las otras componentes, al enfocarse en su comportamiento a partir del segundo 3,000. Lo que nos indica que el simulador está operando de manera correcta.

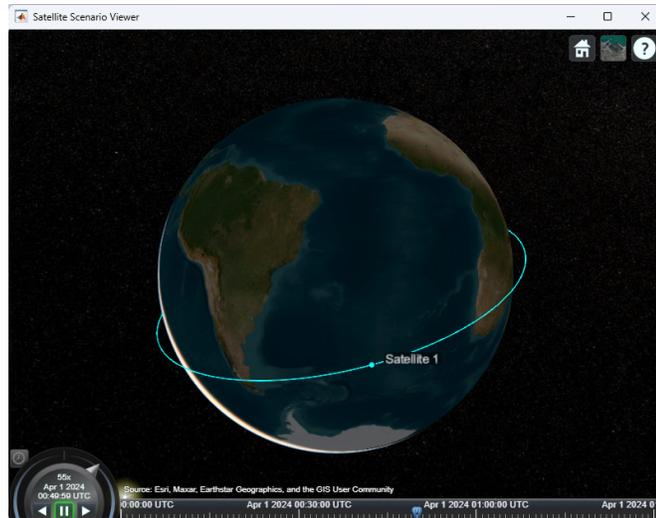


Figura 6.3: Pantalla de visualización de la trayectoria orbital del satélite pasando por la AAS.

6.2. Resultados de la central de control del SCMT

Debido a que no se cuenta con el sistema de potencia, ni la jaula Helmholtz construida, se presentarán los resultados del funcionamiento del magnetómetro para realizar la calibración de la jaula y la medición del campo magnético cuando se ejecute una simulación.

Se probó el funcionamiento del magnetómetro HMC5883L, con el fin de probar su efectividad, realizando mediciones del campo magnético local, así como el envío y procesamiento de datos en la unidad de control.

Para la medición del campo magnético se orientó el magnetómetro de tal forma que las componentes de campo magnético en direcciones E-O, N-S y vertical coincidieran con el sistema de coordenadas x,y,z del magnetómetro (ver Fig.6.4). De esta manera, se pueden comparar los valores de campo magnético medidos con los obtenidos de la calculadora NOAA para la ubicación del LIESE.

6. RESULTADOS

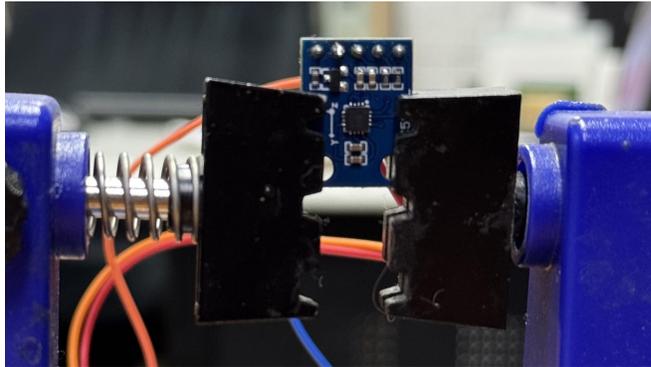


Figura 6.4: Medición de campo magnético local empleando el sensor HMC5883L.

Los valores del campo magnético de acuerdo con la NOAA y los resultados de las mediciones de campo magnético obtenidos por el magnetómetro HMC5883L, previamente calibrado, para la ubicación del LIESE se presentan a continuación.

Coordenadas LIESE:

$$\begin{aligned}h &= 2.240 \text{ [km]}, \\lat &= 19.32802^\circ, \\lon &= -99.18243^\circ.\end{aligned}$$

Componentes del vector de campo magnético (x,y,z) y magnitud del vector de campo magnético (F):

$$\begin{aligned}Fx &= 1,886.7 \text{ [nT]}, \\Fy &= 26,973.6 \text{ [nT]}, \\Fz &= 28,838.2 \text{ [nT]}, \\F &= 39,531.9 \text{ [nT]}.\end{aligned}$$

Mediciones del campo magnético:

Tabla 6.1: Mediciones de campo magnético local.

Medición	B_x [nT]	B_y [nT]	B_z [nT]	B_{total} [nT]
1	1,774.2	27,523.4	28,032.3	39,325.5
2	1,848.1	27,788.3	28,245.5	39,666.3
3	1,853.2	27,552.8	28,174.6	39,451.2
4	2,019.4	27,421.0	28,318.5	39,470.6
5	2,160.0	27,631.3	28,183.2	39,527.8
6	2,091.2	27,490.0	28,250.7	39,473.7
7	1,854.4	27,789.0	28,455.8	39,817.1
8	1,849.1	27,715.8	28,175.1	39,565.4
9	1,851.1	27,576.7	28,034.4	39,367.9
10	1,850.1	27,643.2	28,104.8	39,464.5
\bar{B}	1,915.1	27,613.2	28,197.5	39,513.0
$E_{\%}$	1.5 %	2.3 %	2.2 %	0.05 %
s	127.5	124.0	129.2	143.2

En la Tabla 6.1 se pueden observar los resultados de las diez mediciones del campo magnético terrestre en cada componente (x,y,z) y el valor de la magnitud del vector de campo (total). De igual manera, se muestra el promedio de las mediciones, el error porcentual con respecto a los valores obtenidos de la NOAA y la desviación estándar por eje.

De acuerdo con los datos presentados, el porcentaje de error de cada componente fue menor del 3% y el error del campo magnético total fue de tan solo $E_{\%} = 0.05\%$. Estos pequeños errores en las componentes de campo se pueden deber a que se tomó de referencia el edificio donde se encuentra el LIESE, por lo que puede existir una pequeña variación del campo magnético terrestre para la ubicación exacta.

En cuanto a la desviación estándar de las mediciones, es decir, la variación que hay entre las mediciones del campo magnético por eje, se presenta una desviación máxima en el eje z, $s = 129.2$ [nT]. Esto nos indica el ruido en las mediciones y, de acuerdo con la hoja de especificaciones del magnetómetro empleado [39], este sensor puede presentar hasta un nivel de ruido de $N = 2$ [mG] (200 [nT]), por lo tanto, las desviaciones

estuvieron dentro del límite de ruido esperado.

6.3. Resultados de uniformidad de campo magnético en la jaula Helmholtz

Partiendo del área que describe el tamaño máximo de nanosatélite CubeSat que puede ser posicionado en el centro de la jaula Helmholtz para la realización de pruebas de control (3U), $A = 0.345 \times 0.345 [m^2]$, y de los parámetros de diseño especificados en la tabla 4.11, se realizó una simulación de uniformidad de campo magnético en el eje z, ya que es el eje perpendicular en cada bobina donde se concentra el campo magnético, como se muestra en la Fig. 6.5, y se puede apreciar que se obtuvo un campo magnético uniforme mayor al 99 % en la región de prueba del nanosatélite. Asimismo, en la Fig. 6.6 se muestran los mapas de campo magnético en donde se identifica la magnitud del campo por colores y su área de uniformidad.

