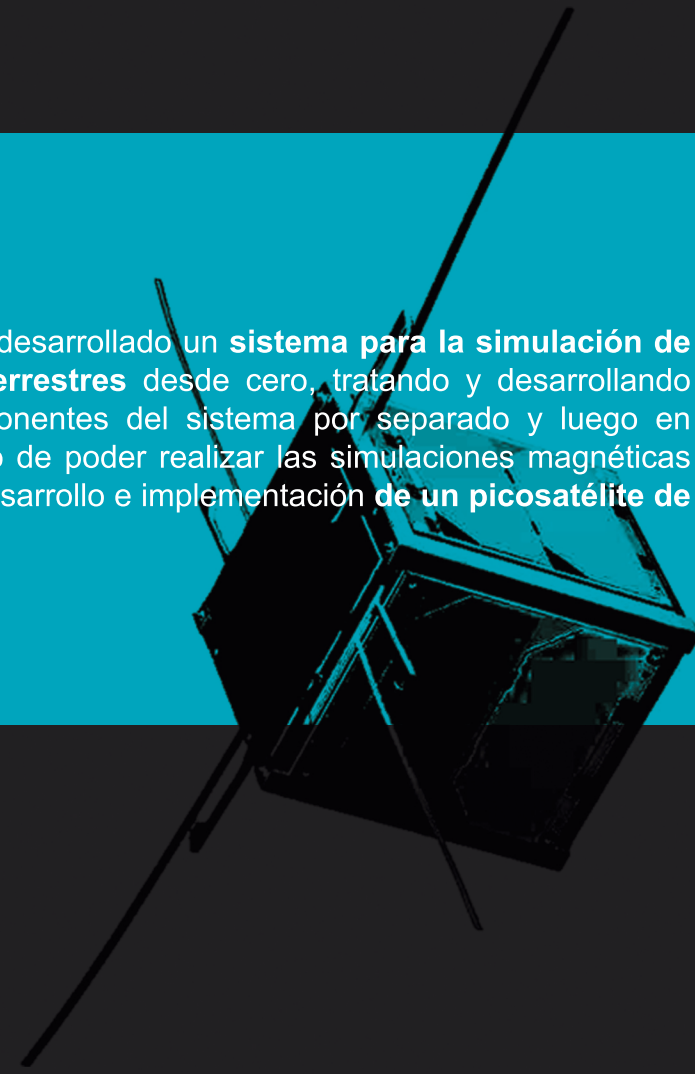


En este proyecto se ha desarrollado un **sistema para la simulación de campos magnéticos terrestres** desde cero, tratando y desarrollando cada uno de los componentes del sistema por separado y luego en conjunto, con el objetivo de poder realizar las simulaciones magnéticas necesarias durante el desarrollo e implementación de un **picosatélite de tipo CubeSat**.



Andrés María Roldán Aranda es el profesor ingeniero a cargo del presente proyecto, así como el tutor del alumno. Actualmente es profesor del departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada.



Ramssel Lendínez Extremera nació en Valdepeñas de Jaén, España, en Julio de 1989. Con este trabajo finaliza la licenciatura en Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Granada. Actualmente, se encuentra trabajando en el departamento de sistemas en una empresa alimentaria líder en su sector.

Proyecto realizado para la **Universidad de Granada**, 2016 / 2017

Simulador de Campo Magnético Terrestre

PROYECTO FIN
DE CARRERA

ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

Ramssel Lendínez Extremera
2016 / 2017



UGR

Universidad
de Granada



ESTUDIOS DE INGENIERÍA
DE TELECOMUNICACIÓN
PROYECTO FIN DE CARRERA

“Simulador de Campo Magnético Terrestre”

CURSO: 2016/2017

Ramssel Lendínez Extremera



ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

“Simulador de Campo Magnético Terrestre”

REALIZADO POR:

Ramssel Lendínez Extremera

DIRIGIDO POR:

Andrés María Roldán Aranda

DEPARTAMENTO:

Electrónica y Tecnología de los Computadores

El tribunal constituido para la evaluación del proyecto PFC titulado:

***“Simulador de Campo Magnético
Terrestre”***

Realizado por el alumno: Ramssel Lendínez Extremera

Y dirigido por el tutor: Andrés María Roldán Aranda

Ha resuelto asignarle la calificación de:

SOBRESALIENTE (9 - 10 puntos)

NOTABLE (7 - 8.9 puntos)

APROBADO (5 - 6.9 puntos)

SUSPENSO

Con la nota¹: puntos.

El Presidente:

El Secretario:

El Vocal:

Granada, a ____ de Septiembre de 2017

¹ Solamente con un decimal.

D. Andrés María Roldán Aranda, Profesor del departamento de Electrónica y Tecnología de los Computadores de la Universidad de Granada, como director del Proyecto Fin de Carrera de D. Ramssel Lendínez Extremera,

Informa:

que el presente trabajo, titulado:

“Simulador de Campo Magnético Terrestre”

ha sido realizado y redactado por el mencionado alumno bajo nuestra dirección, y con esta fecha autorizo a su presentación.

Granada, a ____ de Septiembre de 2017

Fdo.

Los abajo firmantes autorizan a que la presente copia de Proyecto Fin de Carrera se ubique en la Biblioteca del Centro y/o departamento para ser libremente consultada por las personas que lo deseen.

Granada, a ____ de Septiembre de 2017

Fdo.

Simulador de Campo Magnético Terrestre

Ramssel Lendínez Extremera

PALABRAS CLAVE:

Generador campos, electromagnético, control posición, CubeSat, LSM303DLHC, HCM5883L, sensor magnético, GranaSat, MATLAB, Arduino, Gausímetro, magnetorquer, 3D, actitud, bobinas de Helmholtz, Altium, PCB, análisis, IGRF, GUI, interfaz, GranaSat Tracker, seguimiento, ADCS.

RESUMEN:

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de un simulador de pruebas electromagnéticas para el sistema de orientación ([ADCS](#)), de un pico-satélite tipo implementado con actuadores de carácter magnético. Los temas tratados han sido el desarrollo y fabricación de un generador de campos electromagnéticos en los tres ejes, el desarrollo de un software de control para el generador de campos mediante el [GUI](#) de Matlab, así como distintos escenarios de simulación con la plataforma Arduino para controlar una serie de sensores y la caracterización de un magnetorquer excitado por una fuente de corriente. Finalmente, se hace un primer diseño de una [PCB](#) con el sensor magnético junto a un giroscopio para ser integrada en el [CubeSat](#) y poder controlar el posicionamiento del pico-satélite.

Dedicado a

Mis padres, Amador y Paqui. Sin ellos nada de esto hubiera sido posible. Y a mi pareja, Laura, que me ha aguantado en mis buenos y malos momentos durante la realización de este proyecto.

Agradecimientos:

Cuando uno llega a este punto, mira hacia atrás y ve aquél chaval de tan solo 18 años que empieza una nueva etapa en su vida, cargado de ilusiones y ganas. Pues bien, esa etapa, culmina y llega a su fin con la elaboración de este proyecto, teniendo las mismas ilusiones o más que cuando se empezó, pero esta vez para comenzar la siguiente etapa.

Llegados a este punto, no se puede evitar mirar atrás y ver todo el camino, todo el esfuerzo, todos los buenos y malos momentos. Pero, sobre todo, toda esa gente que se ha ido conociendo por ese camino, todos esos amigos que te deja la carrera. Algunos, más cercanos que otros, pero de todos se ha podido aprender algo. Por eso, quiero agradecer a todos estos compañeros y amigos, porque gracias a su gratitud y ayuda, todo esto ha sido posible. Todos esos profesores, que, aunque a veces he podido tener mis discrepancias con algunos, todo lo vivido, sufrido y aprendido me han hecho no solo llegar a ser Ingeniero, sino formarme como persona. Si nos lo han puesto difícil, es por hacernos ver que no hay que darse por vencidos. Y por todo ello, también hay que agradecer a todos ellos el llegar hoy aquí.

A la Universidad de Granada en sí, al igual de la ciudad de Granada, porque me han dado la oportunidad de disfrutar de esta aventura. Sobre todo, lo que más tengo que agradecer a la Universidad, además de mi formación, es el año que pude disfrutar en Bélgica de Erasmus, porque a partir de ese año, me pude convertir en una persona más extrovertida e independiente. Y me hizo disfrutar de una de las mejores experiencias de mi vida.

A mi tutor, Andrés Roldán, que aunque a veces he llegado a la desesperación hasta tal punto de llegar a pensar hasta cambiarme de proyecto, hoy en día tengo que darle las gracias, porque gracias a su exigencia, he podido aprender muchísimo y formarme un poco más a

nivel profesional. Ya no solo en conocimiento, sino en valores y aptitudes como la constancia, esfuerzo y el trabajo en equipo.

En lo personal, a mi familia (mis hermanas Melany y Paqui, y mis padres Amador y Paqui). Porque ellos han sido los más afectados por mi estado de ánimo en los estudios, y han sido los que nunca se han apartado de mi lado. Siempre dando su apoyo incondicional, y siempre ayudando en todo lo que he necesitado. Sin ellos, todo hubiera sido más difícil e igual no hubiera llegado a este punto. Desde que empecé a estudiar, siempre me han tratado de educar lo mejor posible, siempre me han intentado guiar por la vida para no "malearme", y siempre han buscado que yo pudiera llegar a vivir de una manera distinta a ellos, sin tener que estar tirado en Francia, cogiendo a todas horas la maleta, para ir a trabajar en el campo. Ellos han hecho de mi lo que hoy en día soy, y gracias a ellos, puedo decir que hasta hoy día, no me ha faltado el trabajo (ya sea de camarero, en el campo, o en mi actual trabajo). Todo lo que soy, y todo lo que pueden ver en mí a la hora de conseguir un contrato, es sin duda gracias a los valores y aptitudes conseguidas de la educación de mis padres.

Finalmente, a una persona muy especial, que aunque no ha podido estar todo este camino a mi lado, ha llegado en el mejor momento. En el momento en que ya te conviertes en una persona medio responsable que sabe lo que quiere. Ese momento, en el que estas a punto de acabar tu etapa de estudiante para empezar la de formar tu propia familia y empezar a vivir tu vida. El momento en el que asientas un poco la cabeza y empiezas a pensar en el largo camino que aun queda de seguir aprendiendo, en el camino más largo, el camino "más duro", un camino que no se ve claro, pero el que afrontaré sin miedo, porque se que tengo a la mejor compañera de viaje a mi lado. Por ello, estos agradecimientos no podían acabar sin mencionar a mi pareja, Laura, una persona que me ha dado mi época universitaria, para ayudarme a seguir con la siguiente etapa.

Gracias a todos, porque ya no se trata solo de conocimiento, se trata de amistades, experiencias,... se trata de una etapa inolvidable de la que formáis parte.

ÍNDICE

Portada	i
Autorización Lectura	vii
Autorización Depósito Biblioteca	ix
Resumen	xi
Dedicatoria	xiii
Agradecimientos	xv
Índice	xvii
Índice de Figuras	xxi
Índice de Tablas	xxv
0 Motivación	1

1	Introducción	3
1.1	Origen del proyecto	3
1.1.1	Características del Sistema de Control y Determinación de la Actitud (ADCS) en CubeSat	4
1.1.2	Objetivos del proyecto	5
1.2	Descripción de Capítulos	5
2	Requisitos del Sistema	7
2.1	Requisitos	7
2.1.1	Requisitos <i>Hardware</i>	7
2.1.2	Requisitos <i>Software</i>	8
3	Análisis del Sistema	9
3.1	Introducción	9
3.2	Simulación del campo magnético terrestre	9
3.2.1	Análisis del problema	10
3.3	Solución	14
3.3.1	Posibles soluciones	14
3.3.2	Elección final	16
4	Diseño del Sistema	19
4.1	Implementación Hardware	19
4.1.1	Fuente de alimentación Agilent N6705A [2]	21
4.1.2	Puente-H: STL298 [14]	23
4.1.3	Gaussímetro Hirst GM08 [11]	24
4.1.4	Magnetómetro LSM303DLHC con Arduino Mega2560 [21]	24
4.1.5	Bobinas de Helmholtz [9][3]	25
5	Fabricación e Implementación	31
5.1	Fabricación e implementación <i>Hardware</i>	31

5.1.1	Fabricación de las bobinas de Helmholtz [9]	32
5.1.1.1	Cálculos teóricos	32
5.1.1.2	Proceso de fabricación y montaje	35
5.1.2	Modificación del puente en H	39
5.1.3	Arduino y sensores	42
5.2	Implementación <i>Software</i>	43
5.2.1	Arduino	43
5.2.2	Programa de control en Matlab	44
5.2.2.1	Coils Simulator	44
5.2.2.2	Magnetorquer Simulator	58
5.3	Sistema final	64
6	Pruebas y Test Funcionales	65
6.1	Caracterización y calibración de las bobinas de Helmholtz	65
6.1.1	Caracterización	65
6.1.2	Calibración	68
6.1.3	Arduino: Test	72
6.1.4	Matlab: test y simulación	74
6.1.4.1	Coils Simulator	75
6.1.4.2	Magnetorquer Simulator	78
7	Líneas Futuras	81
	Apéndices	85
A	Estudio de mercado: Sensores magnéticos para CubeSat	85
B	Protoboard de testeo	89
C	Fichero con la configuración de los instrumentos, <i>saved_devices_addresses</i>	95

D Pieza para sujeción y unión de las bobinas de Helmholtz	99
E Primer diseño PCB con sensor magnético y giróscopo	101
Glosario	103
Acrónimos	105
Bibliografía	107

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	CP8 (IPEX) CubeSat [18]	3
1.2	CubeSat 3U [7]	4
3.1	Vector del Campo Magnético Terrestre	10
3.2	Polos magnéticos [19]	11
3.3	Esquema de los polos magnéticos y geográficos terrestre [16]	11
3.4	Mapa del campo magnético terrestre [17]	12
3.5	Diagrama de las diferentes regiones de altura que definen el tipo de órbita: 1- La Tierra, 2- Zona de órbita terrestre baja (LEO), 3- Zona de órbitas medias, 4- Órbita geoestacionaria [28]	13
3.6	Bobinas de Helmholtz 1D	14
4.1	Esquema del sistema y conexión entre dispositivos	20
4.2	Agilent N6705A	22
4.3	Puente-H [14]	23
4.4	Gaussímetro Hirst GM08	24
4.5	LSM303DLHC	25

4.6	Configuración de bobinas de Helmholtz cuadradas [3]	26
4.7	Sistema de bobinas de Helmholtz cuadradas	28
5.1	Perfil de aluminio (mm)	32
5.2	Montaje de estructura para bobinas de Helmholtz cuadradas	36
5.3	Bobinado	36
5.4	Resultado final	36
5.5	Unión de las bobinas de Helmholtz	38
5.6	Pieza de conexión para las bobinas de Helmholtz	39
5.7	Puente-H para un eje	39
5.8	Diagrama de bloques STL298	40
5.9	Puentes-H mejorados	40
5.10	Dispositivo Puentes-H	41
5.11	Caja contenedora Puentes-H	41
5.12	Conjunto de sensores del sistema	42
5.13	Esquemático de la conexión de los sensores con Arduino	43
5.14	Ubicación de archivos	45
5.15	Coils simulator: Diagrama de flujo general	46
5.16	Pantalla de configuración de instrumentos	47
5.17	Coils Simulator: Pantalla principal	47
5.18	Parámetros de configuración para eje X	48
5.19	Checkbox de simulación para eje X con tooltip	48
5.20	Tiempo entre muestras	48
5.21	Incremento de corriente	49
5.22	Corriente inicial y corriente final	49
5.23	Corrientes durante la simulación	50
5.24	Configuración del magnetómetro	50
5.25	Nivelado mediante aceleración de la gravedad	51

5.26	Sección para campos magnéticos medidos por LSM303DLHC	51
5.27	Sección para medidas tomadas en barómetro BMP180	51
5.28	Menús disponibles	51
5.29	Ejemplo de simulación cargada (<i>Load</i>)	52
5.30	Coils simulator: Créditos	52
5.31	Coils simulator: Botón Stop	53
5.32	Coils simulator: Botón "Zero"	53
5.33	Diagrama de flujo para pulsador "Zero"	54
5.34	Coils simulator: Botón "Start"	55
5.35	Diagrama de flujo para pulsador "Start"	56
5.36	Ubicación de archivos	58
5.37	Magnetorquer simulator: Diagrama de flujo general	59
5.38	Magnetorquer simulator: pantalla principal	59
5.39	Control de la simulación para el magnetorquer	60
5.40	Paneles de medidas tomadas por el magnetómetro y barómetro	61
5.41	Magnetorquer Simulator: zona de botones	61
5.42	Magnetorquer Simulator: diagrama de flujo al comenzar una simulación ("Start")	62
5.43	Sistema final implementado	64
6.1	Caracterización de bobinas de Helmholtz	66
6.2	Caracterización eje X	67
6.3	Caracterización eje Y	67
6.4	Caracterización eje Z	67
6.5	Calibración eje X	68
6.6	Calibración eje Y	69
6.7	Calibración eje Z	69
6.8	Calibración ejes X, Y y Z sin anular el campo magnético terrestre	71
6.9	Calibración ejes X, Y y Z anulando el campo magnético terrestre	71

6.10	Menú Arduino	72
6.11	Datos calibración + autocalibración	72
6.12	Detalles de sensores HMC5883L + LSM303DLHC	73
6.13	Medidas sensores HMC5883L + LSM303DLHC	73
6.14	Medidas BMP180	74
6.15	Coils Simulator: 'Zero'	75
6.16	Coils Simulator: calibración eje X	76
6.17	Coils Simulator: calibración eje Y	76
6.18	Coils Simulator: calibración eje Z	77
6.19	Coils Simulator: Simulación completa	77
6.20	Magnetorquer	78
6.21	Magnetorquer Simulator: Sistema para la simulación	78
6.22	Magnetorquer Simulator: 'Zero'	79
6.23	Magnetorquer Simulator: 'Start'	79
7.1	Cajón de madera y coordenadas para alcanzar el centro del generador	82
B.1	Arduino Mega pin mapping	90
B.2	Protoboard sensor LSM303DLHC [21]	91
B.3	Conexiones Arduino + LSM303DLHC + LCD-I2C	91
D.1	Alzado, planta y perfil	99
D.2	Pieza para juntas y sujeción de bobinas de Helmholtz	100
E.1	Esquemático PCB: LSM303DLHC + L3G4200D	102
E.2	PCB: LSM303DLHC + L3G4200D	102

ÍNDICE DE TABLAS

3.1	Valores aproximados del campo magnético sobre la superficie terrestre [8] . . .	12
3.2	Campo magnético medido en dos órbitas LEO	13
4.1	Características de la fuente por canal	22
4.2	Funcionalidades del puerto digital	23
5.1	Propiedades del cable de cobre utilizado	32
5.2	Características mecánicas de referencia [9]	33
5.3	Longitud de bobinas	34
5.4	Características mecánicas finales	35
5.5	Características mecánicas y eléctricas finales de las bobinas de Helmholtz . . .	35
5.6	Características reales de las bobinas	37
5.7	Características reales de las bobinas después del ajuste	37
5.8	Diferencia en resistencia	38
5.9	Características reales de las bobinas después del ajuste *	41
5.10	Protocolo de comunicación	44

A.1 Magnetómetros incluidos en misiones CubeSat	86
B.1 Características Arduino Mega2560 [4]	90

CAPÍTULO

0

MOTIVACIÓN

El motivo de la elección de este proyecto, fue primeramente la atracción que sentía por la electrónica, y la pasión por el tema aeroespacial. Una rama, que aunque no muy explotada en las universidades españolas, es un tema muy interesante y puntero, del que se puede aprender muchísimo en todas las ramas. Por lo que al oír sobre el proyecto [GranaSat](#), que se estaba desarrollando en el departamento de electrónica de la [UGR](#), vi una gran oportunidad de aprender y conseguir conceptos en el tema aeroespacial centrados en la electrónica.

Finalmente, he estado más ligado al tema del campo magnético, pero no he dejado de aprender a cerca de otros proyectos similares, no solo en el campo del electromagnetismo (una rama que durante la carrera no me parecía nada atractiva, pero que al aplicarla, me ha encantado), sino que también sobre diferentes sistemas que están siendo desarrollados mediante proyectos fin de carrera por otros compañeros. Temas que van desde el enlace de comunicación entre la estación terrestre y el satélite en órbita, la fabricación de diferentes sistemas de simulación (como es nuestro caso, para simular el campo magnético), o directamente sistemas de potencia, de orientación en órbita,... implementados directamente dentro del satélite. Básicamente, el tema aeroespacial es un tema muy amplio, y toca muchísimas ramas.

Una vez dentro, creo que mis expectativas han sido superadas con creces. No solo he aprendido sobre campos magnéticos, sino que además tengo pinceladas de muchos otros sistemas implementados tanto dentro del satélite como en la estación terrestre. Y sobre todo, he adquirido conceptos como el desarrollo de proyectos de manera multidisciplinar y trabajo en equipo.

Sin duda alguna, volvería a elegir este proyecto, o algún otro proyecto ligado a [GranaSat](#) o al tema aeroespacial. Creo que en este tema se pueden ampliar muchísimos de los conceptos aprendidos en la carrera, aplicándolos y viendo su utilidad.

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN

1.1 Origen del proyecto

GranaSat es el nombre con el que se denomina un proyecto de la Universidad de Granada (UGR) cuyo objetivo es el diseño y la fabricación de un **picosatélite** de tipo **CubeSat**. Se trata de un proyecto multidisciplinar en el que todas sus partes son desarrolladas por estudiantes en sus proyectos fin de carrera o trabajos fin de grado. Este proyecto en cuestión, es uno de todos esos proyectos que forman parte de **GranaSat**. Un ejemplo de **CubeSat** se puede apreciar en la siguiente imagen 1.1:



Figura 1.1 – *CP8 (IPEX) CubeSat* [18]

Las especificaciones para **CubeSat** fueron desarrolladas en 1999 por la Universidad Politécnica del Estado de California y la Universidad de Stanford [13]. Desde entonces, universidades de todo el mundo han desarrollado picosatélites siguiendo estas especificaciones. Para una unidad **CubeSat** (CubeSat 1U), la estructura mecánica es un cubo de 10 cm x 10 cm x 10 cm y su masa no puede ser mayor a 1.33 kg. Además, la electrónica utilizada en este **picosatélite** suele ser una electrónica comercial, es decir, al

alcance de todo el mundo. Este [CubeSat](#) 1U puede ser agrupado con otros para construir un satélite mayor, la imagen 1.2 muestra la estructura de un [CubeSat](#) 3U.

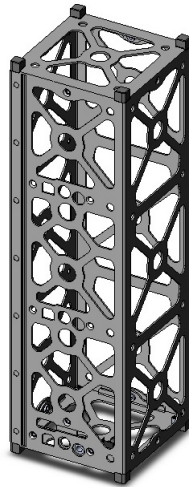


Figura 1.2 – *CubeSat 3U* [7]

1.1.1 Características del Sistema de Control y Determinación de la Actitud (ADCS) en [CubeSat](#)

Sobre [ADCS](#) para pico-satélites, se pueden encontrar muchas soluciones. Aunque estas pueden ser clasificadas en dos grandes categorías [5]:

- **Controles Activos:** Proporcionan un control real sobre el satélite, dando más libertad para cambiar la actitud de éste. Los controles activos, necesitan de alguna fuente de alimentación así como de un algoritmo de control para su funcionamiento.
- **Controles Pasivos:** Al contrario que con los controles activos, los pasivos no necesitan ninguna fuente de alimentación. Los controles pasivos fijan la actitud del satélite y no pueden cambiarla.

En este proyecto se tratarán controles activos indirectamente, ya que el grueso se basará en el desarrollo de un sistema de simulación de campos magnéticos terrestres. Controles activos hay de varios tipos:

- **Rueda de Reacción o de Momentum:** Se trata de un tipo de rueda usada en un satélite para cambiar su momento angular. Simplemente, la rueda gira gracias a un motor eléctrico para hacer girar al satélite y de este modo cambiar su actitud. Normalmente, el disco de rotación suele ser fabricado de metal, ya que a mayor masa del disco, mayor será el momento generado.
- **Magnetorquer:** Se trata de una bobina que genera un campo magnético, el cual reacciona con el Campo Magnético Terrestre haciendo rotar el satélite.

- **Sistemas de Propulsión:** Los sistemas de propulsión utilizan un carburante a presión que a través de las boquillas apropiadas genera una rotación angular del satélite. Este sistema no es tan usado para picosatélites, ya que el tener que llevar un carburante a presión genera una gran cantidad de limitaciones.

1.1.2 Objetivos del proyecto

Una vez hecha una pequeña introducción, hay que aclarar los problemas que serán tratados en este proyecto. Para este caso, el objetivo final será tener una zona de pruebas con la cual se quiere controlar y simular las condiciones electromagnéticas que el satélite se encontrará una vez en órbita. Para ello, hay que fabricar un generador de campos en los tres ejes, con el que será simulado el campo magnético terrestre. En el interior de este generador, deberá de coger el [CubeSat](#) al completo y deberá de ser controlado lo más automáticamente posible mediante un software de control.

Debido a que el proyecto [GranaSat](#) se encuentra aun en una fase temprana de su desarrollo, no se podrán realizar pruebas sobre el [CubeSat](#) ya acabado. Pero se podrán realizar pruebas y ver el comportamiento de algunos sistemas de control activos como es el caso de los magnetorquer. Además, se trabajará con sensores magnéticos, de temperatura y de presión que serán usados en un futuro en el satélite y se hará un primer diseño de una [PCB](#) en la cual se incluirá un sensor magnético de ciertas características junto a un giróscopo. Esta [PCB](#) formará parte de los controles activos que ayudan a conocer en cada momento la actitud y posicionamiento del satélite una vez en órbita.

1.2 Descripción de Capítulos

- **Capítulo 0: Motivación:** En este capítulo será explicado el motivo de la elección de este proyecto y qué se esperaba aprender en él para complementar la formación académica.
- **Capítulo 1: Introducción:** Aquí se realizará una pequeña introducción al proyecto [GranaSat](#), así como una pequeña descripción de en qué consiste este proyecto en particular.
- **Capítulo 2: Requisitos del simulador:** Se podrá encontrar un listado de lo que se pidió en la realización de este proyecto, tanto a nivel hardware como software.
- **Capítulo 3: Análisis:** Una vez los requisitos han sido definidos, en este capítulo serán presentados tanto problemas como soluciones para la realización de este proyecto. También se incluirá una planificación.
- **Capítulo 4: Diseño del sistema:** Este capítulo mostrará el diseño del sistema. Teniendo en cuenta tanto la parte hardware como software.

- **Capítulo 5: Fabricación e Implementación:** En este punto se podrá ver el proceso de fabricación del sistema, llegando a obtener cada uno de los elementos que lo componen, y mencionando problemas que se han ido encontrando a lo largo de su desarrollo.
- **Capítulo 6: Pruebas y test funcionales:** Como su mismo nombre indica, este capítulo incluirá todos los test y simulaciones que han sido realizadas para comprobar que se ha logrado el objetivo que se requería.
- **Capítulo 7: Líneas futuras:** Breve conclusión y mención a las líneas futuras asociadas a este proyecto.

CAPÍTULO

2

REQUISITOS DEL SISTEMA

En este capítulo serán detallados los requisitos técnicos de diseño, tanto a nivel *hardware* como *software*.

2.1 Requisitos

2.1.1 Requisitos *Hardware*

A nivel *hardware* se pide:

- Fabricación de un generador de campos magnéticos 3D con el objetivo de simular el campo magnético terrestre.
- El generador debe de ser capaz de generar campos en los tres ejes simultáneamente y en cualquier dirección.
- Debe de poder anular el campo magnético terrestre para que, a partir de ahí, simular el campo magnético que sufriría un satélite de tipo [CubeSat](#) en órbita.
- Dicho generador debe de poder incorporar en su interior el [CubeSat](#) mencionado, pero sin exceder demasiado en tamaño para poder ser incorporado al laboratorio.
- Elegir un sensor magnético 3D que sea capaz de adaptarse y funcionar en las condiciones magnéticas del satélite en órbita con su correspondiente plataforma.

2.1.2 Requisitos *Software*

A nivel *software* se debe de realizar unos programas que serán responsables del correcto funcionamiento tanto del sensor magnético como del generador. Estos son:

- Software de control del generador, con el que hacer un calibrado de las bobinas de Helmholtz y sea capaz de trabajar con los tres ejes simultáneamente, pero siendo estos ejes independientes entre ellos. También debe de ser capaz de anular el campo magnético terrestre. Este Software además debe de poder guardar sesiones anteriores y cargarlas, así como guardar los parámetros de configuración iniciales de la simulación (para no tener que ser introducidos a mano cada vez que se quiera simular).
- Software de control del generador conjunto a un magnetorquer: Muy parecido al mencionado anteriormente, pero con la particularidad de, en este caso, poder anular el campo magnético terrestre y, a partir de ahí, realizar una simulación para ver la respuesta magnética que genera un magnetorquer a diferentes valores de corriente de alimentación. Por lo que será necesario alimentar de manera simultánea las tres bobinas de Helmholtz más el magnetorquer (es necesario el uso de cuatro fuentes de alimentación o una fuente de corriente de cuatro canales).
- Software de control del sensor magnético: El sensor magnético debe ser controlado mediante el software principal. Por tanto, hay que establecer una comunicación bidireccional entre ambos en la que se puedan enviar tanto los datos magnéticos leídos, como poder controlar diferentes aspectos en la configuración del sensor (por ejemplo, la ganancia del mismo).

CAPÍTULO

3

ANÁLISIS DEL SISTEMA

3.1 Introducción

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el objetivo es fabricar un generador de campos magnéticos en los tres ejes. De este modo, se podrá realizar simulaciones del campo magnético con el que se encontrará el satélite a lo largo de su órbita, pudiendo, conseguir el campo magnético cero y realizar el barrido a partir de ahí. Este campo magnético cero, se obtiene anulando el campo magnético terrestre en el punto en el que se encuentre el sensor magnético dentro de las bobinas.

Además, se realizará un estudio y elección del sensor magnético que será utilizado en el satélite, así como realizar distintas simulaciones con este sensor, realizando la caracterización de las bobinas, y simulando el comportamiento de un magnetorquer. De esta manera, estaremos simulando así con las primeras versiones de los magnetorquer que se pondrán incluir en el [CubeSat](#) en cuestión.

3.2 Simulación del campo magnético terrestre

En este punto, trataremos la generación del campo magnético terrestre. Primeramente, se hará un estudio sobre las características de este campo magnético para, después, exponer la solución a cómo generar este campo. Para implementar una solución debemos de resolver dos problemas, la caracterización del generador de campos magnéticos y su calibración. La caracterización consiste en el estudio de cada una de las seis bobinas por separado con las

que este generador será montado y la posición de las mismas, mientras que la calibración tratará de obtener la relación entre la corriente suministrada y el campo magnético generado en cada eje.

3.2.1 Análisis del problema

Antes de generar el campo magnético terrestre, es necesario ver sus características. El campo magnético puede ser representado en cualquier punto por un vector tridimensional (normalmente denominado \mathbf{B}). Una forma común de medir su dirección es usar una brújula para determinar la dirección del norte magnético. Su ángulo con respecto al norte geográfico se denomina declinación. Apuntando hacia el norte magnético el ángulo que el campo mantiene con la horizontal es la inclinación. La intensidad (F , también denominada fuerza de Lorentz) del campo es proporcional a la fuerza que se ejerce sobre el imán de dicha brújula. También se puede usar una representación con coordenadas XYZ en las que la X es la dirección de los paralelos (con sentido este), la Y es la dirección meridiana (sentido hacia el polo norte geográfico) y la Z es la dirección vertical (con el sentido hacia abajo apuntando al centro de la Tierra \mathbf{V}). Esto lo podemos apreciar en la imagen 3.1. [24]

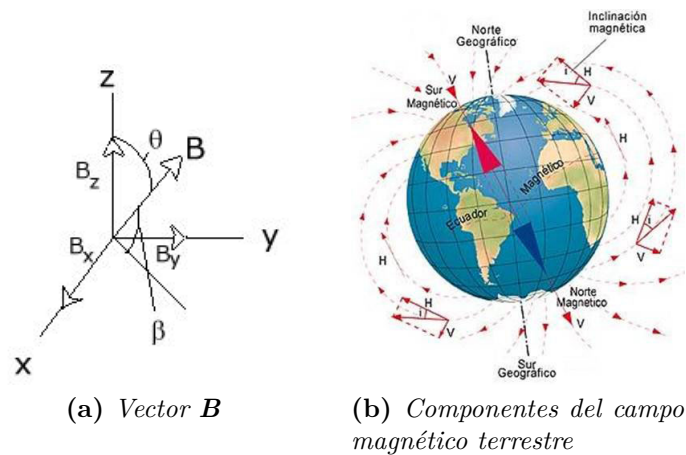


Figura 3.1 – Vector del Campo Magnético Terrestre

Este campo magnético, es medido en **Tesla** (T) en el Sistema de Unidades Internacional, y en **Gauss** (G) en el Sistema Cegesimal de Unidades. Para campos magnéticos débiles, es más común usar el Gauss. La relación entre estas dos unidades es la siguiente 3.2.1:

$$1T = 10^4G \quad (3.2.1)$$

Por otro lado, La Tierra puede ser dividida, en una aproximación simple, en un imán

con polo norte y polo sur, como podemos ver en la imagen 3.2. En esta división, se pueden apreciar las líneas de campo magnético que revelan la forma del campo. Estas líneas emergen de un polo, rodean el imán y penetran por el otro polo.

