

Universidad de La Laguna
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología (ESIT)
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño de una Jaula de Helmholtz para el testeo del nanosatélite TEIDESAT-I

Autora: Andrea Valentina Pereira Serrano

Tutor: Santiago Torres Álvarez

Convocatoria: Septiembre 2022

Curso 2021-2022

Índice:

Lista de Figuras	5
1. Resumen / Abstract	10
1.1. Resumen	10
1.2. Abstract	10
2. Memoria	11
2.1. Objetivo	11
2.2. Alcance	11
2.3. Campo magnético terrestre	12
2.3.1. Descripción del campo magnético terrestre	12
2.3.2. Modelos geomagnéticos	14
2.3.3. Recorrido del satélite en la órbita LEO	16
2.4. Principios de la Jaula de Helmholtz	17
2.4.1. Bobinas de Helmholtz	17
2.4.2. Jaula de Helmholtz	21
2.5. Cancelación del campo magnético terrestre	22
2.6. Normativa aplicable	27
3. Metodología	30
3.1. Descripción del sistema	30
3.2. Diseño y dimensionamiento	31
3.2.1. Estructura	31
3.2.1.1. Longitud y separación	31
3.2.1.2. Número de vueltas	35
3.2.1.3. Modelo de Elemento Finito para Magnetismo (FEMM)	36
3.2.1.4. Modelos 3D y materiales para la construcción	39
3.2.1.5. Recomendaciones de construcción	43
3.2.1.6. Prototipo	45
3.2.2. Control	46
3.2.2.1. Funcionamiento general y ficheros Matlab®	46
3.2.2.2. Obtención de los datos de campo magnético	52
3.2.2.3. Diagramas de control	54
3.2.3. Electrónica	62
3.2.3.1. Funcionamiento general	62
3.2.3.2. Análisis de los componentes	65
3.2.3.2.1. Hilo de cobre, inductancia y resistencia interna	65
3.2.3.2.2. Puente H	66
3.2.3.2.3. Amplificador Operacional	68
3.2.3.2.4. Etapa de salida. Amplificador push-pull	70

3.2.3.2.5. IMU: Magnetómetro	73
3.2.3.3. Diseño final y simulaciones	74
3.2.3.4. Consideraciones térmicas	76
4. Conclusiones / Conclusions	81
4.1. Conclusiones	81
4.2. Conclusions	82
5. Presupuesto	83
6. Bibliografía	85
7. Anexos	89

Agradecimientos:

Los logros no son posibles si no existen personas que ayuden a hacerlos realidad, a mi tutor Santiago Torres y a todo el equipo de TEIDESAT, gracias. Espero que en este trabajo haya sido capaz de reflejar todo de lo que ustedes he aprendido.

A mis amigos, espero que sepan lo agradecida que estoy por hacerme más fácil el comenzar de cero en un país nuevo.

A mi mamá, papá y hermana, cuyo apoyo sólo se volvió mayor con la distancia, a ustedes les debo la persona que hoy soy y la profesional que comienzo a ser. Mis logros siempre serán nuestros, y no hay nada que me haga más feliz.

Lista de Figuras

[Figura 2.1](#): Inconsistencias del campo magnético terrestre. [1]

[Figura 2.2](#): Sistema de coordenadas usado para la caracterización del campo magnético terrestre. [3]

[Figura 2.3](#): Campo magnético terrestre en el año 2018. [4]

[Figura 2.4](#): Inclinación orbital de la trayectoria que sigue la ISS. [9]

[Figura 2.5](#): Dos órbitas consecutivas de la ISS. [10]

[Figura 2.6](#): Distintos recorridos orbitales de la ISS. [10]

[Figura 2.7](#): *Ley de Ampère*, hilo conductor infinito. [11]

[Figura 2.8](#): *Ley de Ampère*, inductor. [12]

[Figura 2.9](#): Bobinas de Helmholtz y la zona de campo magnético constante que generan. [13]

[Figura 2.10](#): Separación entre bobinas vs. zona de campo constante: $a < L/2$ (izquierda), $a = L/2$ (central) y $a > L/2$ (derecha). [12]

[Figura 2.11](#): Bobinas de Helmholtz cuadradas. [14]

[Figura 2.12](#): Jaula de Helmholtz. [15]

[Figura 2.13](#): Bobinas de Helmholtz sin estar sometidas a circulación de corriente eléctrica con una brújula en su centro.

[Figura 2.14](#): Bobinas de Helmholtz cuando están sometidas a circulación de corriente eléctrica con una brújula en su centro.

[Figura 2.15](#): Cancelación del campo magnético ambiental/*bias* y la generación del deseado (B_{total}) mediante la orientación del eje longitudinal de las bobinas con el eje de interés.

[Figura 2.16](#): Disposición de las bobinas (rojo) en la simulación de Wolfram-Alpha.

[Figura 2.17](#): Gráfico vectorial de Bobinas de Helmholtz sin suministración de corriente.

[Figura 2.18](#): Gráfico vectorial de Bobinas de Helmholtz para $I=0,15A$ (izquierda), $I=0,25A$ (central), $I=0,35A$ (derecha).

[Figura 2.19](#): Gráfico vectorial de Bobinas de Helmholtz para $I=0,43A$ (izquierda), $I=0,43153A$ (central), $I=0,45A$ (derecha).

[Figura 2.20](#): Tabla 1 del Anexo II del RD 299/2016: sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos. [\[24\]](#)

[Figura 2.21](#): Tabla B1 del Anexo II del RD 299/2016: sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos. [\[24\]](#)

[Figura 3.1](#): Resultados de simulación para Bobinas de Helmholtz con $L=1m$. [\[25\]](#)

[Figura 3.2](#): Resultados de simulación para Bobinas de Helmholtz con $L=2m$. [\[25\]](#)

[Figura 3.3](#): Resultados de simulación para Bobinas de Helmholtz con $L=1,5m$. [\[25\]](#)

[Figura 3.4](#): Resultados de simulación para Bobinas de Helmholtz con $L=1,5m$. [\[25\]](#)

[Figura 3.5](#): Resultados de la densidad de campo magnético de Bobinas de Helmholtz simuladas a través del FEMM. [\[26\]](#)

[Figura 3.6](#): Resultados del tamaño de la zona de campo magnético homogéneo de Bobinas de Helmholtz simuladas a través del FEMM. [\[26\]](#)

[Figura 3.7](#): Perfil en U propuesto para la construcción de la Jaula de Helmholtz (superior: cotas en mm, inferior: cotas en cm).

[Figura 3.8](#): Modelos en 3D de la Jaula de Helmholtz (vista desde arriba, cotas en cm).

[Figura 3.9](#): Modelo en 3D de la Jaula de Helmholtz con las direcciones en las que cada par de bobinas produce campo magnético.

[Figura 3.10](#): Modelo en 3D de la Jaula de Helmholtz con apoyos en las esquinas.

[Figura 3.11](#): Soportes para el ensamblaje de las Bobinas de Helmholtz. [\[27\]](#)

[Figura 3.12](#): Esquema general de control para la Jaula de Helmholtz.

[Figura 3.13](#): Consideraciones para el control de la Jaula de Helmholtz como un conjunto de sistemas SISO independientes (control descentralizado) o un único sistema MIMO.

[Figura 3.14](#): Esquema de las funciones del control de la Jaula de Helmholtz con Matlab®.

[Figura 3.15](#): Elección de coordenadas para simulación con la Jaula de Helmholtz basada en el ejemplo de Matlab®: “*Create an Interactive Map for Selecting Point Features*”. [\[28\]](#)

[Figura 3.16](#): Obtención de data geomagnética a través del IGRF. [\[6\]](#)

[Figura 3.17](#): Diagrama del comportamiento ideal de un par de Bobinas de Helmholtz.

[Figura 3.18](#): *Total Magnetic Field*. Gráfica del campo magnético total generado por un par de bobinas, comportamiento ideal.

[Figura 3.19](#): Diagrama de control del comportamiento no ideal de un par de Bobinas de Helmholtz.

[Figura 3.20](#): Comparación de la generación de corriente en el caso ideal (instantánea) y no ideal (no instantánea) en *Simulink*.

[Figura 3.21](#): *Total Magnetic Field*. Gráfica del campo magnético total generado por un par de bobinas sin la implementación de un PID.

[Figura 3.22](#): *Total Magnetic Field* con la aplicación de acción proporcional. $P=0.001$ (superior izquierda), $P=1$ (superior derecha), $P=10$ (inferior izquierda), $P=50$ (inferior derecha).

[Figura 3.23](#): *Total Magnetic Field* con la aplicación de acción integral. $I=0.001$ (superior izquierda), $I=0.1$ (superior derecha), $I=1$ (abajo).

[Figura 3.24](#): *Total Magnetic Field* con la aplicación de acción proporcional e integral. $P=1$ $I=0.5$ (superior), $P=1$ $I=1$ (inferior).

[Figura 3.25](#): Funcionamiento general del sistema eléctrico de la Jaula de Helmholtz.

[Figura 3.26](#): Circuito de un puente H (superior), circulación de corriente en distintas direcciones (inferior). [\[29\]](#)

[Figura 3.27](#): Motor driver shield para Arduino. [\[30\]](#)

[Figura 3.28](#): Parámetros necesarios para el cálculo de la inductancia de una bobina. [\[32\]](#)

[Figura 3.29](#): Prototipo de la estructura de una Bobina de Helmholtz.

[Figura 3.30](#): Condiciones de operación máximas y recomendadas del circuito integrado L293D. [Anexo II]

[Figura 3.31](#): Amplificador Operacional en configuración no inversora.

[Figura 3.32](#): Esquema del amplificador push-pull (superior), conducción del NPN (inferior izquierda) y conducción del PNP (inferior derecha). [31]

[Figura 3.33](#): Encapsulados de los transistores NPN 2N3055 (izquierda) y PNP D45VH10 (derecha) del fabricante ON Semiconductor. [Anexos III y IV]

[Figura 3.34](#): IMU LSM9DS1 del fabricante Adafruit. [Anexo V]

[Figura 3.35](#): Esquema del sistema de electrónica de para un par de Bobinas de Helmholtz basado en un puente H, amplificador operacional y amplificador push-pull.

[Figura 3.36](#): Circuitos en LTSpice® con componentes ideales (izquierda) y reales (derecha).

[Figura 3.37](#): Gráficas de las simulaciones para los circuitos con componentes ideales y reales para corrientes bidireccionales.

[Figura 3.38](#): Gráficas de potencia de LTSpice® para el circuito con componentes reales. Transistor NPN (superior izquierda), resistencia (superior derecha), OPAMP (inferior izquierda) y fuente +Vcc (inferior derecha).

[Figura 3.39](#): Circuito térmico equivalente de los transistores BJT.

1. Resumen / Abstract

1.1. Resumen

La fase de prueba de un nanosatélite es la etapa más importante en donde se comprueba y corrige el funcionamiento de sus distintos subsistemas. El sistema de orientación, ADCS (*Attitude Determination Control System*), es el más difícil de comprobar por el desafío que implica simular las condiciones del espacio en Tierra. En el presente Trabajo de Fin de Grado se propone el diseño de una Jaula de Helmholtz, un dispositivo constituido por bobinas orientadas de distintas formas que permite la generación de campo magnético tridimensional, teniendo así la capacidad de probar el nanosatélite en un entorno magnético lo más similar posible al que se verá sometido en el espacio. Este diseño implica el dimensionamiento de la estructura física y el desarrollo de los sistemas de control y electrónica, que son los elementos principales que permiten su correcto funcionamiento y cuyos cálculos, análisis y simulaciones se presentan en este documento.

Palabras clave: Jaula de Helmholtz, campo magnético, bobinas.

1.2. Abstract

Testing of a nanosatellite is the most crucial phase in which the operation of their subsystems is verified and corrected. The test proofs of the orientation system, ADCS (*Attitude Determination Control System*), are the hardest because of the difficulties of simulating space conditions on Earth. In this work the design of a Helmholtz Cage is presented. It consists of a device created by coils oriented in different ways that allows the generation of a tridimensional magnetic field, thus allowing the capability of testing the nanosatellite in a magnetic environment as close as the conditions that will be subjected to in space. This design implies the sizing of the physical structure and development of the control and electronic systems, the main components that enable the proper functioning of the cage. The calculations, analysis and simulations of these systems are presented in this document.

Key words: Helmholtz Cage, magnetic field, coils.

2. Memoria

2.1. Objetivo

Uno de los subsistemas cruciales de cualquier satélite es el ADCS (*Attitude Determination and Control System*). Este se encarga de la determinación y control de la orientación del satélite con respecto a un sistema de referencia, de cara a establecer acciones de control para su corrección o modificación.

De entre todas las fases que implica el diseño de un nanosatélite como será el TEIDESAT-I, una de las más importantes y críticas es el testeo de todos sus subsistemas y su funcionamiento conjunto. Es durante esta fase donde se hacen las comprobaciones necesarias y la localización y corrección de posibles errores; sin embargo todo esto se hace en las condiciones de tierra, el TEIDESAT-I estará en una órbita a 400 km de altitud aproximadamente, en el que su entorno será radicalmente diferente (especialmente el magnético).

De aquí nace la necesidad de diseñar un instrumento que permita la simulación de las condiciones magnéticas del espacio, para hacer un testeo más riguroso en condiciones más fieles a las que el satélite tendrá en órbita. Una Jaula de Helmholtz es capaz de generar campo magnético uniforme tridimensional, en la que de forma controlada se puede variar su magnitud con el objetivo de simular las condiciones en las que se quiera testear al *Cubesat*. La presente memoria refiere al diseño de tal instrumento, cuya futura implementación ofrecerá resultados más precisos y fieles al verdadero comportamiento que tendrá el TEIDESAT-I en el espacio, logrando así asegurar en mayor medida el éxito de la misión.

2.2. Alcance

En la presente memoria se presenta la investigación, diseño y simulación del funcionamiento de una Jaula de Helmholtz, cuyos requerimientos principales se presentan a continuación:

1. Generar una zona de campo magnético constante lo suficientemente grande como para probar a un *Cubesat*¹.
2. Generar el código capaz de determinar los parámetros necesarios para recrear en tierra el campo magnético a 400 km de altitud en las coordenadas geográficas introducidas.
3. Generar código que haga los cálculos pertinentes para la cancelación del campo magnético ambiental (*bias*) y la generación del deseado.
4. Diseñar el sistema de control y electrónica necesarios para la alimentación de la jaula.
5. Simular y verificar el correcto comportamiento de la Jaula de Helmholtz diseñada para las condiciones calculadas en las coordenadas geográficas introducidas.

2.3. Campo magnético terrestre

2.3.1. Descripción del campo magnético terrestre

Una de las características principales del campo magnético de la Tierra es que es una estructura dominada por dipolos, en las que su eje está casi alineado con el rotatorio. Se podría llegar a asumir que las líneas de campo magnético terrestre son semejantes a las de un imán, en las que de forma simétrica salen del polo norte y se cierran en el sur. Sin embargo, el campo magnético de la Tierra es inconsistente debido al efecto dínamo², en el que por las convecciones de metales líquidos cargados eléctricamente en constante movimiento, se genera el magnetismo terrestre. [1]

Haciendo referencia a la [Figura 2.1](#) se puede ver como a bajas altitudes las líneas de campo existen en múltiples direcciones de forma aparentemente aleatoria. Estas inconsistencias, conjuntamente con otras como la *Anomalía del Atlántico Sur*, son características importantes que se deben tomar en cuenta a la hora de querer modelar el campo magnético terrestre.