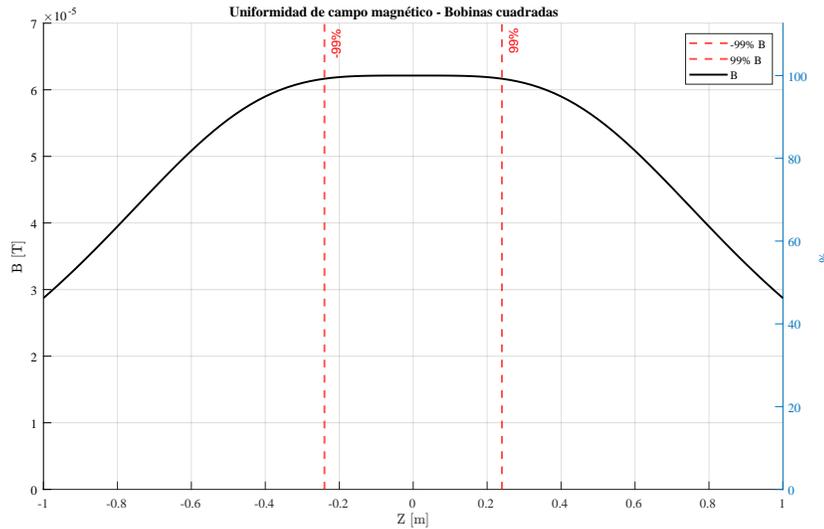
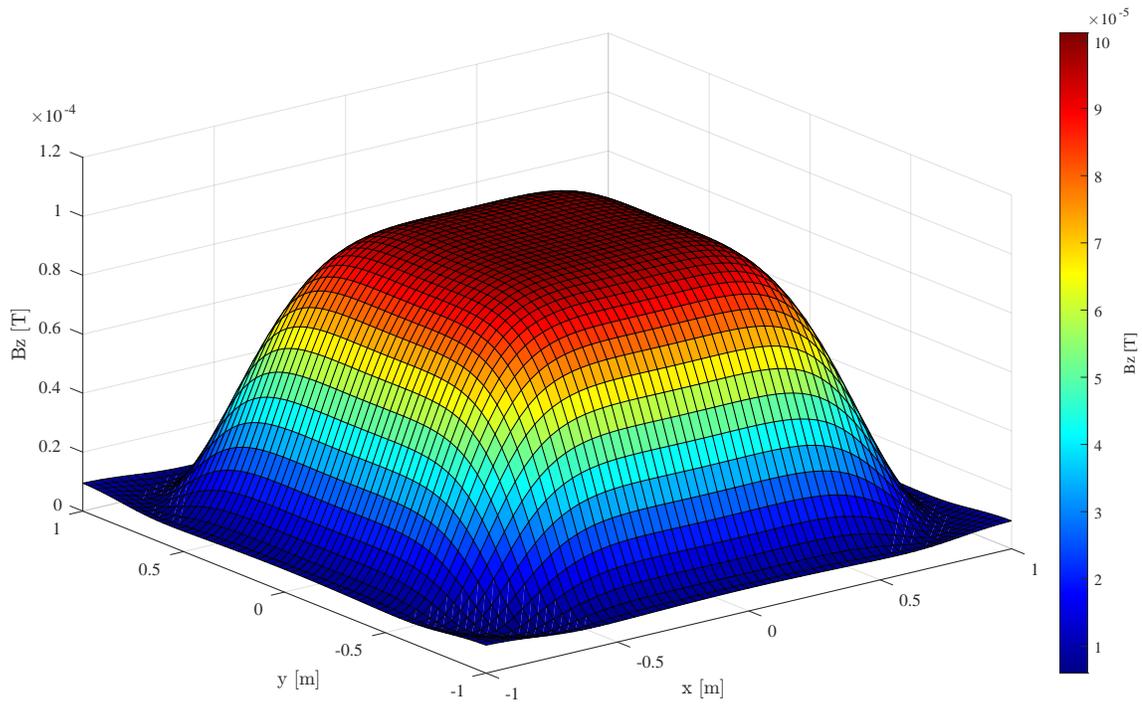
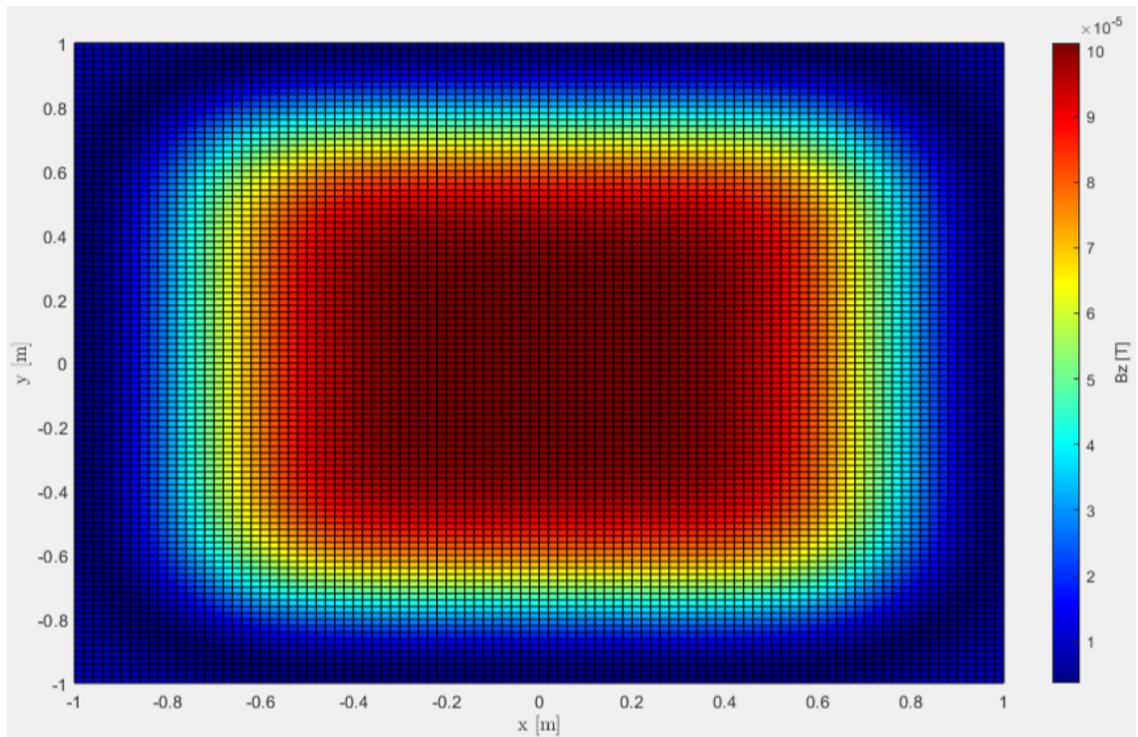


Figura 6.5: Gráfica de campo magnético en el eje z mostrando uniformidad mayor al 99 %.

6.3 Resultados de uniformidad de campo magnético en la jaula Helmholtz



(a) Mapa 3D de campo magnético.



(b) Mapa 2D de campo magnético.

Figura 6.6: Mapa de campo magnético en el eje z del SCMT.

6.4. Resultados del modelado de la estructura mecánica y eléctrica de la jaula Helmholtz

Se realizó el modelo de ingeniería de la jaula Helmholtz (Fig. 6.7), considerando las especificaciones mecánicas y eléctricas mostradas en la Tabla 4.10, el cual permitió tener una visualización realista de la estructura, contemplando los componentes estructurales complementarios (descritos en el capítulo anterior) que aportan a la estructura rigidez y estabilidad, así como su manufactura y ensamblaje total. Además, se incluyó el embobinado y la organización de las conexiones para tener un sistema ordenado para la realización de pruebas del ADCS de nanosatélites.

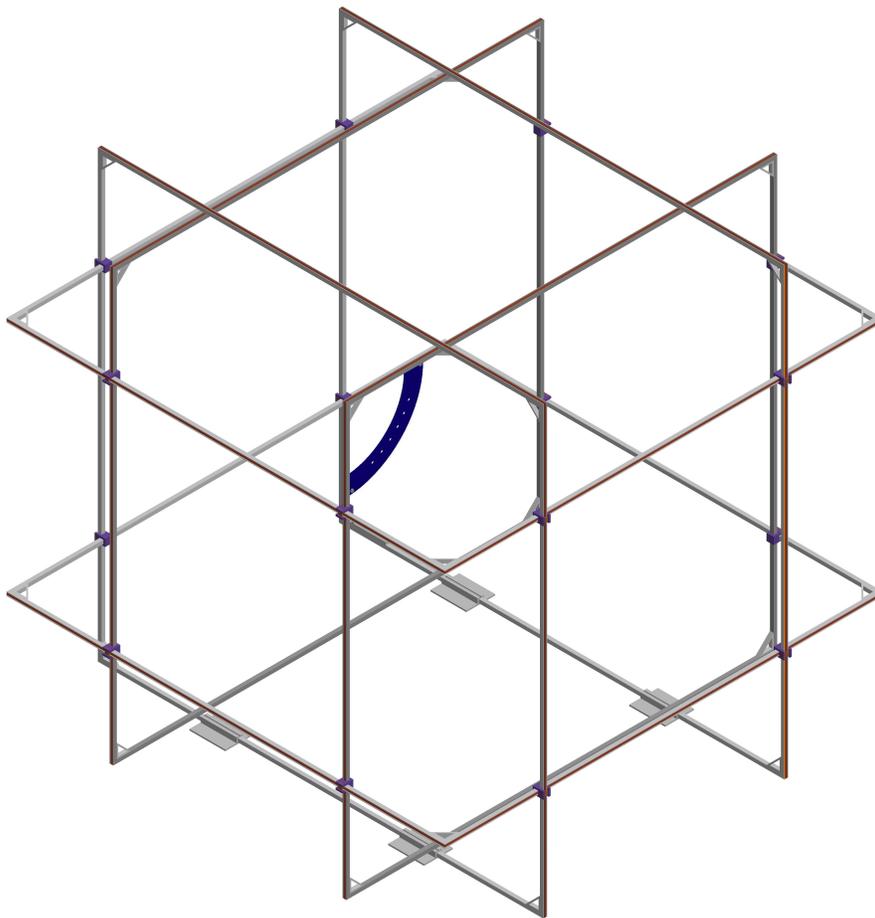


Figura 6.7: Modelado de ingeniería de la jaula Helmholtz.