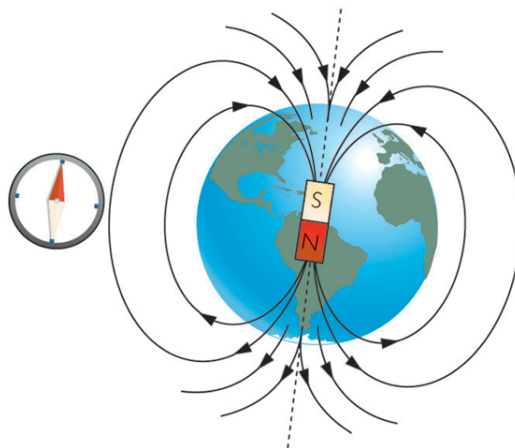


Figura 3.2 – Polos magnéticos [19]

El campo magnético terrestre es similar al generado por una esfera magnetizada. Los polos norte y sur magnéticos no se corresponden con los polos geográficos de La Tierra. Es decir, hay una desviación entre el eje magnético (dicho eje une el polo norte y el polo sur magnéticos) y el eje geográfico (línea que une los polos norte y sur geográficos). Además, esta desviación no es constante, varía con el tiempo. Incluso, con cientos de miles de años, los polos magnéticos intercambian su posición (por lo que podríamos encontrar el polo norte magnético donde se encuentra el polo sur y viceversa). La figura 3.3 muestra un esquema del campo magnético terrestre y la desviación entre los polos magnéticos y geográficos:

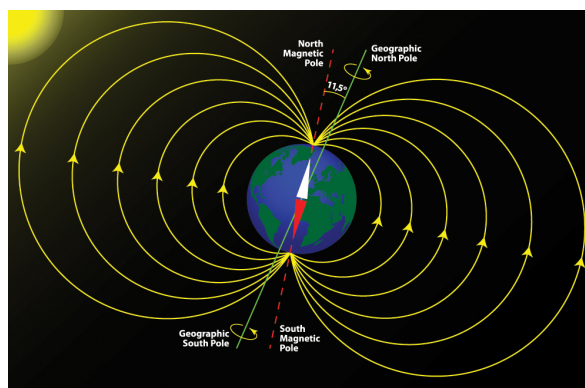


Figura 3.3 – Esquema de los polos magnéticos y geográficos terrestre [16]

Otro punto importante, es que el campo magnético terrestre no es uniforme sobre toda la superficie de la tierra y, además, es menor a medida que nos alejamos de la superficie terrestre. El campo magnético terrestre va aumentando su valor a medida que nos acercamos a los polos magnéticos, mientras que alcanza sus valores más bajos en el ecuador. Sin embargo, hay una zona de la tierra llamada "Anomalía del Atlántico" o "Anomalía Brasileña" situada en el sur del Océano Atlántico que no cumple lo mencionado anteriormente. En esta zona, es donde

el campo magnético terrestre alcanza sus valores más bajos [23]. En la tabla 3.1 se pueden apreciar una aproximación del valor del campo magnético sobre la superficie terrestre:

	Tesla	Gauss
Polos	$60\mu\text{T}$	0.6G
Ecuador	$30\mu\text{T}$	0.3G
Anomalía del Atlántico	$23\mu\text{T}$	$230\mu\text{G}$

Tabla 3.1 – Valores aproximados del campo magnético sobre la superficie terrestre [8]

Para tener una idea de cómo se distribuye el campo magnético sobre la superficie terrestre, se tiene la siguiente imagen 3.4, donde se puede ver la distribución del campo de manera gráfica sobre un mapa terrestre, así como la mencionada Anomalía del Atlántico.

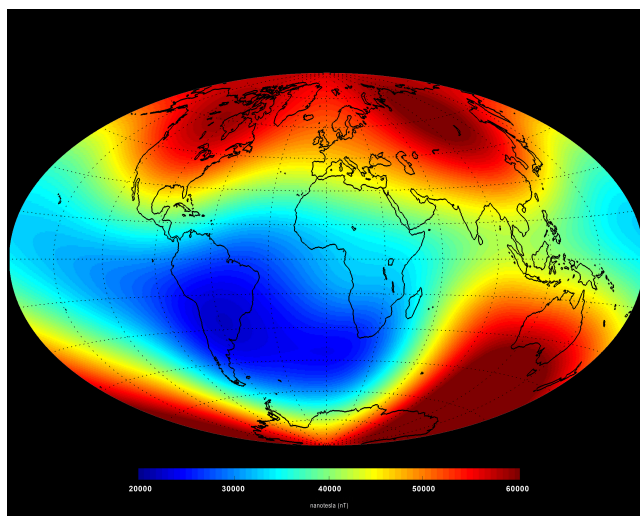


Figura 3.4 – Mapa del campo magnético terrestre [17]

Aun así, el interés de este proyecto no se centra en el campo magnético en la superficie de La Tierra, sino en el campo magnético que se da en órbitas de satélites artificiales que van desde una altitud de 200 Km a 2000 Km. Se dice que un satélite dentro de esta altitud se encuentra en una "Órbita Terrestre Baja" (del inglés LEO). También están las zonas de órbitas medias y las de órbitas geoestacionarias. Estas órbitas se pueden apreciar en la imagen 3.5. Además de estas órbitas, es común tomar como referencia tanto la órbita por la que se encuentra el sistema GPS, el cual está a 20200 km de altura, como la órbita de la Estación Espacial Internacional (ISS), a unos 400 Km de altura aproximadamente. [28]

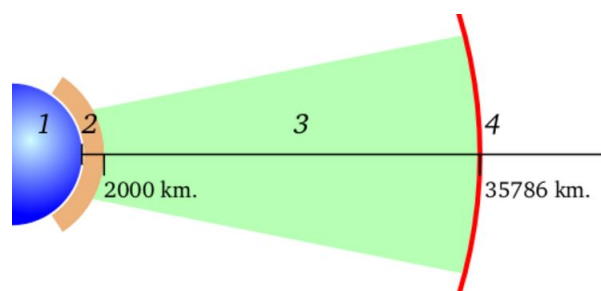


Figura 3.5 – Diagrama de las diferentes regiones de altura que definen el tipo de órbita: 1- La Tierra, 2- Zona de órbita terrestre baja (*LEO*), 3- Zona de órbitas medias, 4- Órbita geostacionaria [28]

La siguiente tabla 3.2 muestra aproximadamente el campo magnético medido para dos ejemplos de órbitas en la zona de interés para este proyecto (*LEO*).

	400 Km	600 Km
Polos	0.5G	0.45G
Ecuador	0.25G	0.20G

Tabla 3.2 – Campo magnético medido en dos órbitas *LEO*

Todos los valores que han sido expuestos para medidas del campo magnético, son valores promediados. Esto es debido a que el campo magnético terrestre está en constante cambio. Para predecir el campo magnético terrestre, existe un modelo creado por la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (*IAGA*) denominado Campo de Referencia Geomagnética Internacional (*IGRF*). Este modelo está formado por un conjunto de coeficientes que son redefinidos cada 5 años [8]. Con este modelo se pueden ver las variaciones magnéticas a lo largo del tiempo, además de poder hacer consultas precisas como conocer el campo magnético en un determinado lugar, a una determinada altura sobre la superficie de La Tierra y en una fecha concreta (la fecha puede ser tanto pasada como futura). Aun así, el sistema de referencia *IGRF* no tiene en cuenta ni las variaciones aleatorias que sufre el campo magnético debido a las tormentas solares ni otros eventos aleatorios que puedan afectar a dicho campo. Pero puede ser utilizado como una muy buena aproximación.

En este punto, ya se ha analizado el comportamiento del campo magnético terrestre. Por lo tanto, el siguiente paso será ver cómo se puede simular este campo magnético en el laboratorio. Para ello, se realizará un estudio sobre las bobinas de Helmholtz.

Una bobina de Helmholtz es un aparato con el que se puede producir un campo magnético aproximadamente uniforme sobre cierta región. Consiste en dos bobinas situadas paralelamente y conectadas en serie entre ellas. El campo magnético generado está directamente relacionado con la corriente con la que se alimentan dichas bobinas, teniendo un comportamiento (idealmente) lineal. En la siguiente figura 3.6 se puede apreciar una bobina de Helmholtz 1D (en una dimensión, o un eje):

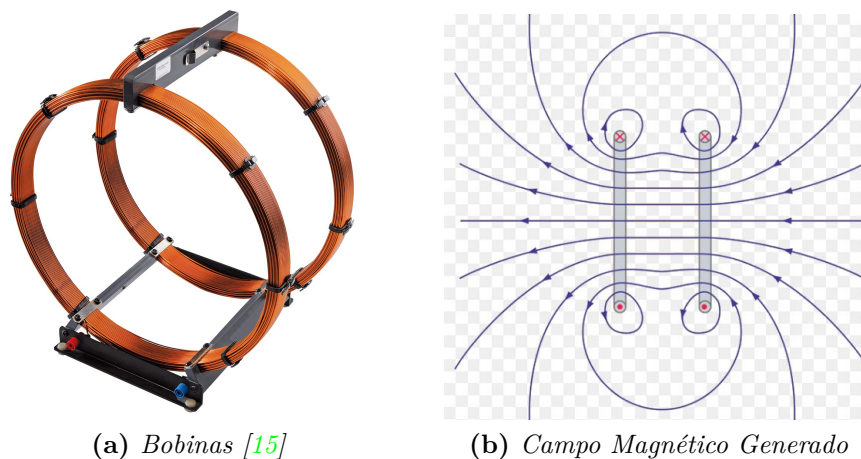


Figura 3.6 – Bobinas de Helmholtz 1D

Con dos bobinas, solo se puede generar campo magnético en un eje, 1D. Por tanto, para poder generar campo magnético en los tres ejes, será necesaria la fabricación de un generador de campos magnéticos en tres dimensiones (3D). Este generador, estará formado por un conjunto de tres bobinas de Helmholtz, una para cada eje (X, Y y Z), seis bobinas en total. Además, cada par de bobinas tiene que ser alimentado independientemente, para así, poder cambiar tanto el sentido de la corriente en cada bobina como su valor. Lo normal es encontrar bobinas de Helmholtz 1D (que son fáciles de localizar en un laboratorio de física), pero la necesidad de simular en los tres ejes, unida a un presupuesto ajustado, hace que se tenga que fabricar un propio generador de campos de bajo coste.

3.3 Solución

Aquí, se mencionarán las posibles soluciones que cumplirían los requisitos mencionados con anterioridad y se hará una elección de la solución más idónea. Que será la que se desarrollará.

3.3.1 Posibles soluciones

Hay varios bloques que pueden contar con diferentes soluciones:

- **Bobinas de Helmholtz:** La idea en este punto es fabricar de manera casera dichas bobinas, por lo que se tienen dos opciones viables para este caso:
 - Bobinas de Helmholtz cuadradas: Podrían ser fabricadas de aluminio, tendrían gran robustez y facilidad de fabricación. Por contra, habría que hacer uso de material ferromagnético.

- Bobinas de Helmholtz circulares: Deberían de ser fabricadas en un material con facilidad para ser doblado de forma circular (por ejemplo, plástico, al que se le puede aplicar calor y hacer el molde). No habría que usar material ferromagnético en las juntas, siendo toda la bobina una misma pieza.
- **Software de Control:** La interfaz de usuario podría ser implementada en diferentes lenguajes de programación. Los más viables son:
 - Java: Este lenguaje ha sido utilizado en la carrera y se tiene conocimiento sobre entornos gráficos en él. Es potente y con una programación dirigida a objetos. Mediante plataformas como Netbeans o Eclipse, tiene muchas facilidades para crear la interfaz gráfica.
 - C: Otro de los programas usados durante la carrera. Es muy potente y versátil. Se puede hacer casi cualquier cosa con C. Por contra, crear una interfaz gráfica en C no es tan sencillo. Aunque ya se tienen conocimientos sobre protocolos de comunicación entre dos dispositivos con C y esto facilitaría las cosas.
 - Matlab: Otro de los lenguajes muy usados durante la carrera. Aunque no se ha trabajado el tema de las interfaces gráficas en Matlab (**GUI** de Matlab), sí que se tiene bastante conocimiento sobre este lenguaje. Matlab es muy potente y da muchísimas facilidades para tratar los datos así como para poder controlar los distintos dispositivos del laboratorio que puedan ser necesarios (como fuentes de alimentación, dispositivos de instrumentación, etc).
- **Fuente de alimentación:** Como ya ha sido mencionado, se tiene la necesidad de poder controlar cuatro corrientes a la vez (tres para el generador de campos y una para poder hacer simulaciones con magnetorquer), teniendo en cuenta que estas corrientes deben de ser tanto positiva como negativa para controlar la dirección del campo magnético en cada eje. En este caso se tiene dos opciones, según el material disponible:
 - Solución propuesta por la fuente **Agilent N6705A** [2]: Esta fuente es capaz de controlar cuatro canales a la vez, ofreciendo además la posibilidad de conexión directa al ordenador por puerto **GPIB**. Además, dispone un control digital de gran utilidad, ya que, al no disponer directamente de la posibilidad de generar corrientes negativas, habría que usar un puente en H controlado por ese puerto digital (que cambiaría el sentido de la corriente). Este puente ya ha sido realizado en otro proyecto fin de carrera por otro compañero [14], por lo que ya estaría también disponible, aunque habría que hacerle ciertas modificaciones para cumplir con los requisitos de este proyecto.
 - En el laboratorio también se pueden encontrar otras fuentes de corriente capaces de generar la corriente negativa directamente. Pero, por contra, solo disponen de dos canales, por lo que habría que usar varias.
- **Plataforma para distintos sensores, siendo el sensor magnético el principal, y pudiendo incorporar otros sensores que puedan ir surgiendo**

posteriormente: El sensor magnético necesita de una plataforma o microcontrolador para ser conectado al ordenador y poder pasarle los datos. En el mercado, hay muchas familias de microcontroladores así como plataformas que podrían ser usadas para el control de este sensor. Por haber sido estudiadas con anterioridad, en la carrera y por cuenta propia, tenemos varias opciones viables:

- Microcontroladores PIC (MicroPic): Estos controladores han sido estudiados durante la carrera, y pueden cumplir con los requisitos. Son programados en *C* y necesitan de un sistema de programación que hay que adquirir por separado, aumentando así el coste de la plataforma.
- Arduino: Se trata de una plataforma muy usada, de la que se encuentra muchísima información y ejemplos de software libre. Es barata y fácil de programar. Además, tiene gran facilidad para conectar con el ordenador. A pesar de su precio, es muy potente.
- Raspberry PI: Un microordenador muy potente que ofrece gran facilidad para la interconexión con otros dispositivos. A diferencia de los anteriores, este tiene un sistema operativo funcionando y tiene una capacidad enorme. Es barata para todo el potencial que tiene, y cada vez está siendo más usada, pero quizás sea de más utilidad en otro tipo de proyecto. En este, que solo se desea conectar unos cuantos sensores con el ordenador, quizás con menos sea más que suficiente.

3.3.2 Elección final

Finalmente, la mejor solución y más viable sería la formada por:

- Bobinas de Helmholtz **cuadradas**: Se muestra como la mejor solución por la facilidad de fabricación. Además, aunque se tenga que usar material ferromagnético para las juntas, éste no afectaría al interés de este proyecto.
- Fuente de alimentación **Agilent N6705A** [2]. Por todo lo mencionado, es la que más se adapta a los requerimientos. Además, ya dispone de mucha información y librerías con la que realizar todo el control.
- **Arduino**: se muestra mucho mejor frente a las demás plataformas propuestas. Sobre todo por la facilidad del intercambio de datos que ofrece con el PC y por todo el código libre que circula por la red, que facilitaría mucho su desarrollo.
- Finalmente, la interfaz de usuario será creada con **Matlab**. Con Matlab se podrá controlar la fuente de alimentación fácilmente mediante **GPIB**. Además, es sencillo crear una conexión con Arduino para el control del sensor magnético y recibir los datos mediante puerto serie.

Por lo tanto, el sistema quedaría formado por una fuente de corriente que alimentaría las bobinas y tendría la posibilidad de añadir un magnetorquer, capaz, con la ayuda de

un puente-H, de obtener corrientes negativas mediante su puerto digital. Esta fuente, sería controlada desde el PC por GPIB desde una interfaz de usuario creada en GUI de Matlab. Gracias a Arduino, se podrá recibir los datos en el PC desde el sensor magnético obteniendo el campo generado por unas bobinas de Helmholtz de aluminio cuadradas.

3

CAPÍTULO

4

DISEÑO DEL SISTEMA

En este capítulo, se detallará la solución tomada en el capítulo [3](#) tanto a nivel hardware como software.

4.1 Implementación Hardware

Una vez ha sido analizado el problema, el siguiente paso será ofrecer una solución más detallada al problema mencionado en el apartado anterior. Está claro, que el principal elemento para la generación de campos magnéticos será el de las bobinas de Helmholtz 3D ya mencionadas. No obstante, serán necesarios otros elementos además de estas bobinas tanto para alimentarlas como para que tengan un correcto funcionamiento. El diagrama [4.1](#) muestra el una primera visión del sistema con los distintos elementos participantes y la conexión entre dichos elementos para un correcto funcionamiento. Este sistema, se puede ver alterado a medida que se vaya desarrollando el proyecto, ya que puede ser beneficiosa la incorporación de otros elementos al sistema o el campo de cierto tipo de conexiones que no pueden saberse actualmente ya que nos encontramos en un primer punto de contacto con la idea que podría cumplir los requisitos del sistema.

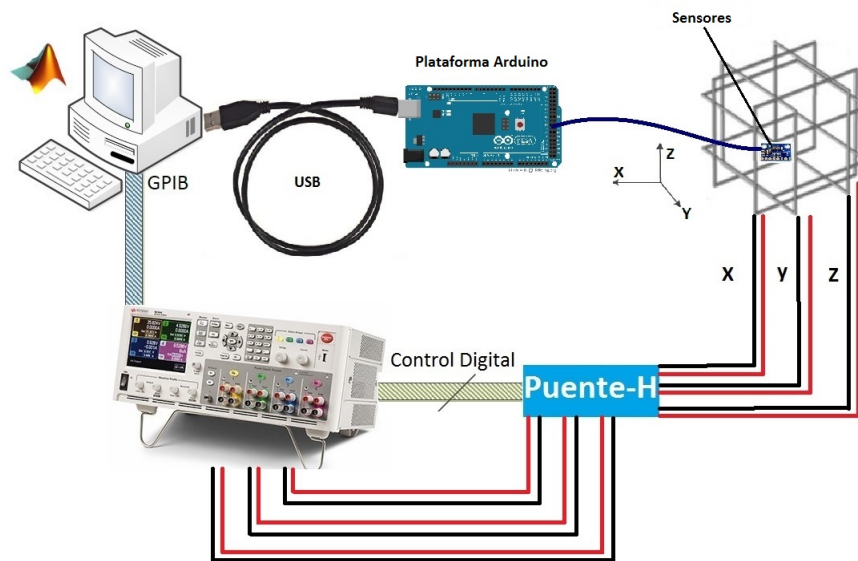


Figura 4.1 – Esquema del sistema y conexión entre dispositivos

4

Las bobinas serán alimentadas mediante la fuente de corriente Aligent N6705A. Esta fuente, es controlada por el PC mediante el puerto GPIB. Para que la fuente actúe tal y como se pretende, se disponen de librerías en Matlab de numerosos instrumentos (ente los que se encuentra la fuente Aligent N6705A). Como esta fuente no es capaz de generar corrientes negativas, es necesario el uso de un puente-H, este puente tendrá como entrada las conexiones procedentes de la fuente para la alimentación de las bobinas, donde, por diseño y características de la fuente, se realizarán dichas conexiones de manera:

- Bobina de Helmholtz para el eje X \rightarrow canal 4.
- Bobina de Helmholtz para el eje Y \rightarrow canal 3.
- Bobina de Helmholtz para el eje Z \rightarrow canal 1.
- *Quedaría libre el canal 2 de la fuente, donde se conectará un magnetorquer para realizar ciertas simulaciones.*

Una vez hecha esta conexión, el siguiente paso es conectar el puente-H con el generador de campos magnéticos. En este caso, cada bobina va con su correspondiente alimentación (la Z con la Z, ...), la diferencia es que ya, gracias a este puente, la corriente por esta conexión podrá ser tanto positiva como negativa. Para controlar este puente-H, será necesario un bus digital desde la fuente de alimentación al puente-H. Por el que, cambiando el valor de los bits, se podrá controlar el sentido de la corriente de una bobina concreta (corriente positiva o negativa).

Finalmente, para saber qué campo magnético se está generando en cada momento en el interior del generador, se dispone de un sensor magnético capaz de leer en los tres ejes.

Este sensor (*LSM303DLHC* [21]) será conectado al ordenador mediante un Arduino modelo *Mega 2560* [4]. Que mediante un puerto **USB** es conectado al ordenador para controlar el sensor y recibir los datos leídos. Para justificar las mediciones realizadas por dicho sensor, se añade otro sensor *HMC5883L* [12]. Con este sensor, se podrán verificar las mediciones tomadas en cada momento, teniendo que dar prácticamente la misma medición (se tomará por buena una medición con un pequeño error, ya que estos sensores no podrán ser situados exactamente en el mismo lugar, sino uno al lado del otro).

Además, aunque no forme parte del sistema final, también ha sido usado el Gausímetro *Hirst GM08* [11]. Este Gausímetro, aunque solo pueda medir en un sentido (solamente un eje), se usará durante la fabricación del generador de campos magnéticos para certificar los datos que están siendo medidos desde el sensor *LSM303DLHC*. A diferencia del sensor *HCM5883L*, el Gausímetro será utilizado para verificar las mediciones durante la fabricación de las bobinas de Helmholtz, mientras que el sensor *HCM5883L* tomará valores del sistema final paralelamente al sensor *LSM303DLHC*, y directamente sobre los tres ejes en el mismo instante de tiempo.

Aunque se haga uso de varios sensores para las mediciones del campo magnético generado, es necesario otro instrumento más utilizado durante la fabricación del generador de campos. Para realizar la caracterización de las bobinas, se han realizado medidas con el multímetro de *Agilent HP-3478A* [1]. Con este multímetro se ha medido la resistencia de cada bobina por separado, para que sean lo más idénticas posibles las bobinas dos a dos.

Finalmente, se incluirá el sensor *BMP180* [6]. Este sensor es un barómetro, que es capaz de medir además altitud y temperatura. Es de gran utilidad, ya que, según los datos tomados, se pueden hacer aún más precisas las medidas de campo magnético tomadas por el sensor *LSM303DLHC*, realizando pequeños ajustes del campo magnético registrado según las mediciones tomadas por el sensor *BMP180*. Este sensor se incluye en el proyecto para ir teniéndolo en cuenta para el sistema final, pero no se harán esos pequeños ajustes, dejando esa nueva funcionalidad para líneas futuras.

A continuación, serán detallados cada uno de los instrumentos de este sistema por separado.

4.1.1 Fuente de alimentación Agilent N6705A [2]

La fuente de alimentación Agilent N6705A (4.2) es la encargada de proporcionar las corrientes deseadas para las bobinas de Helmholtz. Esta fuente tiene cuatro canales de potencia y un canal digital con 7 **GPIO** con un octavo pin de tierra.

Como ya se ha mencionado, la fuente va a ser controlada mediante **GPIO**, el cual da distintas funcionalidades de las que serán usadas solo algunas de ellas. En la siguiente tabla se pueden observar las características de cada canal de la fuente de alimentación 4.1:



Figura 4.2 – *Agilent N6705A*

	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
Canal 1	60	1.5	60
Canal 2	20	15	30
Canal 3	100	1	100
Canal 4	100	1	100

Tabla 4.1 – *Características de la fuente por canal*

En esta tabla, se pueden observar los valores máximos que puede tomar la fuente para cada canal. Si uno de estos valores es alcanzado, la fuente mantiene los valores de salida constantes. Sin embargo, si se supera el valor límite en la salida de un canal, la fuente apaga ese canal automáticamente. Además, se ofrece la posibilidad de alimentación como fuente de corriente o fuente de voltaje. Para este caso, se va a utilizar el modo de fuente de corriente, ya que así el campo magnético generado en las bobinas de Helmholtz se podrá controlar de manera más eficiente.

Teniendo en cuenta las características de cada canal, se hace la elección del eje que cubrirá. Como se puede observar, de todos los canales hay uno que es el que menos potencia da, el canal 2. Este canal, se dejará dedicado al magnetorquer, ya que no requerirá de mucha más potencia, y se podrán cumplir sus necesidades con estas características. Sin embargo, los otros 3 canales deben de ser repartidos entre los 3 ejes (XYZ). Debido a las resistencias que ofrecen cada una de las bobinas, el mejor canal para este caso y el que más campo magnético generará es el canal 1. Por tanto, este canal será dedicado a la bobina que controla el eje Z, ya que es la componente que mayor campo magnético terrestre soporta. Debido a que el primer paso será anular el campo magnético terrestre en el centro del generador para después proceder a las simulaciones pertinentes, se usará el canal que más potencia nos puede generar en el eje Z, ya que es la componente magnética terrestre más potente y que más potencia requerirá para alcanzar el cero. Los otros dos canales son de iguales características, por lo que no importa a qué eje asociarlos. En este caso, el canal 4 se ha ligado a la bobina que controla el eje X y el canal 3 a la bobina que controla el eje Y.

El puerto digital de la fuente ofrece distintas posibilidades y funcionalidades para cada pin. Estas funcionalidades pueden ser vistas en la tabla 4.2

I / O Bidireccional	Pines del 1 al 7
Solo entrada	Pines del 1 al 7
Trigger externo I / O	Pines del 1 al 7
Error en salida	Pines 1 y 2
Impedir entrada	Pin 3
Control de sincronización	Pines del 4 al 7

Tabla 4.2 – Funcionalidades del puerto digital

Sin embargo, para este proyecto solo interesará el modo **GPIO** para todos estos pines (teniendo en cuenta siempre muy presente que el pin 8 es el pin de tierra).

4.1.2 Puente-H: STL298 [14]

No se entrará en profundidad en este apartado, ya que ha sido desarrollado en el proyecto fin de carrera citado en el título de esta sección.

Se trata de un puente que, mediante el puerto digital de la fuente Agilent N6705A, es capaz de poner la corriente suministrada negativa. Simplemente hay que conectar las bornas de entrada hacia el puente-H a los tres canales de la fuente de alimentación, el puerto digital al de la fuente, y las bornas de salida al generador de campos magnéticos en el lugar correspondiente. Este dispositivo puede verse en la en la imagen 4.3.

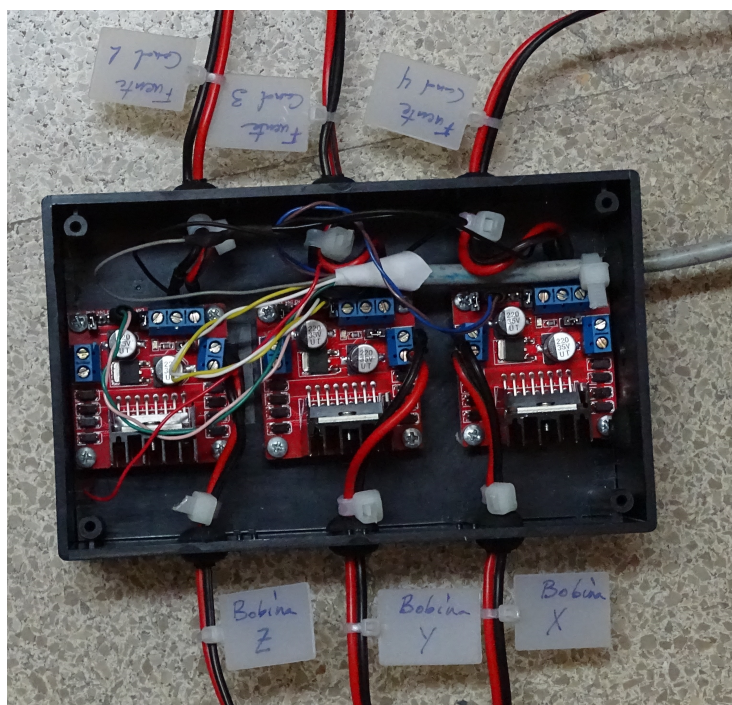


Figura 4.3 – Puente-H [14]

4.1.3 Gaussímetro Hirst GM08 [11]

Este dispositivo está diseñado para medir campos magnéticos con la mayor precisión posible. A pesar de todos sus conectores y posibilidades de alimentación, la forma más cómoda de hacer funcionar este Gaussímetro para este proyecto será mediante [USB](#). La única intención del uso de este instrumento es para la verificación de que el sensor magnético está funcionando correctamente. En la siguiente imagen se puede ver el Gaussímetro en sí [4.4](#):



Figura 4.4 – Gaussímetro Hirst GM08

Este dispositivo tiene dos sondas: una sonda axial y otra radial. La primera solo permite medir campos paralelos a ella mientras que la segunda, la sonda radial, mide campos perpendiculares a ella. Para hacer las medidas, la sonda que va a ser usada será la axial. Por otro lado, las unidades de medida serán el Gauss. Para tomar las medidas, se tomará la mayor resolución posible del dispositivo. Esta resolución es de 0.01 Gauss. Con esta resolución, el rango de medida va desde -29.99 a 29.99 Gauss (un rango suficiente para medir el campo magnético terrestre, que aproximadamente va desde 0.25 a 0.65 Gauss).

4.1.4 Magnetómetro LSM303DLHC con Arduino Mega2560 [21]

El circuito integrado LSM303DLHC que se usará, será el que tiene un encapsulado GY-511 y puede ser observado en la imagen [4.5](#). Está formado por un magnetómetro, un acelerómetro, un sensor de temperatura y una interfaz de comunicación [I2C](#). Tanto el magnetómetro como el acelerómetro realizan medidas en los 3 ejes simultáneamente. En este proyecto, solo será usado el sensor magnético. Para realizar las medidas y poder comunicarse con el PC, este sensor será conectado a un Arduino Mega2560 haciendo uso de la comunicación [I2C](#). El por qué de la elección de este magnetómetro y no cualquier otro del mercado y ya utilizado en otros proyectos [CubeSat](#) se puede ver en el apéndice [A](#). Aun así, y a modo de verificación de las medidas con otro sensor capaz de medir en los tres ejes, también se hará uso del magnetómetro HCM5883L[[12](#)].

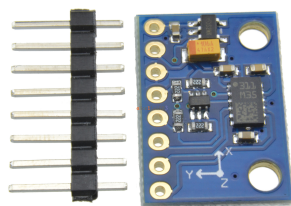


Figura 4.5 – *LSM303DLHC*

Por otro lado, el modelo de Arduino utilizado será el Mega2560. En una primera instancia, se ha realizado una protoboard de test para el aprendizaje y uso de los sensores sobre Arduino, ya que esta plataforma no había sido tratada con anterioridad y había que partir desde cero. Dicha protoboard, formada por un Arduino Mega2560, un sensor magnético LSM303DLHC conectado al bus I2C y una pantalla LCD controlada también por bus I2C para facilitar la vista de la toma de datos, pueden ser vistos en conjunto en el apéndice B.

Esta protoboard, como se ya ha mencionado, servirá para ir analizando el sistema, tener una primera toma de contacto, y empezar a desarrollar el código necesario. En el siguiente capítulo 5, se verán los distintos problemas que han ido surgiendo, y, por ello, la necesidad de incluir nuevos dispositivos (como el ya mencionado HCM5883L[12]).

4.1.5 Bobinas de Helmholtz [9][3]

En esta sección se hará un estudio teórico sobre el instrumento más importante de este proyecto, las bobinas de Helmholtz. Los requisitos impuestos en la sección 2.1, hacen que sean necesarias tres pares de bobinas de Helmholtz, un par por cada eje, de modo que queden puestas perpendicularmente un par con respecto a otro y poder generar campo magnético terrestre en los tres ejes simultáneamente.