¹ Los *Cubesat* tienen dimensiones estandarizadas de 10x10x10cm

² El efecto dínamo es una teoría científica

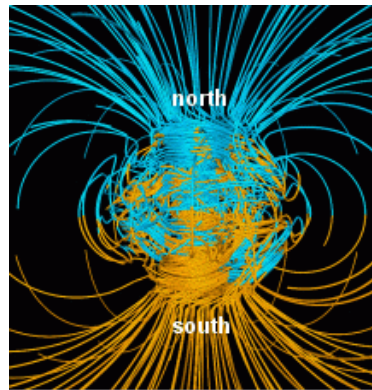


Figura 2.1: Inconsistencias del campo magnético terrestre. [1]

Para cualquier altitud, latitud y longitud podemos representar el campo magnético como un vector tridimensional, pero para esto se debe definir un sistema de coordenadas. El campo magnético terrestre se define a través de 7 parámetros [2]:

- Declinación (D)
- Inclinación (I)
- Norte (X)
- Este (Y)
- Intensidad horizontal (H)
- Intensidad vertical (Z)
- Intensidad total (F)

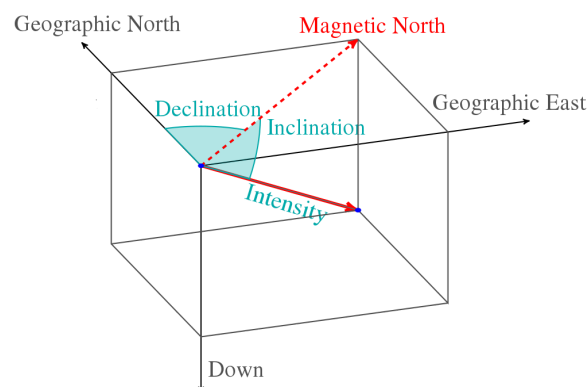


Figura 2.2: Sistema de coordenadas usado para la caracterización del campo magnético terrestre. [3]

Haciendo referencia a la [Figura 2.2](#) se puede ver que: la declinación (D) indica el ángulo con respecto al norte geográfico, que es positivo hacia el este; la inclinación (I) indica el ángulo con respecto a la horizontal, que es positiva hacia abajo; las componentes norte (X) y este (Y) forman a la componente horizontal (H), y esta última conjunto con la vertical (Z) forman a la intensidad total (F). Otra de las principales características es que la intensidad del campo magnético de la Tierra se encuentra entre 25000 y 65000 nT, se hace máximo en los polos magnéticos y mínimo en la *Anomalía del Atlántico Sur* (ref. [Figura 2.3](#)). [2]

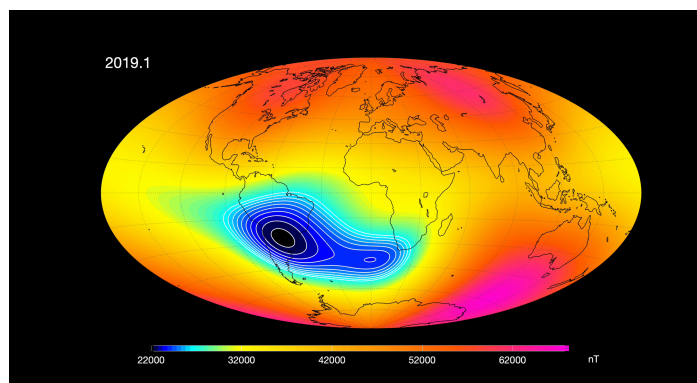


Figura 2.3: Campo magnético terrestre en el año 2018. [4]

2.3.2. Modelos geomagnéticos

No solamente el campo magnético es inconsistente, sino que además está constantemente cambiando con el tiempo. De esta impredecibilidad nace la necesidad de generar modelos que permitan su caracterización: los modelos geomagnéticos más aceptados son el IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) y el WMM (*World Magnetic Model*). Estos modelos estiman mediante representaciones matemáticas cómo será el campo magnético para una localización y fecha determinada. Es importante destacar que estos modelos son aproximaciones, y que se atribuye un 10% de variaciones a fluctuaciones diurnas ionosféricas y tormentas magnetosféricas. [5]

El IGRF [6] es producido y actualizado por la *Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía* (IAGA), y el WMM [7] por la *Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica* (NOAA); aunque las diferencias y variaciones entre ambos modelos son pocas, en el presente documento se utilizarán los datos del IGRF ya que es el referente europeo.

El IGRF se modeló basándose en numerosas observaciones hechas por satélites y estaciones de tierra, y mediante estas se logró establecer una expresión matemática que simula el comportamiento del campo magnético de la Tierra; sin embargo como este está permanentemente cambiando se hacen revisiones cada 5 años, en el que se actualiza un grupo de coeficientes que representan al campo magnético para una fecha determinada. La decimotercera versión (la más reciente) modela al campo magnético desde el 2020 hasta el 2025, siendo este último año la fecha tentativa para el lanzamiento del TEIDESAT-I, por lo que podremos obtener los datos más semejantes a los que serán experimentados en el espacio. La expresión matemática a la que se ha hecho referencia se presenta en la [Ecuación 2.1](#), en donde el potencial V es una expansión en serie finita definida por los coeficientes³ de Gauss g_n^m y h_n^m , en la [Ecuación 2.2](#) se muestra la relación entre el potencial V y el campo magnético B . [8]

Uno de los mayores beneficios de usar el IGRF es que es posible descargar su propio software (ref. [6]), en donde mediante un entorno de usuario se pueden obtener los datos necesarios, sin la necesidad de tener que desarrollar las complejas expresiones matemáticas anteriores; este mismo software se utilizará posteriormente en el desarrollo del código de la Jaula de Helmholtz.

$$V(r, \theta, \phi, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} [g_n^m(t) \cos(m\phi) + h_n^m(t) \sin(m\phi)] P_n^m(\cos \theta) \quad [\text{Ec. 2.1}]$$

$$B = -\nabla V \quad [\text{Ec. 2.2}]$$

³ También conocidos como coeficientes armónicos esféricos.

2.3.3. Recorrido del satélite en la órbita *LEO*

Cuando el TEIDESAT-I sea lanzado al espacio se encontrará a una altitud de aproximadamente 400 km en lo que se conoce como la órbita *LEO* (*Low Earth Orbit*), donde se encuentran la mayoría de los satélites. Es importante destacar que el satélite no seguirá siempre el mismo recorrido, y para entenderlo haremos referencia a los trayectos de la *ISS* (*International Space Station*) que también se encuentra en esta órbita baja.

La *ISS* viaja de oeste a este con una inclinación orbital de $51,6^\circ$ (ref. [Figura 2.4](#)). Después de que una órbita es completada, la longitud de la siguiente órbita cambia en unos $22,9^\circ$ aproximadamente (ref. [Figura 2.5](#)). Se puede ver que el satélite no tendrá un trayecto constante y estará experimentando diversas intensidades de campo magnético continuamente. Como referencia, la *ISS* repite sus órbitas cada 3 días aproximadamente (ref. [Figura 2.6](#)), pero esto es altamente dependiente de la altitud en la que la nave espacial se encuentre. [\[10\]](#)

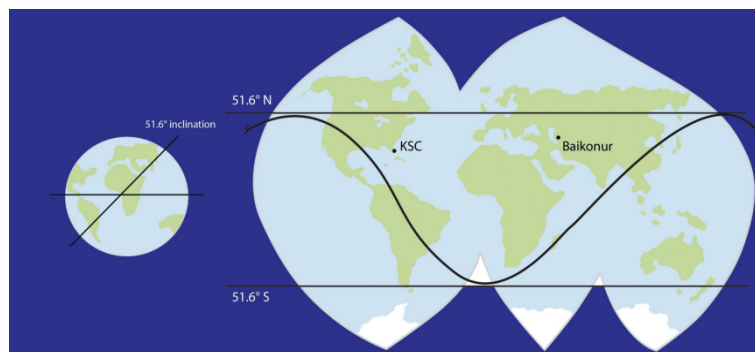


Figura 2.4: Inclinación orbital de la trayectoria que sigue la ISS. [\[9\]](#)

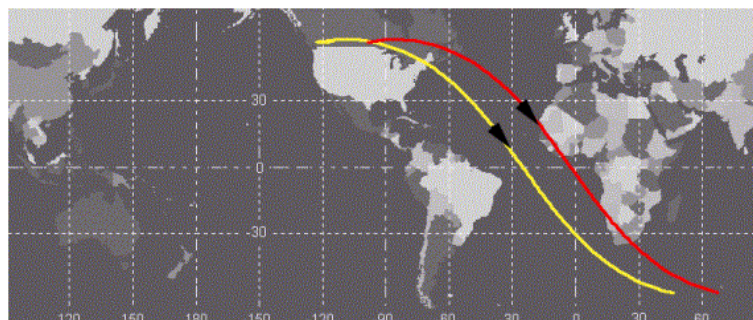


Figura 2.5: Dos órbitas consecutivas de la ISS. [\[10\]](#)

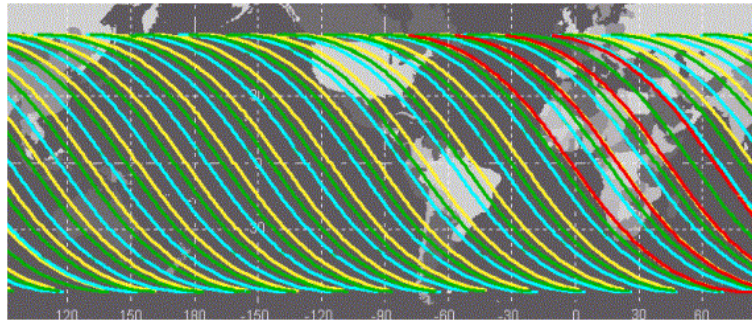


Figura 2.6: Distintos recorridos orbitales de la ISS. [10]

2.4. Principios de la Jaula de Helmholtz

2.4.1. Bobinas de Helmholtz

Una de las principales leyes del electromagnetismo es la *Ley de Ampère*, en la que se enuncia que el campo magnético en una trayectoria cerrada es proporcional a la corriente eléctrica que le atraviesa (ref. [Ecuación 2.3](#)). Uno de los ejemplos clásicos que se utiliza para ilustrar este principio, es el de la corriente que atraviesa un hilo infinito (ref. [Figura 2.7](#)), en el que las líneas de campo se forman de manera angular y su dirección en cada punto (tangencialmente) es perpendicular a la corriente; de forma más sencilla podemos decir que se cumple la regla de la mano derecha para conocer las direcciones y sentidos del campo y la corriente. [11]

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 I \quad [\text{Ec. 2.3}]$$

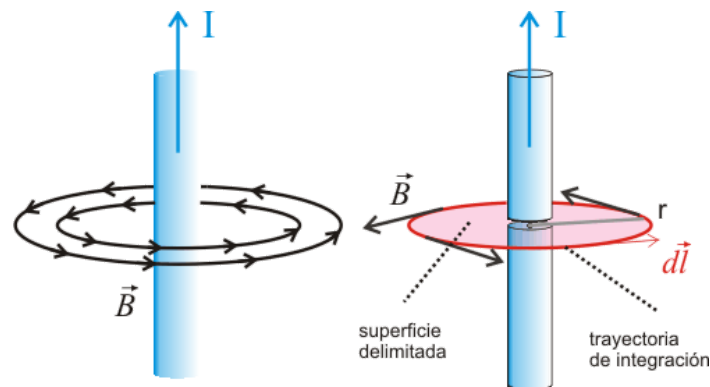


Figura 2.7: *Ley de Ampère*, hilo conductor infinito. [11]

Quizás la aplicación más típica del ejemplo anterior es una bobina, inductor o solenoide (ref. [Figura 2.8](#)), en la que enrollando hilo conductor (alrededor de un núcleo o no) y haciéndole circular corriente eléctrica se obtiene un dispositivo que almacena energía temporalmente,⁴ en forma de campo magnético. Si esta aplicación se extrapola y en vez de hacer circular corriente por una bobina, se hace por dos bobinas paralelas entre sí, se obtiene lo que se conoce como una Bobina de Helmholtz.

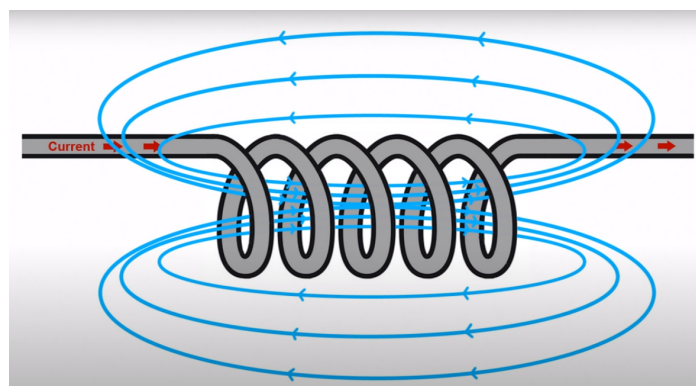


Figura 2.8: *Ley de Ampère*, inductor. [12]

Las Bobinas de Helmholtz fueron creadas por el científico alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894), se trata de dos bobinas dispuestas paralelas entre sí, en el que debido a la circulación de corriente eléctrica se genera campo magnético homogéneo en el plano central entre ellas (ref. [Figura 2.9](#)). Esta zona de campo depende del tamaño, geometría y separación de las bobinas, así como el número de vueltas y la corriente eléctrica a las que se

⁴ Mientras circule corriente eléctrica a través del inductor.

vean sometidas; podemos ver esto representado de forma matemática en la [Ecuación 2.4](#) a continuación. [\[13\]](#)

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 n I}{R} \quad [\text{Ec. 2.4}]$$

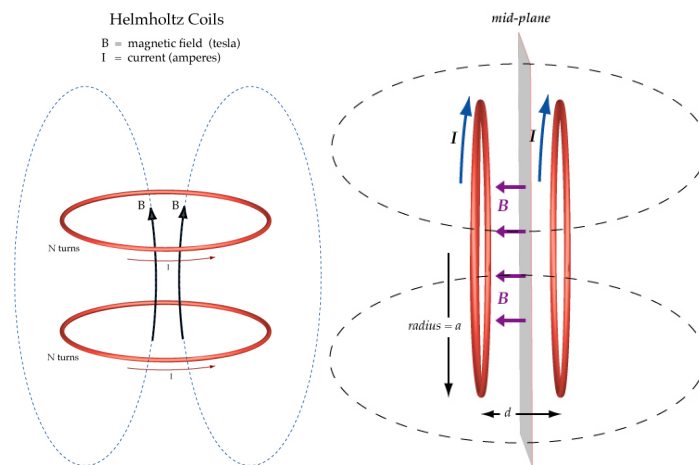


Figura 2.9: Bobinas de Helmholtz y la zona de campo magnético constante que generan. [\[13\]](#)

Durante el presente documento se estudiarán y diseñarán Bobinas de Helmholtz cuadradas de longitud L , ya que esta geometría ofrece una mayor zona de campo constante en comparación a la circular, por ejemplo [\[14\]](#). Quizás más importante que la geometría de las bobinas refiriéndonos al tamaño de la zona de campo constante, es la separación entre ellas, ya que este parámetro es el que define el tamaño de la zona de campo de forma exacta. Cuando la separación entre bobinas (a) es la mitad de su longitud es cuando se obtiene la zona de campo constante de mayor tamaño, a continuación en la [Figura 2.10](#) se muestra gráficamente cómo es el campo para $a=L/2$, $a<L/2$ y $a>L/2$.

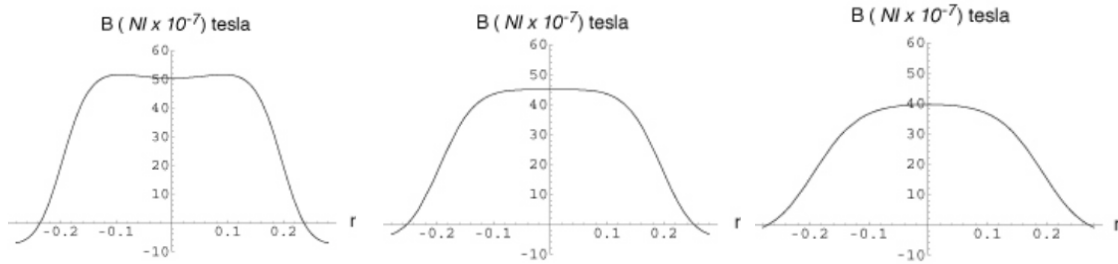


Figura 2.10: Separación entre bobinas vs. zona de campo constante: $a < L/2$ (izquierda), $a = L/2$ (central) y $a > L/2$ (derecha). [12]

Uno de los requerimientos de diseño es producir una zona de campo constante lo suficientemente grande como para testear a un *Cubesat*, es por ello que se establecerá la separación entre bobinas como la mitad de su longitud. La ecuación que define al campo en el centro de las bobinas con esta geometría es la [Ecuación 2.5](#) (ref. [Figura 2.11](#)) en donde: [14]

- N: número de vueltas
- $\mu_o = 4\pi * 10^{-7}$ [T · m/A]: permitividad en el vacío
- I: corriente eléctrica
- $a = \frac{L}{2}$
- $\gamma = \frac{2b}{2a}$

$$B = \frac{2\mu_o NI}{\pi a} \frac{2}{(1 + \gamma^2)\sqrt{2 + \gamma^2}}$$

[Ec. 2.5]

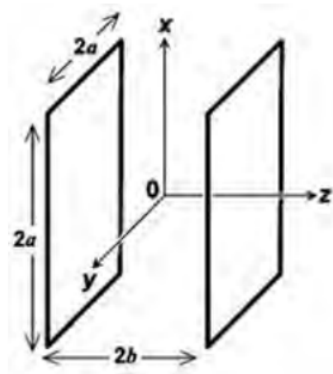


Figura 2.11: Bobinas de Helmholtz cuadradas. [14]

2.4.2. Jaula de Helmholtz

Un par de Bobinas de Helmholtz son capaces de generar una zona de campo magnético constante en una dirección, sin embargo como se ha estudiado anteriormente el campo magnético al que el satélite estará sometido es tridimensional. Una Jaula de Helmholtz son 3 pares de bobinas dispuestas ortogonalmente entre sí de forma tal que se obtiene campo magnético constante en las direcciones x, y, z, consiguiendo un dispositivo de simulación de campo magnético tridimensional (ref. [Figura 2.12](#)).