Conclusiones

El presente proyecto muestra el diseño de un simulador de campo magnético terrestre, desde la interfaz gráfica de usuario hasta el banco de pruebas, conformado por tres bobinas Helmholtz para la generación del campo magnético, con el fin de realizar, principalmente, pruebas de los sistemas de control de orientación de nanosatélites de tamaño máximo de un nanosatélite CubeSat 3U. También es de gran utilidad para la calibración de sensores magnéticos, pruebas de algoritmos de navegación, entre otras utilidades dentro de la investigación.

El diseño del simulador de campo magnético partió de la premisa de la selección de la mejor geometría de la bobina para contener un campo magnético uniforme dentro de un volumen de trabajo, y fue este el primer problema que se presentó, ya que a partir de la investigación realizada en el Estado del Arte, no se encontraron criterios de diseño claros que coincidieran con los de este proyecto, los cuales fundamentaran la elección de la geometría. Por esta razón, se decidió realizar una comparación propia con criterios claros para este proyecto y se concluyó que una geometría cuadrada es mejor que una circular, en cuanto a un mayor volumen de uniformidad de campo magnético, además de una mayor intensidad de campo magnético suministrando la misma corriente eléctrica que en una bobina de geometría circular. Además, con esta geometría se facilita el ensamblaje de cada bobina y de la jaula Helmholtz en su totalidad. Aunado a esto, mediante una simulación de uniformidad empleando bobinas cuadradas, se encontró un mejor factor para determinar la distancia que debe haber entre bobinas.

De la simulación de uniformidad de campo magnético, se obtuvo una uniformidad mayor a la esperada para la región de prueba; por lo tanto, se puede validar la geometría de la bobina seleccionada y el factor de distancia entre bobinas, cumpliendo de esta manera con el objetivo de uniformidad de campo magnético planteado para este proyecto.

El segundo reto que se enfrentó durante la elaboración del proyecto fue operar el magnetómetro seleccionado empleando la tarjeta de desarrollo STM32F446RE proporcionada por el LIESE, debido a un problema con la configuración de registros del primer

7. CONCLUSIONES

módulo adquirido; no obstante, fue posible realizar un programa que permitiera obtener la lectura de las mediciones de campo magnético, además de realizar la propia calibración del sensor usando el software de Matlab en conjunto con el microcontrolador. Los resultados del campo magnético medidos por el sensor fueron satisfactorios considerando la pequeña variación de campo magnético en las componentes debido a la ubicación exacta del laboratorio. En cuanto a la calibración de la jaula Helmholtz, se describió un procedimiento efectivo para la eliminación del campo magnético local; sin embargo, se tiene la restricción de no poder llevarlo a cabo hasta que se construyan las bobinas Helmholtz, así como la interacción de la central de control con el sistema de potencia.

Otro reto fue realizar la GUI, entendiendo el funcionamiento del Satellite Communication Toolbox de MATLAB que hizo posible la propagación y visualización de las órbitas satelitales dentro del simulador de campo magnético terrestre. Sin embargo, gracias a la documentación de Mathworks y al estudio del formato de datos, TLE, se pudo llevar a cabo, de manera satisfactoria, una interfaz muy intuitiva y sencilla de usar, capaz de simular el campo magnético terrestre dados los parámetros orbitales deseados, y de proporcionar los valores de intensidad de corriente y voltaje en cada muestra de tiempo definida, así como gráficas del comportamiento del campo magnético a lo largo de la trayectoria orbital que seguiría el nanosatélite y una visualización de esta trayectoria alrededor de la Tierra.

Finalmente, se realizó una simulación del sistema de electrónica de potencia, la cual verifica la salida de corriente y voltaje para cada valor del campo magnético solicitado.

De este modo, se muestra la validación del diseño de los bloques que constituyen el simulador de campo magnético terrestre para sistemas de control de orientación de nanosatélites de un tamaño máximo del estándar CubeSat 3U, quedando como trabajo a futuro su construcción e integración.

7.1. Trabajo a futuro

A continuación, se presentan proyecciones de trabajo a futuro para la mejora del simulador del campo magnético terrestre y su banco de pruebas, contribuyendo a la apertura de nuevas líneas de investigación.

- Adquirir un instrumento de medición de campo magnético capaz de orientarse con el campo magnético terrestre.
- Realizar una simulación electromagnética completa (integrando la estructura).
- Integrar un controlador PI.
- Adquirir una fuente de alimentación programable compatible con el software de MATLAB.
- Construir el banco de pruebas del SCMT.
- Integrar una mesa de aire al banco de pruebas del SCMT.

Unidades del campo magnético

La intensidad de campo magnético es medida con frecuencia en Gauss (Sistema Cegesimal de Unidades; CGS), que es equivalente a una diezmilésima de Tesla (en el SI). Sin embargo, es común que se usen nanoteslas para representarla.

$$1[G] = 100,000[nT]$$

Unidad de momento magnético en el SI.

$$A \cdot m^2 = \frac{N \cdot m}{T} = \frac{J}{T}$$

B.1. Uniformidad de campo magnético

Código elaborado en el software MATLAB.

```
1 % mf_circular.m
2 % Autora: Sharon Ruby Reyes Cuallo.
3 % Generación de campo magnético por bobinas circulares.
4
5 %%% MAIN DE BOBINA CIRCULAR %%%
6
7 % clc;
8 % clear all;
9 n=100; %Número de separación de puntos en la malla.
10 N=10; %Número de espiras.
11 h=0.5; %Factor de escalamiento gráfico (tamaño del vector).
12 mu0=(4e-7)*pi; %Permeabilidad del vacío.
13 I=1; %Intensidad de corriente.
14 R=0.5; %Radio bobinas.
15 L=2*R*pi; %Perímetro bobinas.
16
```

B. SOFTWARE

```
17 l=0.5; %Parámetro de límite de gráfica
18 z=-1:2*l/n:l;
19 y=-1:2*l/n:l;
20 % x=-1:2*l/n:l;
21
22 length=2*R;
23
24 x=-length:2*length/n:length;
25
26 [x,y,z]=meshgrid(x,x,x);
27
28 v_z=R/2; %Distancia del centro al campo (gráfica).
29
30 [Bx_hc,By_hc,Bz_hc] = mfc_hcoil(N,I,v_z,R,x,y,z);
31 nB_c=sqrt(Bx_hc.^2+By_hc.^2+Bz_hc.^2)*h;
32
33 [Bx,By,Bz] = mfc_cage(N,I,v_z,R,x,y,z);
34 nB=sqrt(Bx.^2+By.^2+Bz.^2)*h;
```

```
1 % mf_square.m
2 % Autora: Sharon Ruby Reyes Cuallo.
3 % Generación de campo magnético por bobinas cuadradas.
4
5 %%% MAIN DE BOBINA CUADRADA %%%
6
7 % clc;
8 % clear all;
9
10 n=100; %Cantidad de puntos a mapear.
```

```

11 N=10; %Número de espiras.
12 mu0=(4e-7)*pi; %Permeabilidad en el vacío.
13 I=1; %Intensidad de corriente.
14 L=1; %Lado de la bobina.
15 d=L/2; %Mitad de un lado de la bobina
16 xc=L/2; %Distancia media en x.
17 dz=d*0.5445; %Distancia media entre bobinas (Distancia desde el origen a una bobina)
18 Lz=L*0.5445; %Distancia entre bobinas.
19
20 length=1; %Longitud de la meshgrid.
21
22 x=-length:2*length/n:length; %Longitud de gráfica completa en x.
23
24 [x,y,z]=meshgrid(x); %Volumen de gráfica.
25
26 %Sqs ---> single
27 %Sqc ---> cage
28 [Bx_sqs,By_sqs,Bz_sqs] = mfsq_hcoil(N,I,L,xc,dz,x,y,z); %Llamado a función bobina.
29 nB_sqs=sqrt(Bx_sqs.^2+By_sqs.^2+Bz_sqs.^2); %Norma del vector de campo.
30
31 [Bx_sqc,By_sqc,Bz_sqc]=mfsq_cage(N,I,L,xc,dz,x,y,z); %Llamado a función jaula.
32 nB_sqc=sqrt(Bx_sqc.^2+By_sqc.^2+Bz_sqc.^2); %Norma del vector de campo.