Por lo tanto, en esta sección se presenta el principio de operación de nuestro sistema de bobinas de Helmholtz, refiriendo al campo electromagnético generado por un conductor eléctrico por el cual circula una intensidad de corriente eléctrica, comenzando desde la descripción de intensidad y densidad de corriente hasta llegar a la fuerza y campo magnético en materiales conductores.

Unas bobinas de Helmholtz tratan de dos bobinas circulares o cuadradas, con sus centros geométricos separados una cierta distancia h a lo largo del eje de simetría. Con este tipo de bobinas, se permite obtener una zona de campo magnético uniforme alrededor del punto central entre ambas. Para generar este campo magnético, es necesario que la corriente eléctrica fluya en la misma dirección en cada bobina (en caso contrario, para unas bobinas con las mismas características, el campo de una bobina anularía al campo de la otra).

El estudio del comportamiento del campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz se puede realizar mediante la ley de Biot-Savart. La configuración de las

bobinas de Helmholtz consiste en un par de bobinas circulares o cuadradas ubicadas de forma paralela una a cada lado del área experimental a lo largo de un eje común, separadas a una distancia h . Cada bobina está formada por N vueltas de hilo conductor. Para unas bobinas cuadradas (que serán las usadas en este proyecto) de longitud de lado $2*a$ como se puede observar en la figura 4.6. Aquí, se puede ver la relación entre el lado y la distancia de separación dada por un factor de $0,5445$. De manera que $h=0,5445*2*a=1,089*a$. Este par de bobinas, se conecta en serie y, por ellas, circula una corriente eléctrica de intensidad I , generando un campo magnético que es prácticamente uniforme en el espacio comprendido entre ellas [3].

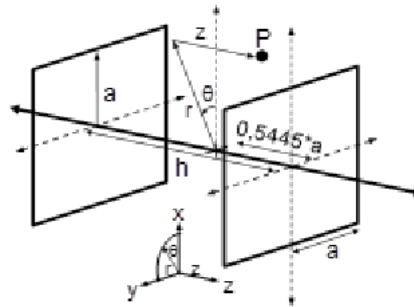


Figura 4.6 – Configuración de bobinas de Helmholtz cuadradas [3]

Tomando como referencia esta figura, el campo magnético sobre el eje z se calcula por medio de la ecuación 4.1.1:

$$B_z(z) = \frac{2\mu_0 N I a^2}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{\left(a^2 + \left(z + \frac{h}{2}\right)^2\right) \cdot \left(2a^2 + \left(z + \frac{h}{2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{\left(a^2 + \left(z - \frac{h}{2}\right)^2\right) \cdot \left(2a^2 + \left(z - \frac{h}{2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \right] z \quad (4.1.1)$$

Donde se tiene,

- a = Longitud media del lado de la bobina
- h = Distancia entre las bobinas
- z = Distancia entre el centro de separación y el punto evaluado

Para establecer el campo magnético en las bobinas, se asume que éste es constante y uniforme en el centro de ellas. De esta manera, la ecuación 4.1.1 se puede desarrollar mediante un desarrollo de series de Taylor. 4.1.2.

$$B_z(z)|_{|z| \leq a/2} \approx B_z(z=0) + \frac{\partial B_z}{\partial x} \Big|_{z=0} \cdot z + \frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} \Big|_{z=0} \cdot z^2 + \frac{1}{3!} \cdot \frac{\partial^3 B_z}{\partial z^3} \Big|_{z=0} \cdot z^3 + \frac{1}{4!} \cdot \frac{\partial^4 B_z}{\partial z^4} \Big|_{z=0} \cdot z^4 \quad (4.1.2)$$

Realizando el desarrollo en series de Taylor de la ecuación 4.1.2 alrededor de $z=0$ se determina que por simetría $B_z(z)$ es una función par, lo que asegura que todas las derivadas impares de $B_z(z)$ son nulas. Resolviendo el término de la segunda derivada, se obtiene la condición de uniformidad de las bobinas de Helmholtz cuadradas que relacionan la distancia de separación h con la longitud media del lado de la bobina a ($h=1,089 \cdot a$), que al ser reemplazada en 4.1.1 y evaluada en $z=0$, genera la expresión del campo magnético en el centro de separación de las bobinas cuadradas 4.1.3.

$$B_z(0) \approx \frac{4\mu_0 NI}{1,2965\pi\sqrt{2},2965 \cdot a} \quad (4.1.3)$$

Seguidamente, se calcula la cuarta derivada evaluada en $z=0$. Con lo que se obtendrá la expresión para la configuración de bobinas de Helmholtz cuadradas. Esta expresión, 4.1.4, es una muy buena aproximación siempre y cuando se cumpla que $|z| \leq 0,5445 \cdot a$.

$$B_z(z)_{|z| \leq 0,5445 \cdot a} \approx \frac{4\mu_0 NI}{1,2965\pi\sqrt{2},2965 \cdot a} \cdot \left[1 - 0,8068 \cdot \left(\frac{z}{a}\right)^4 \right] \quad (4.1.4)$$

En términos generales, la distribución de campo magnético en unas bobinas de Helmholtz será homogénea solo para una determinada área ubicada en la mitad de la distancia de separación del par de bobinas cuadradas.

Para hacer un pequeño estudio de la homogeneidad del campo magnético y poder verificar que el campo es homogéneo en la mitad de la distancia de separación entre el par de bobinas de Helmholtz cuadradas (vale el mismo criterio para bobinas circulares) se tiene la ecuación 4.1.5. Dicha homogeneidad es denominada H y trata de una medida de la variabilidad del campo magnético dentro de una región definida en el espacio. Normalmente, este valor se indica como una diferencia porcentual entre la magnitud del campo magnético en el centro de separación de las bobinas, tal y como se puede observar en la citada ecuación. El valor de homogeneidad de campo magnético depende de los requerimientos de la aplicación, valores típicos de esta variable serían $\pm 0,1\%$, $\pm 0,5\%$ y $\pm 1\%$ [3].

$$H (\%) = \frac{B_i - B_0}{B_0} \cdot 100 \quad (4.1.5)$$

Donde,

- B_0 es el campo magnético localizado en el centro de las bobinas.

- B_i trata del campo magnético en otro punto dentro del volumen comprendido dentro de las bobinas (excluyendo el centro).

Si reemplazamos la primera ecuación presentada `refeq:campoMagZ` en la ecuación mostrada sobre la homogeneidad 4.1.5 se puede obtener la relación entre una longitud determinada con campo magnético uniforme sobre el eje Z y la longitud media del lado de las bobinas (denominada a). Sin embargo, la solución analítica completa resulta ser muy compleja, por lo que se realizará una aproximación para campos magnéticos en el intervalo $|z| \leq 0,5445 \cdot a$ haciendo uso de la ecuación obtenida para unas bobinas de Helmholtz cuadradas 4.1.4, obteniendo la expresión para z/a 4.1.6 [3]:

$$|z| \leq \left(\frac{H}{80,68} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot a \quad (4.1.6)$$

Una vez explicado el funcionamiento de un par de bobinas de Helmholtz para un eje (en este caso se ha explicado para el eje z , pero es exactamente lo mismo para los demás ejes), se puede observar el sistema encargado de la generación de campo magnético uniforme en los tres ejes, teniendo tres pares de bobinas de Helmholtz cuadradas (una por cada eje X , Y y Z) tal y como se puede observar en la figura 4.7. Una ventaja del uso de bobinas cuadradas frente a las circulares es que permiten una mayor homogeneidad, mejor uso del volumen, facilidad de implementación y menor susceptibilidad a errores de construcción (ya que con los medios de los que se disponen, no sería posible realizar unas bobinas de Helmholtz perfectamente circulares).

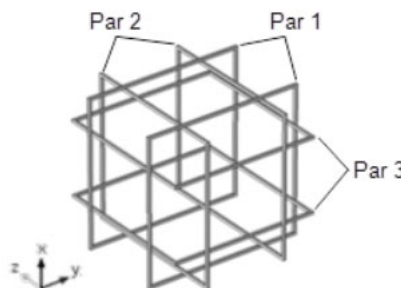


Figura 4.7 – Sistema de bobinas de Helmholtz cuadradas

Tanto las dimensiones de cada par de bobinas así como las distancias de separación dependerán de las restricciones de la aplicación que se le desee dar al sistema de bobinas de Helmholtz así como del volumen de trabajo en el que se quiera tener un campo magnético uniforme. Para este caso, se quiere que el volumen de trabajo sea suficiente como para albergar en su interior un [picosatélite](#) de tipo [CubeSat](#) y capaz de hacer simulaciones de campo magnético terrestre en su interior, para poder simular el campo magnético que será soportado por este picosatélite una vez en órbita. Para ello, además de generar dicho campo, debe de ser capaz de anular el campo magnético terrestre y, a partir de ahí, hacer las

simulaciones pertinentes.

Llegado a este punto, hay que definir los parámetros más importantes de diseño para un sistema de bobinas de Helmholtz como el visto anteriormente. Una buena elección de dichos parámetros, supondrá un cumplimiento de los requisitos del sistema.

Dicho esto, se presenta uno de los parámetros más importantes a considerar, la resistencia (R) de cada bobina. Este parámetro se puede calcular con la ecuación 4.1.7:

$$R = \frac{\rho l}{s} = \frac{4\rho l}{\pi d^2} \quad (4.1.7)$$

Donde,

- ρ es la resistividad del cobre ($\rho_{cobre} = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$).
- l es la longitud del alambre.
- s es la sección transversal del alambre.
- d es el diámetro del alambre.

Otra ecuación importante es la de la inductancia (I), que se puede observar en la ecuación 4.1.8:

$$I = \frac{R\pi d^2}{4\rho} = 4ND \quad (4.1.8)$$

Donde, además de los parámetros presentados para la resistencia en la ecuación anterior 4.1.7, se tienen:

- N es el número de vueltas de alambre sobre la bobina.
- D es la longitud del lado de la bobina ($D = 2 * a$).
- a es, en este caso, el factor de inductancia mutua ($0,494 * 10^6$).

Otra de las limitaciones básicas para este tipo de bobinas es el de tiempo de subida del campo magnético en la bobina (τ). Este valor corresponde al valor entre el 10% y el 90% de la máxima intensidad de campo magnético y puede observarse en la ecuación 4.1.9:

$$\tau(10\% - 90\%) = 2,2 \cdot \frac{L}{R} \quad (4.1.9)$$

Por otro lado, la inductancia serie de las bobinas se puede calcular mediante 4.1.10:

$$L = \frac{2\mu_0 DN^2}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2D}{d}\right) - 0,774 \right] \quad (4.1.10)$$

Además, se define la inductancia mutua (M) para cada par de bobinas como 4.1.11:

$$M = \alpha \cdot N^2 \cdot a \quad (4.1.11)$$

4

Para todos estos cálculos, no se tiene en cuenta el acople entre pares de bobinas de Helmholtz de cada eje al ser prácticamente despreciables siempre y cuando las bobinas estén bien configuradas y situadas. Finalmente, la inductancia resultante para un par de bobinas será la suma de la inductancia serie con la inductancia mutua, lo que dará la ecuación 4.1.12:

$$L_r = L + M = \frac{4\mu_0 DN^2}{2\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2D}{d}\right) - 0,465 \right] \quad (4.1.12)$$

En esta sección, solo se ha presentado la parte totalmente teórica. Será en el capítulo 5 donde se obtendrán los valores que cumplan los requisitos de este proyecto haciendo uso de las fórmulas aquí expuestas.

CAPÍTULO

5

FABRICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se tratará el proceso de fabricación e implementación de todo el sistema que se ha seguido hasta la obtención del sistema final. Se empezará por la parte *hardware*, para acabar con la parte *software* del proyecto. Además, se mencionarán ciertos inconvenientes que han ido apareciendo, con el propósito de poder tenerlos en cuenta en un futuro, si se quiere realizar una nueva implementación, para no caer en los mismos errores de diseño que acabarían aumentando los costes y el tiempo de producción de este sistema.

5.1 Fabricación e implementación *Hardware*

El objetivo final de esta sección es el montaje del sistema final, para seguidamente realizar el software que permitirá el control sobre dicho sistema. Por ello, primeramente se comenzará por la fabricación de las bobinas de Helmholtz, con todo su procedimiento e implementación, para continuar con la conexión de dichas bobinas con la fuente de alimentación. Una vez el sistema está conectado y es capaz de generar campos, será necesaria la incorporación del [4] con todos sus sensores para la toma de datos, así como el puente-H para poder cambiar el sentido de la corriente. Todo esto a su vez conectado al ordenador, que será el encargado de controlar todo el sistema mediante Matlab. Por tanto, se irá desglosando todo el sistema por partes.

5.1.1 Fabricación de las bobinas de Helmholtz [9]

La necesidad de poder realizar un simulador de campos magnéticos lo suficientemente grande como para que un [CubeSat](#) quepa dentro del mismo, hace que haya que tomar una primera decisión de las dimensiones de las bobinas de Helmholtz. Teniendo en cuenta que tampoco se puede tomar unas medidas muy grandes, ya que aumentarían los costes, necesitando más cable de cobre para poder generar el mismo campo en el centro del generador (conclusión respaldada por la ecuación 4.1.3, donde se puede observar que a mayor tamaño de las bobinas, a será mayor, el número de vueltas N ha de ser mayor para generar el mismo campo teniendo en cuenta una misma intensidad I suministrada).

5.1.1.1 Cálculos teóricos

Para la realización de los cálculos, se parte de la disposición de cierto cable de cobre cuyas características son las mostradas en la tabla 5.1.

Diámetro (mm)	Resistencia (Ω/m)
0.5	0.0838

Tabla 5.1 – *Propiedades del cable de cobre utilizado*

Además, ya se dispone de las barras de aluminio con las que se fabricarán las bobinas. La elección de aluminio, es debido a que se trata de un material de fácil accesibilidad, barato y, aunque un buen conductor, no es un material magnético que pudiera alterar el campo uniforme que se desea generar. Por lo tanto, el perfil utilizado sería como el de la figura 5.1, donde se pueden ver las medidas en milímetros que proporciona el fabricante.

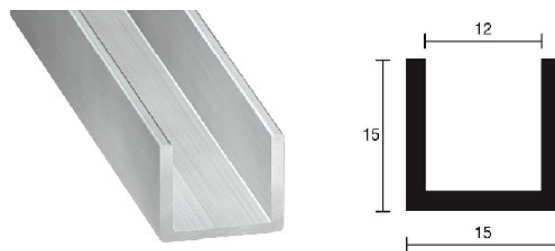


Figura 5.1 – *Perfil de aluminio (mm)*

Teniendo en cuenta de lo que se dispone en el laboratorio y por tanto, hay que hacer uso, ya se tiene una limitación impuesta por el cable de cobre junto con el perfil de aluminio. Esta limitación es la de la cantidad de cobre que cogería en una sección transversal del perfil de aluminio utilizado. Haciendo un cálculo del área del perfil de aluminio 5.1.1, teniendo en cuenta que se ha medido dicho perfil con un calibre en el laboratorio con el fin de obtener las medidas reales, se tiene que la base b del interior del perfil de aluminio tiene una longitud de $11.5mm$ mientras que la altura a es de, exactamente, $13,2mm$.

$$A_{aluminio} = b \cdot a = 11.5mm \cdot 13.2mm = 151.8mm^2 \quad (5.1.1)$$

Mientras que el área de la sección transversal de cobre es la calculada en la ecuación 5.1.2:

$$A_{cobre} = \pi r^2 = \pi \cdot (0.5mm)^2 = 0.7854mm^2 \quad (5.1.2)$$

Uniendo dichos cálculos, se puede calcular la cantidad máxima de cobre que sería posible pasar por el perfil de aluminio, simplemente con dividir dichas áreas. Esta cantidad máxima de cobre es precisamente el número de vueltas máximo N_{max} que podríamos dar a nuestro perfil de aluminio sin que el cobre rebase el borde superior del perfil. Dicho número puede verse calculado en la siguiente expresión 5.1.3:

$$N_{max} = \frac{A_{aluminio}}{A_{cobre}} = \frac{151.8mm^2}{0.7854mm^2} = 193.28 \approx 193Vueltas \quad (5.1.3)$$

Por tanto, se obtiene una primera limitación, y es que el número de vueltas N no puede ser mayor de 193, ya que no cogería en el perfil de aluminio seleccionado.

Dos cuestiones fundamentales son el número de vueltas y el tamaño de cada uno del par de bobinas. El valor del tamaño de las bobinas, es una decisión de diseño fundamental que hay que tomar, ya que, dependiendo del tamaño, se necesitará más hilo de cobre o menos (mayor o menor número de vueltas) para generar el campo magnético requerido.

En este caso, por tal de no tomar una decisión a la ligera, se ha tomado como referencia el buen trabajo realizado por Fabrizio Piergentili, Gian Paolo Candini y Marco Zannonien [9] por dos razones fundamentales de similitud: Utilizan bobinas de Helmholtz cuadradas y, el más importante, disponen de hilo de cobre de 0.511mm de diámetro (prácticamente el mismo que se utilizará en este proyecto, que es de 0.5mm). En este trabajo, se desea realizar un generador de campos magnéticos para el mismo propósito que se tiene en este proyecto cuyas características de diseño que se pueden observar en la tabla 5.2.

	X	Y	Z
Longitud de las bobinas (cm)	47	50	53
Longitud de hilo de cobre (m)	188	200	212

Tabla 5.2 – Características mecánicas de referencia [9]

En este caso, se desea realizar unas bobinas lo más grandes posibles (al menos, algo más que las utilizadas en el trabajo mencionado anteriormente [9]) pero, sin ser excesivamente grandes para que no supere ni el número de vueltas, ni el espacio del que se dispone en el laboratorio. Por tanto, se van a realizar unas bobinas cuya longitud de cada lado de la bobina se puede observar en la siguiente tabla 5.3. El hecho de que haya una diferencia entre un par a otro de 3cm , es debido a que es la distancia necesaria para que una bobina coja dentro de otra teniendo en cuenta que la barra de aluminio tiene un grosor de 1.5cm .

	X	Y	Z
Longitud (cm)	70	73	76

Tabla 5.3 – Longitud de bobinas

Con unas bobinas de características 5.2, son capaces de realizar una simulación de campo magnético terrestre para CubeSat. Por tanto, haciendo uso de la Ley de Biot-Savart [27], en su expresión 4.1.3 se puede hacer un cálculo del número de vueltas necesario para generar el campo magnético capaz de realizar dichas simulaciones, teniendo en cuenta que, las medidas del lado de cada una de las bobinas cuadradas que se van a tomar para este proyecto son las que se pueden observar en la tabla 5.3. Denotando como B_1 5.1.4 al campo magnético generado por el sistema de referencia y B_2 5.1.5 al que generará este sistema, se igualan dichas expresiones con las condiciones de que, para una misma intensidad dada, se genera el mismo campo. Entonces se llega a la expresión 5.1.6.

$$B_1 = \frac{4\mu_0 N_1 I_1}{1,2965\pi\sqrt{2,2965} \cdot a_1} \quad (5.1.4)$$

$$B_2 = \frac{4\mu_0 N_2 I_2}{1,2965\pi\sqrt{2,2965} \cdot a_2} \quad (5.1.5)$$

Con $B_1 = B_2$ y $I_1 = I_2$, se tiene:

$$N_2 = \frac{N_1 \cdot a_2}{a_1} \quad (5.1.6)$$

Con esta expresión, ya se calcula el número de vueltas necesario para cada una de las bobinas de Helmholtz, así como el hilo de cobre que va a ser necesario (dato fundamental, ya que te tiene que disponer de ese hilo y hacer bien los cálculos para que no se acabe el hilo en mitad del bobinado y tener que empezar de nuevo o realizar empalmes, perdiendo

calidad). Los datos mecánicos finales del sistema se pueden observar en la tabla 5.4

	X	Y	Z
Lado de la bobina a (cm)	70	73	76
Número de vueltas N	148.93 \approx 149	146	143.39 \approx 144
Longitud de cobre(m)	417.2	426.32	437.76

Tabla 5.4 – *Características mecánicas finales*

Como se puede observar, ninguna de las bobinas supera el número máximo de vueltas calculado 5.1.3, además, la cantidad total de hilo de cobre utilizado será de 1281.28m está disponible en laboratorio. Por lo tanto, es viable la fabricación de este sistema.

Con todos estos datos y haciendo uso de las fórmulas 4.1.7 y $D = 0.5445 \cdot a$, siendo a la longitud del lado de la bobina, se puede obtener la tabla de especificaciones mecánicas y eléctricas de cada una de las bobinas de Helmholtz para cada eje 5.5:

	X	Y	Z
Lado de la bobina, a (cm)	70	73	76
Número de vueltas, N	148.93 \approx 149	146	143.39 \approx 144
Longitud de cobre (m)	417.2	426.32	437.76
Separación entre par de bobinas, D (cm)	38.38	40.02	41.38
Resistencia, R (Ω)	36.12	36.91	37.90

Tabla 5.5 – *Características mecánicas y eléctricas finales de las bobinas de Helmholtz*

Ya se tiene todo lo necesario para proceder con el proceso de fabricación.

5.1.1.2 Proceso de fabricación y montaje

En primer lugar, se cortan las barras de aluminio con las medidas calculadas, es importante que el corte se haga en triángulo, para que encajen bien. Una vez cortadas, se unen formando cuadrados, haciendo uso de dos tornillos y una escuadra de aluminio para la unión entre dos trozos y, finalmente, se va a colocar cinta aislante en los bordes para evitar cortar el hilo de cobre cuando se tense formando el bobinado. Al final, se debería de tener una espira cuadrada como la mostrada en la imagen 5.2. En esta imagen se puede apreciar las seis estructuras para la fabricación de tres bobinas de Helmholtz dos a dos (una para cada eje).

Una vez se tiene la estructura, se pasa al bobinado. Para dicho bobinado, hay que tener en cuenta el número de vueltas de hilo de cobre que hay que darle a cada bobina, que puede verse en la tabla 5.5. No se dispone de ninguna máquina que pudiera facilitar el bobinado de dichas estructuras, por tanto, se hace a mano. En caso de disponer de algún mecanismo que bobine, se recomienda su uso, ya que, aunque se intentó tensar lo máximo posible, no es lo mismo tensar a mano que con una máquina que realice dicho proceso (sin tener en cuenta el tiempo empleado). Por tanto, se procede con el bobinado tal y como se puede observar

en la imagen 5.3.



Figura 5.2 – Montaje de estructura para bobinas de Helmholtz cuadradas



Figura 5.3 – Bobinado

Finalmente, se le añade un poco de cinta adhesiva para evitar que se salga el hilo de cobre de las bobinas en las esquinas. Además, para evitar que el hilo de cobre de los dos extremos de la bobina esté colgado y a sus anchas, también se le añade cinta adhesiva para tenerlo lo más pegado a la bobina posible, a la espera de su unión mediante una soldadura con su otra bobina gemela (formando así un par de bobinas de Helmholtz para un eje). Se repite todo el procedimiento para cada bobina y para cada eje. Al final, cada una de las bobinas quedaría como la mostrada en la imagen 5.4.



Figura 5.4 – Resultado final

Ya se tienen las bobinas montadas, por tanto, se va a realizar ciertas mediciones para comprobar que todo se ha realizado correctamente y las bobinas son lo más iguales posibles entre pares. Para ello, se tomarán cada una de las bobinas por separado y se estudiará la resistencia y el campo generado para una intensidad dada. Estas mediciones se pueden observar en la tabla 5.6 donde se ven cada una de las bobinas por separado de cada par de bobinas de Helmholtz, denotando, por ejemplo, a cada una de las bobinas del eje X como X_1 y X_2 .

	Longitud de la bobina real, a (cm)	R (Ω)	I (A)	B (Gauss)
X_1	73.2	38.91	1	2.17
X_2	73.2	37.18	1	2.13
Y_1	76.2	38.81	1	2.35
Y_2	75.9	37.92	1	2.53
Z_1	70.9	36.91	1	2.81
Z_2	70.6	38.53	1	2.32

Tabla 5.6 – Características reales de las bobinas

Las medidas de campo magnético han sido realizadas por el Gaussímetro Hirst GM08 [11]. Mientras que las medidas de resistencia de las bobinas se han tomado con el multímetro HP3478 [10].

Observando la tabla anterior 5.6, se puede ver que las resistencias en el par de bobinas es bastante diferente en algunos ejes. Esto hace que el campo magnético generado en su interior no sea uniforme. Debido al modo de bobinado, que se hizo totalmente a mano, era de esperar tener algún error de número de vueltas, por lo que hay bobinas que se le ha dado más o menos número de vueltas. Por tanto, se procederá a realizar un ajuste, para hacer que las bobinas sean lo más similares posibles (siempre aceptando un margen de error). Mediante el ajuste, se irá cortando hilo de cobre de las bobinas que tienen una resistencia más alta, de manera que queden lo más similares posibles. Después de dicho ajuste, se obtiene otra tabla, 5.7, de características, ya sí con unas resistencias similares y totalmente aceptables.

	Longitud de la bobina real, a (cm)	R (Ω)	I (A)	B (Gauss)
X_1	73.2	37.72	1.026	2.05
X_2	73.2	37.52	1.026	2.13
Y_1	76.2	38.18	1.026	2.56
Y_2	75.9	38.28	1.026	2.54
Z_1	70.9	36.95	1.026	2.37
Z_2	70.6	37.18	1.026	2.25

Tabla 5.7 – Características reales de las bobinas después del ajuste

Ya si se tienen unas medidas muy aceptables. Si se compraran las resistencias para cada eje, se obtienen unas diferencias muy pequeñas tal y como se pueden observar en la siguiente tabla 5.8.

Eje	Diferencia
X	0.2
Y	0.1
Z	0.23

Tabla 5.8 – *Diferencia en resistencia*

Una vez se tienen todas las bobinas, se procede a su unión formando un solo sistema tal y como se podía apreciar en la figura 4.7. De esta manera, se tendrá un par de bobinas de Helmholtz para cada eje. Ya así, hay que unir cada par de bobinas soldando sus extremos. La única consideración a tener en cuenta, es que el par de bobinas debe de ser soldado de manera que la corriente por ambas vaya en el mismo sentido (además de tener la consideración que hay que raspar un poco los bordes del hilo de cobre). Gracias a esto, el campo magnético generado irá en el mismo sentido en cada par de bobinas y no se anulará una bobina a otra. Después de unir las bobinas, nos queda un generador como se puede observar en la siguiente imagen 5.5.

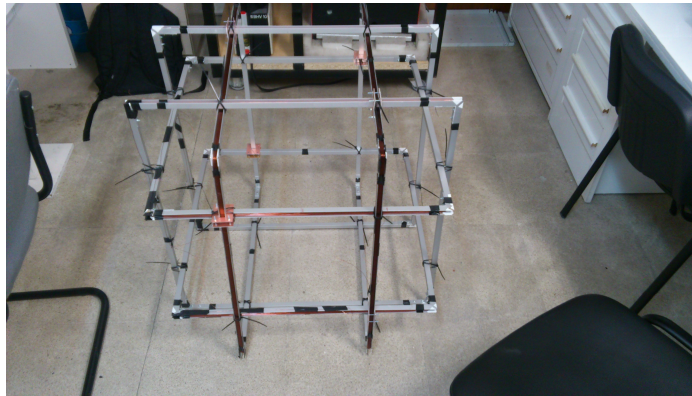


Figura 5.5 – *Unión de las bobinas de Helmholtz*

Para fijar el generador, en primera instancia, se ha hecho uso de bridas, así como de unas piezas de presión creadas con la fresadora. En un futuro, esto será cambiado para ganar en estética a la vez que en fijación. Además, para darle más solidez al generador, se hace uso de unos tacos de madera, para que se pueda también fijar y hacer presión entre la bobina más grande y la más pequeña, evitando el espacio que quedaba entre ellas.

Finalmente, para acabar la parte de las bobinas de Helmholtz, se ha realizado una pieza con la fresadora, con el objetivo de realizar a través de dicha pieza la conexión con las bobinas mediante unas bornas tal y como puede observarse en la siguiente imagen 5.6.

Con todo lo expuesto, ya se tiene un sistema de bobinas de Helmholtz para los tres ejes. Lo siguiente será el montaje de los demás dispositivos del sistema, tales como el puente en H y los distintos sensores de Arduino.

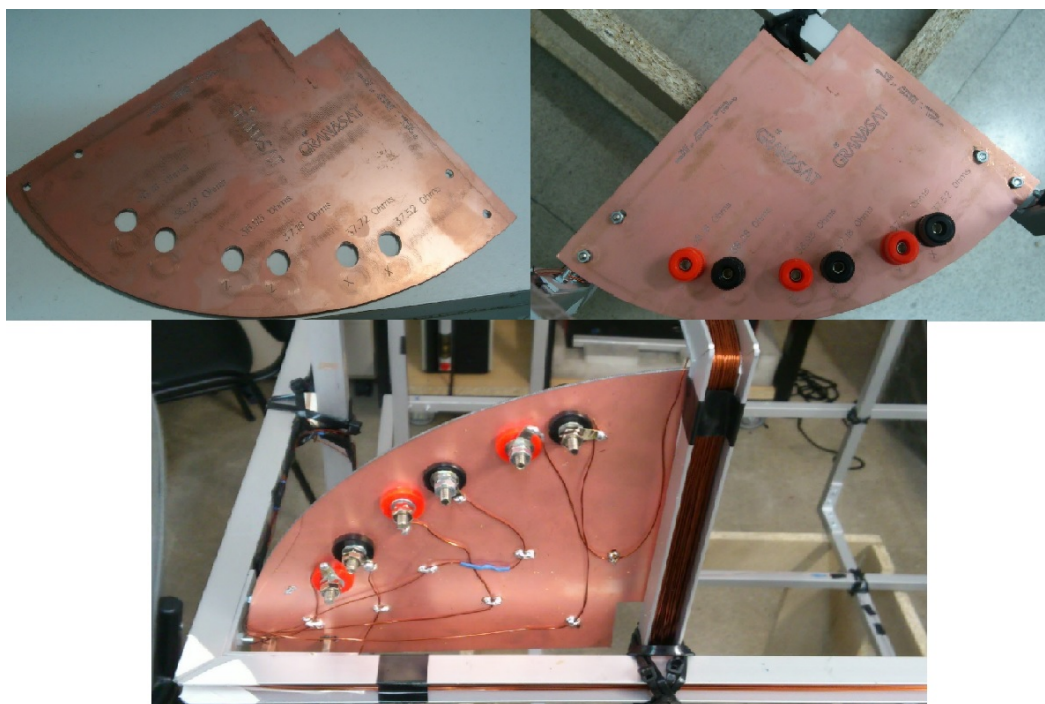


Figura 5.6 – Pieza de conexión para las bobinas de Helmholtz

5.1.2 Modificación del puente en H

Este dispositivo, como ya se ha comentado en el capítulo 4 4.1.2, se ha realizado en el proyecto de *Alejandro Toral* [14]. Para este caso, simplemente se ha hecho una pequeña modificación para poder aprovechar al máximo el integrado STL298 [22], ya que se tenían ciertas limitaciones en el dispositivo que no permitían aprovechar al máximo el integrado mencionado. El dispositivo que contiene dicho integrado, antes de la modificación, es el siguiente 5.7:

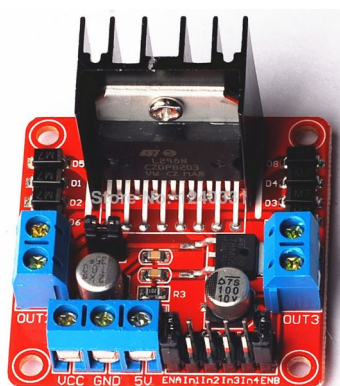


Figura 5.7 – Puente-H para un eje

Para más detalles en este dispositivo, revisar el proyecto fin de carrera mencionado. En este caso, se ha procedido a cambiar uno de los condensadores, ya que, aunque el integrado STL298 acepta un voltaje de hasta 46V, dicho condensador (el de más a la izquierda en la

figura anterior 5.7 imponía una limitación de voltaje de 35V, provocando que no se pueda aprovechar al máximo el puente en H y, por tanto, limitando el campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz. Además, debido a lo delicados que son los pines de entrada para el control del sentido de la corriente de los distintos puentes en H (Int1, Int2, Int3 e Int4), ya que, un error en el control de dichos pines pueden estropear por completo el integrado provocando una mala polarización del puente, se han colocado unos leds para controlar de manera visual la entrada que se está produciendo en cada momento. Para entender mejor la mala polarización de dicho dispositivo, podemos observar el diagrama de bloques del integrado STL298 en la figura 5.8. Finalmente, los puentes-H (uno por cada eje) modificados se pueden observar en la figura 5.9.