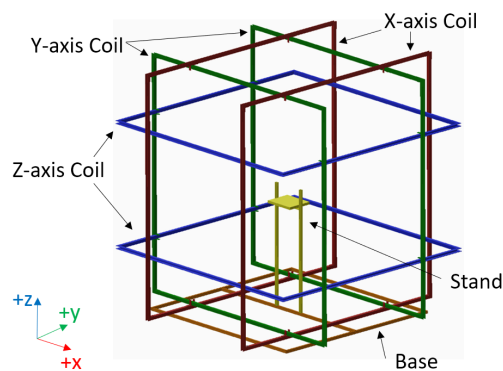


Figura 2.12: Jaula de Helmholtz. [15]

Estos dispositivos han sido diseñados y construidos múltiples veces, tanto con fines educativos como comerciales. Algunos ejemplos de entidades educativas que han

implementado Jaulas de Helmholtz son la *Universidad de Delft de Tecnología* [17], la *Universidad de Michigan* [16] y el *Instituto de Tecnología de las Fuerzas Aéreas* [14], cuyos diseños han servido como referencias para el presente Trabajo de Fin de Grado.

2.5. Cancelación del campo magnético terrestre

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado es diseñar una Jaula de Helmholtz, que permita la simulación del campo magnético a 400 km de altitud para unas coordenadas geográficas indicadas. Este dispositivo es capaz de generar campo magnético constante tridimensional, pero hay que tomar en cuenta que la jaula estará sometida al campo magnético terrestre, al que se denominará como “campo magnético *bias*”, por lo que se debe buscar una forma de cancelar este *bias* para lograr la adecuada generación de la magnitud de campo deseado.

El enfoque que se usará para la cancelación del campo magnético *bias* se puede entender a través de sumas vectoriales, supongamos un par de Bobinas de Helmholtz que no están sometidas a corriente eléctrica, si se sitúa una brújula en el centro entre ellas, su aguja apuntará al norte magnético (que en el caso de la [Figura 2.13](#) está en la dirección y). Si se comienza la circulación de corriente en las bobinas estas generarán campo magnético en su eje longitudinal (dirección x en la [Figura 2.14](#)), y ahora la aguja de la brújula apuntará al noroeste, ya que se suma el vector del campo magnético *bias* con el generado por las bobinas. [\[18\]](#)

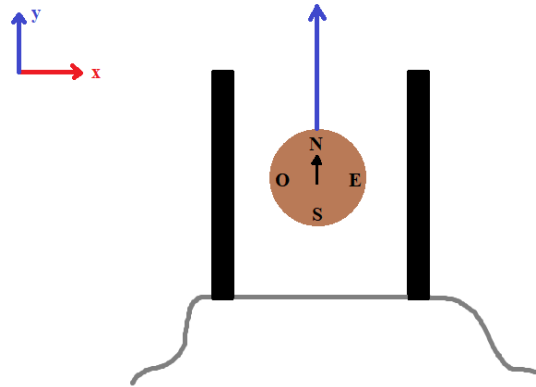


Figura 2.13: Bobinas de Helmholtz sin estar sometidas a circulación de corriente eléctrica con una brújula en su centro.

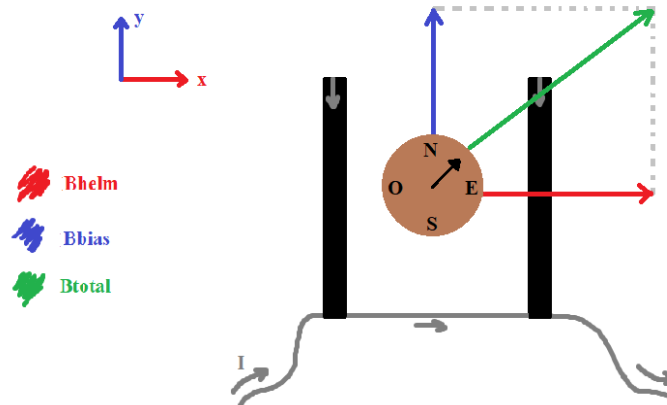


Figura 2.14: Bobinas de Helmholtz cuando están sometidas a circulación de corriente eléctrica con una brújula en su centro.

Por lo que dependiendo de cómo se orienten un par de bobinas, y el sentido del campo que estas generen, podemos ser capaces a través de sumas vectoriales de cancelar el campo magnético *bias* y generar el que se desee. La idea es orientar un par de bobinas de forma tal que su eje longitudinal se alinee con la dirección norte-sur magnética⁵, y generar con las bobinas un campo de magnitud tal (B_{helm}), que cuando se reste con el *bias* (B_{bias}) se obtenga el deseado (B_{total}), esta idea se ilustra en la [Figura 2.15](#). Al orientar un par de bobinas en la dirección norte-sur magnética y como se cumple que los 3 pares son

⁵ El campo magnético de las *Bobinas de Helmholtz* se genera en la misma dirección que su eje longitudinal.

ortogonales entre sí, ya se logra que cada par de bobinas genere campo en las direcciones restantes.

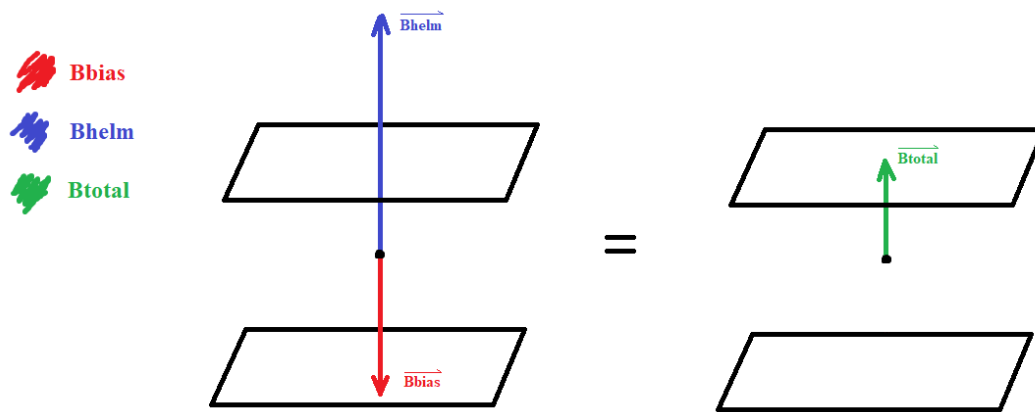


Figura 2.15: Cancelación del campo magnético ambiental/*bias* y la generación del deseado (B_{total}) mediante la orientación del eje longitudinal de las bobinas con el eje de interés.

Con la demostración de Wolfram-Alpha titulada “*Vector Plot of Helmholtz Coil in Earth's Magnetic Field*” [19], podemos simular lo descrito anteriormente a ver si matemáticamente se cumple lo que se quiere lograr: la cancelación del campo magnético *bias* para la generación de una magnitud deseada. Para esta demostración las bobinas se encuentran en el plano xy , es decir su eje longitudinal alineado en la dirección z (ref. [Figura 2.16](#)), también es importante notar que en esta simulación al alimentar las Bobinas de Helmholtz con corriente positiva estas generan campo magnético con sentido negativo (hacia abajo).

Vector Plot of Helmholtz Coil in Earth's Magnetic Field

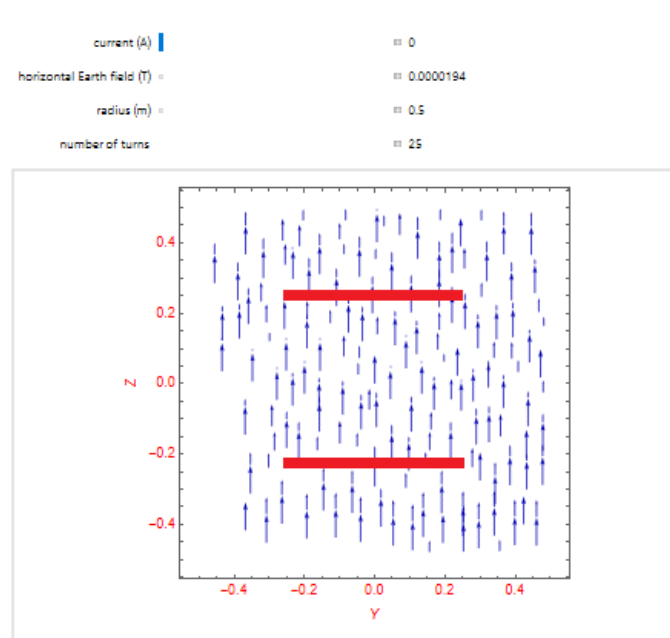


Figura 2.16: Disposición de las bobinas (rojo) en la simulación de Wolfram-Alpha.

En la [Figura 2.17](#) no se está alimentando a las bobinas, por lo que el campo magnético presente es solamente el “ambiental”, en la dirección que estableceremos como norte-sur con sentido norte. También se puede observar la magnitud de los otros parámetros como el campo magnético terrestre, radio y número de vueltas que se dejarán constantes.

Vector Plot of Helmholtz Coil in Earth's Magnetic Field

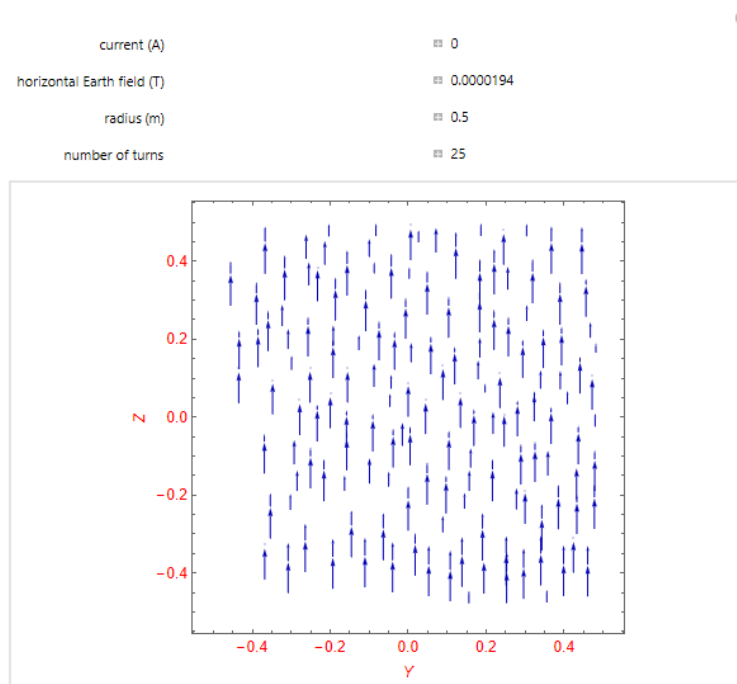


Figura 2.17: Gráfico vectorial de Bobinas de Helmholtz sin suministración de corriente.

Ahora en la [Figura 2.18](#) se puede observar la administración progresiva de corriente⁶ a las bobinas, y el efecto que esto produce sobre la gráfica vectorial. Mientras la corriente aumenta, las líneas de campo se vuelven mucho más angulares; en la [Figura 2.19](#) se observa que existe un valor de corriente para el cual el campo magnético terrestre se vuelve nulo (ref. [Figura 2.19](#) central), y si se sigue aumentando las líneas de campo magnético cambian su sentido al sur. En la [Figura 2.19](#) (derecha), en donde predomina el campo producido por las bobinas, se puede observar como en la zona central ($Y=0$, $Z=0$) las líneas de campo son rectas indicando la homogeneidad del mismo.

⁶ Manteniendo el resto de parámetros constantes.

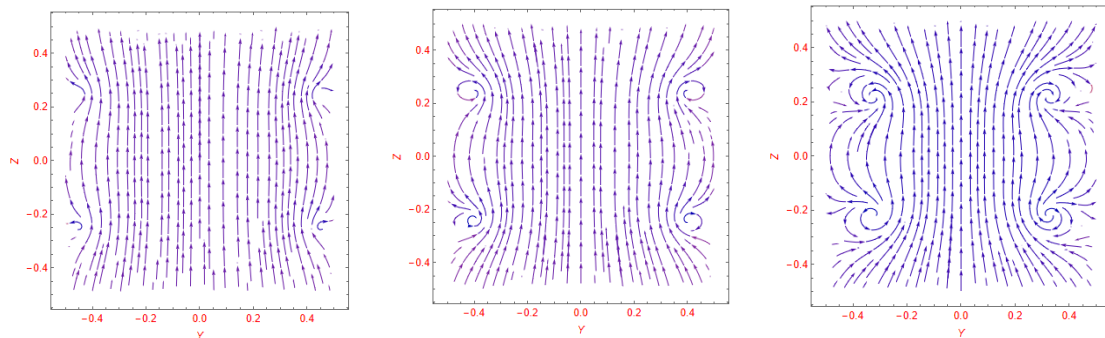


Figura 2.18: Gráfico vectorial de Bobinas de Helmholtz para $I=0,15A$ (izquierda), $I=0,25A$ (central), $I=0,35A$ (derecha).

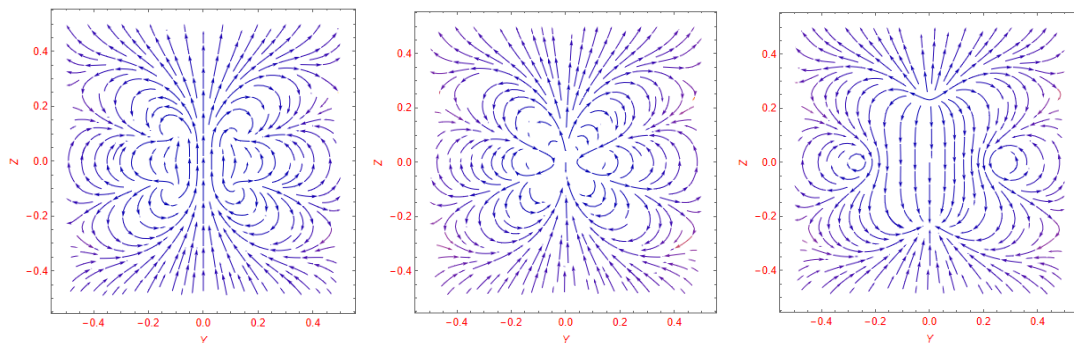


Figura 2.19: Gráfico vectorial de Bobinas de Helmholtz para $I=0,43A$ (izquierda), $I=0,43153A$ (central), $I=0,45A$ (derecha).

2.6. Normativa aplicable

El TEIDESAT-I será lanzado al espacio a través del programa *Fly your satellite!* de la ESA (*European Space Agency*) [20], por lo que se buscó dentro de las posibles normativas aplicables si existían requerimientos con respecto a los testeos de tipo magnético. Uno de los acrónimos más usados para referirse a especificaciones de tipo magnéticas es *EMC* (*Electro-Magnetic Compatibility*). Para este programa de la ESA hay que registrarse por sus especificaciones de diseño⁷, aunque no existen requerimientos con respecto a las pruebas de

⁷ Aunque los documentos de la ESA para este programa son de tipo no clasificado, se deben solicitar como se indica en [21].

tipo magnético, sí que existe una recomendación en este documento: “*Algunos vehículos de lanzamiento tienen requerimientos con respecto a la intensidad de campo magnético. Por lo que, se aconseja limitar el campo magnético exterior al CubeSat a 0,5 Gauss por encima del campo magnético terrestre*”⁸. [22]

Además de las especificaciones de diseño de *Fly your satellite!* existen los estándares *Cubesat* [23], en donde además de la recomendación anterior también se aconseja evitar que imanes fuertes estén en las proximidades del nanosatélite.

Por lo que se puede ver, no existe normativa en cuanto a las especificaciones de las pruebas electromagnéticas a las que se somete al nanosatélite, más allá de un sistema de *ADCS* en correcto funcionamiento, sin embargo se estudió también la normativa española aplicable a instrumentos generadores de campo magnético. A través del RD 299/2016: *sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos* [24], se estudiará si se estará tratando con valores potencialmente peligrosos y de ser así, las medidas a tomar.