```

B.2. Funcionamiento de la GUI

Código elaborado en el software MATLAB.
 Se utilizaron los parámetros de ejemplo mostrados en los resultados.

```

1 % TrackSat.m
2 % Autora: Sharon Ruby Reyes Cuallo.

```

B. SOFTWARE

```
3 % Funcionamiento de la GUI.
4
5 %% Satellite Scenario %%
6 startTime = datetime(2024,4,1,0,0,0);
7 stopTime = startTime + minutes(180);
8 sampleTime = 60; %Segundos
9 %fs = 1/sampleTime;
10 sc = satelliteScenario(startTime,stopTime,sampleTime);
11
12 %% Satellite orbit based on TLE %%
13 % Parámetros orbitales%
14 semimayoraxis = earthRadius + 420e3; %Se define altitud.
15 eccentricity = 0; %Tipo de órbita.
16 inclination = 50;
17 RAAN = 245; %Right Ascension of Ascending Node.
18 argofperiapsis = 130; %Argument of Periapsis.
19 trueanomaly = 325;
20
21 sat1 = satellite(sc,semimayoraxis,eccentricity,
22 inclination,RAAN,argofperiapsis,trueanomaly);
23
24 %% Display the orbit %%
25 play(sc)
26
27 %% Getting positions %%
28 pos = states(sat1,['CoordinateFrame','geographic']);
29
30 %% Getting Magnetic Field %%
31 year=decyear(2024,4,1); %Fecha empezando por año en decimal.
```

```
32
33 lat = pos(1,:);
34 lon = pos(2,:);
35 h = pos(3,:);
36
37 for i=1:length(h)
38     [XYZ(:,i),H,D,I,F] = wrldmagm(h(i),lat(i),lon(i),year);
39     %XYZ en [nT].
40     %     pause(0.5);
41 end
42
43 XYZ = XYZ*10.^-9; % Conversión a Tesla.
44
45 %% Getting current I [A] %%
46 N=40;
47 L=1.5;
48 mu_0=(4e-7)*pi;
49
50 x=0;
51 z=0;
52 y=0;
53 d=L/2;
54 xc=L/2; %Distancia media en x.
55 Lz=0.5409; %Factor de distancia entre bobinas.
56 dz=d*Lz;
57
58 a=sqrt((x-xc).^2+(z-dz).^2);
59 c_theta_1=(L/2+y)./sqrt((L/2+y).^2+a.^2);
60 c_theta_2=(L/2-y)./sqrt((L/2-y).^2+a.^2);
```

B. SOFTWARE

```
61
62 B_x = XYZ(1,:);
63 B_y = XYZ(2,:);
64 B_z = XYZ(3,:);
65
66 for i=1:length(XYZ)
67     Ic_x(:,i)=((4*B_x(i)*pi*a)./((c_theta_2+c_theta_1)*N*mu_0))/(4*1.76);
68     Ic_y(:,i)=((4*B_y(i)*pi*a)./((c_theta_2+c_theta_1)*N*mu_0))/(4*1.76);
69     Ic_z(:,i)=((4*B_z(i)*pi*a)./((c_theta_2+c_theta_1)*N*mu_0))/(4*1.76);
70 end
71
72 Ic = [Ic_x;Ic_y;Ic_z];
73
74 %% Getting voltage [V] %%
75 R = 5; % Ohms.
76 L = 14.4*10^-3; Inductacia resultante (L + M)
77
78 dIc_x = diff(Ic_x)/sampleTime;
79 dIc_y = diff(Ic_y)/sampleTime;
80 dIc_z = diff(Ic_z)/sampleTime;
81
82 for i=1:length(Ic_x)-1
83     V_x(i) = R*Ic_x(i)+L*dIc_x(i);
84     V_y(i) = R*Ic_y(i)+L*dIc_y(i);
85     V_z(i) = R*Ic_z(i)+L*dIc_z(i);
86 end
```

B.3. Operación del magnetómetro HMC5883L

Código elaborado en el software STM32CubeIDE.

```
1 //SCMT_MGNT/Core/Src/main.c
2 //Autora: Sharon Ruby Reyes Cuallo
3 //Operación del magnetómetro HMC5883L
4
5 #include "main.h"
6
7 /* Private variables -----*/
8 I2C_HandleTypeDef hi2c2;
9
10 UART_HandleTypeDef huart2;
11
12 /* USER CODE BEGIN PV */
13 HMC5883L_Type mgn;
14 double CHECK;
15 /* USER CODE END PV */
16
17 /* Private function prototypes -----*/
18 void SystemClock_Config(void);
19 static void MX_GPIO_Init(void);
20 static void MX_I2C2_Init(void);
21 static void MX_USART2_UART_Init(void);
22
23 /* Private user code -----*/
24 /* USER CODE BEGIN 0 */
25 void send_data_sensors(double * GAUSS_RESULTS){
```

B. SOFTWARE

```
26
27     char buffer[200]; // Ajusta el tamaño si se necesita más o menos espacio.
28     int length = 0;   // Guarda la longitud actual de la cadena.
29
30     length += snprintf(buffer + length, sizeof(buffer) - length,
31 "%0.3f,%0.3f,%0.3f\r\n", GAUSS_RESULTS[0], GAUSS_RESULTS[1], GAUSS_RESULTS[2]);
32
33     HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t *)buffer, length, HAL_MAX_DELAY);
34
35 }
36 /* USER CODE END 0 */
37
38 int main(void)
39 {
40
41     /* MCU Configuration-----*/
42
43     /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
44     HAL_Init();
45
46     /* Configure the system clock */
47     SystemClock_Config();
48
49     /* Initialize all configured peripherals */
50     MX_GPIO_Init();
51     MX_I2C2_Init();
52     MX_USART2_UART_Init();
53     /* USER CODE BEGIN 2 */
54     HMC5883L_Init(&mgn, hi2c2, HMC5883L_CRA_AVG_MEASURE_1, HMC5883L_CRA_DATA_OUTPUT_RATE_3000,
```

```
55 HMC5883L_CRA_NORMAL_MEASURE_MODE, HMC5883L_CRB_GAIN_CONFIG_1370, HMC5883L_MR_CONTINUO
56 /* USER CODE END 2 */
57
58 /* Infinite loop */
59 /* USER CODE BEGIN WHILE */
60 while (1)
61 {
62     /* USER CODE END WHILE */
63     HMC5883L_Measure_Read(&mgn);
64     send_data_sensors(mgn.MFC);
65     CHECK = sqrt((mgn.MFC[0]*mgn.MFC[0])+(mgn.MFC[1]*mgn.MFC[1])+
66     (mgn.MFC[2]*mgn.MFC[2]));
67 }
68 }
69
70 /**
71  * @brief System Clock Configuration
72  * @retval None
73  */
74
75 void SystemClock_Config(void)
76 {
77     RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
78     RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};
79
80     /** Configure the main internal regulator output voltage
81      */
82     __HAL_RCC_PWR_CLK_ENABLE();
83     __HAL_PWR_VOLTAGESCALING_CONFIG(PWR_REGULATOR_VOLTAGE_SCALE3);
```