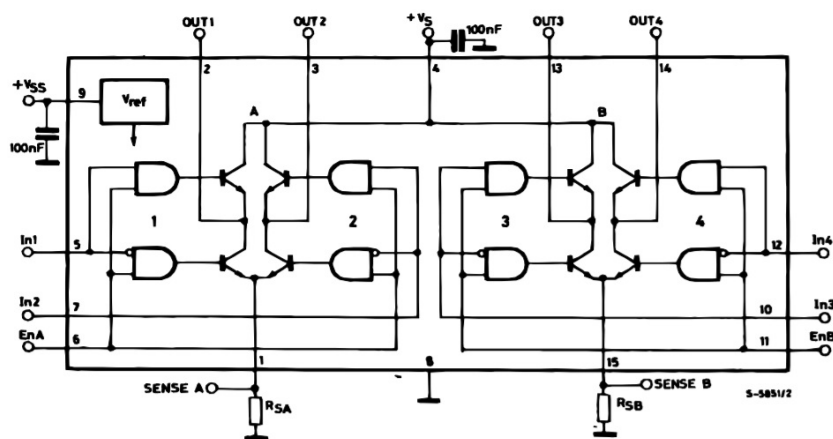


Figura 5.8 – Diagrama de bloques STL298

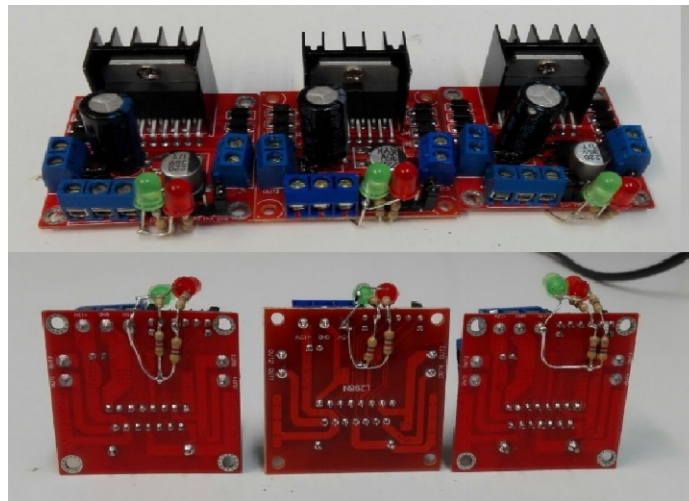


Figura 5.9 – Puentes-H mejorados

La configuración de cada uno de estos dispositivos para cada eje, se puede observar en la tabla 5.9. En dicha tabla, se muestra un esquema de cómo deben de ser conectados los cables de los pines que van desde el bus digital de la fuente de alimentación Agilent N6705A [2] a los puentes-H.

Bobina	Cable	Pin de la fuente	Entrada puente-H
X	Marrón	3	Int3
X	Azul	4	Int4
Y	Amarillo	1	Int1
Y	Blanco	2	Int2
Z	Rosa	5	Int1
Z	Verde	6	Int2

Tabla 5.9 – Características reales de las bobinas después del ajuste *

* *El Gris es el cable de masa para el control de los pines del bus digital.*

Con todos estos detalles, ya se está en disposición de ver cómo queda el dispositivo final que hará de intermediario entre la salida de la fuente de corriente y las bobinas de Helmholtz para poder controlar el sentido de la corriente. Dicho dispositivo se puede apreciar en las figuras 5.10 y 5.11. Para más información sobre este dispositivo, consultar el proyecto de *Alejandro Toral* [14].

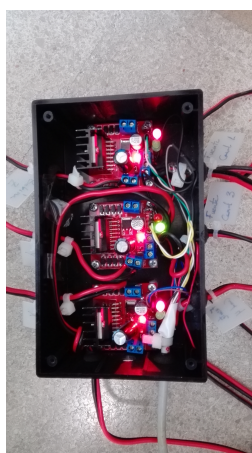


Figura 5.10 – Dispositivo Puentes-H

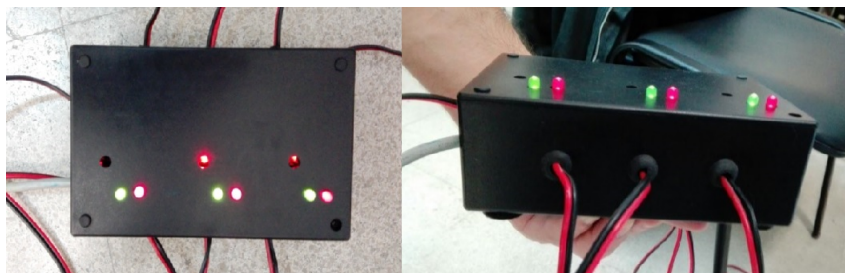


Figura 5.11 – Caja contenedora Puentes-H

5.1.3 Arduino y sensores

En esta sección, se va a ver la conexión de los tres sensores que finalmente han sido utilizados, dichos sensores ya han sido mencionados en el capítulo 4 4.1.4 más la inclusión de un barómetro, para conocer la presión y temperatura en el momento de las mediciones. Este último dispositivo se ha incluido en el sistema pensando en un futuro, donde se puede hacer una medición mucho más precisa, teniendo en cuenta las variaciones que puede sufrir el campo magnético medido por los magnetómetros según la temperatura y presión. Dichos sensores son:

- Sensor magnético LSM303DLHC [21].
- Sensor magnético en los 3 ejes HMC5883L [12].
- Barómetro BMP180 [6].

La conexión de estos sensores es sencilla, ya que se hace mediante el bus I2C [26] del que dispone Arduino, conectando todos estos sensores en serie a los pines SDA y SCL tanto en la parte del sensor como en la del Arduino. El sensor LSM303DLHC ha sido soldado al HMC5883L ya que, para obtener medidas de campo magnético similares en ambos, han de estar situados en el mismo punto en el espacio. El conjunto de estos sensores se une con Arduino mediante un cable largo, de un metro y media aproximadamente, para que los sensores puedan estar en el centro de las bobinas de Helmholtz pudiendo tener el Arduino próximo al ordenador (ya que éste se conectará con el ordenador mediante un USB no muy largo). Estos sensores se pueden observar en la siguiente imagen 5.12.

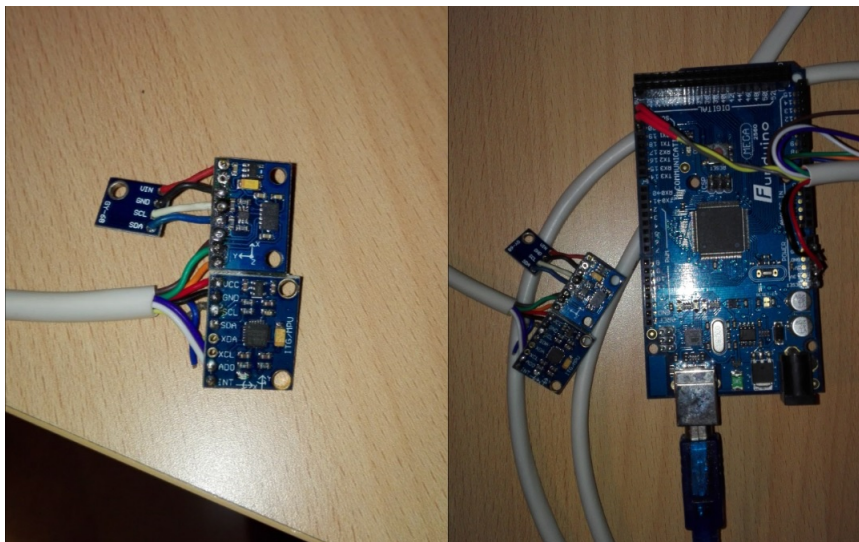


Figura 5.12 – Conjunto de sensores del sistema

Finalmente, para aclarar la conexión que se realiza entre el Arduino Mega 2560 [4], se ha realizado un esquema con la conexión entre dicho Arduino y los sensores. Este esquema puede ser observado en la figura 5.13.

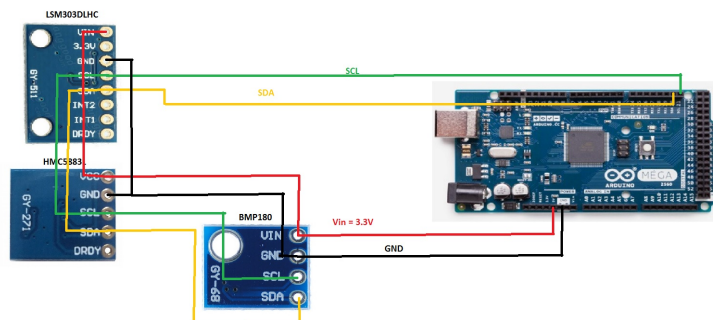


Figura 5.13 – Esquemático de la conexión de los sensores con Arduino

Ya se tienen conectados los sensores con el Arduino, y, a su vez, se ha comentado que Arduino va simplemente conectado con el ordenador de control mediante un bus **USB**. El siguiente paso será realizar el Software de control de dichos sensores con Arduino y, a su vez, realizar el protocolo de comunicación entre Arduino y el Software principal. Dicho Software con el programa principal será desarrollado en Matlab.

5.2 Implementación *Software*

En la parte Software de este proyecto, se tienen dos partes fundamentales. Una parte, más pequeña, encargada del entendimiento de los sensores, toma de lecturas, configuración y comunicación de Arduino con el ordenador. La segunda parte, es el grueso del programa, y trata de la interfaz de usuario para el control de todo el sistema mediante el **GUI** de Matlab, haciendo uso de las librerías **GPIB** [25] para el control de la fuente de alimentación Agilent N6705A. Por tanto, se va a tratar primero la parte de Arduino, para, seguidamente, englobarlo todo en la interfaz final de usuario en Matlab.

5.2.1 Arduino

El código del que va a tratar esta sección se puede observar en el CD adjunto a la memoria. Teniendo en cuenta este código, se va a explicar la funcionalidad del mismo.

Para la comunicación con Matlab, se ha realizado un protocolo de comunicación en el que el programa principal, en Matlab, manda instrucciones a Arduino, y éste contesta o realiza ciertas configuraciones sobre los sensores. Este protocolo, se basa simplemente en que Arduino se quede escuchando, mientras que Matlab manda caracteres a Arduino para realizar ciertas acciones. Estas acciones se pueden visualizar en la siguiente tabla 5.10.

Carácter	Acción
c	Obtener datos de calibración
d	Proceder con la calibración del sensor LSM303DLHC
h	Lista de ayuda con las opciones de comunicación disponibles
g	Detalles del sensor HCM5883L
j	Tomar medidas con sensor HCM5883L
a	Detalles del sensor LSM303DLHC
b	Tomar medidas con sensor LSM303DLHC (magnetómetro + acelerómetro)
n	Leer campo magnético en los ejes B_x , B_y y B_z (<i>LSM303DLHC</i>)
m	Leer aceleración en eje A_z (<i>LSM303DLHC</i>)
p	Configurar LSM303DLHC en rango $\pm 1.3 Gauss$
q	Configurar LSM303DLHC en rango $\pm 1.9 Gauss$
r	Configurar LSM303DLHC en rango $\pm 2.5 Gauss$
s	Configurar LSM303DLHC en rango $\pm 4.0 Gauss$
t	Configurar LSM303DLHC en rango $\pm 4.7 Gauss$
u	Configurar LSM303DLHC en rango $\pm 5.6 Gauss$
v	Configurar LSM303DLHC en rango $\pm 8.1 Gauss$
w	Tomar medida del barómetro BMP180 (extendida)
y	Tomar medida del barómetro BMP180 (Simplificada)

Tabla 5.10 – *Protocolo de comunicación*

5.2.2 Programa de control en Matlab

En esta sección se va a explicar el programa de control principal, desde el que se realiza todas las simulaciones. Se entrará en una explicación del algoritmo, para entender mejor su funcionamiento, para después continuar con la explicación de la interfaz a modo de manual de usuario.

5.2.2.1 Coils Simulator

En un principio, se tenía el primer problema de caracterizar las bobinas de Helmholtz, por lo que se realizó un primer programa llamado "coils_simulator". Por otro lado, se tiene otro programa, muy parecido al primero, llamado "magnetorquer_simulator", en el que se puede ver la reacción real de un magnetorquer haciendo mediciones sobre un eje. Ambos casos van a ser definidos detenidamente y ambos se encuentran dentro de la carpeta "GranaSAT_Tracker_V11/measure". El hecho de incluirlo dentro de "Granasat_Tracker" es debido a que, de esta manera, se puede completar aun más dicho programa, en el que se realizan simulaciones y seguimientos de órbitas satelitales y, en especial, de la Estación Espacial Internacional *ISS*. Para entender mejor la ubicación de los ficheros que serán usados, y debido a que la carpeta "GranaSAT_Tracker_V11" contiene más archivos, se puede observar el diagrama [5.14](#).

En este diagrama, se puede observar cómo está estructurado el programa con respecto a los archivos necesarios, teniendo en cuenta dónde se sitúan los datos de los diferentes instrumentos ya mencionados y los créditos de cada uno de los subprogramas (para las bobinas y los magnetorquers). Además, se tiene unas carpetas llamadas "database". Estas carpetas contendrán simulaciones guardadas con todos los datos de configuración de la simulación más los resultados. Todo esto se va a ver de forma más detallada en las siguientes secciones, donde se desglosará cada uno de los subprogramas por separado.

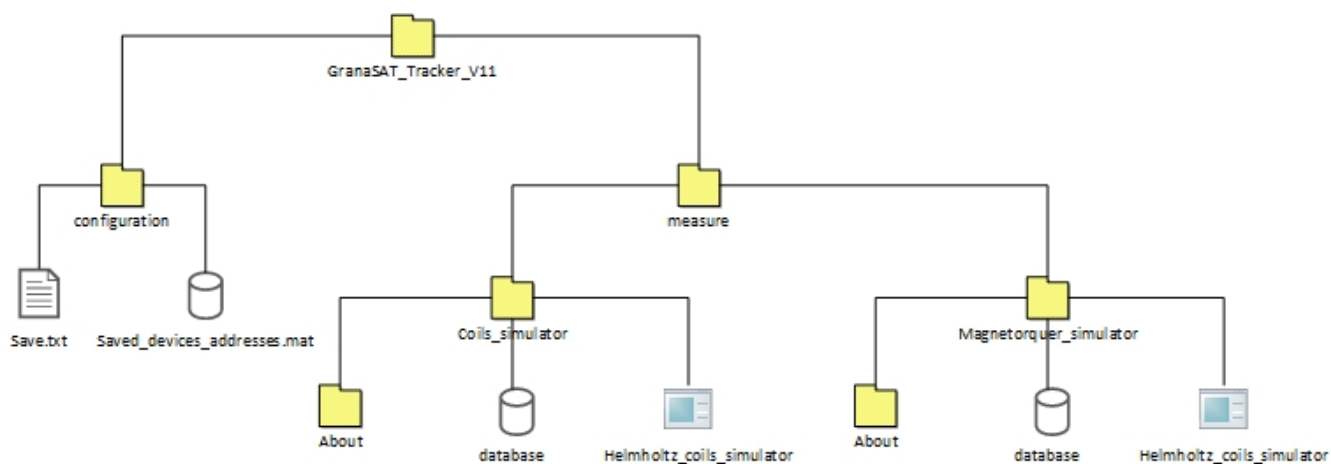


Figura 5.14 – Ubicación de archivos

El código para este programa se puede encontrar en el CD adjunto de este proyecto. Dicho código está debidamente explicado, por lo que se va a pasar a dar una explicación de funcionamiento del mismo de carácter general, más una descripción a nivel de usuario de toda su interfaz. Hay que resaltar que toda la interfaz gráfica está desarrollada en inglés.

A modo general, el comportamiento de este programa se puede ver en el diagrama de flujo 5.15. Más adelante, se mostrará el proceso al pulsar "Zero" y "Start" con otros diagramas de flujo cuando se explique este proceso.

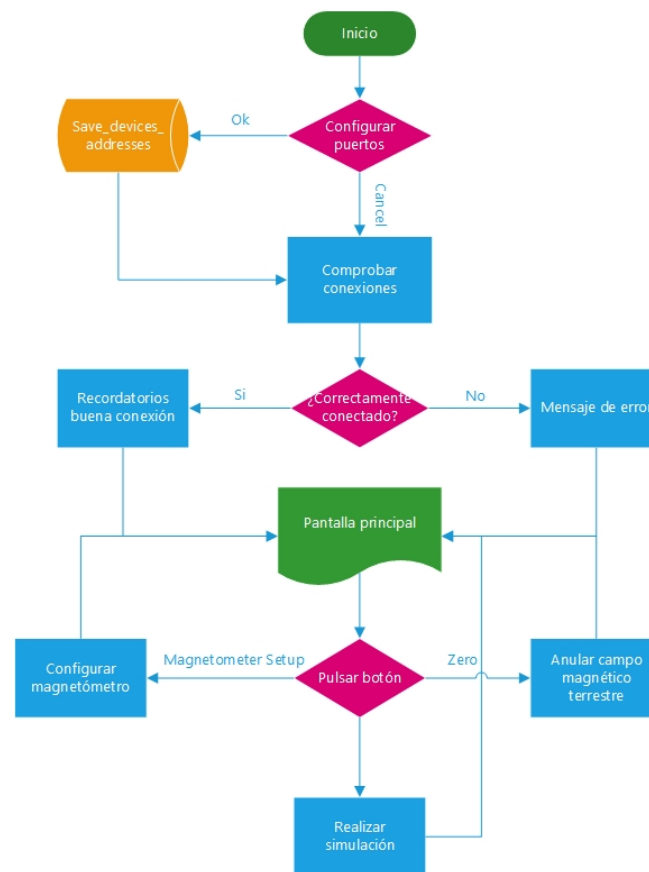


Figura 5.15 – *Coils simulator: Diagrama de flujo general*

Nada más ejecutar el fichero "*helmholtz_coils_simulator.fig*" en Matlab, aparece una pantalla en la que se muestra la configuración actual de los puertos en los que están conectados cada uno de los instrumentos, de los cuales, hay que poner correctamente el puerto al que está actualmente conectado el instrumento. Esta pantalla puede ser observada en la imagen 5.16. Aquí, te tienen todos los instrumentos que intervienen en el Granasat Tracker. Para el estudio de este proyecto, solo será de utilidad de la parte de "*GPIB Devices*" la fuente de alimentación Agilent_N6705A Power Source, cuyos datos son proporcionados por el programa de control de la fuente instalado en el ordenador. El otro instrumento que será tratado está en la parte de "*RS-232 Devices*", Arduino, del que habrá que poner el puerto al que se encuentra conectado. Al abrirse esta pantalla, muestra la última configuración con la que se trabajó, si el puerto ha cambiado, hay que poner el nuevo puerto en el que está conectado Arduino y, después de ello, se pulsa "Ok" para que se hagan efectivos estos cambios, lo que provocará que la nueva configuración sea guardada en los datos del sistema. En caso de pulsar sobre "Cancel", nada es guardado, se cargarán los datos de la última configuración (que son los mismos que en ese momento se pueden ver en esta pantalla de configuración de los puertos de los instrumentos). Seguidamente, se realiza un recordatorio para que los pines de la fuente de alimentación estén conectados y, en caso de tener Arduino correctamente conectado, aparece la pantalla principal. Por el contrario,

si Arduino no está correctamente conectado o se ha indicado un puerto de conexión incorrecto, aparece un mensaje de error informando que no se ha podido establecer la conexión con Arduino. Una vez pasado este proceso, se cargarán los datos de configuración de la última simulación que fue realizada con el simulador. Esto último es bastante útil para no tener que estar siempre rellenando todos y cada uno de los datos de la pantalla.

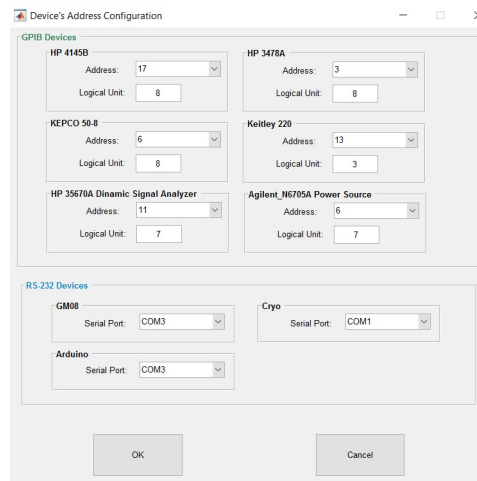


Figura 5.16 – Pantalla de configuración de instrumentos

Continuadamente a este proceso, se abre la pantalla principal 5.17.

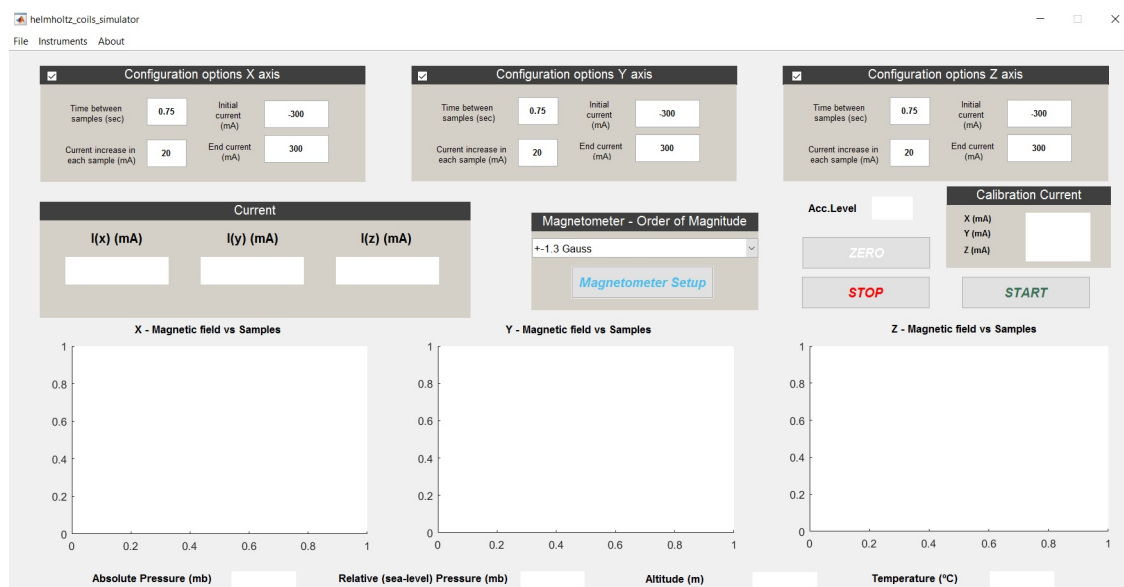


Figura 5.17 – Coils Simulator: Pantalla principal

Se va a ir desglosando cada una de las partes de la pantalla principal, de manera que quede todo completamente claro. Hay que añadir, que todos los botones, cuadros de introducción de datos o, incluso, cuadros de grupo están explicados de manera dinámica mediante "tooltips".

Estos *tooltips* se irán mostrando poco a poco en cada imagen que se presente, aunque no se llegarán a poner todos. La idea, es que valgan de recordatorio de todo el funcionamiento del programa, haciendo un resumen de para qué sirve cada opción o cuadro de la pantalla principal.

Lo primero que se puede apreciar, es tres cuadros (uno por cada bobina) para la configuración de la simulación que se realizará en el generador de campos magnéticos. Se va a detallar el del eje *X*, aunque los otros dos (para el *Y* y el *Z* son exactamente lo mismo). Este cuadro se puede observar de manera detallada en la imagen 5.18.

Figura 5.18 – Parámetros de configuración para eje *X*

Se tiene un *checkbox* en la esquina izquierda superior 5.19 que debe estar marcado si se quiere realizar la simulación sobre este eje. En caso de no marcarlo, no se realizará simulación alguna sobre dicho eje. Por tanto, si se realiza la anulación de campo magnético en el centro del generador y no se marca el *checkbox* del eje *X*. En dicho eje simplemente se introduciría la corriente necesaria para anular el campo magnético terrestre de manera constante.

Figura 5.19 – *Checkbox* de simulación para eje *X* con *tooltip*

Continuando por arriba a la izquierda, se puede ver "*Time between samples (sec)*" 5.20.

Figura 5.20 – *Tiempo entre muestras*

El valor introducido en este campo, marcará a qué velocidad ha de cambiar la corriente para esa bobina. Debido a la velocidad a la que puede tomar medidas el magnetómetro (0.25s), el tiempo entre muestras debe de ser un múltiplo de este valor. En caso contrario,

aparecerá un mensaje de error cuando se vaya a arrancar la simulación indicando que este valor debe de ser múltiplo de 0.25 segundos. Como se puede observar, el tooltip está debidamente explicado para que siempre se tenga en cuenta dicha regla de ejecución. Para saber la velocidad de trabajo del magnetómetro en este sistema, se introdujeron marcas de tiempo en el código Matlab (función *tic-toc*), de manera que, aproximadamente, tardaba de media unos 0.214 segundos en tomar una medida. Por tanto, con la idea de redondear, hacerlo más cómodo, además de asegurar que se ha tomado la medida ya que el valor máximo que se tomó fue de 0.238 segundos, se impuso 0.25 segundos.

Justamente debajo, se tiene el incremento de corriente en cada muestra tomada 5.21, "*Current increase in each sample (mA)*". Por ejemplo, en el campo descrito anteriormente "*Time between samples (sec)*" se ha puesto un valor de 0.75 segundos, mientras que en este campo se pone 20 mA, esto quiere decir que cada 0.25 segundos se tomará una medida del magnetómetro, pero que, al llegar a los 0.75 segundos (a la tercera medida del magnetómetro tomada), se incrementará la corriente en 20 mA, y así sucesivamente hasta alcanzar la corriente final.

Figura 5.21 – Incremento de corriente

Finalmente, los dos campos de la derecha "*Initial current (mA)*" y "*End current (mA)*", indican la corriente inicial de la que se parte, y la final en la que acaba la simulación. Ambos tienen la misma descripción en el *tooltip*, con la salvedad de que una es la corriente inicial, y otra la final 5.22. Ambas corrientes tienen una restricción por software, y es que cuando se detecta que el voltaje supera los 48V, se deja la máxima corriente permitida sin sobrepasar este voltaje. Dicha limitación es impuesta para no estropear el puente-H 4.1.2, ya que, si se mira en el datasheet [22] el integrado *STL298* tiene dicha limitación de operación.

Figura 5.22 – Corriente inicial y corriente final

En mitad, de izquierda a derecha, lo primero que se puede observar es cuadro cuadro "*Current*" 5.23 con los tres ejes. En este cuadro se verá la corriente que se está introduciendo en cada eje durante la simulación. En caso de que la simulación para un eje haya acabado, aparecerá en su recuadro correspondiente "*No Value*".

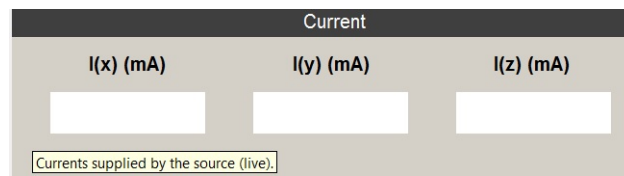


Figura 5.23 – Corrientes durante la simulación

A la derecha de este último cuadro, se encuentra el encargado de ajustar la sensibilidad del magnetómetro 5.24.

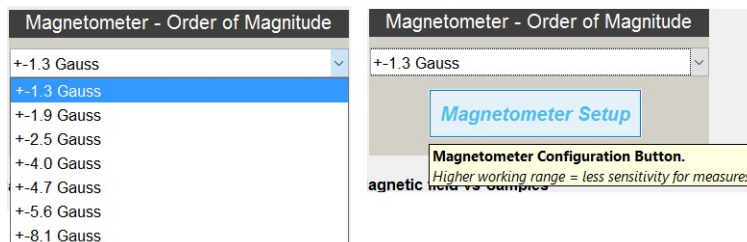


Figura 5.24 – Configuración del magnetómetro

Se puede fijar el rango de trabajo del magnetómetro. Esta parte es usada antes de lanzar la simulación, ya que es preciso realizar la configuración previamente. En caso de no seleccionar ningún rango de trabajo, se pondrá el ± 1.3 . Es de especial interés ajustar dicho rango, ya que a mayor rango, se pierde sensibilidad, pero, en caso de trabajar a más Gauss a los que esté configurado el magnetómetro, éste se saturará sin poder llegar a alcanzar la medida correctamente. De modo que, se selecciona el rango de trabajo en el que se quiere operar, y se pulsa sobre el botón "*Magnetometer Setup*". Una vez pulsado este botón, se enviará el código correspondiente al área de trabajo seleccionada a Arduino, que configurará el magnetómetro. Los códigos correspondientes al rango de trabajo del magnetómetro se pueden observar en la tabla 5.10.

Una cuestión muy importante, es el saber si el magnetómetro está completamente nivelado ya que, si no está bien situado, la medición, por ejemplo, sobre el eje Z, sería la que genera dicho eje más cierto campo magnético de cualquiera de los otros dos ejes que se mezclaría en dicha medición. Aun así, siempre un poco de campo se va a mezclar y es muy complicado obtener el campo sobre ese eje de manera exacta, pero, al tenerlo nivelado, se tendrán medidas mucho más precisas. Para ello, se ha incluido el campo "*Acc.Level*" 5.25. Aquí, se mostrará la aceleración medida sobre el eje Z. Dicha aceleración, si está correctamente nivelado, será lo más parecida posible a la aceleración de la gravedad $9.8m/s^2$. Por tanto, se toman medidas de dicha aceleración, de manera que este recuadro aparecerá en rojo si dicha medición no está dentro de unos márgenes impuestos (si la medida no se encuentra entre $9.2 m/s^2$ a $9.99 m/s^2$, aparecerá en rojo indicando que hay que nivelar mejor el magnetómetro dejando el eje Z apuntando lo máximo posible al centro de la tierra). En caso de estar dentro de los márgenes, dicho recuadro aparecerá en verde, indicando que se puede proceder con las simulaciones.

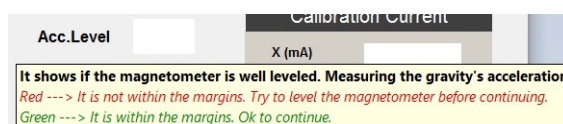


Figura 5.25 – Nivelado mediante aceleración de la gravedad

Justo debajo, se tienen las tres gráficas que mostrarán el campo magnético medido por el magnetómetro. Este campo, durante la simulación, estará centrado en cero para poder ver en vivo y de manera más sencilla la diferencia entre los tres ejes, así que aparecerá una línea en cero, para poder comprar mejor. Una vez acaba la simulación, automáticamente se ajustan las gráficas a los datos tomados para que puedan observarse mejor. Dichas gráficas son las que se pueden observar en la imagen 5.26.

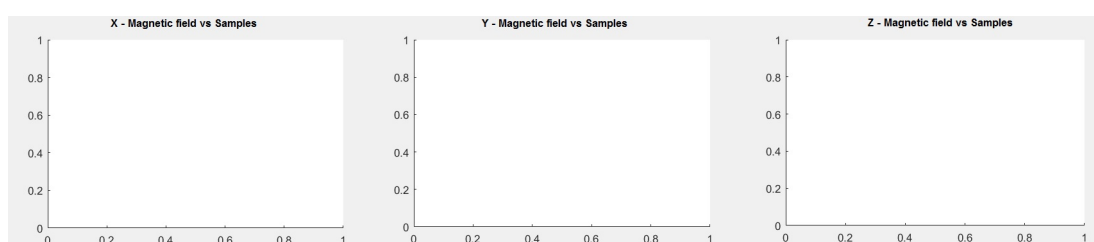


Figura 5.26 – Sección para campos magnéticos medidos por LSM303DLHC

Dejando para el final los botones de "Zero", "Start" y "Stop", así como los menús de los que se dispone, quedaría la última fila, en la que se tomarían medidas del barómetro BMP180 [6]. Aquí se ven valores de presión absoluta, presión relativa (teniendo como referencia el nivel del mar), altitud y temperatura. 5.27. Estas medidas son tomadas y actualizadas al abrir la interfaz, así como cada vez que se pulsa sobre el botón de "Start" para comenzar una simulación.