Los valores límite de exposición y los niveles de acción figuran en los anexos II y III, en la Tabla 1 del Anexo II (ref. [Figura 2.20](#)) se indican los valores límite de exposición de densidad de flujo magnético externo de 0 a 1 Hz⁹, y se ve que estos valores están en el rango entre 2 y 8 Tesla. La mayor magnitud de campo magnético que se generará con la jaula es de 0,65 Gauss, que es la intensidad en los polos magnéticos (ref. [Figura 2.3](#)), y si se toma en consideración la recomendación de las especificaciones de diseño, como magnitud absolutamente máxima no se deberán generar más de 1,15 Gauss (0,000115 Tesla), que se aleja en gran medida de lo establecido en el RD. El Anexo III no aplica ya que es para campos magnéticos de frecuencias superiores a 100 kHz, por lo que no se hará referencia a este.

⁸ Traducido del inglés.

⁹ El campo magnético que se generará con la Jaula de Helmholtz será estático, por ello nuestras referencias serán valores pequeños a nulos de frecuencia.

Tabla 1. VLE para la densidad de flujo magnético externo (B_0) de 0 Hz a 1 Hz

VLE relacionados con efectos sensoriales:	
Condiciones de trabajo normales	2 T
Exposición localizada en las extremidades	8 T
VLE relacionados con efectos para la salud:	
Condiciones de trabajo controladas	8 T

Figura 2.20: Tabla 1 del Anexo II del RD 299/2016: *sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos.* [24]

Además en el Anexo II se encuentra la Tabla B1 (ref. [Figura 2.21](#)) que indica los niveles de acción para campos magnéticos estáticos, en donde se ve que para el caso de la Jaula de Helmholtz del presente TFG, no será necesaria la aplicación de ninguno ya que no se llegará a producir la magnitud indicada de campo magnético.

B1. Niveles de acción para campos magnéticos estáticos.

Tabla 4. Niveles de acción para campos magnéticos estáticos

Riesgos	NA (B_0)
Interferencias con dispositivos médicos activos implantados, por ejemplo marcapasos cardíacos.....	0,5 mT
Riesgo de atracción y proyección de objetos en la proximidad de campos magnéticos intensos (> 100 mT)	3 mT

Figura 2.21: Tabla B1 del Anexo II del RD 299/2016: *sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos.* [24]

3. Metodología

3.1. Descripción del sistema

Habiendo estudiado las bases teóricas necesarias para el diseño de una Jaula de Helmholtz, en el presente apartado se procederá a hacer la descripción general del funcionamiento que se quiere obtener del sistema, cuyo diseño consistirá en 3 partes principales: estructura, control y electrónica.

Con respecto al diseño estructural se diseñarán y dimensionarán 3 pares de Bobinas de Helmholtz iguales en base a los requerimientos presentados en el apartado [2.2 Alcance](#) del presente documento, presentando modelos en 3D, simulaciones justificativas, lista de materiales y recomendaciones para la futura construcción.

Lo siguiente es el sistema de control de la jaula, en donde cada par de bobinas se controlará de forma independiente (esta decisión se justificará más adelante). Se presentará el código de Matlab®, en donde se hacen los cálculos para obtener la intensidad de corriente que debe circular por cada par de Bobinas de Helmholtz para que estas produzcan, tomando en cuenta el *bias* descrito anteriormente, el campo necesario que simule las condiciones magnéticas de unas coordenadas geográficas escogidas por el usuario, obteniendo esta data desde el IGRF (ref. apartado [2.3.2: Modelos Geomagnéticos](#)). Se presentarán los diagramas de control de *Simulink* con simulaciones justificativas del funcionamiento del sistema de control de la jaula.

Finalmente se diseñará el sistema de electrónica de la jaula, en el que se controlará la intensidad y dirección de la corriente de cada par de bobinas de forma independiente, basándose en las directrices de control obtenidas. Se presentarán los esquemas de los circuitos, simulaciones con LTSpice®, elección de componentes y consideraciones térmicas.

3.2. Diseño y dimensionamiento

3.2.1. Estructura

3.2.1.1. Longitud y separación

Como ya estudiado en el apartado [2.4.1. Bobinas de Helmholtz](#), se dimensionarán 3 pares de bobinas iguales con geometría cuadrada, teniendo en cuenta que se debe hacer de tal forma que se obtenga una zona de campo magnético constante lo suficientemente grande como para encerrar a un *Cubesat*, cuyas dimensiones estandarizadas son de 10x10x10cm, por lo que nos interesa una zona con un volumen superior; además las bobinas deben tener un tamaño apropiado para que la jaula sea conveniente para armar, desarmar y almacenar.

Para este dimensionamiento se usó la simulación de *Wolfram Alpha*: “*Square Helmholtz Coils*” [\[25\]](#), que calcula el campo magnético producido por Bobinas de Helmholtz cuadradas, en donde se pueden variar parámetros como la intensidad de corriente, número de vueltas, longitud y separación entre bobinas. Es importante notar que no se conoce qué geometría tiene la zona de campo magnético que producen las Bobinas de Helmholtz, se le considerará como la de un cubo como simplificación.

Primero se consideraron bobinas de 1m de longitud por cada lado, ya que suele ser el tamaño estándar en el que aficionados suelen construir Jaulas de Helmholtz; de momento los otros parámetros como número de vueltas y la corriente serán valores aleatorios y la separación entre bobinas siempre será $L/2$ (ref. apartado [2.4.1. Bobinas de Helmholtz](#)), ya que sólo interesa estudiar el tamaño de la zona de campo constante. En la [Figura 3.1](#) se observa como en la gráfica B_z vs. z se genera una zona de campo homogéneo con diámetro menor a 20 cm, aunque es difícil asegurar esta medida ya que para $z=0$ (punto donde se genera el campo magnético), la forma de la gráfica carece de una zona plana, indicativa de la homogeneidad del campo.

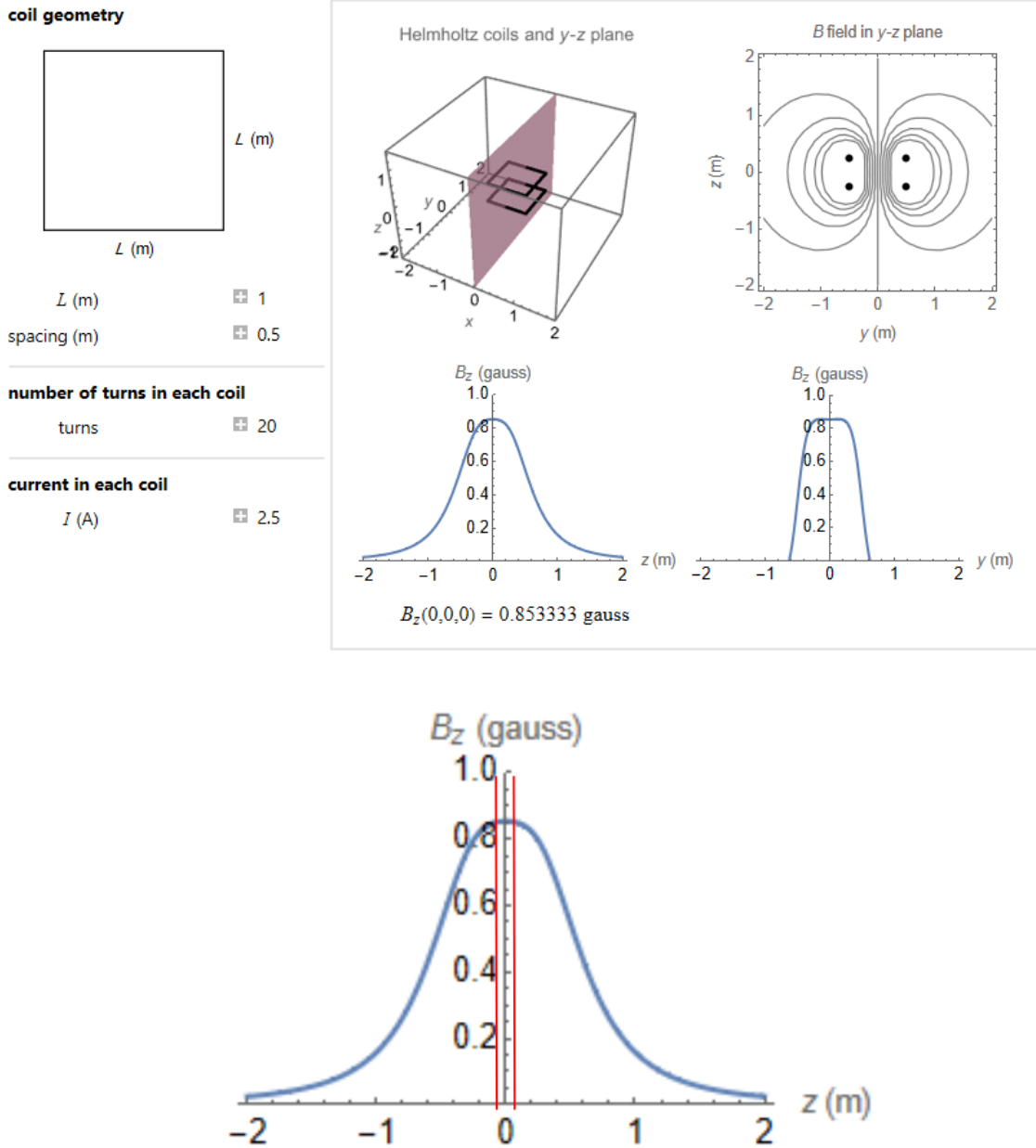


Figura 3.1: Resultados de simulación para Bobinas de Helmholtz con $L=1$ m. [25]

Luego se consideró una longitud de 2 m, que suele ser el tamaño estándar de las Jaulas de Helmholtz de instituciones educativas. En la [Figura 3.2](#) se presentan estos resultados, en donde se ve de forma más clara que la zona en la que hay campo magnético constante tiene un diámetro de casi 40 cm. Sin embargo, esta no es la opción más viable, ya que una Jaula de Helmholtz de estas dimensiones ocupa un volumen demasiado grande y tampoco es necesaria una zona de campo tan grande para la aplicación que se le quiere dar.

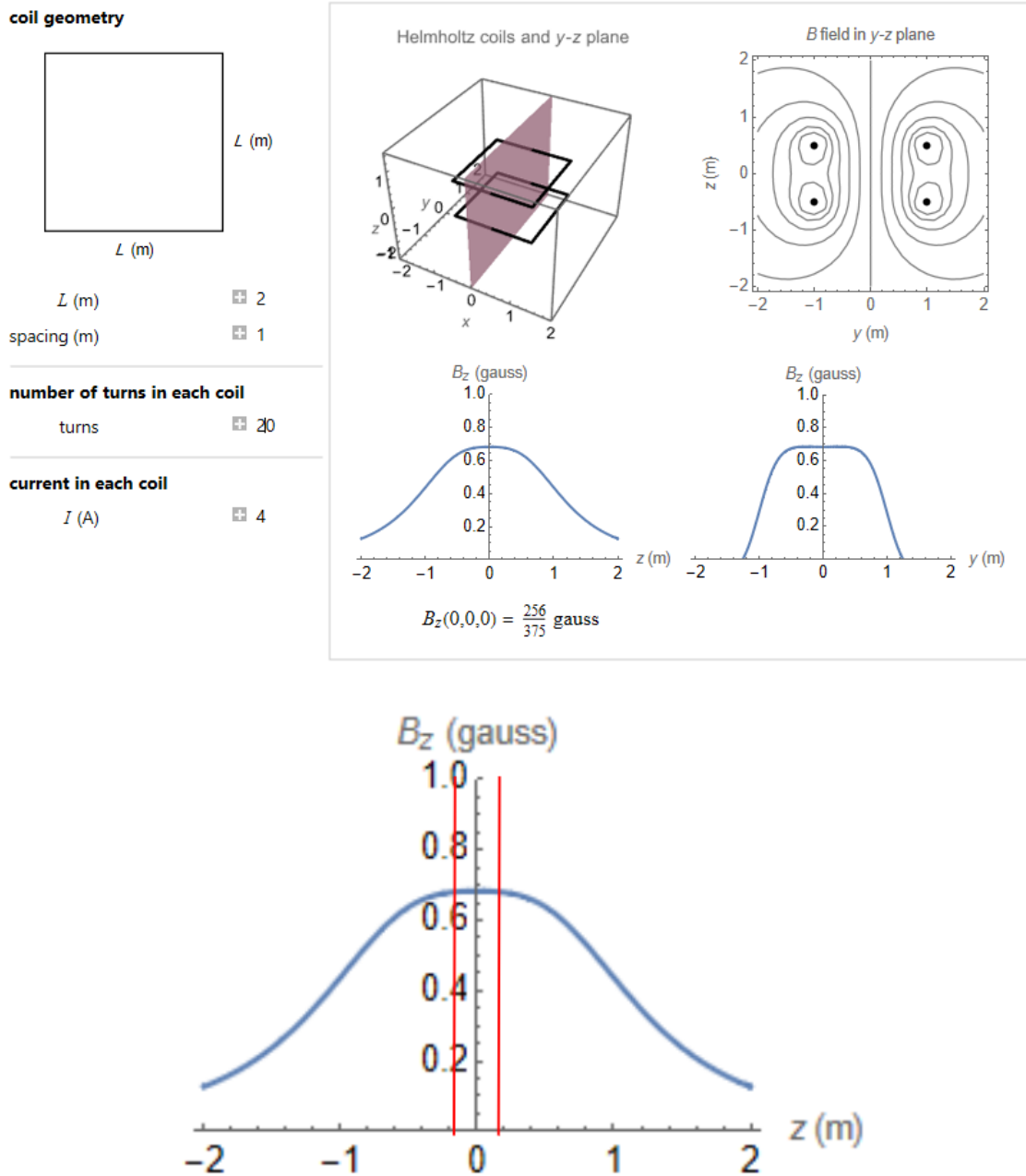


Figura 3.2: Resultados de simulación para Bobinas de Helmholtz con $L=2\text{m}$. [25]

Estudiamos entonces una longitud intermedia a las anteriores, para $L=1,5$ m se produce una zona de campo homogéneo con un diámetro aproximado de 20 cm, como se puede observar en la [Figura 3.3](#). Aunque estas dimensiones siguen siendo importantes, son

bobinas de un tamaño adecuado para manipular y almacenar, además el tamaño de la zona que se produce es ideal para encerrar a un *Cubesat* de forma no restrictiva.