B. SOFTWARE

```
84
85  /** Initializes the RCC Oscillators according to the specified parameters
86  * in the RCC_OscInitTypeDef structure.
87  */
88  RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSI;
89  RCC_OscInitStruct.HSISState = RCC_HSI_ON;
90  RCC_OscInitStruct.HSICalibrationValue = RCC_HSICALIBRATION_DEFAULT;
91  RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
92  RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSI;
93  RCC_OscInitStruct.PLL.PLLM = 16;
94  RCC_OscInitStruct.PLL.PLLN = 336;
95  RCC_OscInitStruct.PLL.PLLP = RCC_PLLP_DIV4;
96  RCC_OscInitStruct.PLL.PLLQ = 2;
97  RCC_OscInitStruct.PLL.PLLR = 2;
98  if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
99  {
100     Error_Handler();
101 }
102
103 /** Initializes the CPU, AHB and APB buses clocks
104 */
105 RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK
106                               |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
107 RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
108 RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
109 RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;
110 RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;
111
112 if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2) != HAL_OK)
```

```
113  {
114      Error_Handler();
115  }
116 }
117
118 /**
119  * @brief I2C2 Initialization Function
120  * @param None
121  * @retval None
122  */
123 static void MX_I2C2_Init(void)
124 {
125
126     hi2c2.Instance = I2C2;
127     hi2c2.Init.ClockSpeed = 100000;
128     hi2c2.Init.DutyCycle = I2C_DUTYCYCLE_2;
129     hi2c2.Init.OwnAddress1 = 0;
130     hi2c2.Init.AddressingMode = I2C_ADDRESSINGMODE_7BIT;
131     hi2c2.Init.DualAddressMode = I2C_DUALADDRESS_DISABLE;
132     hi2c2.Init.OwnAddress2 = 0;
133     hi2c2.Init.GeneralCallMode = I2C_GENERALCALL_DISABLE;
134     hi2c2.Init.NoStretchMode = I2C_NOSTRETCH_DISABLE;
135     if (HAL_I2C_Init(&hi2c2) != HAL_OK)
136     {
137         Error_Handler();
138     }
139 }
140
141 /**
```

B. SOFTWARE

```
142  * @brief USART2 Initialization Function
143  * @param None
144  * @retval None
145  */
146  static void MX_USART2_UART_Init(void)
147  {
148
149      huart2.Instance = USART2;
150      huart2.Init.BaudRate = 115200;
151      huart2.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B;
152      huart2.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1;
153      huart2.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
154      huart2.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX;
155      huart2.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
156      huart2.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16;
157      if (HAL_UART_Init(&huart2) != HAL_OK)
158      {
159          Error_Handler();
160      }
161  }
162
163  /**
164   * @brief GPIO Initialization Function
165   * @param None
166   * @retval None
167   */
168  static void MX_GPIO_Init(void)
169  {
170      GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = {0};
```

```
171
172  /* GPIO Ports Clock Enable */
173  __HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
174  __HAL_RCC_GPIOH_CLK_ENABLE();
175  __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
176  __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();
177
178  /*Configure GPIO pin Output Level */
179  HAL_GPIO_WritePin(LD2_GPIO_Port, LD2_Pin, GPIO_PIN_RESET);
180
181  /*Configure GPIO pin : B1_Pin */
182  GPIO_InitStruct.Pin = B1_Pin;
183  GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_IT_FALLING;
184  GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
185  HAL_GPIO_Init(B1_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);
186
187  /*Configure GPIO pin : LD2_Pin */
188  GPIO_InitStruct.Pin = LD2_Pin;
189  GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
190  GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
191  GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
192  HAL_GPIO_Init(LD2_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);
193
194  }
195
196  /**
197   * @brief This function is executed in case of error occurrence.
198   * @retval None
199   */
```

B. SOFTWARE

```
200 void Error_Handler(void)
201 {
202     /* USER CODE BEGIN Error_Handler_Debug */
203     /* User can add his own implementation to report the HAL error return state */
204     __disable_irq();
205     while (1)
206     {
207     }
208     /* USER CODE END Error_Handler_Debug */
209 }
210
211 #ifndef USE_FULL_ASSERT
212 /**
213  * @brief Reports the name of the source file and the source line number
214  *         where the assert_param error has occurred.
215  * @param file: pointer to the source file name
216  * @param line: assert_param error line source number
217  * @retval None
218 */
219 void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
220 {
221     /* USER CODE BEGIN 6 */
222     /* User can add his own implementation to report the file name and line number,
223     ex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file, line) */
224     /* USER CODE END 6 */
225 }
226 #endif /* USE_FULL_ASSERT */
```

B.3.1. Calibración del magnetómetro HMC5883L

Código elaborado en el software MATLAB.

```
1 % Cal_mag.m
2 % Autora: Sharon Ruby Reyes Cuallo.
3 % Calibración de magnetómetro.
4
5 %clear;
6
7 % Configurar el puerto serie
8 port = "COM6"; % Puerto
9 baudRate = 115200; % Velocidad de baudios
10 serialObj = serialport(port, baudRate); % Crear objeto de puerto serie
11
12 % Configurar tiempo de espera (opcional)
13 serialObj.Timeout = 10; % Tiempo de espera en segundos
14
15 % Tiempo total de adquisición de datos
16 duration = 40; % Segundos (ajusta el tiempo necesario)
17 tic; % Iniciar cronómetro
18
19 % Inicializar matrices para almacenar los datos
20 fx_values = [];
21 fy_values = [];
22 fz_values = [];
23
24 while toc < duration
25     if serialObj.NumBytesAvailable > 0 % Número de bytes almacenados.
26         % Leer los datos disponibles en el puerto serie.
```

B. SOFTWARE

```
27     data = readline(serialObj); % Leer una línea de texto
28     disp(data)
29
30     % Dividir los datos por comas
31     values = str2double(strsplit(data, ','));
32
33     % Asignar los valores a las variables correspondientes
34     fx = values(1);
35     fy = values(2);
36     fz = values(3);
37
38     % Guardar los valores en las matrices
39     fx_values = [fx_values, fx];
40     fy_values = [fy_values, fy];
41     fz_values = [fz_values, fz];
42
43     D=[fx_values',fy_values',fz_values'];
44
45     DnT = D*10.^5;
46     [A,b,expmfs] = magcal(D)
47     end
48 end
49
50 % Cerrar el puerto serie
51 clear serialObj;
52
53 % Guardar las variables en un archivo .mat
54 save('datos_sensor.mat', 'fx_values', 'fy_values', 'fz_values');
55
```

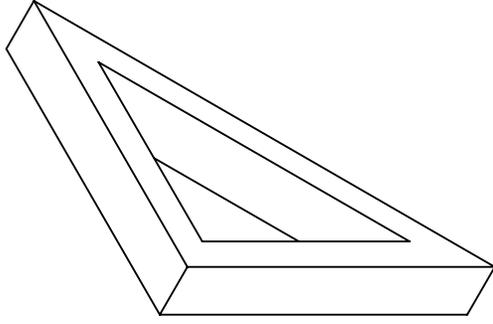
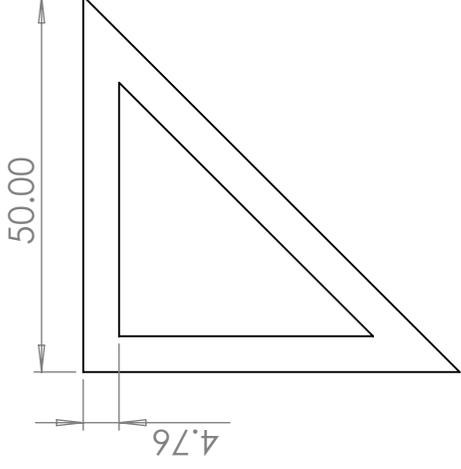
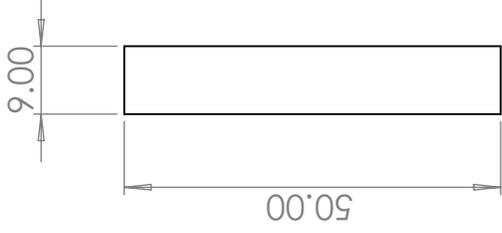
```
56 disp('Datos guardados en archivo .mat correctamente.');
```

Código elaborado en el software STM32CubeIDE.
Integración de matrices obtenidas con MATLAB al programa de operación del magnetómetro.

```
1 double A[3][3] = {{0.9605, 0.0285, 0.0034},  
2 {0.0285, 1.0542, -0.0419}, {0.0034, -0.0419, 0.9902}};  
3 // A es la matriz de escalamiento (mapeo magnético) "Soft-iron"  
4 double B[3] = {0.0944, 0.2420, -0.2608}; // B es la matriz de sesgo  
5 "Hard-iron"
```