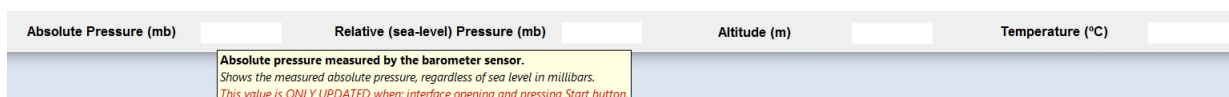


Figura 5.27 – Sección para medidas tomadas en barómetro BMP180

En el menú se tienen las opciones de "Load", "Save", "Instruments" y "Credits" 5.28.

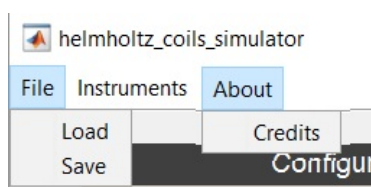


Figura 5.28 – Menús disponibles

En dichos menús, si pulsamos sobre "Load", se podrá cargar una simulación anteriormente guardada (mediante "Save"). Al cargar dicha simulación, se pueden ver todos los datos obtenidos en la simulación así como los parámetros que se introdujeron a la hora de realizar

la simulación. Un ejemplo de cómo quedaría una simulación cargada sería el que se puede observar en la imagen 5.29.

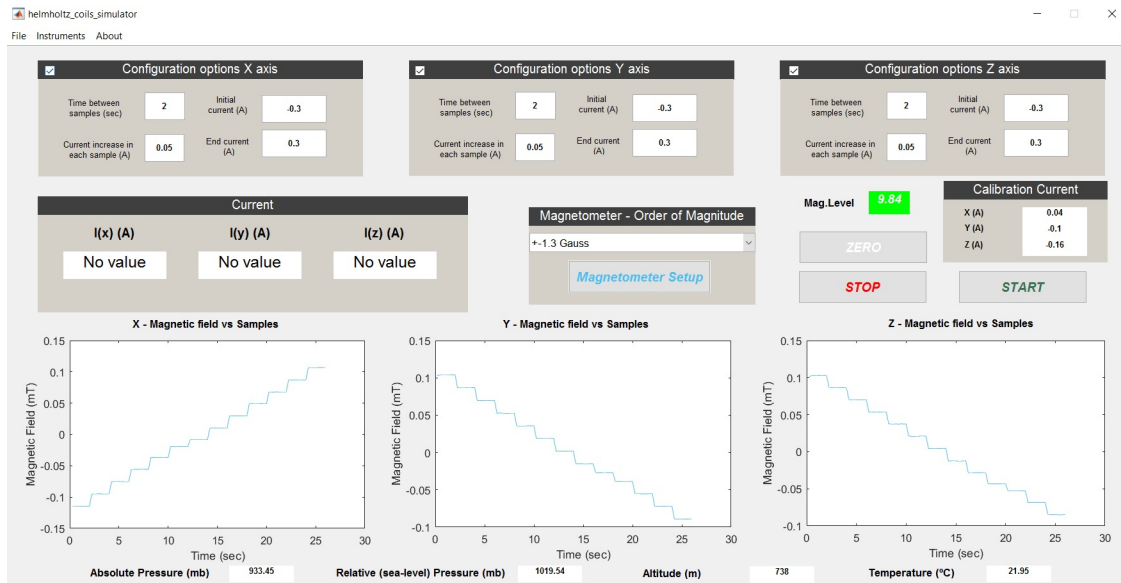


Figura 5.29 – Ejemplo de simulación cargada (Load)

El menú de "Instruments" lo que hace es abrir la pantalla de configuración de las direcciones de los instrumentos, la misma que se abre al arrancar el programa 5.16. Finalmente, al pulsar sobre "Credits" se mostrarán los créditos. Dichos créditos son los siguientes 5.30.

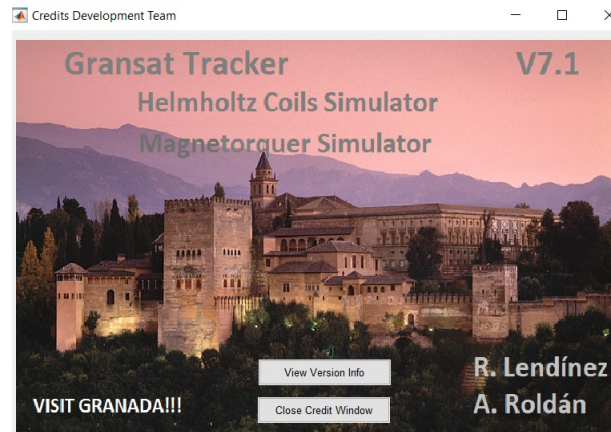


Figura 5.30 – Coils simulator: Créditos

Para el final, en la explicación de esta interfaz de usuario, se han dejado los botones de control para las simulaciones. El primero de ellos, el botón de "Stop" (que se puede observar en la figura 5.31 junto a su tooltip), simplemente realiza una interrupción en cualquiera de las simulaciones que se esté realizando y las para en ese preciso momento. A la hora de realizar una simulación, ésta siempre estará pendiente de este botón, por si tiene que parar.

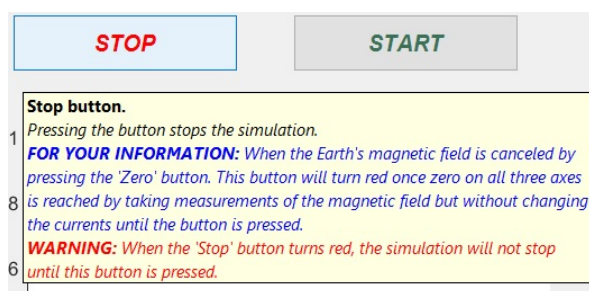


Figura 5.31 – Coils simulator: Botón Stop

Una particularidad de este botón, es que a la hora de alcanzar el campo magnético cero en el centro del generador, anulando el campo magnético terrestre (Pulsando "Zero"), esta simulación no acabará hasta que no se pulse sobre "Stop", por lo que dicho botón pasará a ser rojo, indicando que la simulación ha terminado, pero se seguirá tomando medidas y se dejará la corriente suministrada constante. La explicación de este funcionamiento, viene a que, de esta manera, se puede manipular el instrumento que se tiene en el centro del simulador, viendo "en vivo" cómo estas manipulaciones alteran el campo magnético medido. Al ser de una interfaz autoexplicativa, se recordará esta acción al situar el puntero encima de dicho botón, como se puede observar en la imagen anterior.

El botón "Zero", figura 5.32, hace que se genere un campo magnético en el interior de las bobinas de Helmholtz contrario al campo magnético terrestre, para cada eje, haciendo que el campo magnético medido en el centro del generador sea cero.

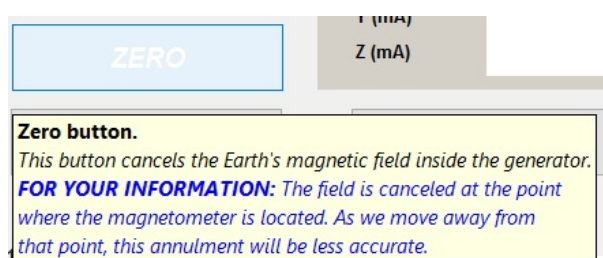


Figura 5.32 – Coils simulator: Botón "Zero"

Para explicar más detenidamente el proceso llevado a cabo cuando este botón es accionado, se va a partir del diagrama de flujo mostrado en la figura 5.33. Como puede observarse en dicho diagrama, lo primero que se realiza es una inicialización de los datos, donde se limpian las gráficas, los valores mostrados en la interfaz, y las variables que se utilizan para la simulación, fijando las corrientes de la fuente de alimentación a cero. Además, en esta inicialización, se toma una primera medida para el campo magnético medido en los tres ejes.

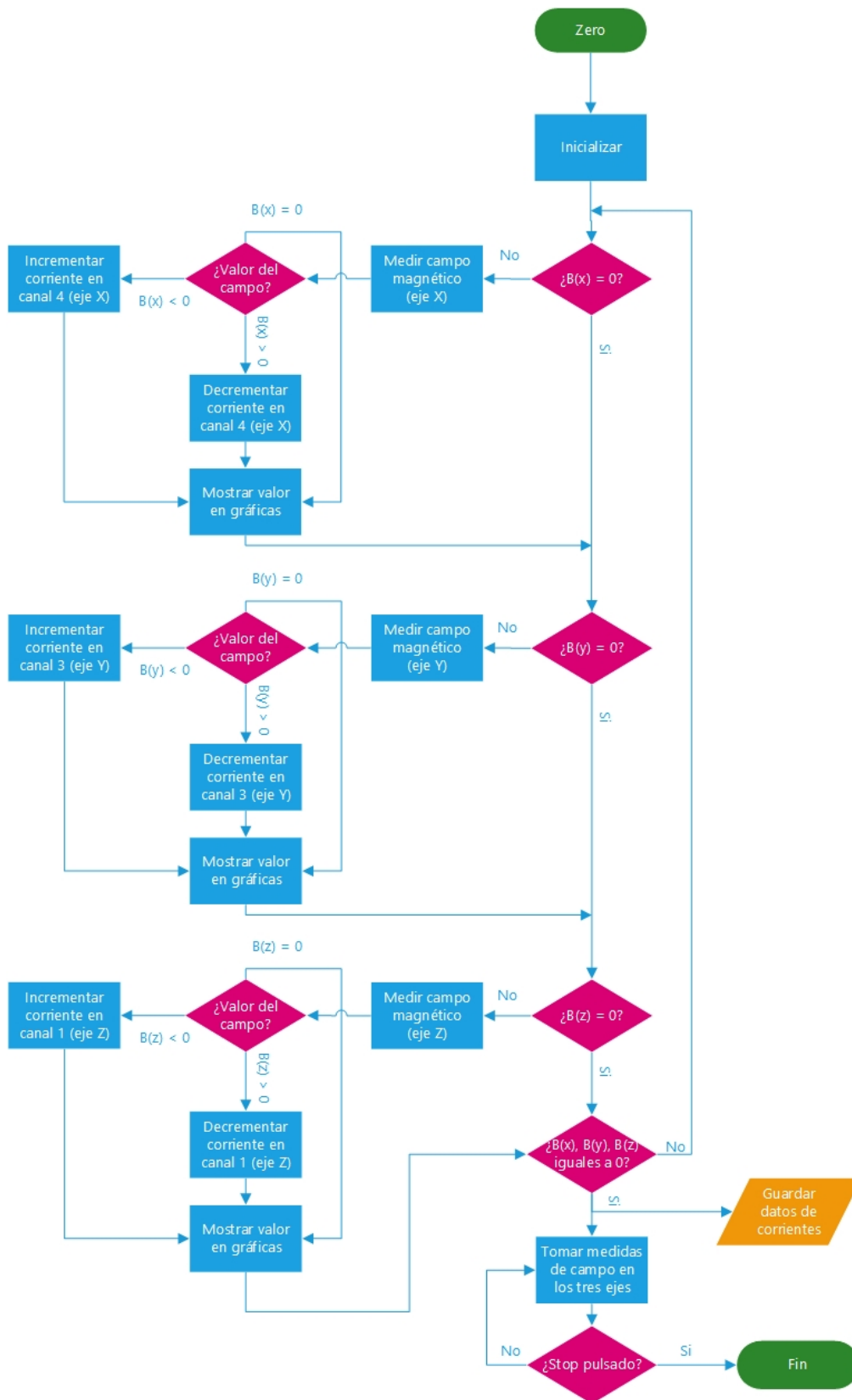


Figura 5.33 – Diagrama de flujo para pulsador "Zero"

Seguidamente, se entrará en el bucle de ejecución del programa, donde lo primero que se hace es ver si el campo magnético medido en el eje X es igual a cero (nunca será exactamente cero, esto sería en un caso ideal que no se dará en la vida real, por tanto, cuando se habla de igual a cero, se quiere decir muy próximo a cero), en caso de ser cero, se pasa al eje Y, en caso contrario se realizan varias operaciones:

1. Se realiza una medición del campo magnético sobre el eje X.
2. Si la medición es igual a cero, se pasa al eje Y.
3. Si esta medición es mayor que cero, se compara con la medida tomada anteriormente para este eje, y si se incrementó o decrementó la corriente. En caso de que la corriente fuera incrementada y con ello también el campo se hiciese mayor, se decremente la corriente. Por el contrario, si la corriente fue decrementada y el campo medido ha sido mayor que antes, habrá que incrementar la corriente.
4. Si la medición es menor que cero, se realizan las mismas comprobaciones que se ha realizado para el caso de mayor que cero, cambiando que, en este caso, en vez de decrementar, se incrementa el valor de la corriente según el caso.

Puede pasar que a mayor corriente el campo pueda ser más negativo, esto simplemente tiene que ver con el sentido del campo magnético terrestre así como el sentido de la corriente generada y la posición del magnetómetro. Este proceso se realiza para los demás ejes, dentro de un bucle del que se saldrá cuando el campo magnético medido en los tres ejes sea igual a cero. Cuando esto ocurre, se guardan las corrientes introducidas para lograr la anulación del campo magnético terrestre en el centro del generador, se pone el botón de "Stop" en rojo y se siguen tomando medidas de campo magnético sobre los tres ejes hasta que se dicho botón.

Finalmente, queda explicar el funcionamiento de una simulación completa. Esta simulación se realiza al pulsar sobre el botón de "Start" 5.34.

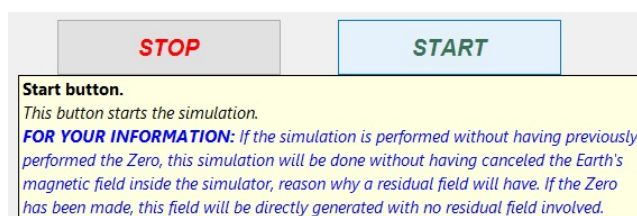


Figura 5.34 – *Coils simulator: Botón "Start"*

Al igual que para el botón anterior, para facilitar la explicación, se tomará como referencia el diagrama de flujo para dicho botón 5.35.

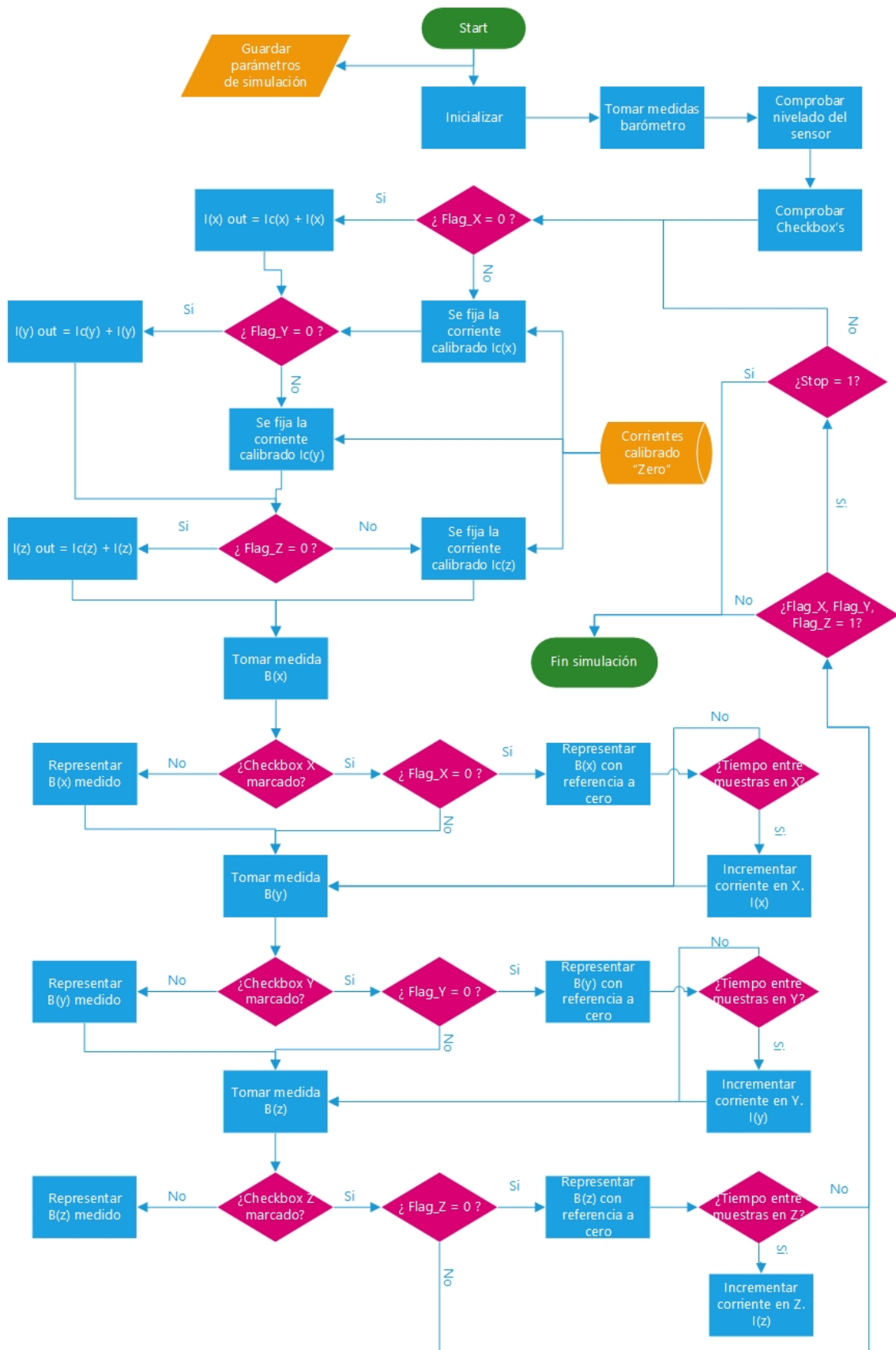


Figura 5.35 – Diagrama de flujo para pulsador "Start"



Cuando se pulsa sobre "Start", lo primero que se realiza es un guardado de todos los parámetros de configuración que se han introducido para la simulación. Este acto es importante, para, a la hora de abrir de nuevo la interfaz, cargar todos los datos de la última simulación agilizando así la configuración de la nueva simulación. Seguidamente a esto, se toman medidas del barómetro BMP180 y se comprueba si el sensor está correctamente nivelado, ya que, si no lo está, las medidas no serán correctas. En caso de que aparezca en rojo el campo para la medición de la aceleración de la gravedad, se aconseja parar la simulación, nivelar mejor, y volver a simular. Finalmente, antes de empezar a generar campo magnético en el simulador, se comprueban los checkbox's de los tres ejes, en caso de que alguno de estos checkbox's no esté marcado, entonces se pone el "flag" para dicho eje igual a uno, indicando que en ese eje no se debe de realizar la simulación, pero, por el contrario, si se tomarán medidas magnéticas para ver el campo residual que se genera desde los otros ejes sobre el eje en cuestión. Por ejemplo, si se desmarca el checkbox para el eje X, se pone " $flag_X = 1$ ". Sobre este eje, no se realizará simulación y no se introducirá corriente, pero, sí que se tomarán medidas de campo magnético mediante el magnetómetro en este eje.

Después de esto, se comprueba el flag para el eje X. En caso de ser igual a uno, simplemente se fijará la corriente de calibrado, $I_c(x)$. Dicha corriente es la que anula el campo magnético terrestre en el interior de la bobina para este eje. En caso de que sea igual a cero, se incrementa la corriente de salida, que será la suma de la corriente de simulación que se ha introducido y en la que se está haciendo el barrido más la de calibrado. Este proceso es repetido tanto para el eje Y como para el eje Z.

Una vez se ha hecho esta comprobación en los tres ejes, y se ha incrementado, o no, la corriente que se aplica en la fuente de alimentación, se procede con realizar mediciones con el magnetómetro. Primeramente, se toma una medida de campo magnético mediante el magnetómetro LSM303DLHC sobre el eje X. De nuevo, se comprueba si el checkbox sobre el eje X está marcado, en caso de no estarlo, simplemente se representa la medida tomada sobre la gráfica para dicho eje y se pasa al eje Y. En caso contrario, que el checkbox si esté marcado, se realiza otra comprobación, y es si el flag para el eje X es igual a cero. En caso de no serlo, se pasa directamente a tomar medida sobre el eje Y. Si es igual a cero, entonces se pinta este valor obtenido sobre la gráfica, añadiendo una referencia en cero, para poder comparar visualmente la diferencia entre un eje y otro. El siguiente punto del proceso sería comprobar si el tiempo entre muestras es el que se ha puesto en la pantalla principal. En caso de no serlo, se pasa a tomar la medida de campo magnético sobre el eje Y, si por el contrario, el tiempo entre muestras es el que se ha impuesto, se realizará un incremento de corriente para que luego se cambie el valor en la fuente de alimentación. Si al realizar el incremento de corriente, esta corriente supera el valor de la corriente final de simulación que se ha introducido por pantalla, se pone el flag del eje X igual a uno. Este proceso se repite para los ejes Y y Z.

Finalmente, se comprueba si todos los flags están a uno, en caso de que lo estén, finaliza la simulación. Por el contrario, si no lo están, se proseguirá la simulación siempre y cuando el botón de "Stop" no haya sido pulsado. Si dicho botón es pulsado, finaliza la simulación

independientemente del estado de los flags.

5.2.2.2 Magnetorquer Simulator

La necesidad de conocer el comportamiento magnético de un magnetorquer cuando éste es alimentado por una corriente, introdujo la necesidad de realizar este programa. Este programa ha sido sacado directamente del anterior, tiene algunas diferencias, pero es muy similar. En el caso de la caracterización de las bobinas ("*Coils Simulator*"), se realiza un barrido en las tres bobinas de Helmholtz que forman el sistema, mientras, para este caso, dichas bobinas se limitarán a anular el campo magnético terrestre en el centro del generador, donde se colocará el magnetorquer, y se irá realizando una simulación introduciendo corriente por el magnetorquer que será conectado a la única salida libre de la fuente de alimentación, al canal 2 de la fuente Agilent N6705A [2]. Las características de dicho canal se pueden observar en la tabla 4.1.

Por tanto, esta sección se limitará a mencionar las diferencias entre el programa anterior 5.2.2.1 y este. El código para este caso se puede encontrar en el CD adjunto, donde se puede disponer de toda la información de manera digital. Dicho código está debidamente explicado, por tanto, esta sección se centrará en el carácter funcional del sistema.

Empezando por la ubicación y explicación de los archivos necesarios para este programa, hay que señalar que es la misma que para el programa anterior. Por tanto, los archivos están distribuidos como se puede observar en la imagen 5.36, con la diferencia de que el archivo de ejecución que interesa es el de "*magnetorquer_simulator.fig*".

A modo general, este programa se comporta exactamente como el anterior, las diferencias serán encontradas a la hora de realizar la simulación, de los datos introducidos, o los mostrados. Por tanto, el diagrama de flujo general para este caso será exactamente el mismo que para el caso anterior 5.37

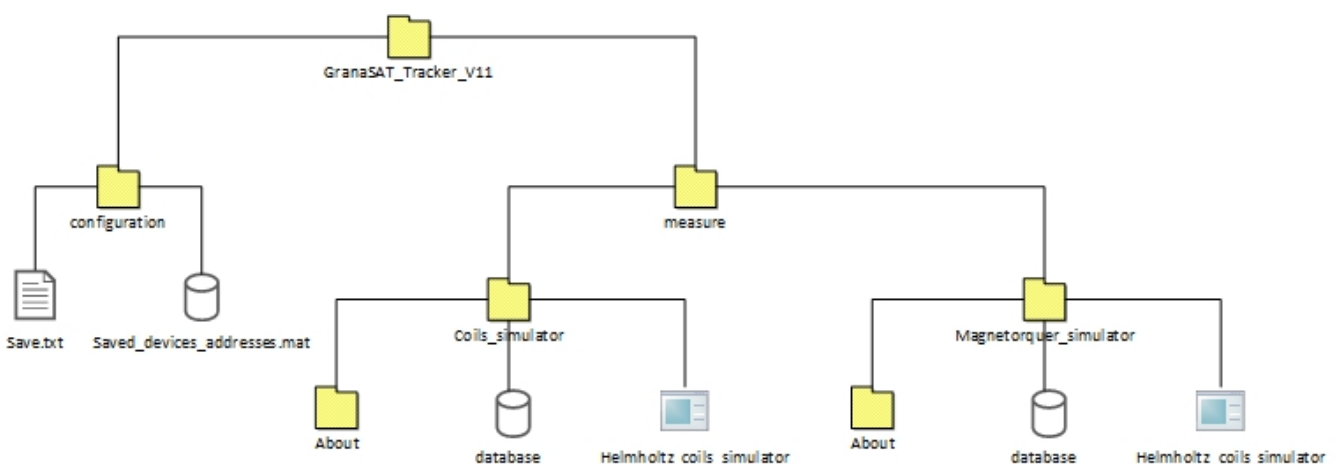


Figura 5.36 – Ubicación de archivos

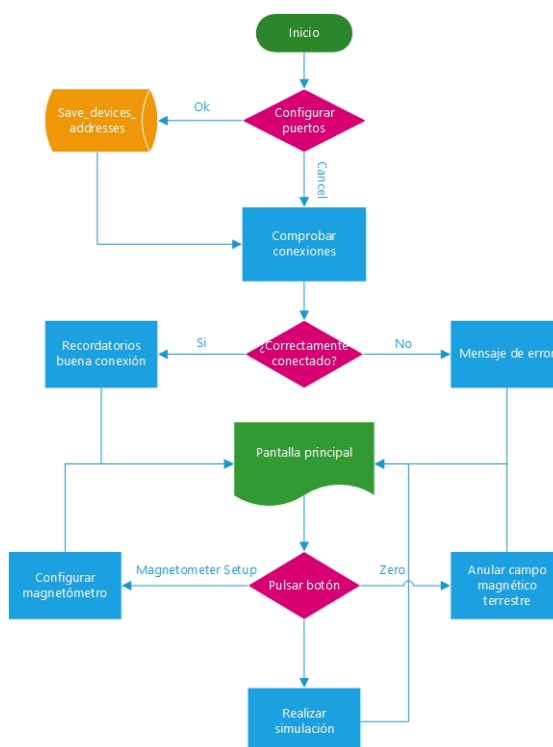


Figura 5.37 – *Magnetorquer simulator: Diagrama de flujo general*

Cuando se ejecuta dicho programa, se comporta igual al anterior, con la salvedad de que, para este caso, se llegará a una ventana principal algo diferente (antes de esta pantalla principal aparece la de configuración de instrumentos como ocurría para el caso de la caracterización de las bobinas 5.16). La interfaz inicial que verá el usuario y desde donde se podrá configurar y realizar las configuraciones es la siguiente 5.38.

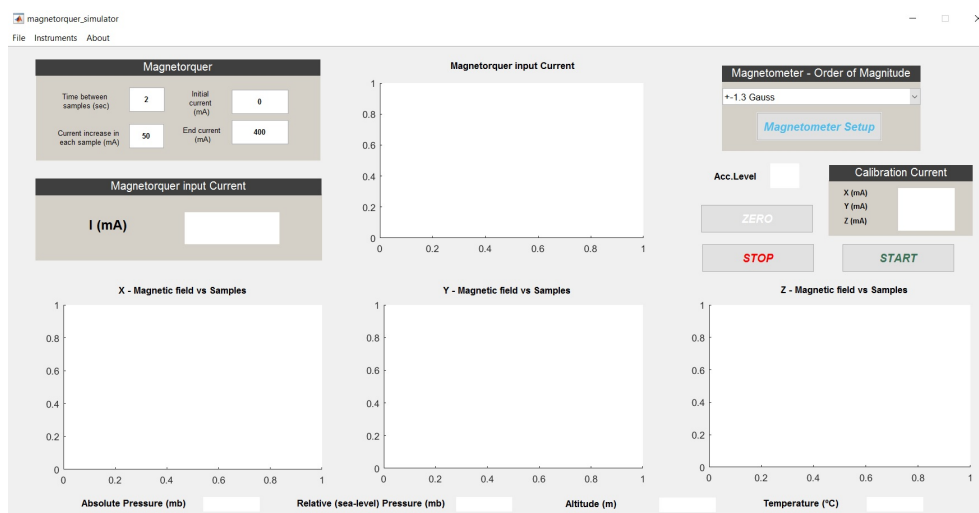


Figura 5.38 – *Magnetorquer simulator: pantalla principal*

Todo está exactamente igual y funciona de la misma manera que para el caso de la

caracterización de bobinas (*Coils Simulator*), las únicas diferencias, es que hay un panel nuevo en lugar de tener los tres paneles de control (donde se controlaba con cada panel un eje diferente) y que el botón de "Start". Por tanto, se van a explicar estas nuevas funcionalidades.

El panel de control de la simulación es el que se muestra en la figura 5.39.

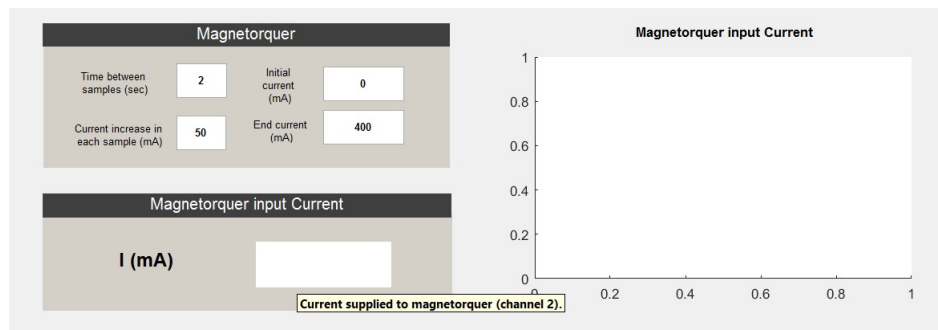


Figura 5.39 – Control de la simulación para el magnetorquer

El primer panel de arriba a la izquierda, tiene la misma funcionalidad que cuando se quiere realizar una simulación con el programa anterior. Los cuatro recuadros son, de izquierda a derecha y de arriba a abajo:

- "*Time between samples (sec)*": Es el tiempo que se tarda en realizar un cambio en la corriente del generador (para este caso el canal 2, correspondiente al magnetorquer). Este tiempo debe de ser múltiplo de 0.25 segundos, o se avisará con un error de que el tiempo no es múltiplo de esa cantidad. Como ya ha sido explicado, esto tiene que ver con la velocidad de tomar medidas del magnetómetro.
- "*Initial current (mA)*": Corriente inicial de la que parte la simulación. En este caso, la corriente no puede ser negativa (algo que sí aceptaba la simulación de bobinas por contar con un puente-H). Ya dependiendo de cómo esté diseñado el magnetorquer, se puede llegar a alcanzar una corriente máxima u otra sin llegar a quemarlo.
- "*Current increase in each sample (mA)*": Este campo configurará el salto de corriente que se dará cada vez que se aumente la corriente de la fuente de alimentación.
- "*End current (mA)*": Se trata de la corriente final donde acabará la simulación.

Justo debajo de este cuadro, se puede observar el de "*Magnetorquer input Current*". Aquí se verá la corriente que se está introduciendo al magnetómetro en cada instante de la simulación. Y, para finalizar, a la derecha se muestra una gráfica con la corriente que se está introduciendo al magnetorquer con respecto al tiempo.

Debajo, se tienen las gráficas donde se mostrarán las medidas tomadas por el magnetómetro para los tres ejes, así como las medidas que se realizan del barómetro BMP180. 5.40

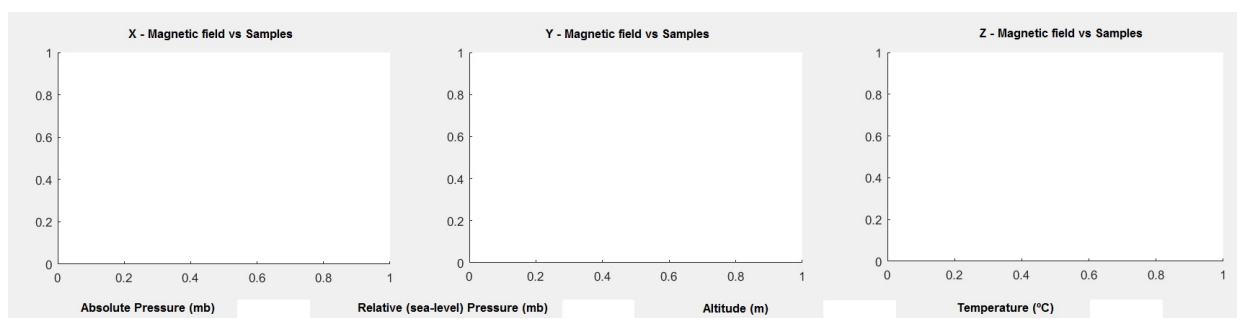


Figura 5.40 – Paneles de medidas tomadas por el magnetómetro y barómetro

Finalmente, quedaría por hablar de la sección de arriba a la derecha 5.41.