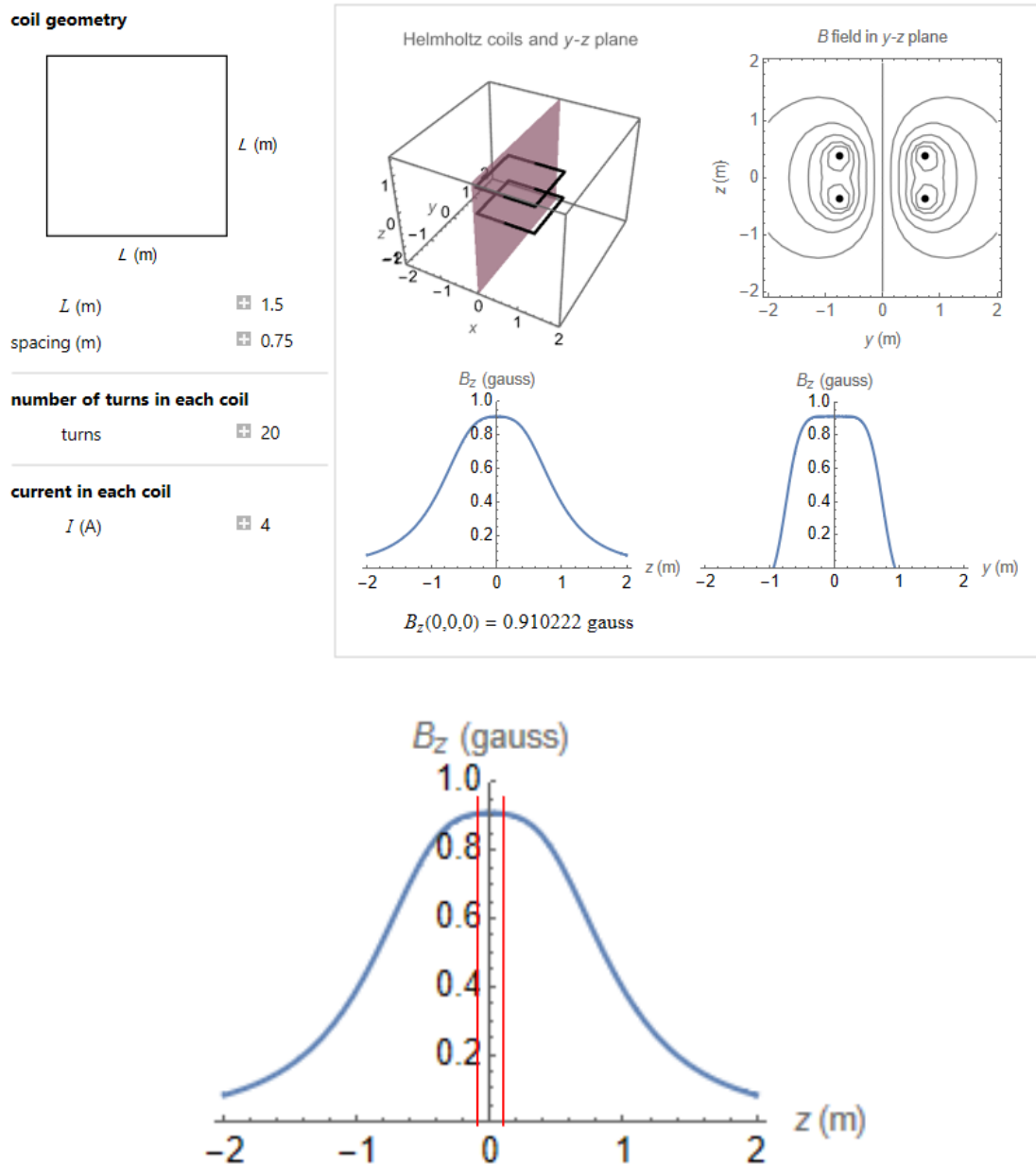


Figura 3.3: Resultados de simulación para Bobinas de Helmholtz con $L=1,5$ m. [\[25\]](#)

3.2.1.2. Número de vueltas

Haciendo referencia al apartado [2.3.1. Descripción del campo magnético terrestre](#), se estudió que en las cercanías de los polos magnéticos terrestres es donde la magnitud del campo se hace máxima, alcanzando valores de hasta 65000 nT (0,65 G). Para decidir el número de vueltas de hilo de cobre que tendrá cada bobina se seguirán 3 criterios:

1. Magnitud de la corriente que debe circular para generar el máximo valor de campo magnético (el producido en los polos).
2. Mínimo número de vueltas con el que lo anterior se pueda obtener, debido a los costes elevados del hilo de cobre.
3. Un valor de corriente adecuado (no demasiado alto) para facilitar el diseño y elección de componentes del sistema de electrónica.

De momento consideraremos la generación de 0,65 G con un par de bobinas sin tomar en cuenta la cancelación del campo magnético *bias*, se sobredimensionará para establecer un margen de seguridad. A través de la [Ecuación 2.5](#) es posible calcular el producto del número de vueltas y la corriente que circula para un par de bobinas para que estas generen 0,65 G, a continuación se presentan dichos cálculos:

$$B = \frac{2\mu_0 N I}{\pi a} * \frac{2}{(1+\gamma^2)\sqrt{2+\gamma^2}}$$

$$N I = \frac{\pi a (1+\gamma^2)\sqrt{2+\gamma^2}}{4\mu_0} * B$$

Donde,

$$a = L/2 = 0,75 \text{ m}$$

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ [T} \cdot \text{m/A]}$$

$$\gamma = \frac{2b}{2a} = \frac{b}{a} = \frac{L/4}{L/2} = 0.5$$

$$NI = \frac{\pi(0,75\text{ m})(1+0,5^2)\sqrt{2+0,5^2}}{4(4\pi*10^{-7}\text{ T}\cdot\text{m/A})} * 65000 * 10^{-9}\text{ T} = 57,1289\text{ [A * total vueltas]}$$

Por lo que si se establece el número de vueltas por bobina como N=10, la máxima corriente que circularía por las bobinas para la generación del valor máximo del campo magnético sería de 5,71 A aproximadamente, que se considera un valor adecuado tanto de vueltas de cobre como de intensidad de corriente. Se comprobará este valor con el simulador de *Wolfram Alpha* [25], que como se observa en la [Figura 3.4](#) se obtiene un valor bastante cercano a 0,65 Gauss.

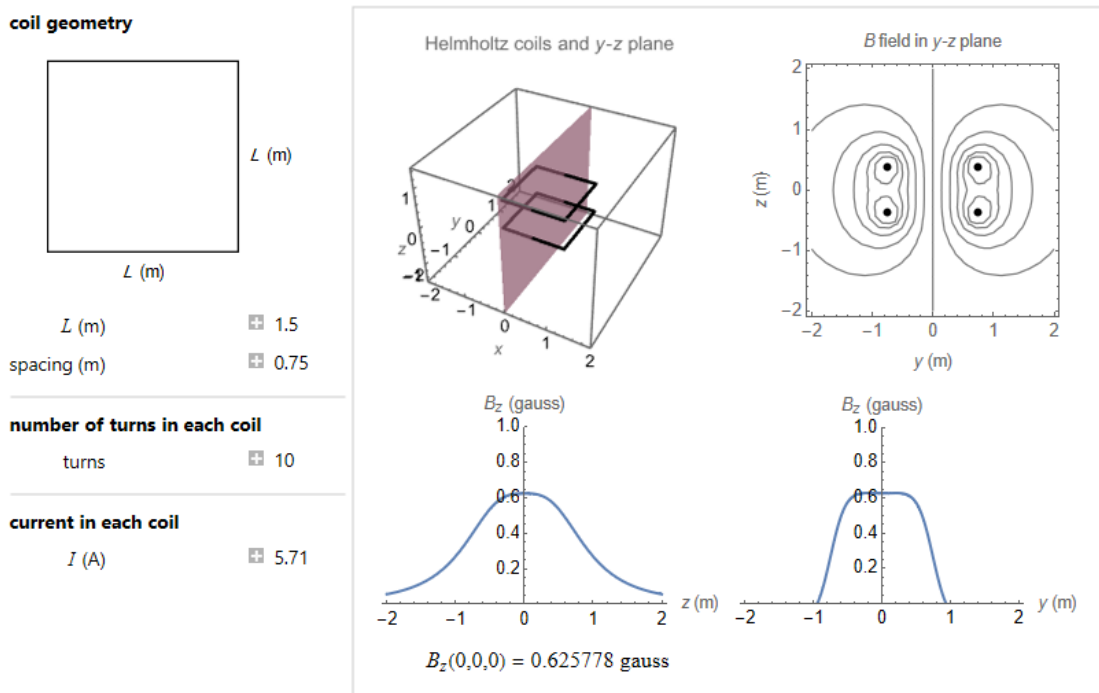


Figura 3.4: Resultados de simulación para Bobinas de Helmholtz con L=1,5m. [25]

3.2.1.3. Modelo de Elemento Finito para Magnetismo (FEMM)

El *Modelo de Elemento Finito para Magnetismo (FEMM)*¹⁰ [26]), es un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales representativas de fenómenos físicos, en este

¹⁰ Finite Element Method Magnetics

caso de electromagnetismo. A través de este método se obtienen resultados aproximados para un problema definido dentro de unos límites, se podrá modelar y simular un par de Bobinas de Helmholtz con el dimensionamiento recién definido, para no solo confirmar los resultados obtenidos con el simulador de *Wolfram Alpha*, sino también para estudiar de forma más detallada el campo magnético generado por las bobinas.

Debido a las características del software sólo será posible simular bobinas de geometría circular, a continuación se adjuntan los parámetros usados para el modelado:

- Bobinas circulares
- Diámetro de cada bobina: $D=1,5$ m
- Separación entre bobinas: $a=0,75$ m
- Número de vueltas: $N=10$
- Sección del hilo de cobre: $S=1,125$ mm²
- Orientación de las bobinas: hacer referencia a la [Figura 2.9](#) (derecha)

Luego de modelar las bobinas y simular para 9000 nodos¹¹ aproximadamente, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 3.5, se observa que las líneas de campo que son rectas en el centro de las bobinas y a partir de allí se vuelven angulares. Además se aprecia la gráfica de densidad de campo magnético, en la que a través de la leyenda es posible ver en qué zonas aumenta y disminuye la magnitud del campo producido. Es interesante ver que el campo es máximo no en el centro de las bobinas sino en las cercanías del cable de cobre, sin embargo sí que es en el centro en donde se obtienen líneas de campo más rectas indicativas de su homogeneidad.

¹¹ Para estas resoluciones matemáticas lo que el *Modelo de Elemento Finito* hace es dividir el problema en zonas pequeñas y obtener su solución, cada “nodo” es una de estas pequeñas divisiones del problema.

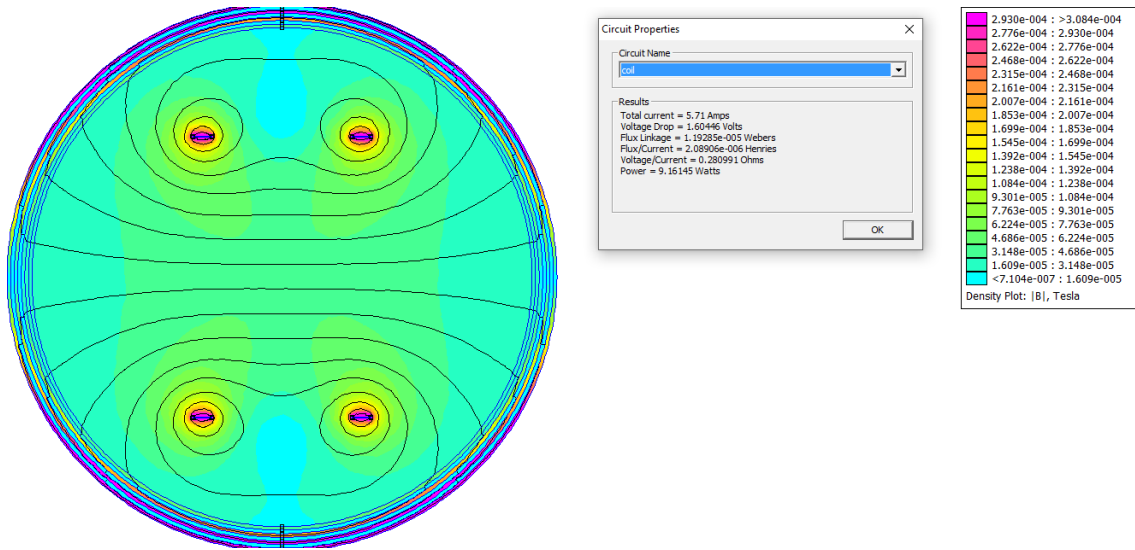


Figura 3.5: Resultados de la densidad de campo magnético de Bobinas de Helmholtz simuladas a través del FEMM. [26]

En la [Figura 3.6](#) se puede observar que para $X=0$, $Y=0$ (centro de las bobinas) la magnitud de campo magnético es de 46000 nT aproximadamente, que se aleja del valor teórico de 65000 nT que se deberían obtener haciendo circular 5,71 A de corriente a través de las bobina, es muy posible que esto se deba a que este valor de corriente se calculó para bobinas cuadradas y en estas simulaciones del FEMM se están modelando como circulares. Además nos fue posible estimar que la zona de campo homogéneo tiene un diámetro aproximado de 50 cm, superior a lo estimado con el de *Wolfram Alpha* [25].

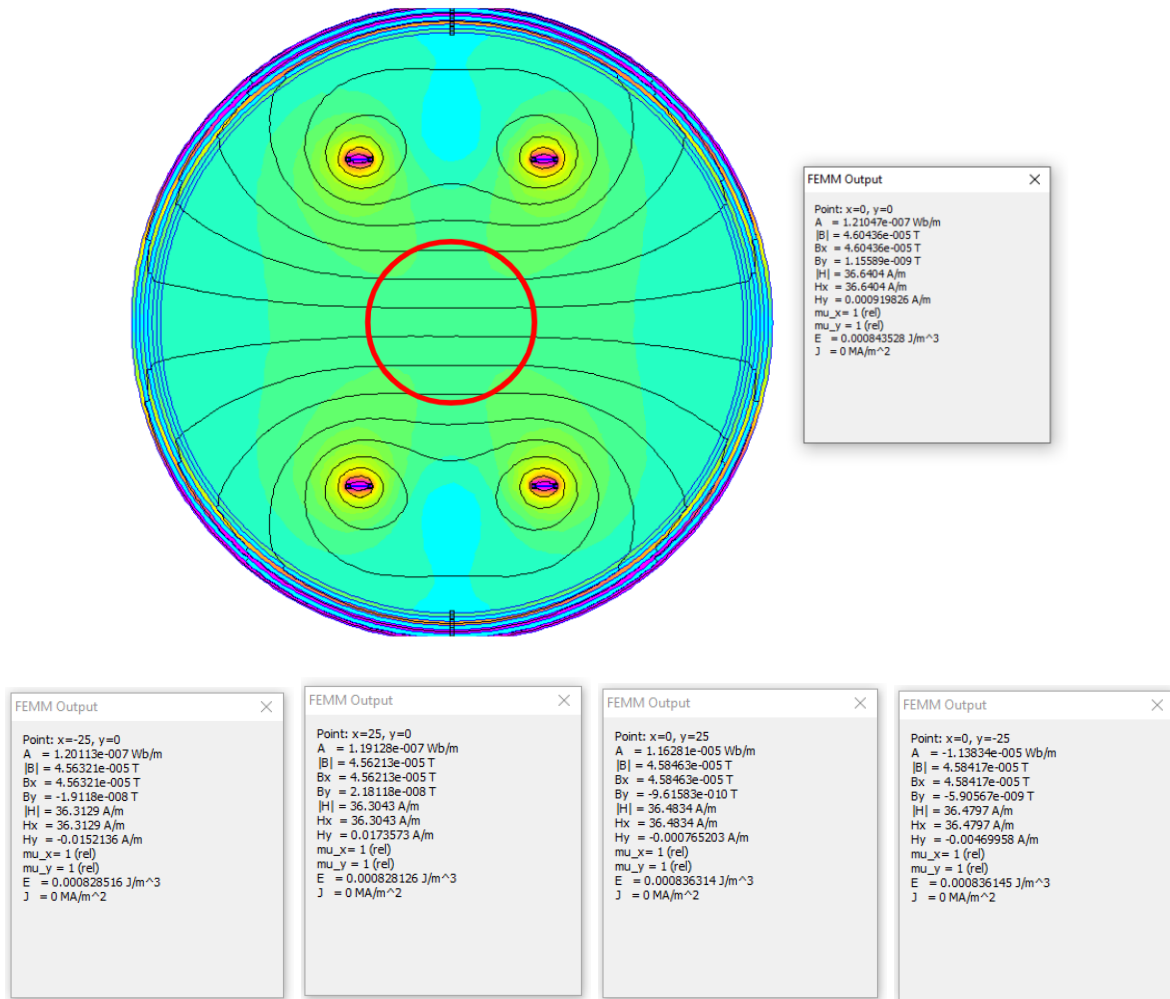


Figura 3.6: Resultados del tamaño de la zona de campo magnético homogéneo de Bobinas de Helmholtz simuladas a través del FEMM. [26]

3.2.1.4. Modelos 3D y materiales para la construcción

Ya habiéndose definido las dimensiones y parámetros principales de la Jaula de Helmholtz, en el presente apartado se proponen los materiales para la construcción además de sus modelos en 3D representativos.

A modo de resumen, se presenta el dimensionamiento estructural actual a continuación:

- 3 pares de bobinas cuadradas
- Longitud del lado de las bobinas: $L = 1,5 \text{ m}$
- Separación entre pares de bobinas: $a = 0,75 \text{ m}$
- Número de vueltas de hilo de cobre: $N = 10$

El material más usado para construir la estructura de las Jaulas de Helmholtz suele ser aluminio. Este es el caso para la Universidad de Michigan [\[16\]](#) y el AFIT [\[14\]](#). Los perfiles de aluminio son fáciles de adquirir, con gran diversidad de elecciones en cuanto a sección y sus formas; ofrecen estabilidad estructural y además el aluminio es un elemento metálico no ferromagnético, lo que quiere decir que no se ve afectado por fenómenos de magnetismo. De forma más sencilla, se puede ver como que no afecta las líneas de campo a las que se encuentre sometido; debido a todas estas características para el presente diseño se ha escogido construir la estructura de las bobinas con perfiles de aluminio.