Apéndice C

Planos de Ingeniería



DISEÑO: Adrián Fonseca

REVISÓ: Sharon Cuallo

FECHA: Marzo - 2025

**Laboratorio de Instrumentación
Electrónica de Sistemas Espaciales**

Simulador de Campo Magnético Terrestre

Escuadra

TAMAÑO: carta UNIDADES: mm

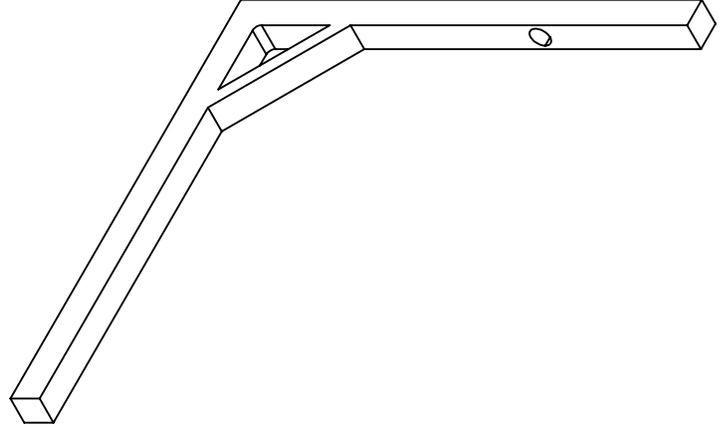
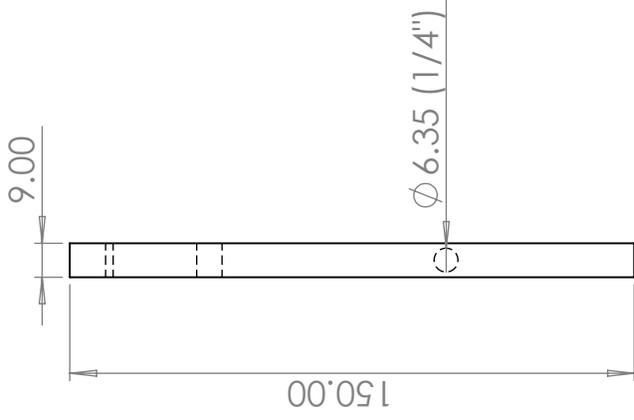
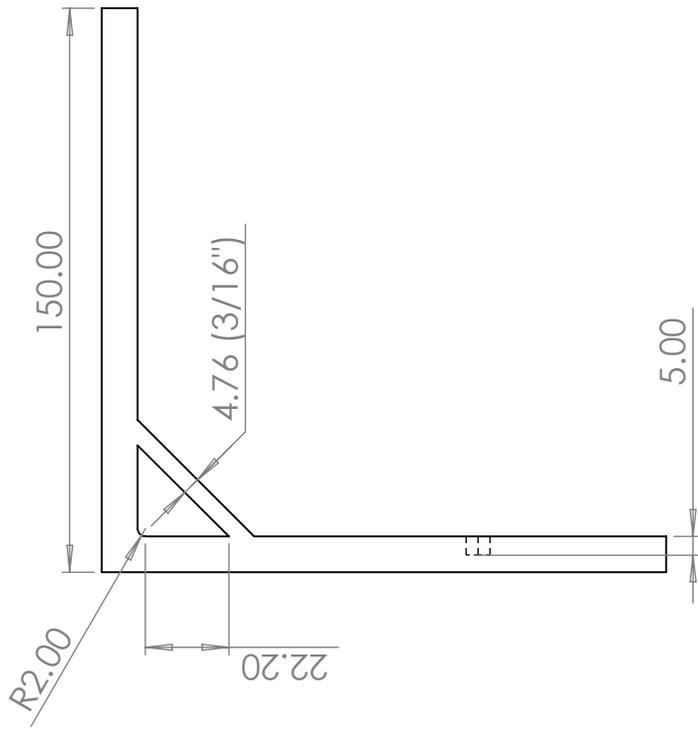
ESCALA: 1:1



MATERIAL:
Aluminio 6061

CANTIDAD:
24

HOJA 1 DE 6



**Laboratorio de Instrumentación
Electrónica de Sistemas Espaciales**

Simulador de Campo Magnético Terrestre

DISEÑO: Adrián Fonseca

REVISÓ: Sharon Cuallo

FECHA: Marzo - 2025

TAMAÑO: carta

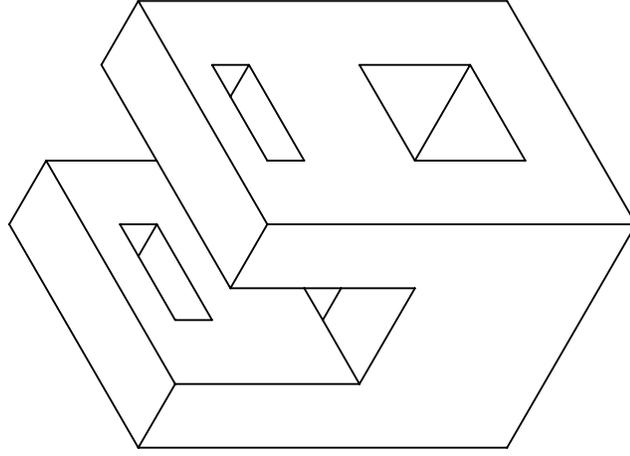
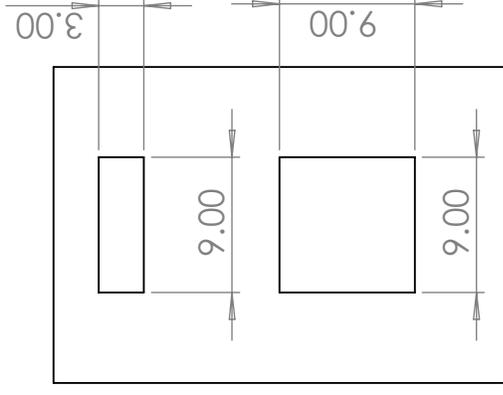
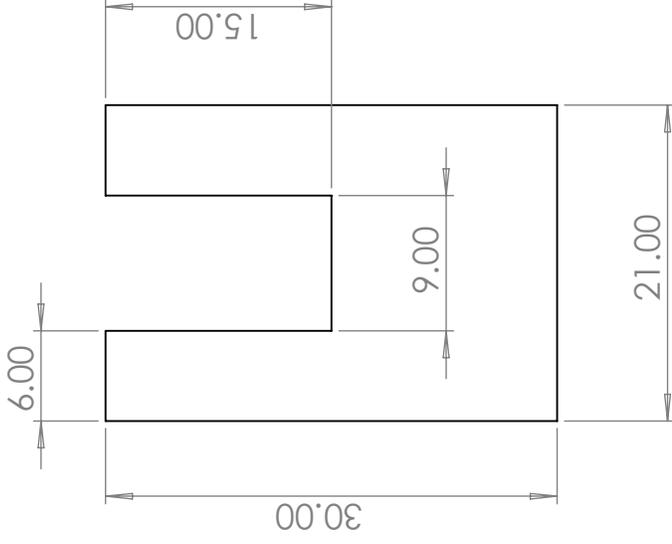
UNIDADES: mm

ESCALA: 1:2

MATERIAL:
Aluminio 6061

CANTIDAD:
2

HOJA 2 DE 6



**Laboratorio de Instrumentación
Electrónica de Sistemas Espaciales**

Simulador de Campo Magnético Terrestre

DISEÑO: Adrián Fonseca

REVISÓ: Sharon Cuallo

FECHA: Marzo - 2025

TAMAÑO: carta

UNIDADES: mm

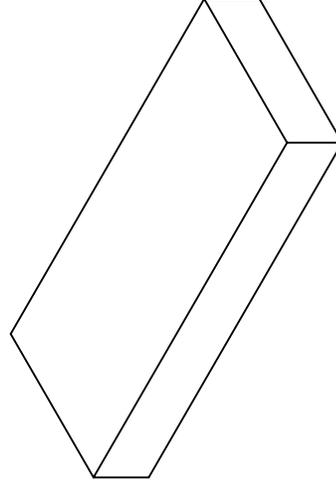
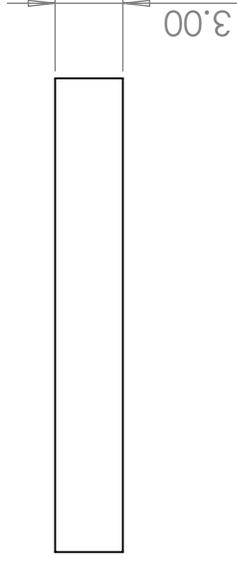
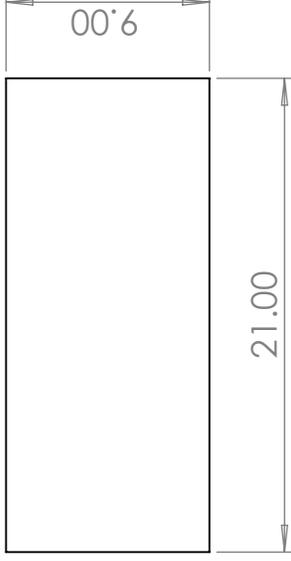
ESCALA: 2:1