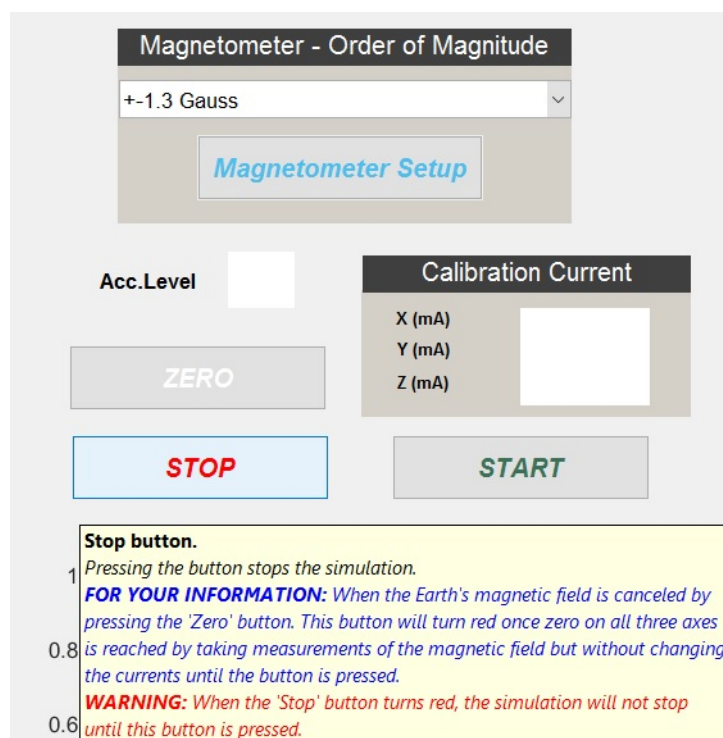


Figura 5.41 – Magnetometer Simulator: zona de botones

Todos estos botones y paneles, tienen la misma configuración que para el caso del programa "Coils Simulator". Con ellos se puede configurar el rango de trabajo del magnetómetro, ver si dicho magnetómetro está correctamente nivelado, ver en cada momento las corrientes que provocan que se anule el campo magnético terrestre en el centro del generador, realizar un calibrado de manera que anule el campo magnético terrestre ("Zero") y hacer una interrupción de la ejecución mediante el botón de "Stop". Todos y cada uno de ellos, tiene la misma funcionalidad que para el caso anterior, salvo al pulsar sobre "Start". Cuando se comienza una simulación presionando este botón, se sigue el proceso que puede observarse en el diagrama de flujo 5.42.

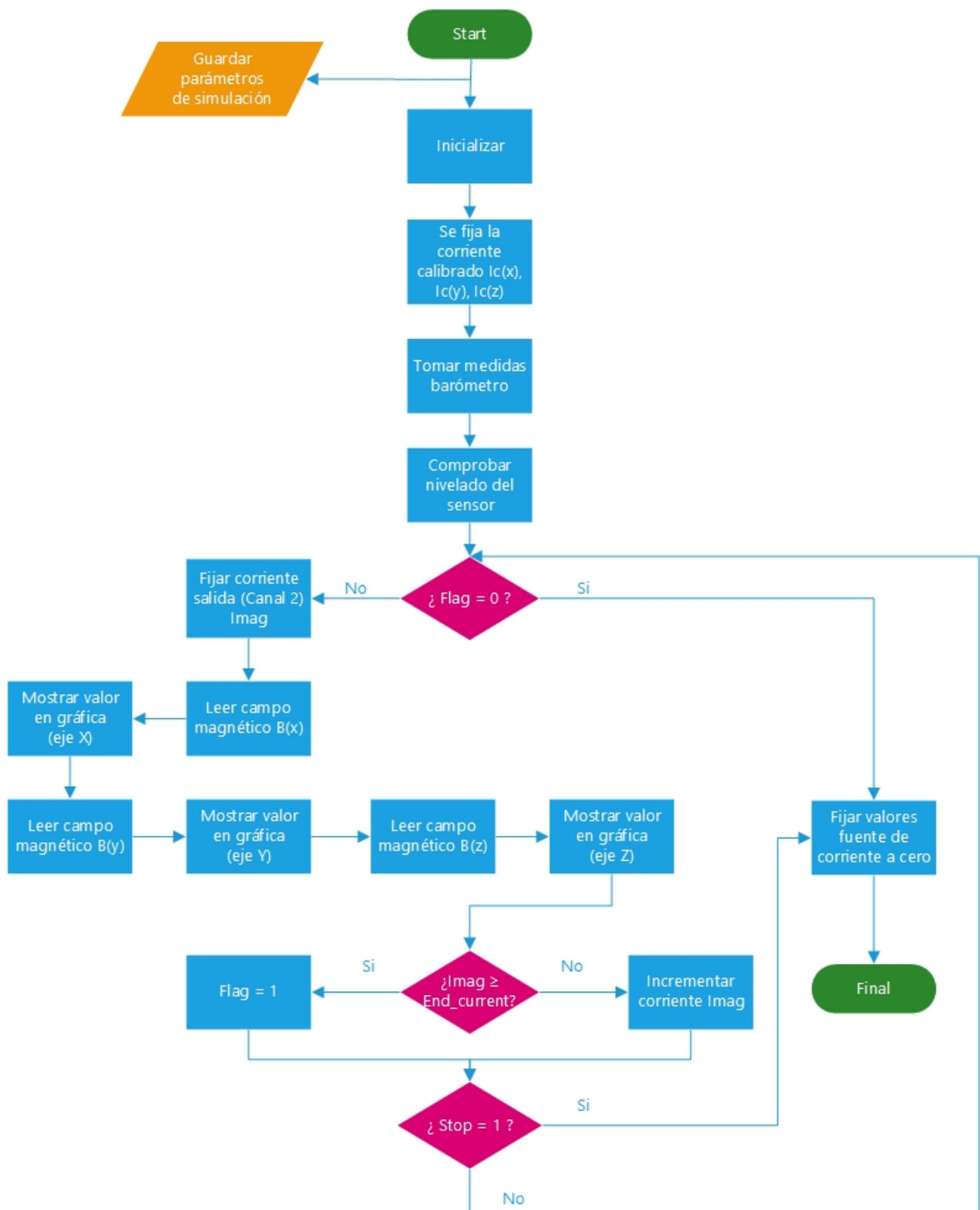


Figura 5.42 – Magnetorquer Simulator: diagrama de flujo al comenzar una simulación ("Start")

Cuando se quiera realizar una simulación, se configuran los parámetros y se pulsa sobre el botón de "Start". Una vez se pulsa sobre dicho botón, el proceso que se sigue es el que se puede observar en el diagrama de flujo anterior:

1. Se guardan los datos de configuración para que ya estén rellenos en la próxima ejecución del programa y tener que evitar estar relleno siempre todos los campos.
2. Inicializar: Se limpian todas las variables internas.
3. Se recuperan las corrientes de calibrado (las obtenidas mediante la opción "Zero"). Una vez recuperadas, se fijan dichas corrientes en la fuente de alimentación para las bobinas de Helmholtz. En caso de que no se haya realizado la calibración de las bobinas antes de lanzar la simulación del magnetorquer, estas corrientes serán fijadas a cero. Por tanto, no estará anulado el campo magnético terrestre en el interior del generador.
4. Realizan medidas del barómetro.
5. Seguidamente, es comprobado el nivelado del sensor. En caso de que aparezca en rojo el campo para la medición de la aceleración de la gravedad, se aconseja parar la simulación, nivelar mejor, y volver a simular.
6. Punto seguido, se comprueba si el flag del magnetorquer está igual a cero. En caso de que esté igual a cero, continuará la simulación. En caso contrario, será una señal de que la simulación ha sido acabada.
7. Si el flag sigue igual a cero, se pone la corriente de salida para el magnetorquer (que será el canal 2 de la fuente de corriente).
8. Se van leyendo y mostrando en las gráficas los campos magnéticos medidos por el magnetómetro LSM303DLHC para todos los ejes.
9. El próximo paso es el de comprobar si la corriente de salida para el magnetorquer ha superado o no la corriente de final de simulación que se ha introducido en la interfaz. En caso de que haya superado o sea igual de dicha corriente, se pone el flag del magnetorquer a uno. Caso contrario, se incrementa dicha corriente, sumándole el incremento de corriente que se ha definido en la interfaz de usuario para la simulación.
10. Finalmente, se comprueba si ha sido pulsado el botón de Stop. Al pulsar este botón, se realiza una interrupción que finaliza directamente la simulación.

Ya se llegue al final porque la simulación acabe o porque sea pulsado el botón de Stop, en ambos casos se reinicia la fuente de alimentación antes de finalizar completamente el programa, de manera que se deje de suministrar corriente tanto al generador como al magnetómetro.

5.3 Sistema final

El sistema final queda como se puede observar en la siguiente imagen 5.43.

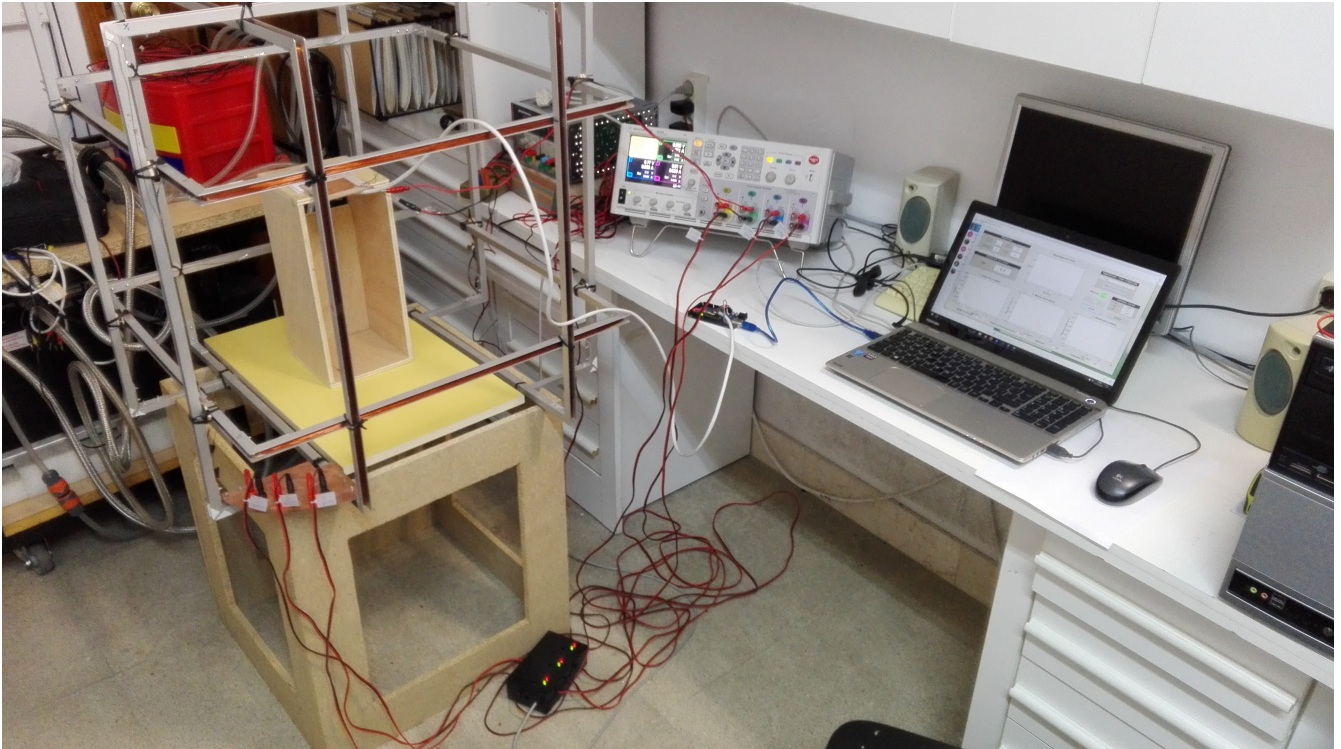


Figura 5.43 – *Sistema final implementado*

Esta es una imagen de cómo quedaría todo conectado en el laboratorio. Una vez todo preparado, se proceden con los test y prueba funcionales, que serán tratados en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO

6

PRUEBAS Y TEST FUNCIONALES

En este capítulo se realizarán test y se irán haciendo diferentes pruebas para la verificación del correcto funcionamiento del sistema. En primer lugar, se realizará la caracterización de las bobinas y la calibración de las mismas, para saber qué comportamiento tiene nuestro sistema. Seguidamente se realizará la verificación de la parte de Arduino, para, finalmente, hacer paso a las correspondientes simulaciones del sistema al completo (en este último caso se realizará lo correspondiente con Arduino que hay que realizar antes de arrancar el sistema y simulaciones del sistema final en Matlab).

6.1 Caracterización y calibración de las bobinas de Helmholtz

Para caracterizar las bobinas así como calibrarlas, se ha hecho uso de los sensores magnéticos LSM303DLHC y HCM5883L. Con Arduino, se han ido tomando medidas en dichos sensores conforme se ha ido aumentando la corriente (en el caso de la calibración) o se han ido desplazando los sensores a lo largo del espacio comprendido entre el un par de bobinas de Helmholtz a una corriente de alimentación constante.

6.1.1 Caracterización

Para realizar la caracterización de las bobinas de Helmholtz, se ha ido desplazando los sensores magnéticos en el interior del generador de manera perpendicular al par de bobinas correspondientes a un eje en concreto, siendo el cero el centro del eje imaginario que uniría las dos bobinas.

Para facilitar el desplazamiento de dichos sensores, se incluye una cuadrícula numerada y separada de centímetro en centímetro colocada de manera que el centro de la cuadrícula coincida con el centro del par de bobinas tal y como se puede observar en la siguiente imagen 6.1:

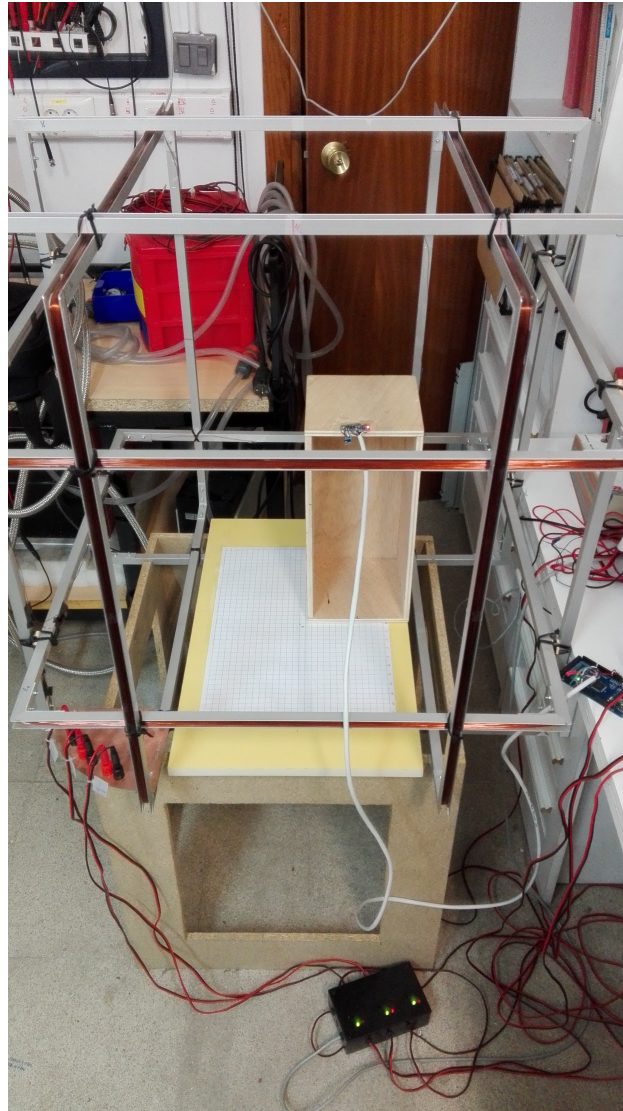


Figura 6.1 – Caracterización de bobinas de Helmholtz

De esta manera, se puede ver el comportamiento del campo magnético que se genera en el interior de las bobinas de Helmholtz. Viendo como va variando dicho campo según la posición dentro del par de bobinas de Helmholtz. Así, se podrá observar en qué volumen del espacio el campo magnético generado es aproximadamente constante. Para tomar las medidas, se han realizado dos mediciones en el mismo punto del espacio para cada sensor para después realizar una media aritmética de esas dos medidas tomadas y representar esta media. De esta manera, se minimizan las pequeñas oscilaciones que se producen durante las

medidas.

El comportamiento sobre el eje X del campo magnético generado según la posición dentro del generador puede ser observado en la figura 6.2.

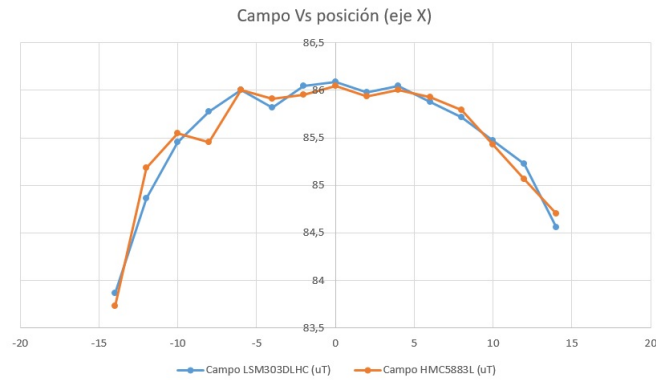


Figura 6.2 – Caracterización eje X

Igual para los ejes Y 6.3 y Z 6.4.

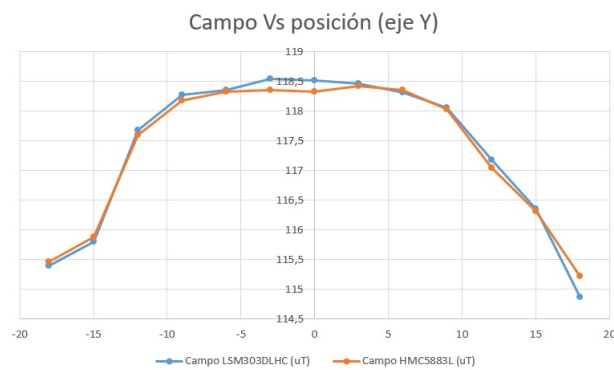


Figura 6.3 – Caracterización eje Y

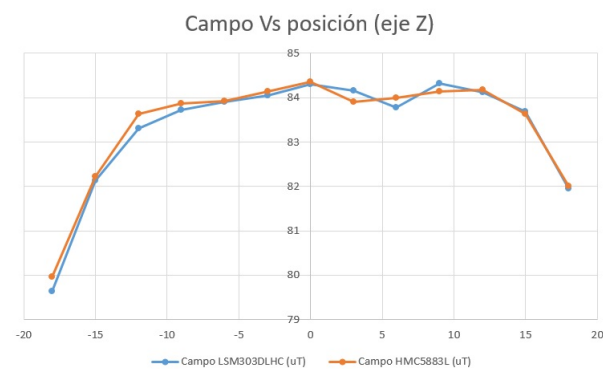


Figura 6.4 – Caracterización eje Z

Observando los resultados, se puede apreciar, en primer lugar, que ambos sensores magnéticos toman medidas muy similares. Esta es buena señal, de que se están tomando bien las medidas y se ha configurado correctamente los sensores. Por otro lado, se tienen curvas muy similares entre todos los ejes, donde se tiene un campo magnético aproximadamente constante.

6.1.2 Calibración

Después de ver la distribución del campo magnético dentro de las bobinas de Helmholtz, se va a obtener la relación entre la corriente suministrada y el campo magnético generado. El procedimiento consiste en situar en el centro de las bobinas de Helmholtz el sensor magnético LSM303DLHC (en este caso, solo se han tomado medidas de este sensor, ya que se ha verificado en el apartado anterior que está midiendo bien. Por contra, se han realizado tres medidas para el mismo valor de corriente para evitar posibles oscilaciones) e ir cambiando la corriente observando el campo magnético generado.

Unas primeras medidas son tomadas para cada uno de los ejes por separado y otras con los tres ejes funcionando a la vez, pero sin anular el campo magnético terrestre. Después de esto, se vuelven a realizar las mismas mediciones pero, en este caso, anulando el campo magnético terrestre en el interior del generador de campos. En todos casos, las simulaciones van desde -300 mA hasta 300 mA con saltos de 20 mA entre cada medida tomada.

En las siguientes gráficas se muestra el campo magnético generado en cada uno de los ejes, juntando el campo que se obtiene sin anular el campo magnético terrestre y anulándolo. Donde se puede observar la calibración para el eje X 6.5, para el eje Y 6.6 y para el eje Z 6.7:

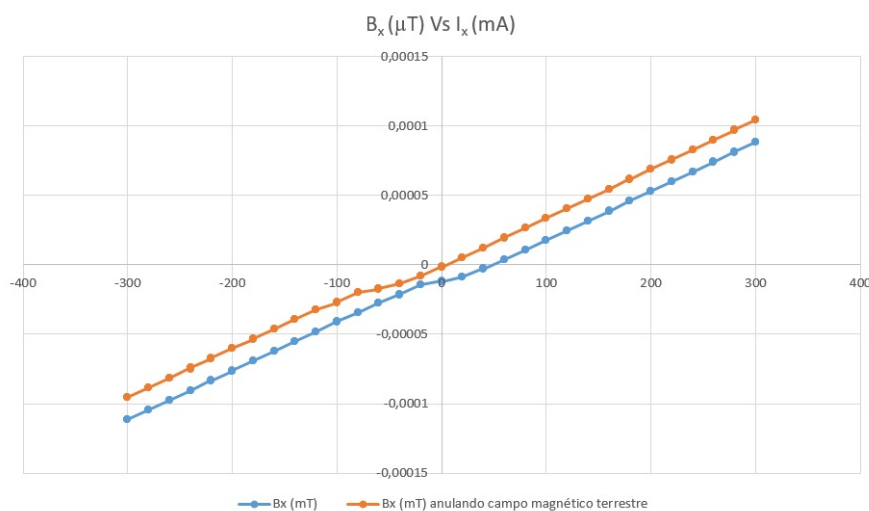


Figura 6.5 – Calibración eje X

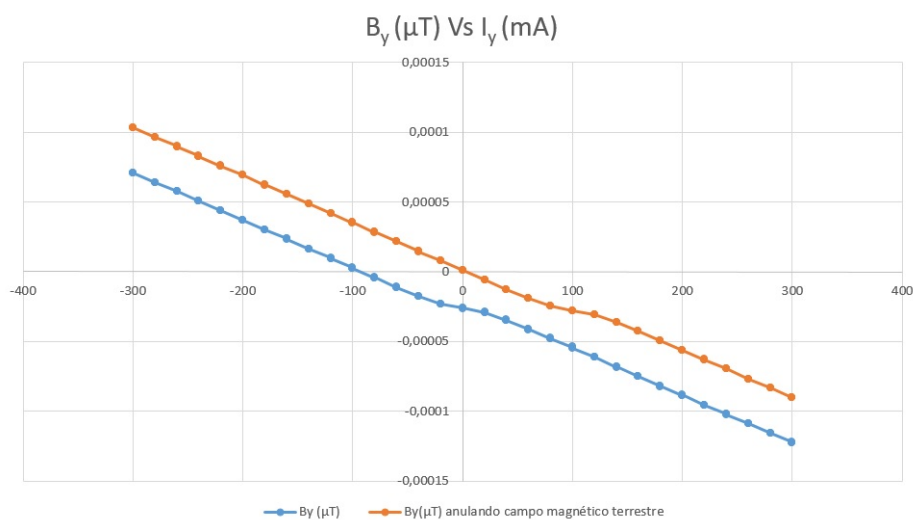


Figura 6.6 – Calibración eje Y

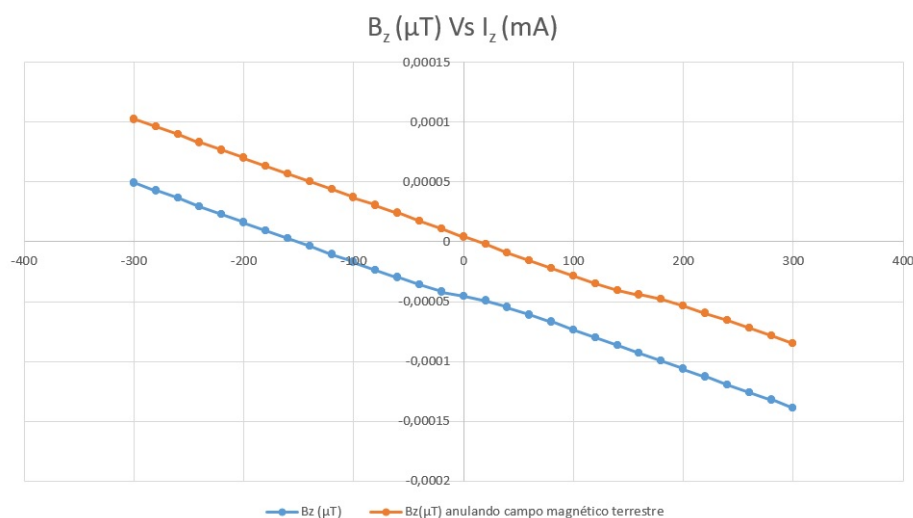


Figura 6.7 – Calibración eje Z

Como se puede observar, todos los ejes tienen un comportamiento prácticamente lineal. Además, la diferencia entre haber anulado el campo magnético terrestre y no, reside en un campo residual que provoca que el cero sea desplazado. Para poder apreciar mejor y tener una fórmula con la que saber qué corriente hay que poner para obtener un campo magnético en cada eje, se obtienen las siguientes rectas de regresión. Estas rectas serán para cada eje, con y sin la anulación del campo magnético terrestre. Teniendo en cuenta que la corriente debe de ser introducida en mA y el campo estará en μT (Para eje X: sin anular campo magnético 6.1.1, anulándolo 6.1.4. Para el Y: sin anular campo magnético 6.1.2, anulándolo 6.1.5. Finalmente para el Z: sin anular campo magnético 6.1.3, anulándolo 6.1.6.

$$B_x(I) = 3 \cdot 10^{-7}I - 10^{-5} \quad (6.1.1)$$

$$B_y(I) = -3 \cdot 10^{-7}I - 3 \cdot 10^{-5} \quad (6.1.2)$$

$$B_z(I) = -3 \cdot 10^{-7}I - 5 \cdot 10^{-5} \quad (6.1.3)$$

$$B_x|_{B_{Terrestre}=0}(I) = 3 \cdot 10^{-7}I + 3 \cdot 10^{-6} \approx 3 \cdot 10^{-7}I \quad (6.1.4)$$

$$B_y|_{B_{Terrestre}=0}(I) = -3 \cdot 10^{-7}I + 5 \cdot 10^{-6} \approx 3 \cdot 10^{-7}I \quad (6.1.5)$$

$$B_z|_{B_{Terrestre}=0}(I) = -3 \cdot 10^{-7}I + 6 \cdot 10^{-6} \approx 3 \cdot 10^{-7}I \quad (6.1.6)$$

Como se puede observar, al anular el campo magnético terrestre, la recta de regresión tiene prácticamente el campo residual igual a cero (por ello se realiza una aproximación). Además, un aspecto a tener en cuenta de que las bobinas han sido correctamente desarrolladas es que las rectas de regresión anulando el campo magnético terrestre son las mismas para los tres ejes, mientras que sin anular el campo magnético la única variante es un poco el campo residual (que esto tiene más que ver con el terrestre). Por tanto, se puede decir que se ha logrado obtener un sistema bastante equilibrado con unas bobinas cuyo comportamiento es prácticamente el mismo.

Finalmente, se realiza una simulación en la que la corriente suministrada a las bobinas es la misma para los tres ejes de manera simultánea y se van tomando medidas de campo magnético en los tres ejes a la vez (situando el magnetómetro en el centro del generador).

Para cada valor de corriente, se toman tres medidas y se realiza la media tal y como se ha realizado para el caso anterior y realizando una simulación de -300 mA a 300 mA en pasos de 20 mA. De este modo, se podrán apreciar las similitudes entre los ejes de una manera más visual. Por tanto, en la gráfica 6.8 se pueden apreciar las medidas tomadas sin anular el campo magnético terrestre.

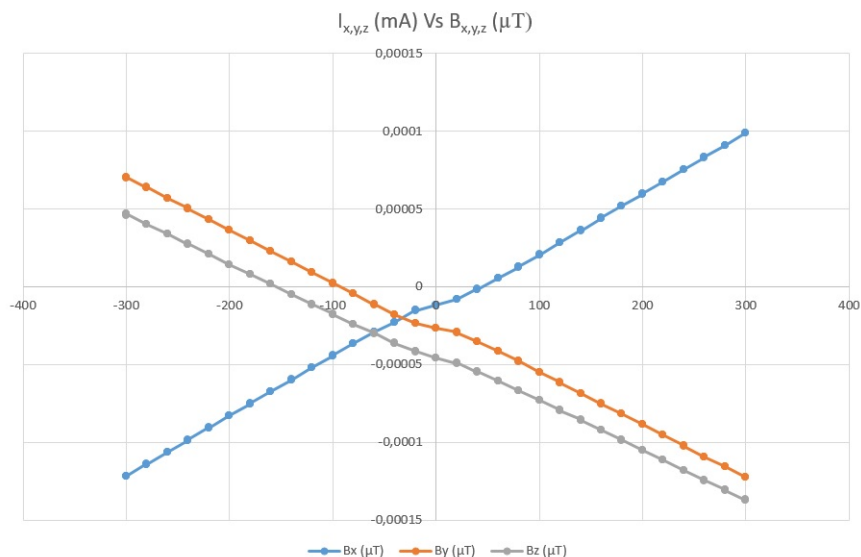


Figura 6.8 – Calibración ejes X , Y y Z sin anular el campo magnético terrestre

Si se anula el campo magnético terrestre y se vuelve a realizar la simulación, se obtiene 6.9

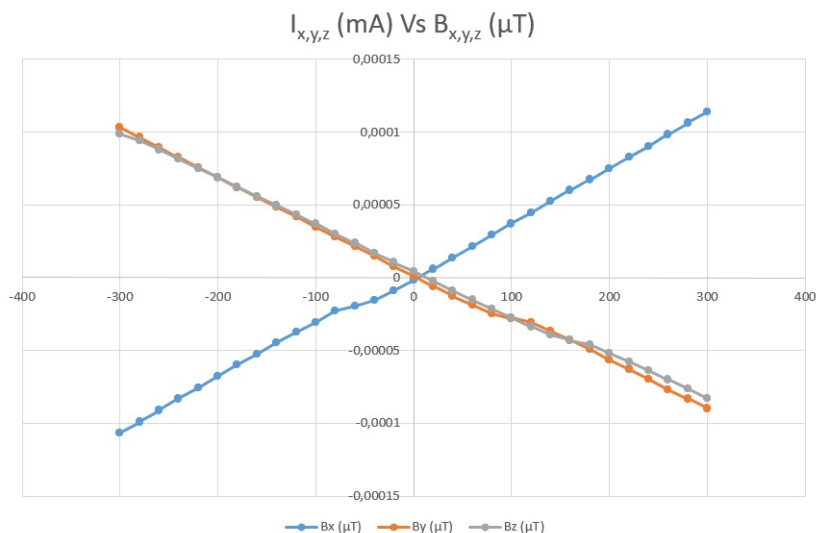


Figura 6.9 – Calibración ejes X , Y y Z anulando el campo magnético terrestre

En estas dos últimas gráficas se puede verificar lo comentado anteriormente, las bobinas tienen un comportamiento similar, por lo que la fabricación e implementación ha sido

La diferencia entre un comando u otro, es que, con el primero ('c') se obtienen los datos de calibración, mientras que el segundo va más lejos usando dichos datos para calibrar el sensor.

Comandos 'g' y 'a' son usados para obtener los detalles de los sensores magnéticos. La primera dará los detalles del sensor HMC5883L mientras que la segunda lo hará del LSM303DLHC 6.12.

```

-----
Sensor:      HMC5883
Driver Ver:  1
Unique ID:   12345
Max Value:   800.00 uT
Min Value:   -800.00 uT
Resolution:  0.20 uT
-----

-----
Sensor:      LSM303
Driver Ver:  1
Unique ID:   54321
-----

```

Figura 6.12 – *Detalles de sensores HMC5883L + LSM303DLHC*

Los siguientes comandos de la lista serían 'j' y 'b'. Ambos realizan mediciones de campo magnético, en el caso del primero, para el HCM5883L, mientras que el segundo para el LSM303DLHC con el que además se muestran datos del acelerómetro que lleva incorporado dicho sensor 6.13:

```

X: 15.82 Y: -23.73 Z: -49.90 uT
Heading (degrees): 316.30
Magnetometer:
X: 15.64 Y: -23.64 Z: -50.00 uT
Heading (degrees):
316.09

Accelerometer:
X: -0.14 Y: 2.73 Z: 9.61 m/s^2

```

Figura 6.13 – *Medidas sensores HMC5883L + LSM303DLHC*

Las primeras dos líneas, corresponden al sensor HCM5883L, mientras que las otras, son del LSM303DLHC. Como se puede apreciar, ambos sensores realizan medidas similares del campo magnético terrestre, por lo que se puede verificar que las medidas tomadas por el LSM303DLHC (que será el sensor principal que se utilizará en las simulaciones del programa principal) son verídicas.