En cuanto a las características de estos perfiles, se considera ideal utilizar un perfil en U, ya que su canalización es ideal para confinar a los cables y son de los perfiles más fáciles de adquirir y a menor precio. Como se verá más adelante en el apartado [3.2.3. Electrónica](#), la sección propuesta para el hilo de cobre es de 1 mm^2 , como se darán 10 vueltas de hilo por bobina, se necesita un perfil de con una sección mínima de 10 mm; sin embargo debido a la longitud de las bobinas se considera apropiado una sección mucho mayor, para ofrecer más estabilidad y evitar el posible pandeo, pero no demasiado grande para intentar mantener el peso de las bobinas como el menor posible (uno de los requerimientos principales del diseño es la facilidad de montar y desmontar la jaula).

Tomando en cuenta estos requerimientos se propone utilizar perfiles de aluminio de 40 mm a 60 mm, en la [Figura 3.8](#) se presentan modelos en 3D a través de *AutoCAD* con perfiles en U de 40 mm que se proponen en la [Figura 3.7](#) (se escogieron las dimensiones más estándares para perfiles en U de 40 mm).

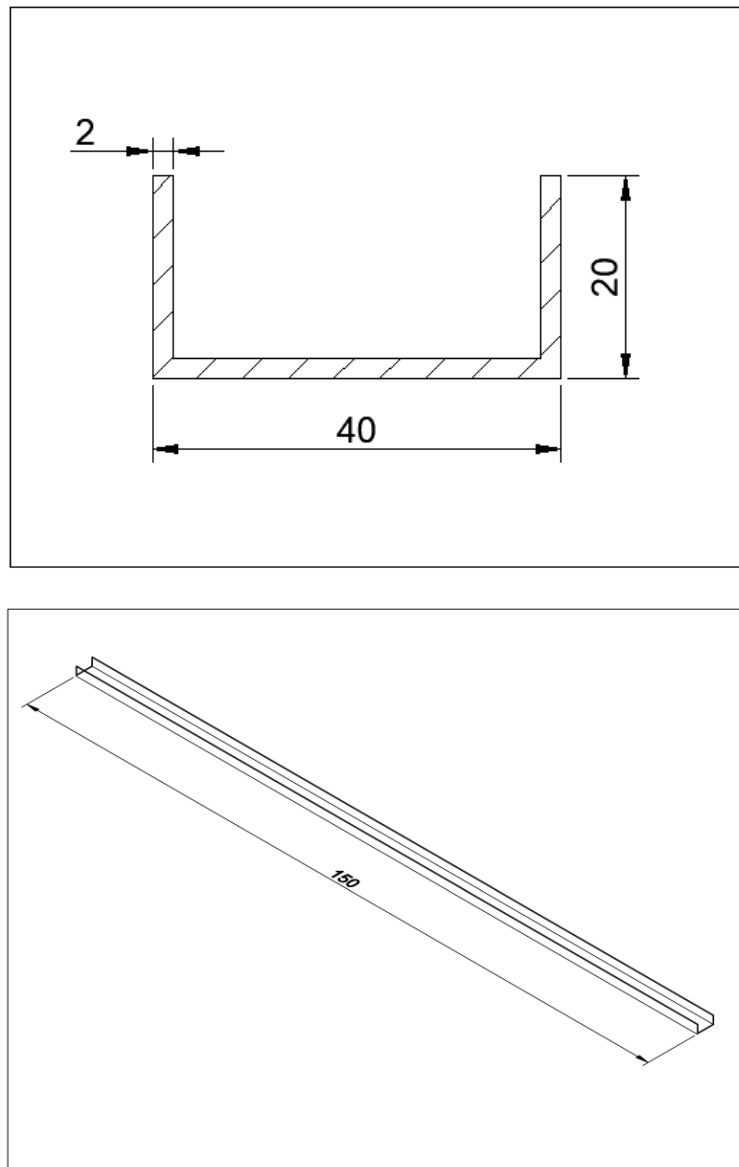


Figura 3.7: Perfil en U propuesto para la construcción de la Jaula de Helmholtz (superior: cotas en mm, inferior: cotas en cm).

Una aclaración con respecto al diseño estructural es que cada par de bobinas será ligeramente diferente con respecto a su longitud, ya que hay que tomar en cuenta que a la hora del ensamblaje de la jaula los 3 pares son concéntricos, para lograr esto se debe construir cada par de distinto tamaño. Se propone que cada par tenga una longitud menor en 5 cm con respecto al siguiente, por lo que un par de bobinas será de 150x150x150cm, el siguiente de 145x145x145cm y el último de 140x140x140cm; esta idea se observa mejor en la [Figura 3.8](#).

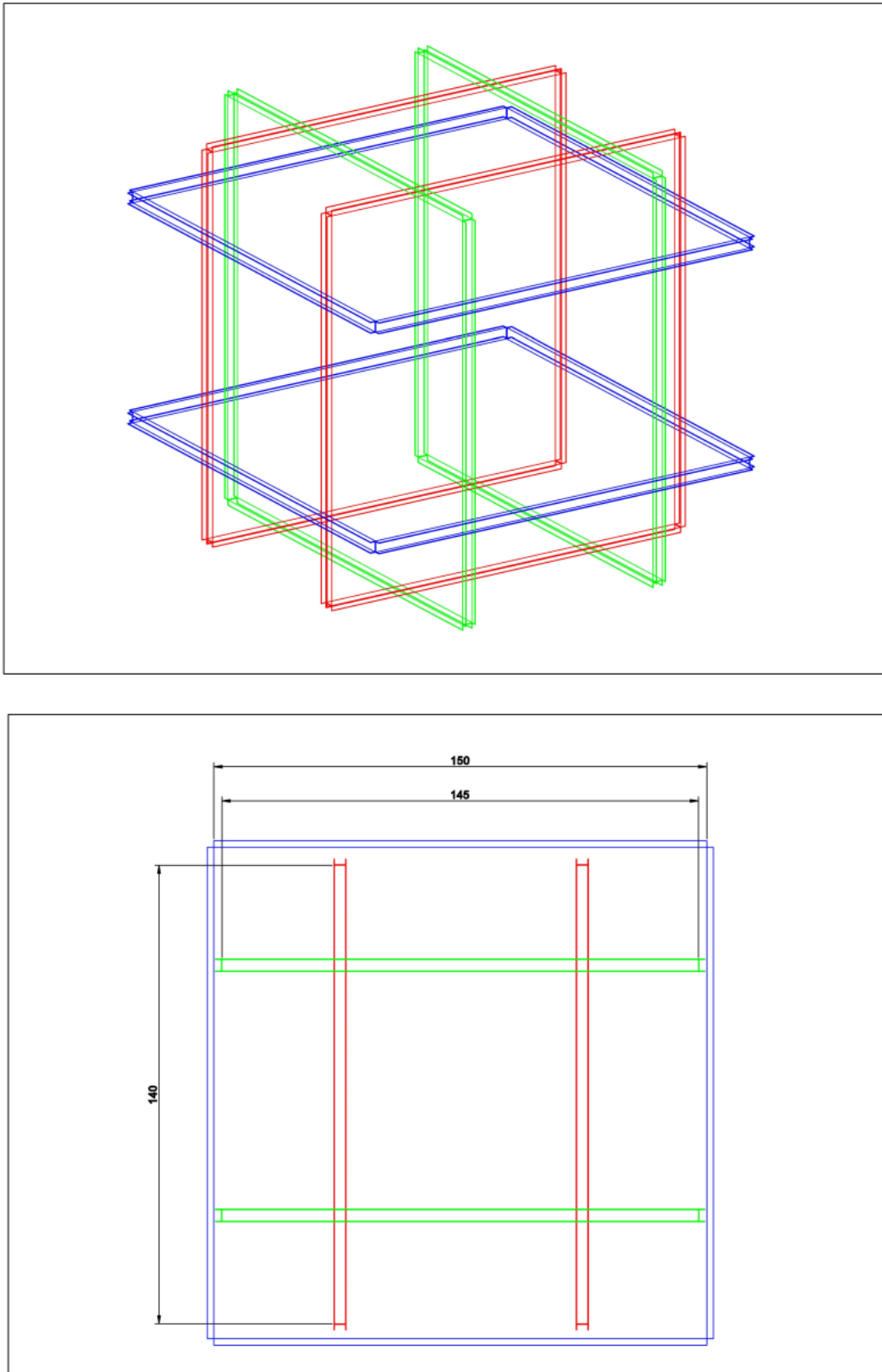


Figura 3.8: Modelos en 3D de la Jaula de Helmholtz (vista desde arriba, cotas en cm).

En la [Figura 3.9](#) se puede ver mediante un código de colores las direcciones en las que cada par de bobinas produce campo magnético: el par rojo produce campo en la dirección x, el par verde en la dirección y, el par azul en la dirección z.

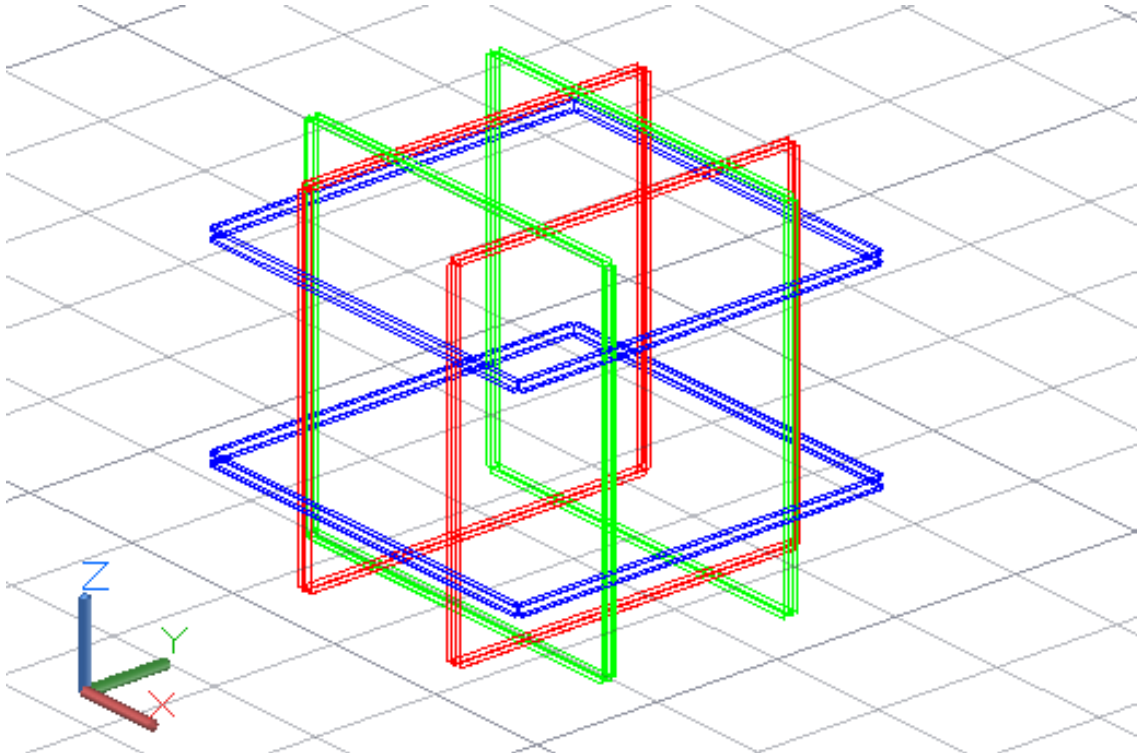


Figura 3.9: Modelo en 3D de la Jaula de Helmholtz con las direcciones en las que cada par de bobinas produce campo magnético.

3.2.1.5. Recomendaciones de construcción

Recomendación de construcción 1:

Debido a las dimensiones de la jaula se recomienda instalar soportes en cada una de las esquinas para mayor estabilidad estructural, como se observa en la [Figura 3.10](#).

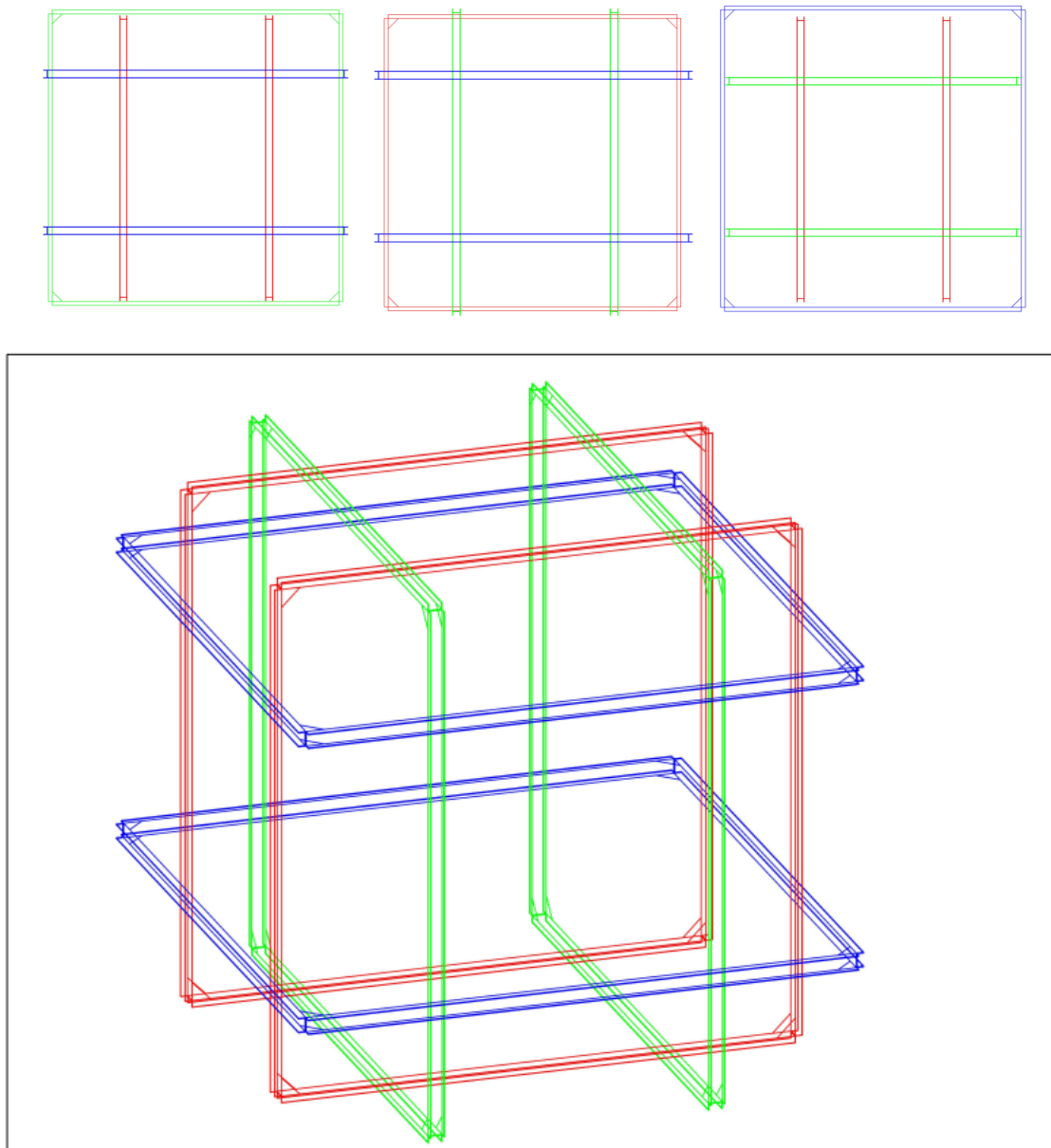


Figura 3.10: Modelo en 3D de la Jaula de Helmholtz con apoyos en las esquinas.

Recomendación de construcción 2:

Debido a la forma en la que se deben ensamblar las bobinas, hay que garantizar la estabilidad del par cuyos lados son paralelos al suelo (ref. bobinas azules de la [Figura 3.9](#)). En la referencia [\[27\]](#) se hacen soportes con impresión 3D y se disponen de la forma que se indica

en la [Figura 3.11](#) a continuación. Se recomienda usar 24 de estos soportes, uno por cada una de las intersecciones entre bobinas.