MATERIAL:
PETG

CANTIDAD:
16

HOJA 3 DE 6



DISEÑO: Adrián Fonseca

REVISÓ: Sharon Cuallo

FECHA: Marzo - 2025

**Laboratorio de Instrumentación
Electrónica de Sistemas Espaciales**

Simulador de Campo Magnético Terrestre

Tapa de abrazadera

TAMAÑO: carta UNIDADES: mm

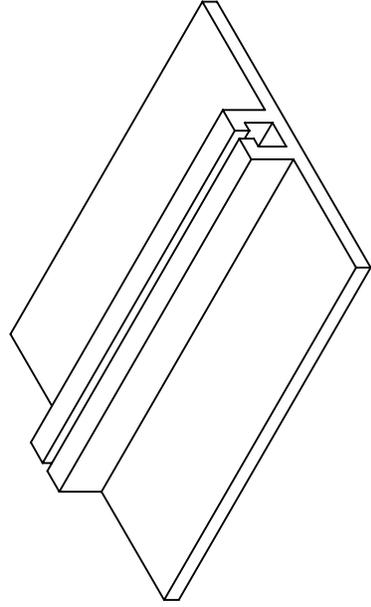
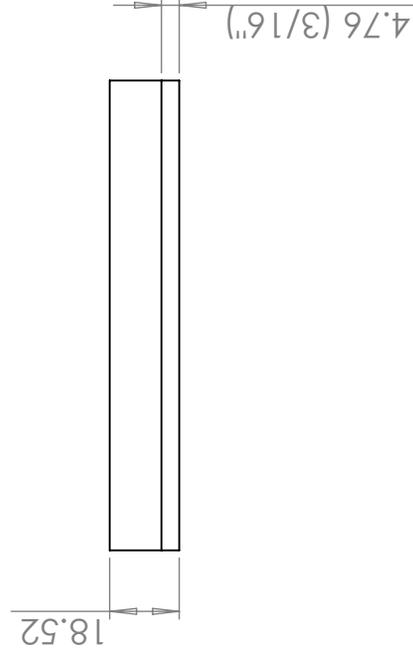
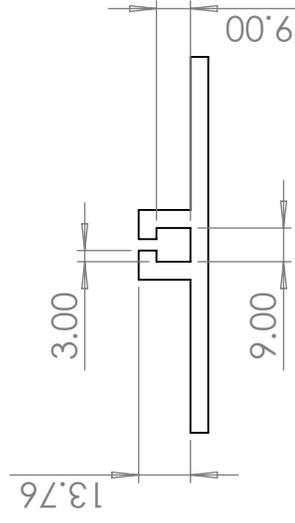
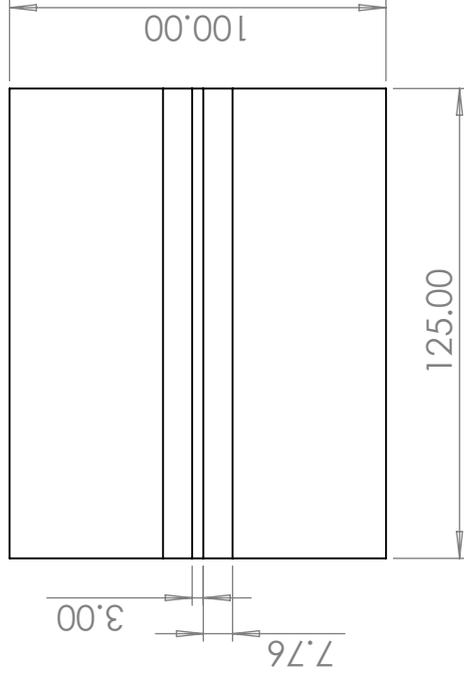
ESCALA: 3:1



MATERIAL:
PETG

CANTIDAD:
16

HOJA 4 DE 6



DISEÑO: Adrián Fonseca

REVISÓ: Sharon Cuallo

FECHA: Marzo - 2025

**Laboratorio de Instrumentación
Electrónica de Sistemas Espaciales**

Simulador de Campo Magnético Terrestre

Base de bobinas

TAMAÑO: carta UNIDADES: mm

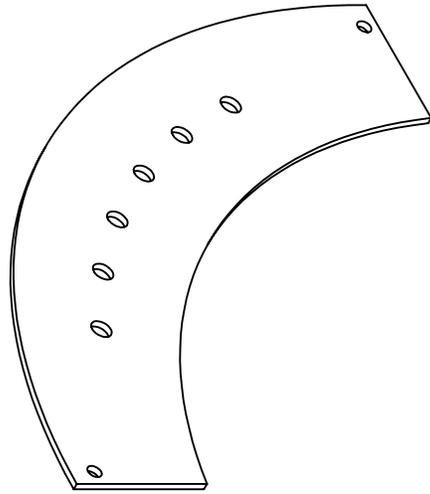
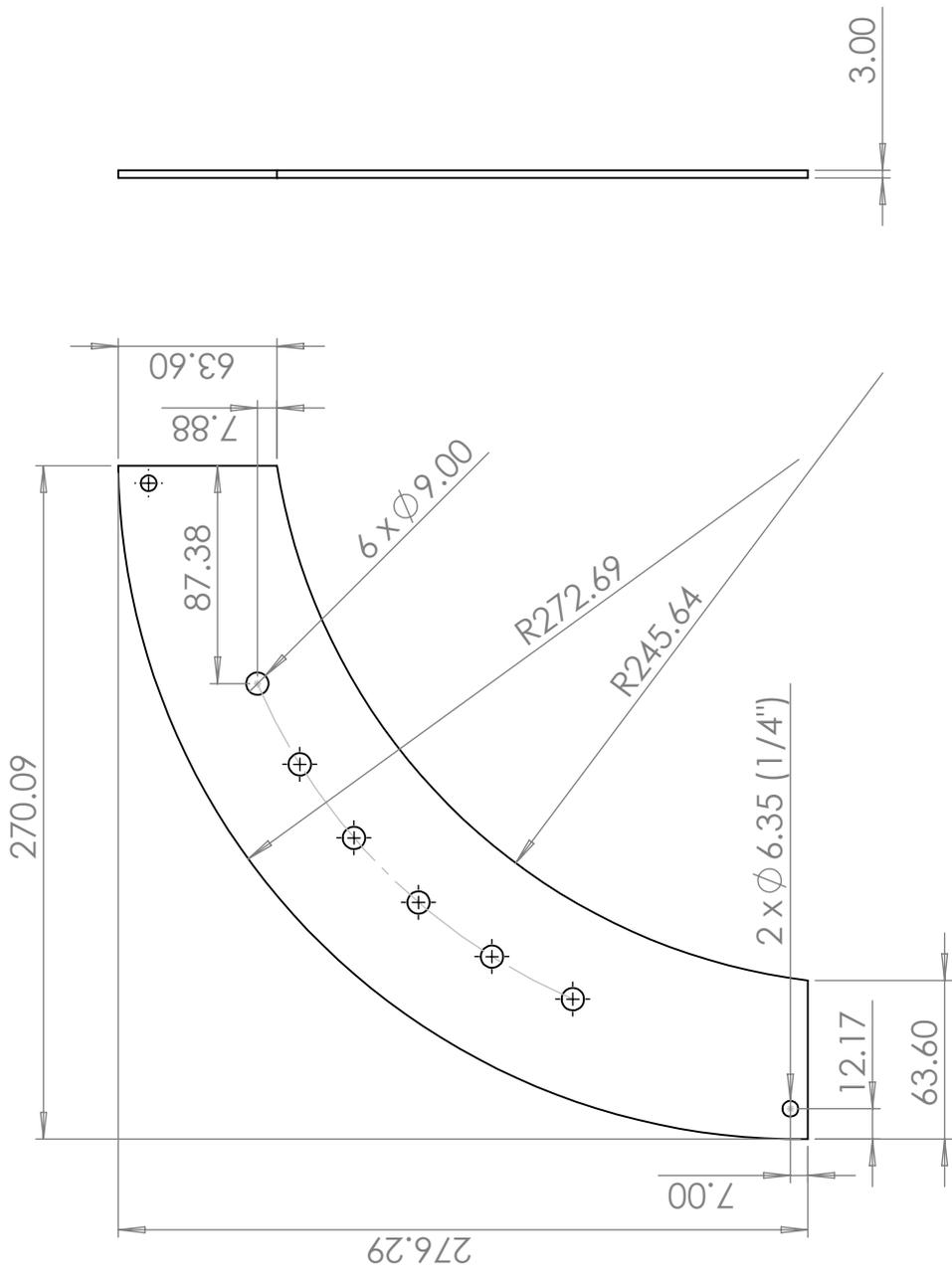
ESCALA: 1:2



MATERIAL:
Aluminio 6061

CANTIDAD:
4

HOJA 5 DE 6



NOTA: Los seis barrenos de 9 mm se encuentran a la mitad del ancho de la placa y son equidistantes.