Además, si se observan las medidas realizadas por el acelerómetro, se tiene que la aceleración que se percibe sobre el eje Z es la aceleración de la gravedad (aceleración que se utilizará para comprobar si el sensor está bien nivelado).

El siguiente comando es 'n', que devuelve el campo magnético medido sin realizar la conversión (número entero con signo). Mientras que con 'n' devuelve directamente la aceleración medida sobre el eje Z ya mencionada (este comando es muy útil para realizar el nivelado del sensor).

Los próximos comandos son los correspondientes para configurar un rango de trabajo del magnetómetro LSM303DLHC. Y, finalmente, se pueden apreciar los dos comandos relacionados con el barómetro BMP180: 'w', 'y' [6.14](#).

```
1051.89
963.07
45.94
738

provided altitude in Granada: 738 meters, temperature: 45.76 deg C, 114.36 deg F
absolute pressure: 963.00 mb, 28.44 inHg
relative (sea-level) pressure: 1051.81 mb, 31.06 inHg
computed altitude: 738 meters, 2421 feet
```

Figura 6.14 – *Medidas BMP180*

Como se aprecia, la diferencia entre uno u otro comando es que, en el primero se obtienen las medidas en número, sin explicar nada (este comando será el usado desde Matlab, para evitar descripciones de por medio en el puerto serie), mientras que el segundo da una descripción detallada de las medidas realizadas.

6.1.4 Matlab: test y simulación

En Matlab, se disponen de dos programas que ya hemos mencionado en el capítulo 5: 'Coils Simulator' [5.2.2.1](#) y 'Magnetorquer Simulator' [5.2.2.2](#). Para ambas simulaciones, hay que comenzar con unas pequeñas comprobaciones en Arduino, para asegurar que las medidas son correctas:

1. Realización de una autocalibración del sensor magnético LSM303DLHC enviando 'd'.
2. Comprobación que las medidas tomadas por el magnetómetro son correctas. Para ello, se comparan mediciones entre LSM303DLHC y HCM5883L. Haciendo uso de los comandos 'j' y 'b'. Que se calibre el sensor LSM303DLHC y no el HCM5883L, es debido a que el HCM5883L no tiene opciones de configuración de rango de trabajo, y viene ya calibrado, mientras el LSM303DLHC viene ya calibrado de fábrica, pero ofrece dicha opción para optimizar más las medidas.

Una vez se realizan dichas comprobaciones, se procede con la simulación sobre Matlab.

6.1.4.1 Coils Simulator

El primer paso realizado es la anulación del campo magnético terrestre mediante el botón 'Zero'. El resultado de dicha simulación se puede apreciar en la imagen 6.15.

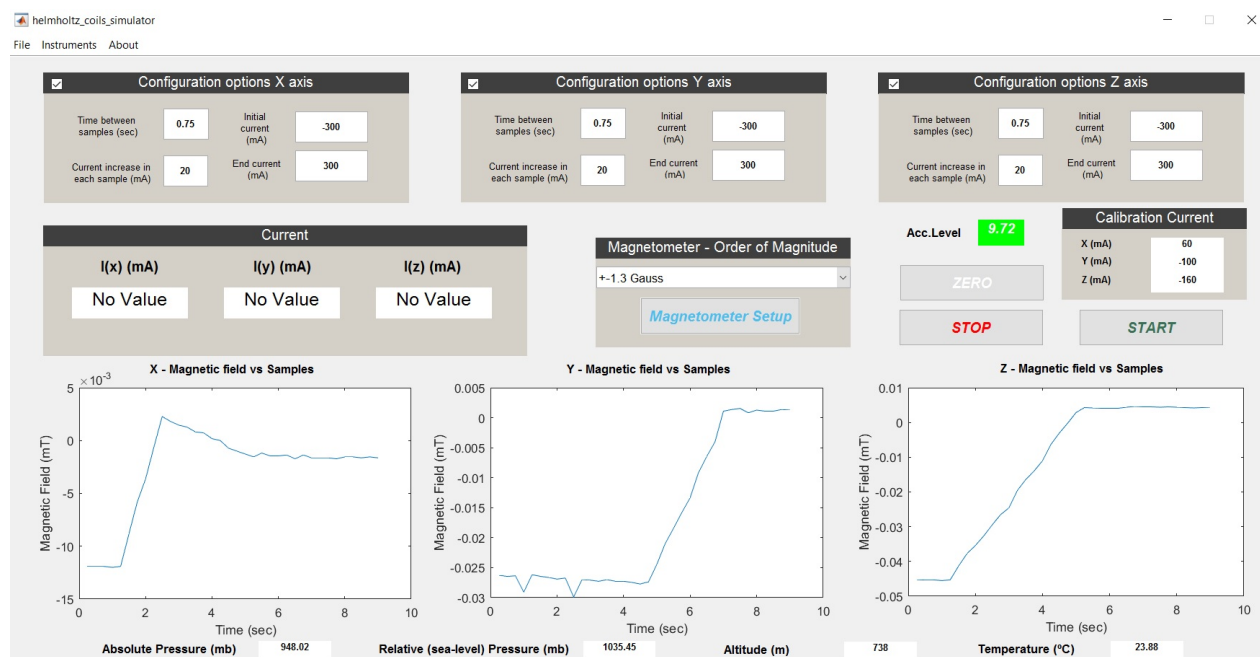


Figura 6.15 – Coils Simulator: 'Zero'

Analizando un poco el resultado del sistema, vemos como se ha ido buscando que todos los ejes marcaran un valor de campo magnético muy próximo a cero. Una vez se alcanza dicho valor, las corrientes necesarias para anular el campo magnético terrestre en el centro del generador son guardadas y observadas en la sección 'Calibration Current' (justo al lado de los botones). Además, se aprecian las medidas del barómetro y se ve que el sensor está bien nivelado.

Continuadamente, se va a realizar una calibración de las bobinas, tal y como se realizó de manera manual en la sección 6.1.2. Para este caso, directamente en la simulación se tiene el campo magnético generado una vez anulado el campo magnético terrestre.

Para el eje X, 6.16: Como puede observarse, se obtiene una buena respuesta a la simulación realizada. Además, aquí se puede apreciar el campo residual que es captado por los ejes Y y Z generado por dicho eje X ya que es muy complicado tener el sensor completamente alineado a las bobinas de Helmholtz. Aunque parezca un campo residual bastante grande, mirando el valor de las medidas tomadas se tiene que en realidad es bastante pequeño y casi despreciable si se compara con las medidas realizadas sobre el eje X.

Se procede de la misma manera para los ejes Y 6.17 y Z 6.18.



Figura 6.16 – Coils Simulator: calibración eje X

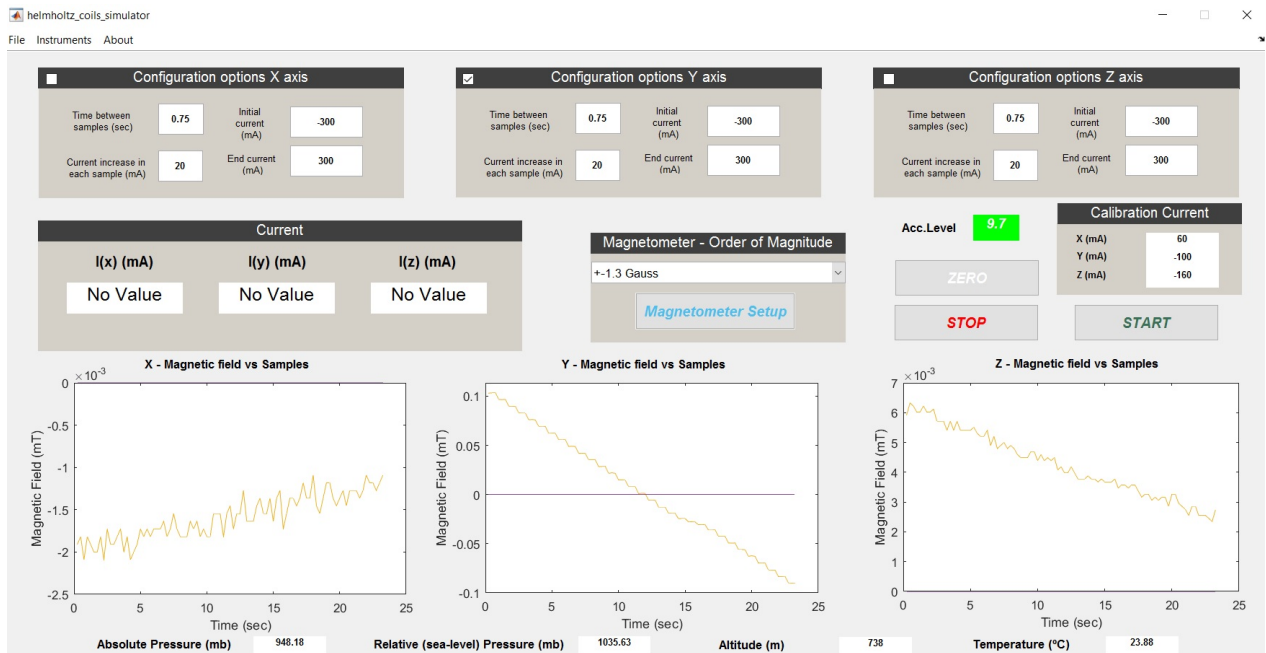


Figura 6.17 – Coils Simulator: calibración eje Y

6

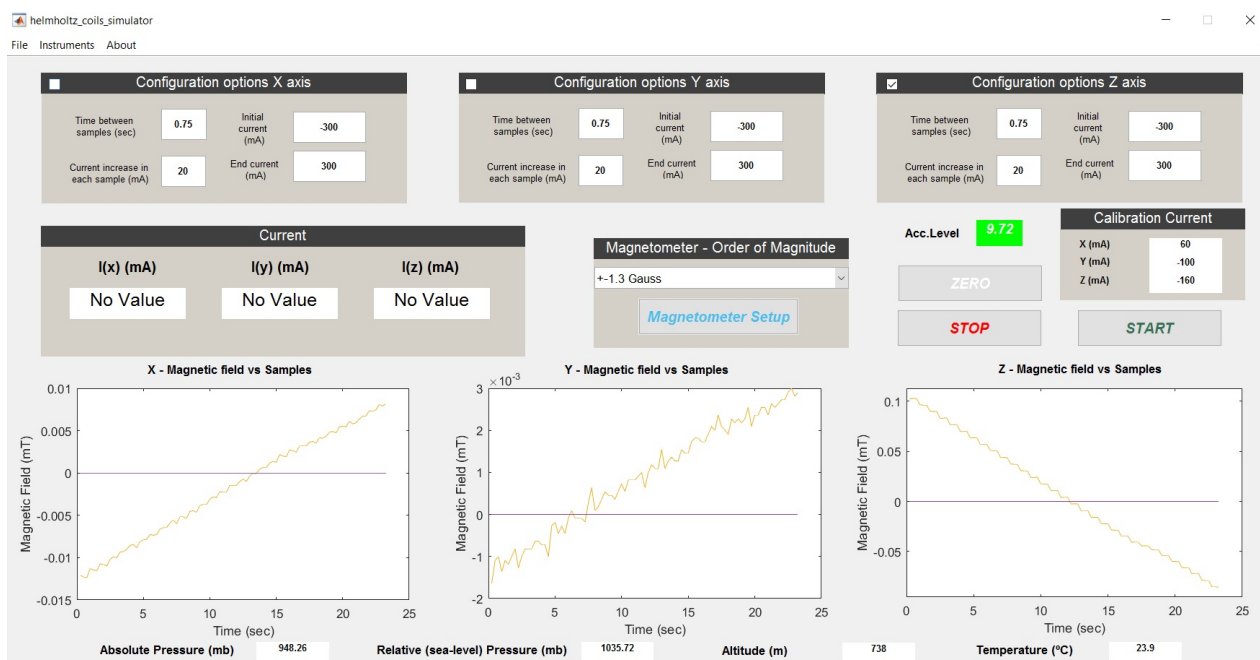


Figura 6.18 – Coils Simulator: calibración eje Z

Finalmente, para acabar con esta sección, se realiza una simulación con todos los ejes a la vez, para ver su comportamiento 6.19.

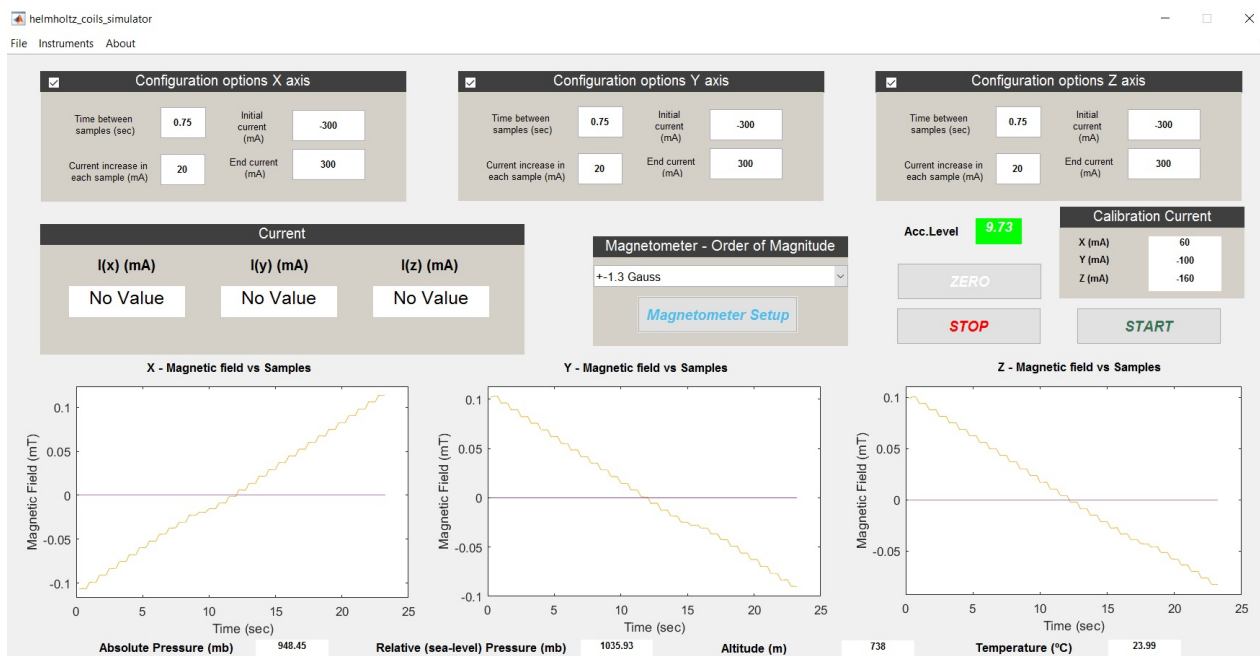


Figura 6.19 – Coils Simulator: Simulación completa

Se aprecia cómo los resultados son similares a los que se han obtenido para la calibración de las bobinas, por lo que se tiene un programa automatizado capaz de realizar

unas simulaciones que conllevaron varias horas en cuestión de segundos. La pequeña desviación que todos los ejes tienen (ya que no van completamente en línea recta), es debida al voltaje mínimo necesario en los puentes en H para el correcto funcionamiento de los transistores Mosfets [29], ya que hay que superar cierta tensión umbral.

6.1.4.2 Magnetorquer Simulator

Para este programa se incluye un magnetorquer cuadrado sobre circuito impreso justo encima de la zona en la que se encuentran los sensores magnéticos para ver cuál es su comportamiento ante una entrada de corriente dada. El magnetorquer utilizado puede apreciarse en la imagen 6.20.

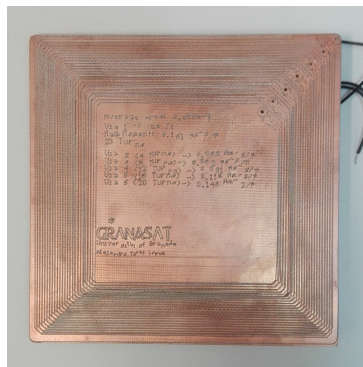


Figura 6.20 – Magnetorquer

Quedando el sistema final preparado para la simulación como puede observarse en la siguiente imagen 6.21:

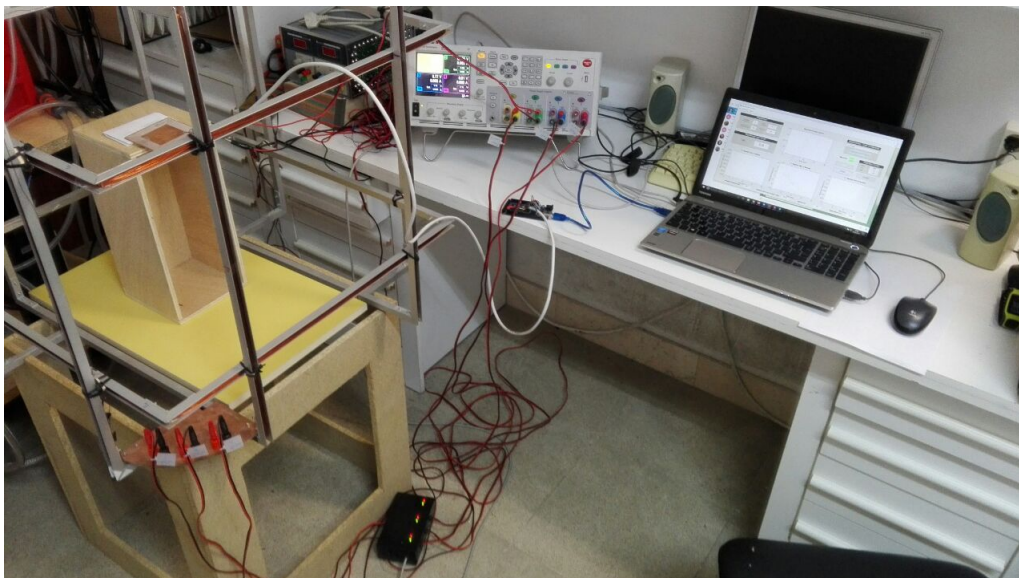


Figura 6.21 – Magnetorquer Simulator: Sistema para la simulación

Ya se dispone de todo lo necesario para la realización de la simulación. Por tanto, se va a proceder con la anulación del campo magnético terrestre en el centro del generador de campos 6.22.

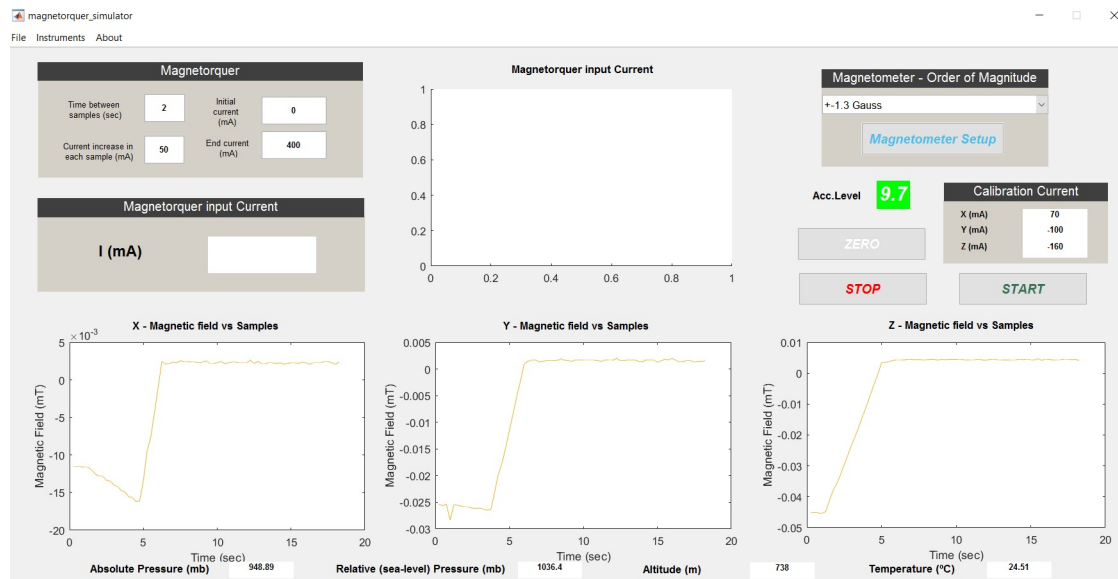


Figura 6.22 – Magnetorquer Simulator: 'Zero'

En dicha simulación se alcanza el cero. Seguidamente, se realiza la simulación sobre el magnetorquer 6.23.

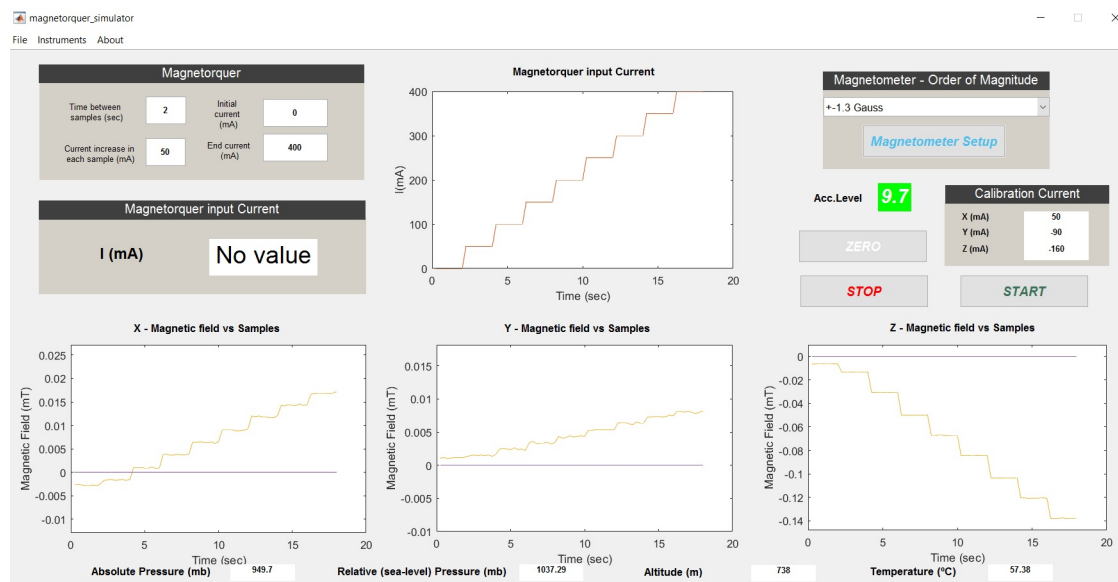


Figura 6.23 – Magnetorquer Simulator: 'Start'

En esta simulación, se puede ver cómo el magnetorquer genera un campo magnético sobre el eje Z, siguiendo una relación lineal con respecto a la corriente suministrada (que el campo generado vaya en sentido negativo simplemente es porque se ha puesto el magnetorquer

mirando hacia abajo, con los cables de conexión arriba). Además, se aprecia el campo residual que se genera en los otros ejes X e Y. Cuanto mejor nivelado esté el magnetómetro con respecto al magnetorquer, menos campo residual será captado por demás ejes.

CAPÍTULO

7

LÍNEAS FUTURAS

En este proyecto se ha desarrollado un sistema para la simulación de campos magnéticos terrestres desde cero, con el objetivo de poder realizar simulaciones magnéticas necesarias durante el desarrollo e implementación de un [picosatélite](#) de tipo [CubeSat](#). Aun habiendo obtenido un sistema bastante completo y automatizado para dichas simulaciones, dicho sistema se puede ir mejorando y haciendo mucho más completo. Algunas líneas de mejora pueden ser:

- Mejora tanto del aspecto como de la solidez de las bobinas de Helmholtz, pudiendo obtener un sistema más vistoso y mucho más comercial para una posible comercialización. Un punto bastante importante, es mejorar la unión entre las bobinas de Helmholtz que, actualmente, se están uniendo mediante bridas. Una posible solución, trata de una pieza impresa 3D que cumpla los requisitos necesarios para mejorar este aspecto. Un primer diseño de esta pieza se puede observar en el apéndice [D](#).
- Inclusión de algún tipo de sistema que pudiera incorporar cualquier dispositivo en el interior del generador de campos de manera que se pueda obtener más movilidad y precisión en el punto en el que se encuentre dicho dispositivo dentro de dicho generador. Ya que actualmente se está utilizando un cajón de madera con una hoja de coordenadas para dicho propósito tal y como se puede observar en la imagen [7.1](#).
- Mejora de las medidas de campo magnético obtenidas generando un algoritmo capaz de ajustar las mediciones según los datos obtenidos por el barómetro. Tanto la presión

como la temperatura influyen en la veracidad de la medida tomada y aunque el sensor LSM303DLHC realiza mediciones bastante buenas, es interesante poder realizar dicho algoritmo para poder corregir dichas mediciones en otro tipo de condiciones que se puedan dar en el satélite en órbita (condiciones como las bajas temperaturas y presión).

- Inclusión del software para la autocalibración y comparación de medidas de los sensores magnéticos LSM303DLHC y HMC5883L en Matlab. De esta manera, se evita tener que iniciar antes de las simulaciones el software de Arduino para la calibración y verificar que se está midiendo bien.
- Inclusión del software desarrollado en el "*GranaSat_Tracker*" e implementación de un simulador de campos magnéticos en órbitas reales. De esta manera, se tendrá todo en un mismo software. Además, la idea sería poder recibir datos de órbita de la [ISS](#) mediante dicho software, obtener el campo magnético que se está recibiendo en ese punto del espacio mediante los algoritmos de predicción de campo magnético terrestre [IGRF](#), y simular dichos campos magnéticos obtenidos en el simulador a distintas velocidades para ver cómo se comportaría el picosatélite en órbita recibiendo un campo magnético de este tipo.
- Mejorar el sensor LSM303DLHC de manera que quede incluido en una [PCB](#) réplica de la que iría dentro del [CubeSat](#) incluyendo además un giróscopo para poder controlar los giros que se pudieran dar sobre dicho satélite teniendo en cuenta que estos giros cambian el sentido de los ejes de referencia del sensor magnético. Un primer diseño de esto se puede apreciar en el apéndice [E](#).

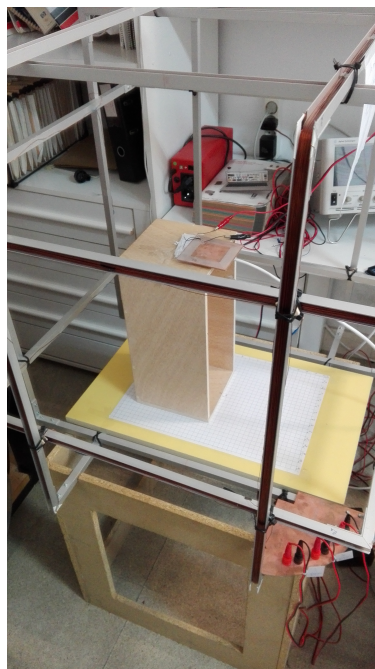


Figura 7.1 – *Cajón de madera y coordenadas para alcanzar el centro del generador*

Apéndices

APÉNDICE

A

ESTUDIO DE MERCADO: SENSORES MAGNÉTICOS PARA CUBESAT

En este Apéndice se hará un estudio de diferentes magnetómetros del mercado, con las características necesarias para ser incorporados en un [CubeSat](#).

Misión (URL)	Magnetómetro	Lectura en:	Coste* (€)
Aau	HMC5883L	3 ejes	6.80
ION	HMC2003	3 ejes	283
HERMES	HMC2003	3 ejes	283
CanX1	HMR2300	3 ejes	911
Compass 1	HMC6352	2 ejes	104
Cute 1.7	HMR2300	3 ejes	911
RAX-1	MicroMag3	3 ejes	8.85
Ncube-1	HMR2300	2 ejes	911
CP3	HMC1052	2 ejes	5.70
CP4	HMC1052	2 ejes	5.70
CP6	HMC5883L	3 ejes	6.80
SwissCube	AK8970N	3 ejes	8.76
StudSat	HMR3300	3 ejes	356

Tabla A.1 – Magnetómetros incluidos en misiones CubeSat

*El coste es aproximado, hay distintos proveedores (Coste revisado a 27 de Junio de 2017)

Otros sensores que no ha sido posible localizar su uso en ninguna misión anterior son:

- **AFF755 y AFF756:** Son sensores de alta sensibilidad que leen en un eje.
- **GF705 y GF708:** Sensores mucho más punteros que los que han sido expuestos con anterioridad ya que usan tecnología GMR (Giant Magnetoresistance). Se obtiene mejor respuesta que los anteriores, pero son bastante caros.
- **LSM303DLHC:** Tiene características similares al sensor HMC5883L. Su precio ronda los 8€.

De todos los sensores expuestos, hay tres sensores que se ajustan al presupuesto y cumplen con las expectativas. Estos son: HMC5883L, AK8970N y LSM303DLHC. El sensor AK8970N ha sido descartado, ya que no se dispone de mucha información sobre él y no tiene las facilidades que los otros dos (librerías de programación, ejemplos, ...). Por tanto, se debe de elegir entre HMC5883L y LSM303DLHC.

Finalmente, se ha decantado por el sensor LSM303DLHC para su uso futuro en la misión [GranaSat](#). El hecho de elegir este sensor, tiene que ver con el consumo de ambos. Los dos sensores tienen un consumo similar, pero el módulo LSM303DLHC es, en realidad, un conjunto de 3 sensores (magnetómetro 3D, acelerómetro 3D y sensor de temperatura) mientras que el HMC5883L es simplemente el sensor magnético. Por lo que se trata de un sensor mucho más completo para incluir en el [CubeSat](#). Aun así, el sensor HMC5883L será usado durante la elaboración de este proyecto para verificar los datos que se están tomando desde el sensor LSM303DLHC. De este modo, al disponer de dos sensores tomando

mediciones, éstas podrán ser comparadas para localizar posibles errores de medición, calibración o, simplemente, la posibilidad de disponer de un sensor defectuoso.

APÉNDICE

B

PROTOBOARD DE TESTEO

En este apéndice va a ser tratada la primera protoboard de testeo que se utilizó para la familiarización con Arduino y su conexión mediante [I2C](#) con el sensor LSM303DLHC [\[21\]](#) y una pantalla LCD. Con esta protoboard, se pueden aprender los conceptos básicos, que serán incluidos y usados para la realización del proyecto.