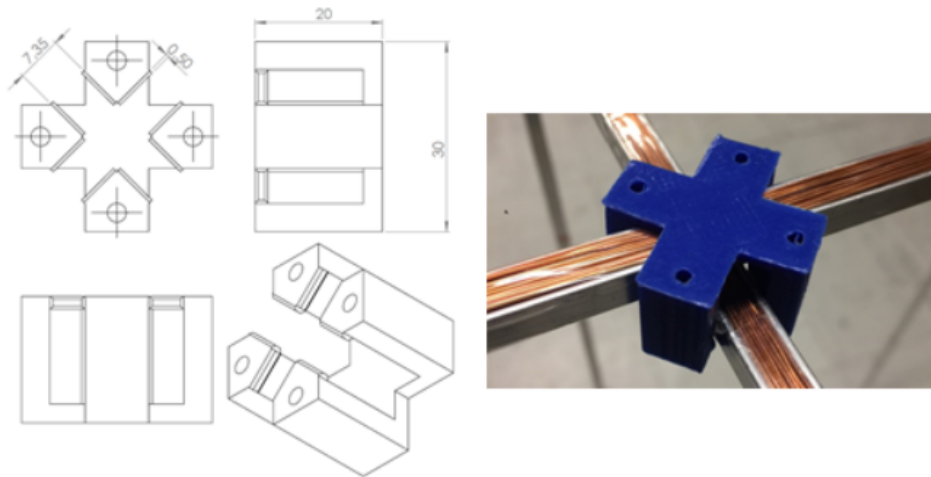


Figura 3.11: Soportes para el ensamblaje de las Bobinas de Helmholtz. [\[27\]](#)

Recomendación de construcción 3:

Una de las precauciones principales que se deben tener en cuenta con respecto a la construcción de bobinas es no deteriorar el esmalte del hilo de cobre con el que se hará el bobinado. Como las esquinas de las bobinas pueden ser el sitio más problemático, se recomienda hacer una protección con cinta aislante, o bien silicona, en estas zonas.

3.2.1.6. Prototipo

Se construyó el prototipo de la estructura de una Bobina de Helmholtz con el dimensionamiento realizado (ref. [Figura 3.29](#)). Antes de la implementación de este proyecto se harán las pruebas del sistema de control y electrónica con este prototipo. Como los perfiles que se usaron para este prototipo no son los finales, se decidió no cortarlos para posteriores usos que se le puedan dar.



Figura 3.29: Prototipo de la estructura de una Bobina de Helmholtz.

3.2.2. Control

3.2.2.1. Funcionamiento general y ficheros Matlab®

El sistema de control se diseñará a través del software Matlab®, en donde se usarán algunas de sus herramientas adicionales como *Simulink* y el *Mapping Toolbox*. En la [Figura 3.12](#) se muestra la descripción general del funcionamiento que tendrá el sistema de control de la Jaula de Helmholtz. Se recomienda hacer referencia al apartado [2.5. Cancelación del campo magnético terrestre](#) si existen dudas con respecto a los valores **Bbias**, **Btotal** y **Bhelm**.

Para las primeras aproximaciones sobre cómo implementar el control de la Jaula de Helmholtz, lo primero que se consideró fue la conveniencia de tratar al sistema como un sistema SISO (*Single Input - Single Output System*), o uno MIMO (*Multiple Input - Multiple Output System*). En el primer caso se trataría cada par de bobinas como un sistema SISO: cada par independiente de los otros, por lo que se hace uso de un diseño de control descentralizado. En el segundo caso se trataría a los 3 pares de bobinas como un único sistema con 3 entradas y 3 salidas (ref. [Figura 3.13](#)).

Se decidió que la mejor opción sería tratar cada par de bobinas como un SISO, que además son de primer orden, con su lazo de control independiente del de los otros pares. La razón de esta elección se debe principalmente a la falta de interacciones entre bobinas. No se encontraron referencias bibliográficas que hicieran mención de este suceso, y como cada par de Bobinas de Helmholtz genera campo en una única dirección distinta, en principio se pueden tratar como sistemas independientes.

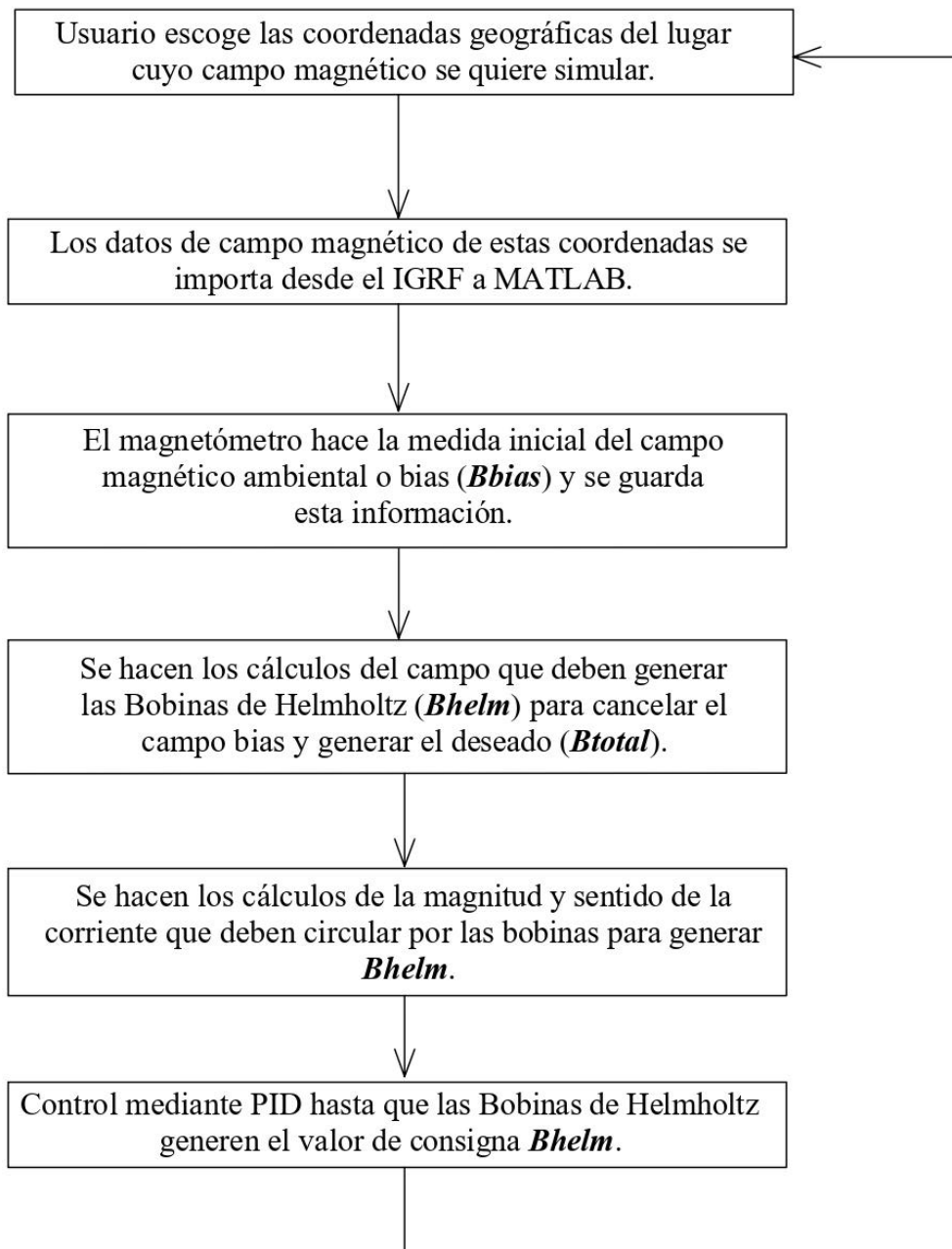
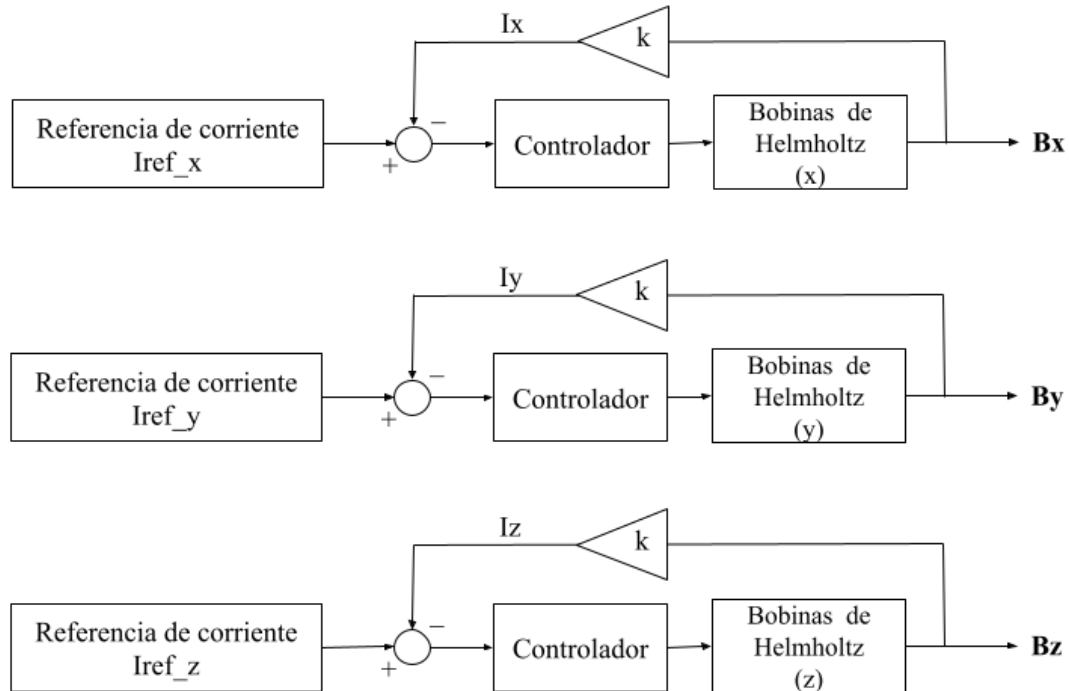


Figura 3.12: Esquema general de control para la Jaula de Helmholtz.

3 sistemas SISO independientes.



1 sistema MIMO.

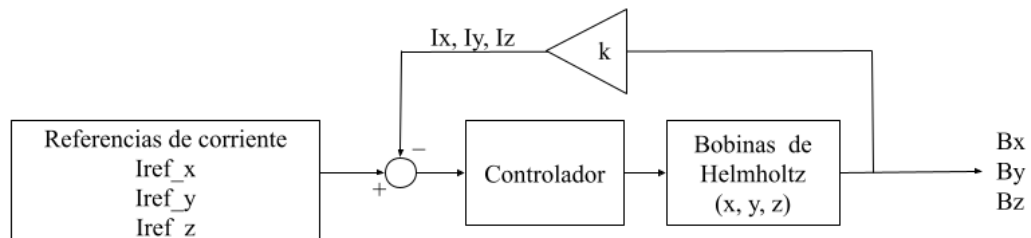


Figura 3.13: Consideraciones para el control de la Jaula de Helmholtz como un conjunto de sistemas SISO independientes (control descentralizado) o un único sistema MIMO.

El sistema de control de la Jaula de Helmholtz se implementará a través de Matlab® con 4 funciones, cuyo código se encuentra en el Anexo I del presente documento, además en la [Figura 3.14](#) se presenta un esquema general de los vínculos entre funciones, los parámetros que requieren y devuelven. La razón por la que la función principal *helmholtz_cage* devuelve

un gran número de parámetros es que estos son necesarios tenerlos en el *Workspace* para su posterior uso en los diagramas de control de *Simulink*.

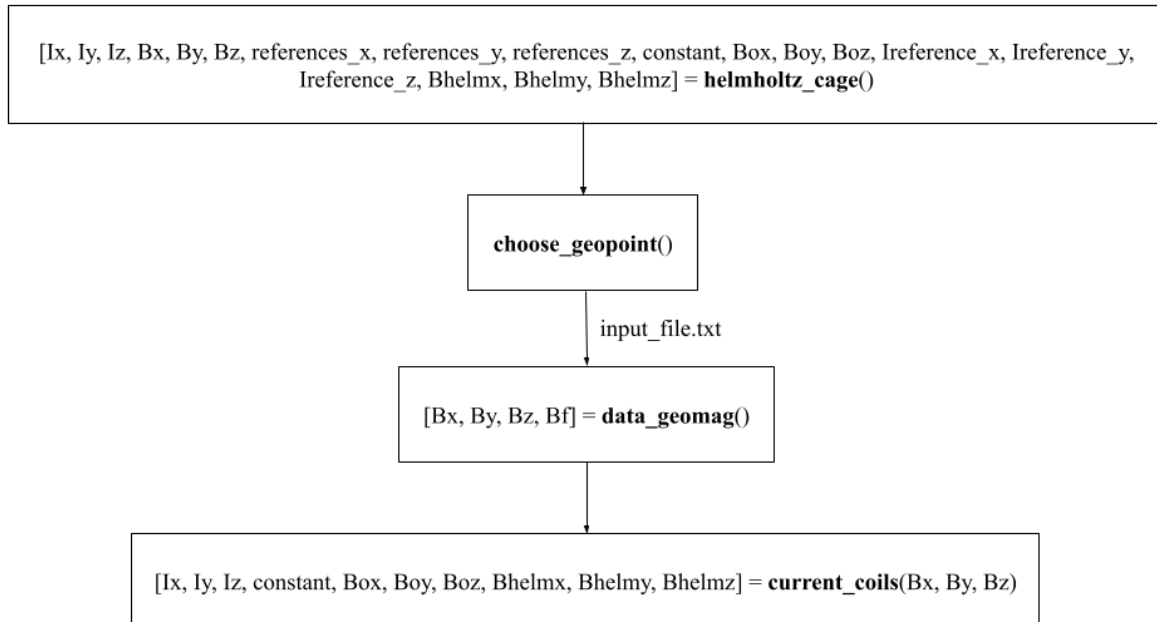


Figura 3.14: Esquema de las funciones del control de la *Jaula de Helmholtz* con Matlab®.

1. choose_geopoint.m

Basado en el ejemplo del *Matlab Mapping Toolbox*: “*Create an Interactive Map for Selecting Point Features*” disponible en [28], en donde se puede hacer la selección interactiva de las principales ciudades mundiales, mostrando por pantalla sus coordenadas y nombre de la ciudad. Este código se modificó para que a medida que el usuario va seleccionando distintas coordenadas (no necesariamente las ciudades indicadas, ref. [Figura 3.15](#)), estas se vayan guardando en un fichero de texto con el resto de parámetros que necesita la línea de comandos del IGRF, esto se logró a través de la siguiente línea de código:

```
fprintf(fileID, '2025 D K400 %.1f %.1f\n', selected_lat,
selected_lon)
```

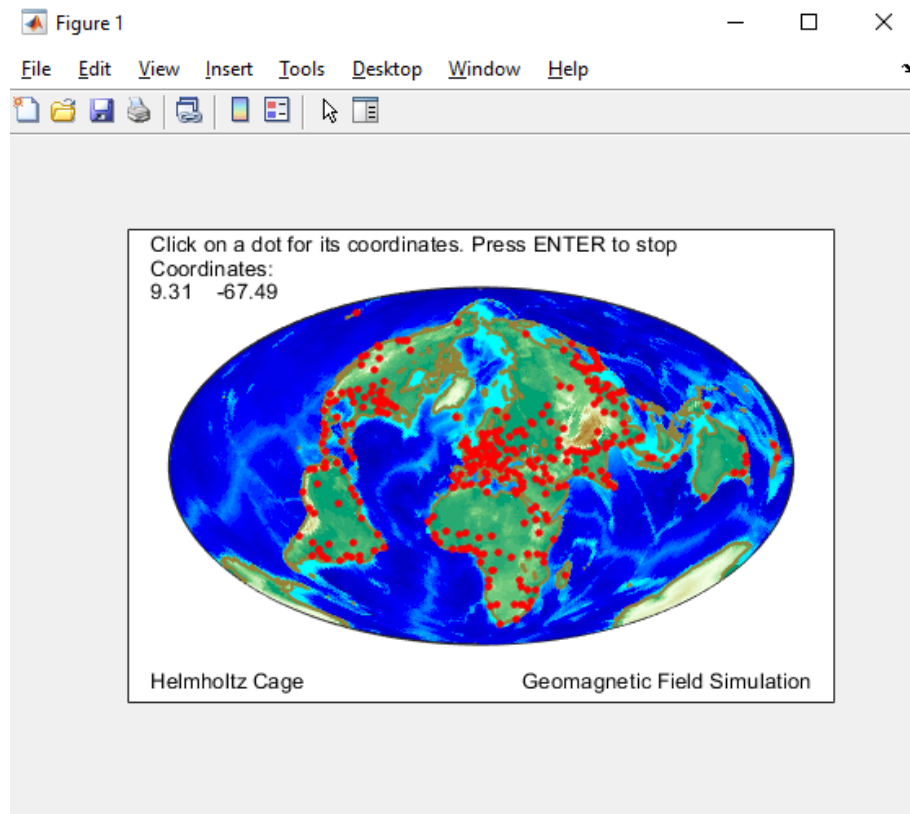


Figura 3.15: Elección de coordenadas para simulación con la Jaula de Helmholtz basada en el ejemplo de Matlab®: “Create an Interactive Map for Selecting Point Features”. [28]

2. data_geomag.m

Tras guardar las coordenadas con el formato requerido para usar el IGRF, la función *data_geomag* llama al IGRF a través de la línea de comandos y a partir del output obtenido (ref. [Figura 3.16](#)), se selecciona la información necesaria, que son los valores en nT del campo magnético en las direcciones x, y, z. De haberse seleccionado más de una localización geográfica, como cuando se quiere simular el recorrido del satélite, por ejemplo, se calcula la media entre los valores de cada dirección y esta información se guarda en un fichero de salida a través de la siguiente línea de código:

```
!geomag70 IGRF13.COF f input_file.txt output_file.txt
```

3. `current_coils.m`

A partir de la información de campo en cada dirección obtenida con `data_geomag`, la función `current_coils` hace los cálculos de la corriente (ref. [Ecuación 2.5](#)) que debe circular cada par de bobinas para que se genere el campo magnético de la/s localización/es indicadas, tomando en cuenta la cancelación del campo magnético *bias* (ref. apartado [2.5. Cancelación del campo magnético terrestre](#)).