**Laboratorio de Instrumentación
Electrónica de Sistemas Espaciales**

Simulador de Campo Magnético Terrestre

DISEÑO: Adrián Fonseca

REVISÓ: Sharon Cuallo

FECHA: Marzo - 2025

TAMAÑO: carta UNIDADES: mm

ESCALA: 1:3

HOJA 6 DE 6



MATERIAL:
PETG

CANTIDAD:
1

Bibliografía

- [1] The CubeSat Program. *CubeSat Design Specification (1U-12U)*, 7 2020. Rev. 14. [3](#), [28](#), [73](#)
- [2] DAVID F. EVERETT Y JEFFERY J. PUSCHELL JAMES R. WERTZ. *Space Mission Engineering: The New SMAD*. Microcosm Press, Hawthorne, CA. USA, 2011.
- [3] National Centers for Environmental Information (U.S.); British Geological Survey. [State of the geomagnetic field 2022](#), Dec 2022.
- [4] GABRIEL A. JARAMILLO MORALES Y ALFONSO A. ALVARADO CASTELLANOS. *Electricidad y Magnetismo*. Trillas, Ciudad de México, México, 2016.
- [5] G. D. PARBROOK P. D. DAVIS AND G. N. C. KENNY. *Basic Physics and Measurement in Anaesthesia*. Butterworth-Heinemann, London. Great Britain, 1995.
- [6] DANIEL STRUFALDI BATISTA, FRANCISCO GRANZIERA, MARCELO CARVALHO TOSIN, AND LEONIMER FLÁVIO DE MELO. **Three-Axial Helmholtz Coil Design and Validation for Aerospace Applications**. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **54**(1):392–403, 2018.
- [7] MARCOS A. BRITO AND SANTIAGO A. RODRIGUEZ GONZALEZ. **Simulación en tiempo real del campo magnético terrestre para una misión orbital**. *2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, pages 322–327, 2014.
- [8] RODRIGO CARDOSO DA SILVA, IGOR SEIITI KINOSHITA ISHIOKA, CHANTAL CAPPELLETTI, SIMONE BATTISTINI, AND RENATO ALVES BORGES. **Helmholtz Cage Design and Validation for Nanosatellites HWIL Testing**. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **55**(6):3050–3061, 2019.
- [9] DAVID J. GRIFFITHS. *Introduction to electrodynamics*. Pearson, Glenview, IL. USA, 2013.

BIBLIOGRAFÍA

- [10] JORGE GARCÍA-FARIETA AND ALEJANDRO HURTADO. **Exploring the magnetic field of Helmholtz and Maxwell coils: a computer-based approach exploiting the superposition principle.** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **42**, 10 2020.
- [11] RONALD HURTADO-VELASCO AND JESUS GONZALEZ-LLORENTE. **Simulation of the magnetic field generated by square shape Helmholtz coils.** *Applied Mathematical Modelling*, **40**(23):9835–9847, 2016.
- [12] PAVÓN-CARRASCO FJ AND DE SANTIS A. **The South Atlantic Anomaly: The Key for a Possible Geomagnetic Reversal.** *Frontiers in Earth Science*, **4:40**, 04 2016.
- [13] CIARÁN BEGGAN. **On the move.** *GEOscientist. The magazine of the Geological Society of London*, 2025.
- [14] National Centers for Environmental Information, NOAA. *The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025: Technical Report*, 2020.
- [15] BYJU'S. **What Causes Earth's Magnetism?**, 2020.
- [16] JORGE DE ARRIBA BODELÓN. **Diseño y construcción de un magnetómetro para la obtención de las variaciones rápidas de la declinación magnética**, 2009.
- [17] M. BARATI M. NAVABI. **Mathematical modeling and simulation of the earth's magnetic field: A comparative study of the models on the spacecraft attitude control application.** *Applied Mathematical Modelling*, **46**:365 – 381, 06 2017.
- [18] GUILLERMO OCAÑA ANAYA. *Diseño de un sistema de ruedas de reacción piramidal para el control de orientación de nanosatélites bajo el estándar CubeSat*. UNAM, Ciudad de México, 2022.
- [19] NASA. **Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)**, 2014.
- [20] ERIK KULU. **Nanosats Database**.
- [21] HOWARD D. CURTIS. *Orbital Mechanics for Engineering Students*. Butterworth-Heinemann, Oxford. UK, 2012.
- [22] CELESTRAK. **NORAD Two-Line Element Set Format**.

- [23] THE STANFORD STUDENT SPACE INITIATIVE. **Attitude Determination and Control (ADCS)**, 2016.
- [24] IVASE JIGHJIGH TERSOO LU YE, FARHAT ASSAAD T AND SNAPP ALAN THOMAS. **Attitude Determination and Control System for CubeSat**, 2013.
- [25] MICHAEL DUMKE STEPHAN THEIL TAKAHIRO KATO, ANSGAR HEIDECKER. **Three-Axis Disturbance-Free Attitude Control Experiment Platform : FACE**. *Aerospace Technology Japan.*, 2013.
- [26] DLR INSTITUTE OF SPACE SYSTEMS. **FACE – Facility for Attitude Control Experiments**, 2013.
- [27] JOÃO VICTOR LOPES DE LOIOLA, LETÍCIA CÂMARA VAN DER PLOEG, RODRIGO CARDOSO DA SILVA, FERNANDO CARDOSO GUIMARÃES, RENATO ALVES BORGES, GEOVANY ARAÚJO BORGES, SIMONE BATTISTINI, AND CHANTAL CAPPELLETTI. **3 Axis simulator of the Earth magnetic field**. pages 1–8, 2018.
- [28] RODRIGO CARDOSO DA SILVA, FERNANDO GUIMARÃES, JOÃO LOIOLA, RENATO BORGES, SIMONE BATTISTINI, AND CHANTAL CAPPELLETTI. **Tabletop Testbed for Attitude Determination and Control of Nanosatellites**. *Journal of Aerospace Engineering*, **32**, 06 2018.
- [29] IGOR SEITI, SIMONE BATTISTINI, CHANTAL CAPPELLETTI, AND RENATO BORGES. **Design and Development of an Active Magnetic Actuator for Attitude Control System of Nanosatellites**. 12 2017.
- [30] Honeywell. *Smart Digital Magnetometer HMR2300*, 2 2016.
- [31] J USCATEGUI AND W XINSHENG. **Magnetic Simulator Testbed for APSCO Student Small Satellite Project**. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **685**(1):012004, nov 2019.
- [32] FABRIZIO PIERGENTILI, GIAN PAOLO CANDINI, AND MARCO ZANNONI. **Design, Manufacturing, and Test of a Real-Time, Three-Axis Magnetic Field Simulator**. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **47**(2):1369–1379, 2011.
- [33] RAMSSEL LENDÍNEZ EXTREMERA. **Simulador de campo magnético terrestre**, 2017.

BIBLIOGRAFÍA

- [34] KARL T. ULRICH Y STEVEN D. EPPINGER. *Diseño y desarrollo de productos*. Mc Graw Hill, Ciudad de México, México, 2012.
- [35] NOAA. [Magnetic Field Calculators](#), 2023.
- [36] ANDRES RESTREPO, EDINSON FRANCO, AND CARLOS PINEDO. **Metodología de diseño e implementación de un sistema para generación de campos magnéticos uniformes con bobinas Helmholtz cuadrada tri-axial**. *Información tecnológica*, **25**:3–14, 04 2014.
- [37] NASA Glenn Research Center. *Strategic Center for Networking, Integration, and Communications Orbit Propagation Front-End Software Development*, Nov 2018.
- [38] infineon Technologies. *BTS 7960 High Current PN Half Bridge NovalithIC*, Dec 2004.
- [39] Honeywell. *3-Axis Digital Compass IC HMC5883L*, Oct 2010.
- [40] Keysight Technologies. *EDU36311A Triple Output Bench Power Supply*, Aug 2021.