El dispositivo principal y más importante usado, es un Arduino Mega2560. Este dispositivo tiene una distribución de pines como la que se puede observar en la siguiente imagen [B.1](#):

**ARDUINO
MEGA**
PINOUT DIAGRAM

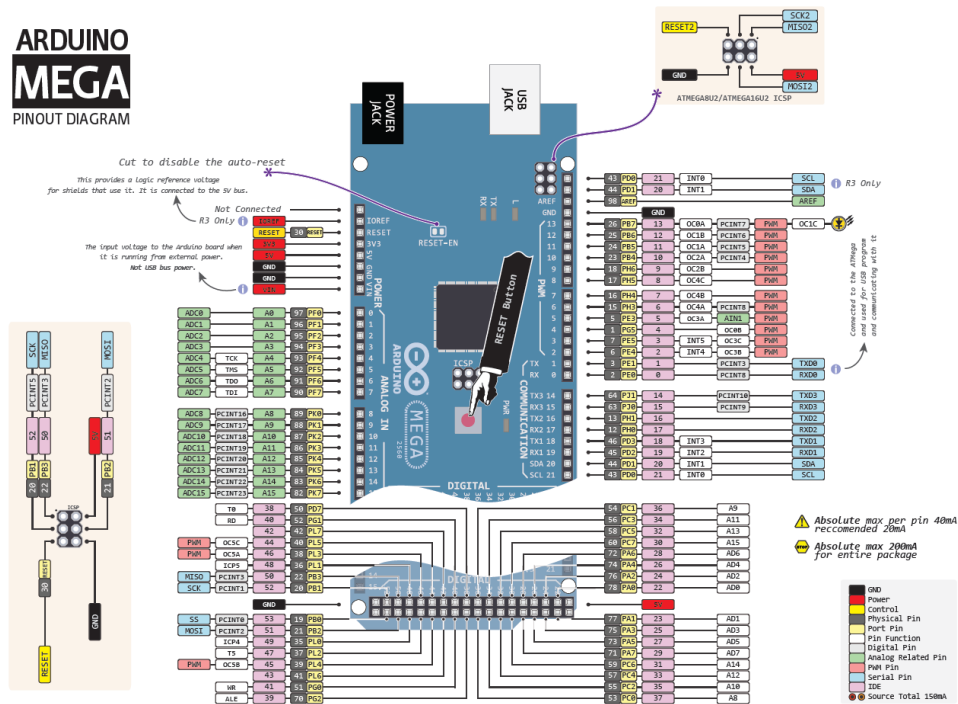


Figura B.1 – Arduino Mega pin mapping

Para este caso, el fabricante elegido es Funduino, y sus características (que son las mismas que para el Arduino Mega2560 oficial) son las que se pueden observar en la tabla B.1 [4]:

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7V - 12V
Voltaje de entrada (límite)	6V - 20V
I/O digital	54
Salida PWM	14
Interfaces de comunicación	4x Serial (UART), 1x SPI, 1x I2C
Entradas analógicas	16
Corriente DC por pin I/O	40mA
Corriente por pin 3.3V	50mA
Memoria Flash	256kB de los cuales 8kB para el gestor de arranque
SRAM	8kB
EEPROM	4kB
Frecuencia del reloj	16MHz

Tabla B.1 – Características Arduino Mega2560 [4]

El programa de control del Arduino se carga a través de USB desde el ordenador. Además, para poder ver los datos que se están midiendo de manera dinámica, como se ha comentado

anteriormente, se hace uso de una pantalla LCD. Estos dispositivos se han agrupado en una protoboard tal y como se puede ver en la siguiente imagen B.2 :

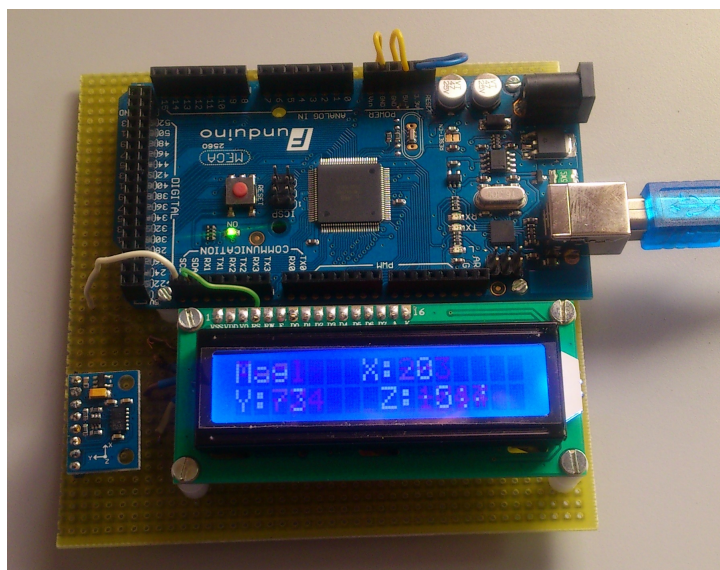


Figura B.2 – Protoboard sensor LSM303DLHC [21]

Notar que en esta imagen, el sensor ha sido puesto sobre la placa para salir mejor en la foto. Pero las conexiones de este sensor con Arduino se realizan mediante unos cables bastante largos para poder tener el Arduino fuera del generador de campos y el sensor dentro (y así evitar también interferencias que producirían el Arduino y la pantalla LCD sobre el sensor). En la siguiente imagen se muestran las conexiones realizadas en este dispositivo B.3:

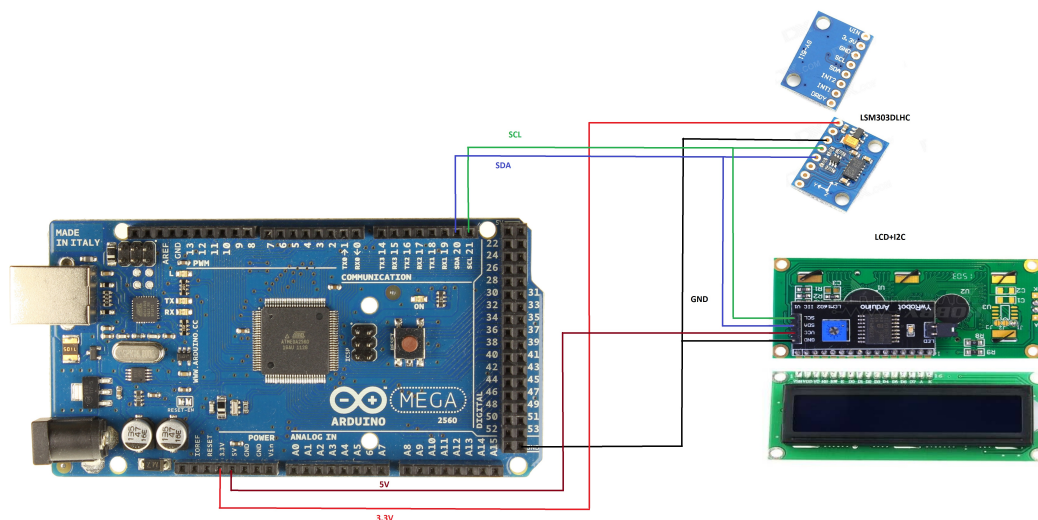


Figura B.3 – Conexiones Arduino + LSM303DLHC + LCD-12C

La comunicación entre este dispositivo y el ordenador para poder guardar los datos y configurar el sensor se hará con Matlab. Así, el controlador mandará los datos al PC que

guarda esos datos en una variable Matlab. Además, es necesario realizar el software en Arduino que controla y obtiene los datos desde el magnetómetro y los envía al PC. Este software tendrá un protocolo de comunicación en el que se entrará en profundidad más adelante con el desarrollo software.

Para el control de esta primera protoboard, se tiene el siguiente código.

```

1
2 #include <Wire.h>
3 #include <LSM303.h>
4 #include <LCD.h>
5 #include <LiquidCrystal_I2C.h> // Librería para la LCD
6
7 LSM303 compass;
8 LSM303::vector running_min = {2047, 2047, 2047}, running_max =
  {-2048, -2048, -2048}; // Vector para el autocalibrado
9
10 // Declaramos una serie de constantes para controlar la pantalla LCD
  , esta configuración tiene que estar
11 // acorde con la librería utilizada, ya que controlamos la pantalla
  por I2C
12 #define I2C_ADDR_LCD 0x27
13 #define BACKLIGHT_PIN 3
14 #define En_pin 2
15 #define Rw_pin 1
16 #define Rs_pin 0
17 #define D4_pin 4
18 #define D5_pin 5
19 #define D6_pin 6
20 #define D7_pin 7
21 #define LED_OFF 1
22 #define LED_ON 0
23
24 // Declaramos un objeto para la LCD, los argumentos pasados son los
  que requieren la librería utilizada.
25 LiquidCrystal_I2C lcd(I2C_ADDR_LCD, En_pin, Rw_pin, Rs_pin, D4_pin,
  D5_pin, D6_pin, D7_pin);
26
27 void setup() {
28   Serial.begin(9600);
29   Wire.begin();
30   compass.init();
31   compass.enableDefault();
32
33   // Definimos los rangos máximos y mínimo para cada eje del magnetó
  metro para la autocalibración
34   running_min.x = min(running_min.x, compass.m.x);
35   running_min.y = min(running_min.y, compass.m.y);
36   running_min.z = min(running_min.z, compass.m.z);
37
38   running_max.x = max(running_max.x, compass.m.x);
39   running_max.y = max(running_max.y, compass.m.y);
40   running_max.z = max(running_max.z, compass.m.z);

```

```

41
42 // Hacemos una conversión de valores para poder utilizarlos
43 int max_X = (int) running_max.x;
44 int max_Y = (int) running_max.y;
45 int max_Z = (int) running_max.z;
46 int min_X = (int) running_min.x;
47 int min_Y = (int) running_min.y;
48 int min_Z = (int) running_min.z;
49
50 // Valores de calibración para el magnetometro configurando la
   cabecera
51 compass.m_min.x = min_X; compass.m_min.y = min_Y; compass.m_min.z
   = min_Z;
52 compass.m_max.x = max_X; compass.m_max.y = max_Y; compass.m_max.z
   = max_Z;
53
54 // Inicializamos la LCD
55 lcd.begin (20,4);
56 // Encendemos el Blacklight
57 lcd.setBacklightPin(BACKLIGHT_PIN,POSITIVE);
58 lcd.setBacklight(LED_ON);
59 lcd.backlight(); // El control del Blacklight es llevado a cabo
   por el programa, que lo pone a ON
60 }
61
62 void loop() {
63 // Hacemos un reset en el Display
64 lcd.clear();
65
66 compass.read();
67 int heading = compass.heading((LSM303::vector){0,-1,0});
68 Serial.println(heading);
69 lcd.setCursor(0,0);
70 lcd.print(heading);
71 delay(1000);
72 }

```


APÉNDICE

C

FICHERO CON LA CONFIGURACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS, *SAVED_DEVICES_ADDRESSES*

Se tiene un fichero con la configuración de todos los instrumentos utilizados en el Granasat Tracker. Algunos de estos instrumentos, han sido utilizados en este proyecto. Las variables globales de interés de este fichero son:

- Agilent_N6705A: Se puede encontrar las características de la fuente de alimentación.
- helmholtz_coils: Aquí es guardada la configuración que se cargará por defecto para el simulador de bobinas de Helmholtz.
- Magnetorquer: Variable global para la configuración que será cargada por defecto en la interfaz del simulador de magnetorquer.
- Arduino_Mega: Parámetros necesarios para la comunicación con Arduino.

Este fichero contiene la siguiente información:

```

1 Coils.adjustment_polynome=adjustment_polynome;
2 Coils.maximum_field_allowed=maximum_field_allowed;
3 Coils.minimum_field_allowed=minimum_field_allowed;
4 Coils.minimum_field_allowed=-171.9000;
5 Coils.maximum_field_allowed=201.1000;
6 Coils.adjustment_polynome=[ -36.0562    -0.9818];
7 save('Configuration\saved_devices_addresses.mat','Coils','-append');
8
9 global Coils;
10 adjustment_polynome= Coils.adjustment_polynome; %Para saber que
    corriente meter a las bobinas
11 maximum_field_allowed=Coils.maximum_field_allowed;
12 minimum_field_allowed=Coils.minimum_field_allowed;
13
14 Coils.adjustment_polynome=adjustment_polynome;
15 Coils.maximum_field_allowed=maximum_field_allowed;
16 Coils.minimum_field_allowed=minimum_field_allowed;
17
18 load('Configuration\saved_devices_addresses.mat');
19 Bridges_Measurement.popupmenuInductionMethod='Coils';
20 Bridges_Measurement.popup_nodeSourceVb='SMU1';
21 Bridges_Measurement.editStabilizationTime=0.5;
22 Bridges_Measurement.editVoltageAverages=4;
23 Bridges_Measurement.editFixedBiasCurrent=1e-3;
24 Bridges_Measurement.editStartBiasCurrent=1e-3;
25 Bridges_Measurement.editStopBiasCurrent=10e-3;
26 Bridges_Measurement.editStepBiasCurrent=1e-3;
27 Bridges_Measurement.editBridgesMaxBiasVoltage=10;
28 Bridges_Measurement.editBridgesMaxBiasCurrent=30e-3;
29 Bridges_Measurement.editFixedBiasCurrent=1e-3;
30 Bridges_Measurement.editCurrentMRAnalysis=1e-3;
31 Bridges_Measurement.editBridgesEquivalentResistance=1000;
32 Bridges_Measurement.editCurrentRangeLimits=100e-3;
33 Bridges_Measurement.editCurrentRangeStep=5e-3;
34 Bridges_Measurement.editCurrentSubRangeLimits=15e-3;
35 Bridges_Measurement.editCurrentSubRangeStep=1e-3;
36 Bridges_Measurement.editFieldRangeLimits=200;
37 Bridges_Measurement.editFieldRangeStep=5;
38 Bridges_Measurement.editFieldSubRangeLimits=10;
39 Bridges_Measurement.editFieldSubRangeStep=1;
40 Bridges_Measurement.checkboxReverseMagneticFieldSweep='yes';
41 Bridges_Measurement.checkboxPrecisionSubRangeMagnetic='yes';
42 Bridges_Measurement.checkboxPerformMRAnalysis='yes';
43 Bridges_Measurement.checkboxPerformMRAnalysis='yes';
44 Bridges_Measurement.checkboxDefineCurrentMRAnalysis='yes';
45 Bridges_Measurement.checkboxPrecisionSubRangeCurrent='yes';
46 Bridges_Measurement.checkboxReverseCurrentSweep='yes';
47 Bridges_Measurement.radiobuttonFixedBiasCurrent='yes';
48 Bridges_Measurement.radiobuttonVariableBiasCurrent='no';
49 Bridges_Measurement.radiobuttonBridgesEquivalentResistance='no';
50 Bridges_Measurement.radiobuttonBridgesMaxBiasCurrent='no';
51 Bridges_Measurement.popupmenuSelectLocation='Probe Station';

```

```

52 Bridges_Measurement.popupmenuSelectSource='HP 4145B';
53 Bridges_Measurement.popupmenuSelectSMU='SMU4';
54 save('Configuration\saved_devices_addresses.mat','
    Bridges_Measurement','-append');
55
56 Cryostat.unitTemp='K';
57 Cryostat.sensorType='PT100';
58 Cryostat.tempSelected='-100';
59 Cryostat.operationMode='ANALOG';
60 Cryostat.controlMode='DISABLED';
61 Cryostat.portStatus='DISCONNECTED';
62 Cryostat.runStatus='DISABLED';
63 save('saved_devices_addresses.mat','Cryostat','-append');
64
65 Agilent_N6705A.Name = 'Agilent_N6705A';
66 Agilent_N6705A.Gpib_Address = 6;
67 Agilent_N6705A.Logical_Board_Index = 9; %7;
68 Agilent_N6705A.Verbose = 2;
69 save('saved_devices_addresses.mat','Agilent_N6705A','-append');
70
71 helmholtz_coils.time_X=2;
72 helmholtz_coils.time_Y=2;
73 helmholtz_coils.time_Z=2;
74 helmholtz_coils.init_current_X = -0.5;
75 helmholtz_coils.init_current_Y = -0.5;
76 helmholtz_coils.init_current_Z = -0.5;
77 helmholtz_coils.end_current_X = 0.5;
78 helmholtz_coils.end_current_Y = 0.5;
79 helmholtz_coils.end_current_Z = 0.5;
80 helmholtz_coils.increase_current_X = 0.05;
81 helmholtz_coils.increase_current_Y = 0.05;
82 helmholtz_coils.increase_current_Z = 0.05;
83 helmholtz_coils.checkbox_X_value = 1;
84 helmholtz_coils.checkbox_Y_value = 1;
85 helmholtz_coils.checkbox_Z_value = 1;
86 helmholtz_coils.limit_time = 0.25;
87 helmholtz_coils.zero_X=0;
88 helmholtz_coils.zero_Y=0;
89 helmholtz_coils.zero_Z=0;
90 helmholtz_coils.stop = 0;
91 helmholtz_coils.mag_setup = 0;
92 helmholtz_coils.gain_XY = 1/1100;
93 helmholtz_coils.gain_Z = 1/980;
94 save('saved_devices_addresses.mat','helmholtz_coils','-append');
95
96 Magnetorquer.time=2;
97 Magnetorquer.init_current = -0.5;
98 Magnetorquer.end_current = 0.5;
99 Magnetorquer.increase_current = 0.05;
100 Magnetorquer.limit_time = 0.25;
101 Magnetorquer.zero_X=0;
102 Magnetorquer.zero_Y=0;

```

```
103 Magnetorquer.zero_Z=0;
104 Magnetorquer.stop = 0;
105 Magnetorquer.mag_setup = 0;
106 Magnetorquer.gain_XY = 1/1100;
107 Magnetorquer.gain_Z = 1/980;
108 save('saved_devices_addresses.mat','Magnetorquer','-append');
109
110 Arduino_Mega.Name = 'Arduino_Mega_2560';
111 Arduino_Mega.serialPort = 'COM3';
112 save('saved_devices_addresses.mat','Arduino_Mega','-append');
```

Para cargar dicho fichero, basta con copiar y pegar el código y se creará una variable con toda la información expuesta. Esta variable deberá de estar en la carpeta "GranaSAT_Tracker_V11/configuration".

APÉNDICE

D

PIEZA PARA SUJECCIÓN Y UNIÓN DE LAS BOBINAS DE HELMHOLTZ

Para realizar una correcta sujeción de las bobinas de Helmholtz y poder sustituir las actuales bridas, que, a pesar de hacer su función, no favorecen al aspecto del generador ni da la fijación requerida (a veces se mueven y hay que recolocar cuando se cambia el generador de campos de lugar) se ha desarrollado un posible primer diseño de una pieza para dicha sujeción en *SolidWorks* para, posteriormente, su impresión 3D y sustituir dichas bridas por estas piezas. Los archivos para dichas piezas se podrán encontrar en el disco del proyecto, su diseño, con el alzado, planta y perfil, se puede apreciar en la imagen [D.1](#).

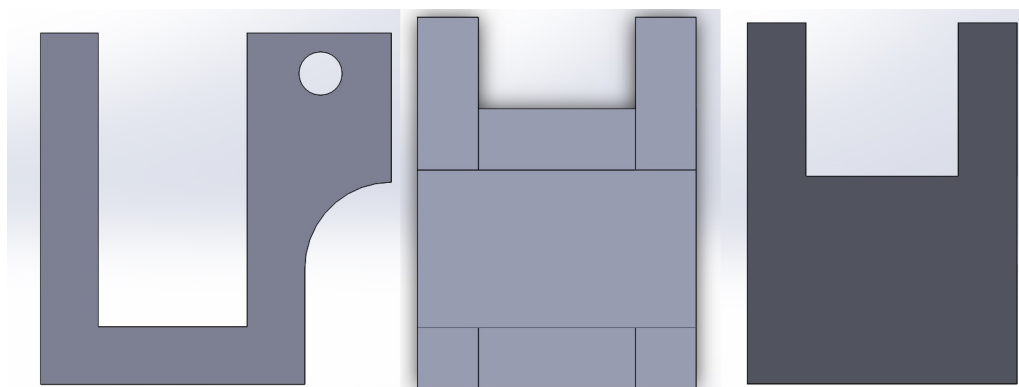


Figura D.1 – Alzado, planta y perfil

Para tener una idea de como quedaría la pieza, esta puede ser vista a continuación [D.2](#).

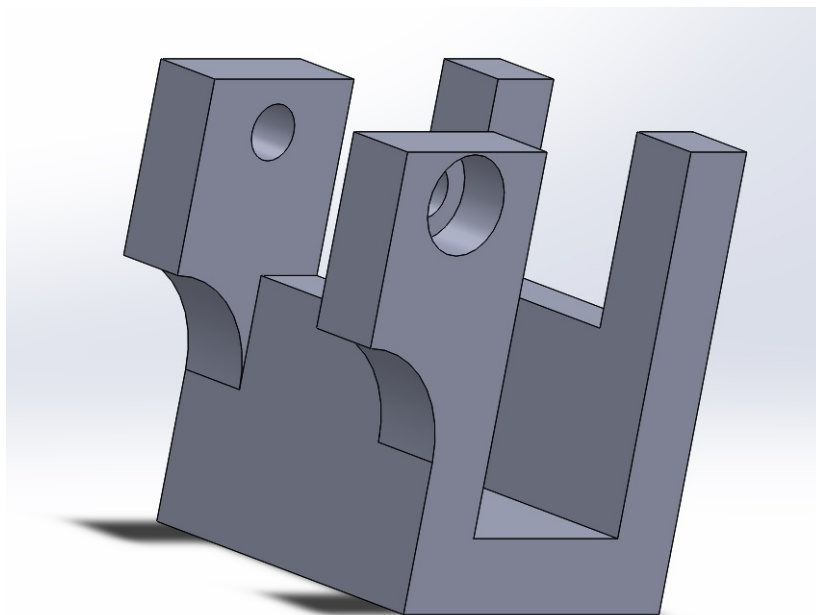


Figura D.2 – *Pieza para juntas y sujeción de bobinas de Helmholtz*

Se fueron realizando varios diseños hasta dar con esta pieza. Esta pieza es el resultado de una pequeña optimización de los anteriores.

APÉNDICE

E

PRIMER DISEÑO PCB CON SENSOR MAGNÉTICO Y GIRÓSCOPO

Un primer diseño propuesto para la una [PCB](#), en el que se engloba el sensor magnético tratado LSM303DLHC [\[21\]](#) y un giróscopo L3G4200D [\[20\]](#). Se ha realizado un diseño lo más miniaturizado posible para la tecnología de impresión de placas de la que se dispone. Estos sensores, han sido polarizados y conectados según sus datasheets cuyas características se pueden observar en las citas realizadas sobre los mismos en este mismo párrafo. Los ficheros de diseño se encuentran en el CD asociado a la memoria, aquí solo se va a mostrar un primer diseño realizado, del que se puede partir en líneas futuras para mejorarlo e incluirlo en el [CubeSat](#). Dicho diseño se puede ver en el siguiente diagrama [E.1](#)

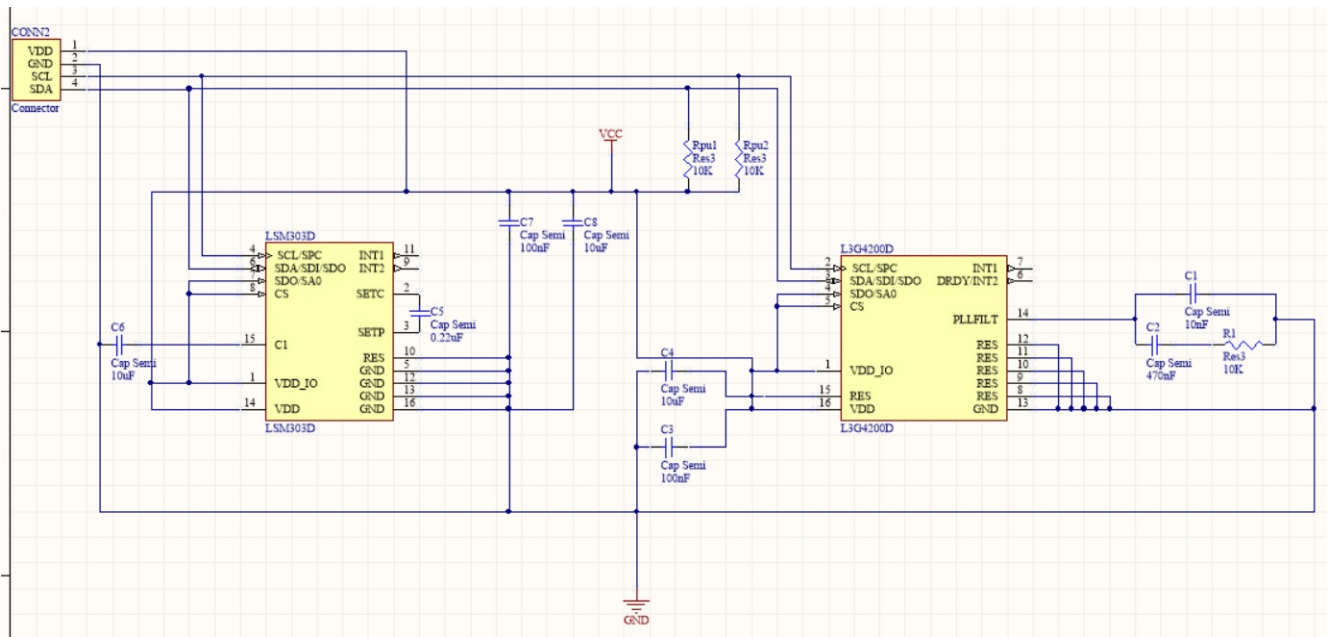


Figura E.1 – Esquemático PCB: LSM303DLHC + L3G4200D

Cuyo circuito impreso correspondería con la siguiente imagen E.2

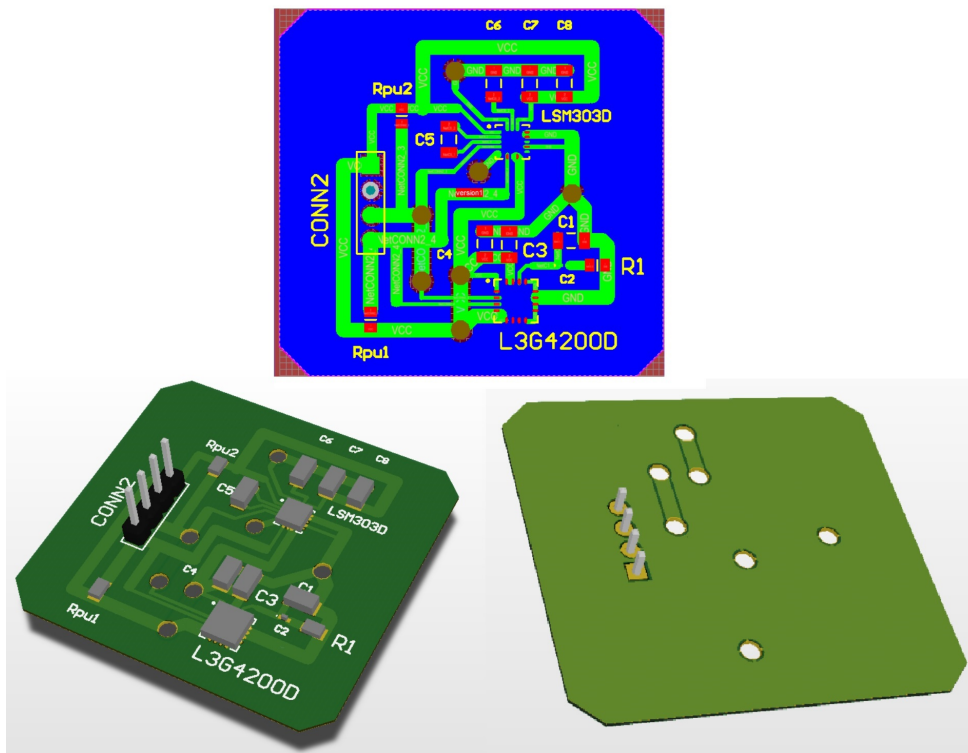


Figura E.2 – PCB: LSM303DLHC + L3G4200D

GLOSARIO

CubeSat Este es el nombre de una especificación para picosatélites desarrollada en 1999 por la Universidad Politécnica del Estado de California y la Universidad de Standford. En esta especificación se establece que el satélite tiene que tener una estructura en forma de cubo con 10 cm de altura, cuya masa no puede ser mayor que 1 kg..

Gauss Un gauss (**G**) es una unidad de campo magnético del *Sistema Cegesimal de Unidades (CGS)*, nombrada en honor del matemático y físico alemán Carl Friedrich Gauss. Un gauss se define como un maxwell por centímetro cuadrado ($1 \text{ Maxwell} / \text{cm}^2$).

GranaSat Nombre que recibe el proyecto multidisciplinar llevado a cabo por la Universidad de Granada, cuya intención es la fabricación de un picosatélite tipo CubeSat por medio de estudiantes de diferentes carreras mediante colaboraciones y proyectos fin de carrera o fin de grado, guiado por el profesor Andrés Roldán Aranda y por el departamento de electrónica de la Universidad de Granada.

LEO Del inglés "Low Earth Orbit". Se trata de órbitas de satélites artificiales que una altitud entre 200 km a 2000 Km.

pico satélite Este es el nombre con el que se designa todos aquellos satélites cuya masa se encuentra entre 0.1 kg y 1 kg.

Tesla Esta es la unidad con la que se denomina el campo **B** en el Sistema de Unidades Internacional. Un Tesla se define como la inducción de un campo magnético que ejerce una fuerza de 1 Newton sobre una carga de 1 Culombio que se mueve a velocidad de 1 m/s dentro del campo y perpendicularmente a las líneas de inducción magnética.

ACRÓNIMOS

ADCS Attitude Determination and Control System.

GPIB General Purpose Interface Bus.

GPIO General Purpose Input Output.

GPS Global Positioning System.

GUI Graphical User Interface.

I2C Inter-Integrated Circuit.

IAGA International Association of Geomagnetism and Aeronomy.

IGRF International Geomagnetic Reference Field.

ISS International Space Station.

PCB Printed Circuit Boards.

UGR Universidad de Granada.

USB Universal Serial Bus.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AGILENT. Agilent hp-3478a manual. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/03478-90008.pdf>.
- [2] AGILENT. N6705a dc power analyzer, user's guide. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/N6705-90001.pdf>.
- [3] ANDRÉS F, E. F. Y. C. R. Metodología de diseño e implementación de un sistema para generación de campos magnéticos uniformes con bobinas de helmholtz cuadrada tri-axial. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642014000200002.
- [4] ARDUINO. Arduino mega 2560. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>.
- [5] BELLINI, N. Magnetic actuators for nanosatellite attitude control. Master's thesis, Universita di Bologna, 2014. <http://amslaurea.unibo.it/7506/>, 2014.
- [6] BOSCH. Datasheet bmp180 digital pressure sensor. <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>.
- [7] CUBESATKIT. 3d models of the cubesat kit. Disponible en <http://www.cubesatkit.com/content/design.html>.
- [8] DAVIS, J. Mathematical modeling of earth's magnetic field, 2004.
- [9] FABRIZIO PIERGENTILI, GIAN PAOLO CANDINI, M. Z. Design, manufacturing and test of a real time three-axis magnetic field simulator.

- [10] HEWLETT-PACKARD. Hp 3478a service manualhp 3478a service manual. <https://www.manualslib.com/products/Hp-3478a-2960320.html>.
- [11] HIRST. Gmo7 & gmo8 gaussmeters. <http://www.hirst-magnetics.com/downloads/gm07&gm08.pdf>.
- [12] HONEYWELL. 3-axis digital compass ic hmc5883l0. <https://media.digikey.com/PDF/Data%20Sheets/Honeywell%20PDFs/HMC5883L.pdf>.
- [13] LEE, S. University, c. p. s. cubesat design specification. Disponible en http://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf.
- [14] LÓPEZ, A. T. Testbed for cubesat adcs with magnetorquers.
- [15] M OLMO, R. N. Bobinas helmholtz. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/helmholtz.html>.
- [16] METARGENTINA. El campo magnético de la tierra, características principales e inversión de los polos magnéticos. <http://metargentina.blogspot.com.es/2013/06/el-campo-magnetico-de-la.html>.
- [17] NASA. Measuring earth's magnetism, 2014. <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=84266>.
- [18] POLYSAT. Cal poly's 8th satellite, december 5th, 2013. Disponible en <http://polysat.calpoly.edu/launched-missions/cp8-ipex/>.
- [19] SÁNCHEZ, J. La tierra actúa como un imán. <http://elfisicoloco.blogspot.com.es/2013/02/la-tierra-actua-como-un-iman.html>.
- [20] STMICROELECTRONICS. L3g4200d datasheet. https://www.pololu.com/file/download/L3G4200D.pdf?file_id=0J491.
- [21] STMICROELECTRONICS. Lsm303dlhc datasheet. <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/56/ec/ac/de/28/21/4d/48/DM00027543.pdf/files/DM00027543.pdf/jcr:content/translations/en.DM00027543.pdf>.
- [22] STMICROELECTRONICS. Stl298 datasheet. <http://www.st.com/en/motor-drivers/1298.html>.
- [23] TRIVEDI. Geomagnetic phenomena in the south atlantic anomaly region. https://www.researchgate.net/publication/223787033_Geomagnetic_phenomena_in_the_South_Atlantic_anomaly_region_in_Brazil.
- [24] WIKIPEDIA. Campo magnético terrestre. https://es.wikipedia.org/wiki/Campo_magn%C3%A9tico_terrestre.

- [25] WIKIPEDIA. Gpib. <https://es.wikipedia.org/wiki/GPIB>.
- [26] WIKIPEDIA. I2c. <https://es.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>.
- [27] WIKIPEDIA. Ley de biort-savart. https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Biot-Savart.
- [28] WIKIPEDIA. Órbitas de satélites artificiales. https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93rbitas_de_sat%C3%A9lites_artificiales.
- [29] WIKIPEDIA. Transistores mosfet. https://es.wikipedia.org/wiki/Transistor_de_efecto_de_campo_metal-%C3%B3xido-semiconductor#Modos_de_operaci.C3.B3n.