4. `helmholtz_cage.m`

Esta es la función principal. Al inicializarse se muestra un menú en el que usuario puede escoger alguna de las siguientes modalidades de simulación, en donde de momento sólo se está implementando la primera opción:

- Campo magnético de un punto geográfico escogido.
- Input de valores de campo magnético escogidos por el usuario.

Independientemente de cualquiera de las opciones que se escoja, se hacen los cálculos necesarios para la cancelación del campo *bias*, además se convierten los parámetros de campo y corrientes calculados en vectores temporales para su uso en *Simulink*.

3.2.2.2. Obtención de los datos de campo magnético

Observando la [Figura 3.12](#), la generación de campo magnético con la Jaula de Helmholtz comienza con la elección de unas coordenadas geográficas que serán la referencia de la magnitud, dirección y sentido del campo magnético que se desea simular. Como se ha mencionado, esta data geomagnética se importará desde el IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) y se exportará hasta Matlab® para su posterior procesamiento en el sistema de control.

Para la obtención de los valores de declinación, inclinación, norte, este, intensidad horizontal, intensidad vertical e intensidad total a través del IGRF, es necesario introducir la siguiente información: fecha o rango de fechas, coordenadas geodésicas o geocéntricas, altitud, latitud y longitud. A través de la interfaz de usuario que se descarga desde [6] se presenta la información geomagnética como se observa en la [Figura 3.16](#).

No sólo es posible obtener la información a través de esta interfaz, también existe la posibilidad del uso de la línea de comandos, este fue el método que se usó para exportar estos datos a Matlab® para su posterior procesamiento en el sistema de control. Con este método es necesario indicar los parámetros de la siguiente forma como el ejemplo a continuación:

```
geomag70.exe IGRF13.COF 2010.32 D M133.4 10.5 10.5
```

A continuación se indican los parámetros a indicar con sus respectivos formatos:

- Fichero ejecutable
 - geomag70.exe
- Fichero de los coeficientes armónicos esféricos (ref. [2.3.2. Modelos geomagnéticos](#))
 - IGRF13.COF
- Preferencia de coordenadas
 - D: Geodésicas (latitud y altitud sobre el nivel medio del mar)
 - C: Geocéntricas (esféricas, altitud relativa al centro de la Tierra)
- Altitud
 - Kilómetros: Kxxxxxx.xxx (K1000.13)
 - Metros: Mxxxxxx.xxx (M1389.24)
 - Pies: Fxxxxxx.xxx (F192133.73)
- Latitud y longitud
 - Decimal: xxx.xxx
 - Grados, minutos, segundos: ddd,mm,ss

```

Model: IGRF2020
Latitude: 10.00 deg
Longitude: -68.00 deg
Altitude: 400.00 km
Date of Interest: 2025.00
-----
Date      D      I      H      X      Y      Z      F
(yr)     (deg min) (deg min) (nT) (nT) (nT) (nT) (nT)
2025.00  -11d 38m  31d 38m  22605.0  22140.0  -4561.3  13928.2  26551.5
-----
Date      dD     dI     dH     dX     dY     dZ     dF
(yr)     (min/yr) (min/yr) (nT/yr) (nT/yr) (nT/yr) (nT/yr) (nT/yr)
2025.00  -5.9   -14.1  -4.5   -12.4  -37.4  -130.8  -72.2
-----

```

Figura 3.16: Obtención de los datos magnéticos a través del IGRF. [6]

3.2.2.3. Diagramas de control

Para la verificación del desarrollo del control de la Jaula de Helmholtz se hará uso de los diagramas de control de *Simulink*, en el que mediante los bloques disponibles se modela el comportamiento del sistema, y se implementan los algoritmos de control necesarios. Idealmente, como el valor de campo magnético que se quiere generar con cada par de bobinas es un valor constante que sólo requiere de una alimentación de corriente constante, no debería ser necesario la implementación de un algoritmo de control, sin embargo existen perturbaciones e incertidumbres que hacen que el comportamiento del sistema se aleje del ideal, y es ahí en donde la implementación de dichos algoritmos se vuelve necesaria.

Primero se estudiará el comportamiento ideal de un único par de Bobinas de Helmholtz. Como se observa en la [Figura 3.17](#) la referencia inicial es el valor de corriente previamente calculado en el *Workspace* de Matlab®, que toma en cuenta tanto la cancelación del campo *bias* como la generación del indicado por el usuario. Este valor es después dividido por aquellos parámetros que permanecen constantes (ref. [Figura 3.17](#) (abajo) y [Ecuación 2.5](#)), para obtener entonces el valor de campo magnético que generan las bobinas, estableciendo así nuestra referencia de control. Como se ha estudiado en apartados anteriores, el vector de campo generado **Bhelm** se suma con el vector de campo *bias* **Bbias** y se obtiene

un vector resultante que llamamos **Btotal**, en el diagrama se observa que este último se compara con los valores teóricos calculados en el *Workspace*.

Observando la gráfica *Total Magnetic Field* representada en la [Figura 3.18](#), se puede notar como casi inmediatamente el sistema (**Btotal**) alcanza la consigna *references_x* y se mantiene constante, este comportamiento ideal no dependiente de un algoritmo de control es al que previamente se hizo referencia. Se nota que los valores como *Iref*, *Ambient Magnetic Field*, *constant* son todos calculados en el *Workspace* y específicos a cada simulación, exceptuando al último ya que los parámetros de dimensionamiento siempre son iguales independientemente del campo magnético que se desee generar.

Comportamiento IDEAL de la Jaula de Helmholtz
(Un solo par de bobinas)

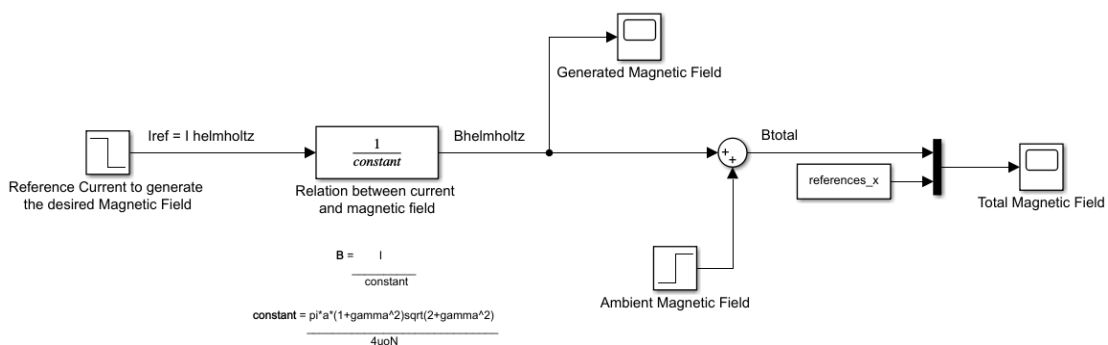


Figura 3.17: Diagrama del comportamiento ideal de un par de Bobinas de Helmholtz.

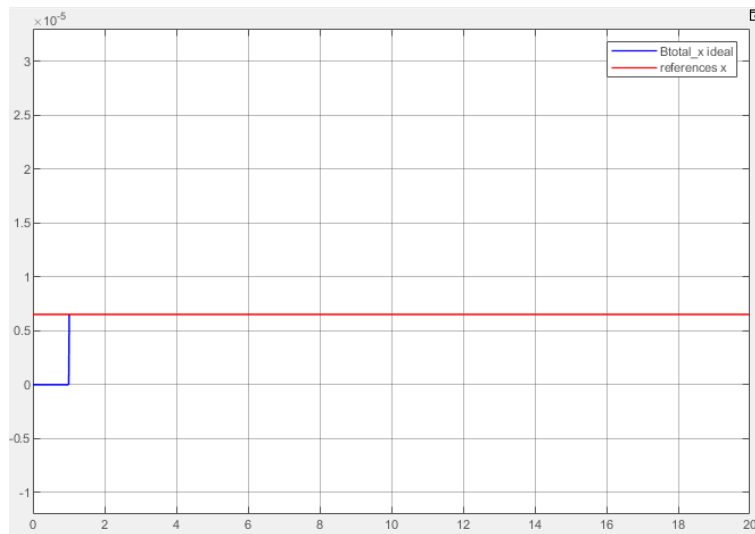


Figura 3.18: *Total Magnetic Field*. Gráfica del campo magnético total generado por un par de bobinas a lazo abierto, comportamiento ideal.

Los comportamientos de los sistemas casi siempre difieren de lo ideal, por lo que se deben estudiar y tomar en cuenta posibles perturbaciones o incertidumbres e incluirlos en el sistema de control para alcanzar la consigna deseada. En la [Figura 3.19](#) se presenta el diagrama de control para este caso, una de las suposiciones que se hizo para el comportamiento ideal es que la corriente inmediatamente alcanza su valor de referencia, a efectos prácticos cuando se utilicen instrumentos reales no se puede asumir este comportamiento instantáneo, esta generación gradual de corriente se simula con el bloque “*Rate Limiter*” en *Simulink* (ref. [Figura 3.20](#)).

Además, todos los sistemas presentan retardos en sus respuestas, y este tiempo en el que las bobinas tardan en generar campo magnético se simula con el bloque “*Non ideal behaviour modelling1*”, estableciendo una constante de tiempo de 1 s. En cuanto al algoritmo de control, se ha escogido la implementación de un controlador PID ya que es uno de los métodos de control más populares y utilizados, debido a esta familiarización se considera como la mejor opción.

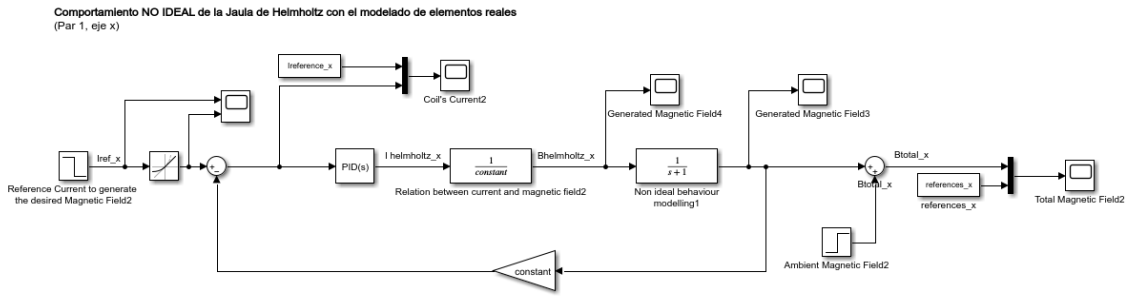


Figura 3.19: Diagrama de control del comportamiento no ideal de un par de Bobinas de Helmholtz a lazo cerrado.

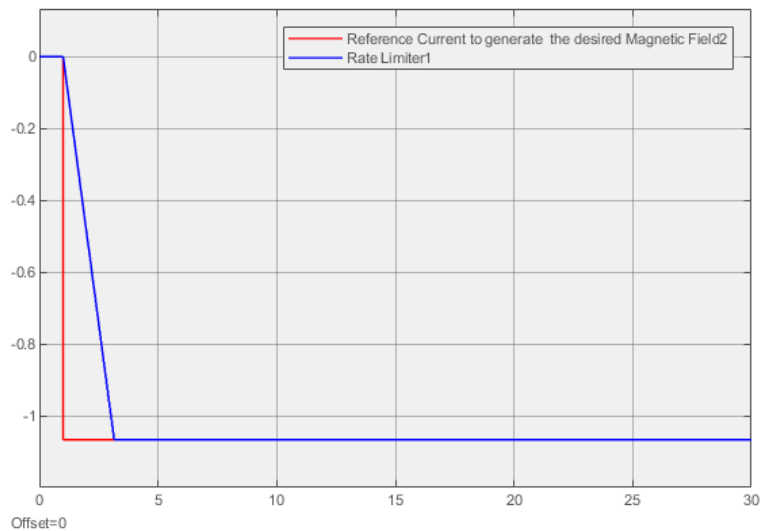


Figura 3.20: Comparación de la generación de corriente en el caso ideal (instantánea) y no ideal (no instantánea) en *Simulink*.

Similar al caso ideal, el campo generado por las bobinas se suma con el ambiental/*bias* y se obtiene el deseado, en la [Figura 3.21](#) se muestra la gráfica *Total Magnetic Field* en donde se comparan los valores teóricos *references_x* con los valores de campo *Btotal_x* cuando no se implementa el PID, se observa que existe un pico inicial de campo que luego disminuye y que nunca se logra alcanzar la consigna de control.

Para la sintonización del controlador PID, se estudiarán distintos casos otorgando distintos valores a los parámetros P, I y D para estudiar la respuesta ideal del sistema. En la [Figura 3.22](#) se aplica sólo acción proporcional (P) y se puede observar que sólo nos acercamos al alcance de la consigna para valores altos de este parámetro, que tiene sentido ya

que este es proporcional al error. Sin embargo, no se considera ideal establecer valores altos de esta acción, ya que este parámetro no soluciona el error estacionario, esto lo hace es la acción integral (I). En la [Figura 3.23](#) se aplica únicamente acción integral, en donde se observa que sí se alcanza la consigna siendo solamente distintos los tiempos en los que esto ocurre.

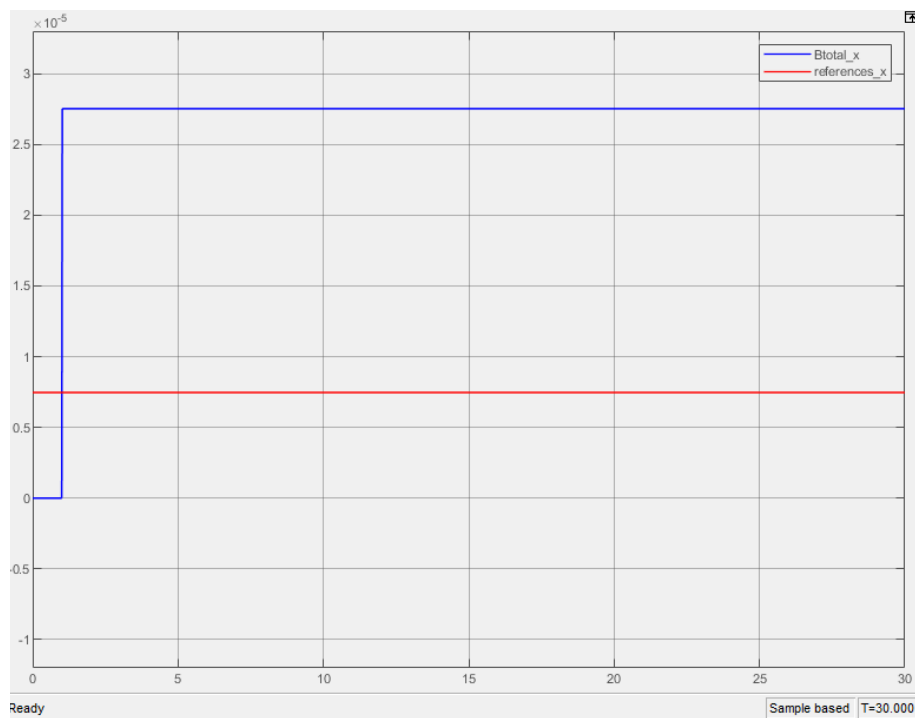


Figura 3.21: *Total Magnetic Field*. Gráfica del campo magnético total generado por un par de bobinas sin la implementación de un PID.

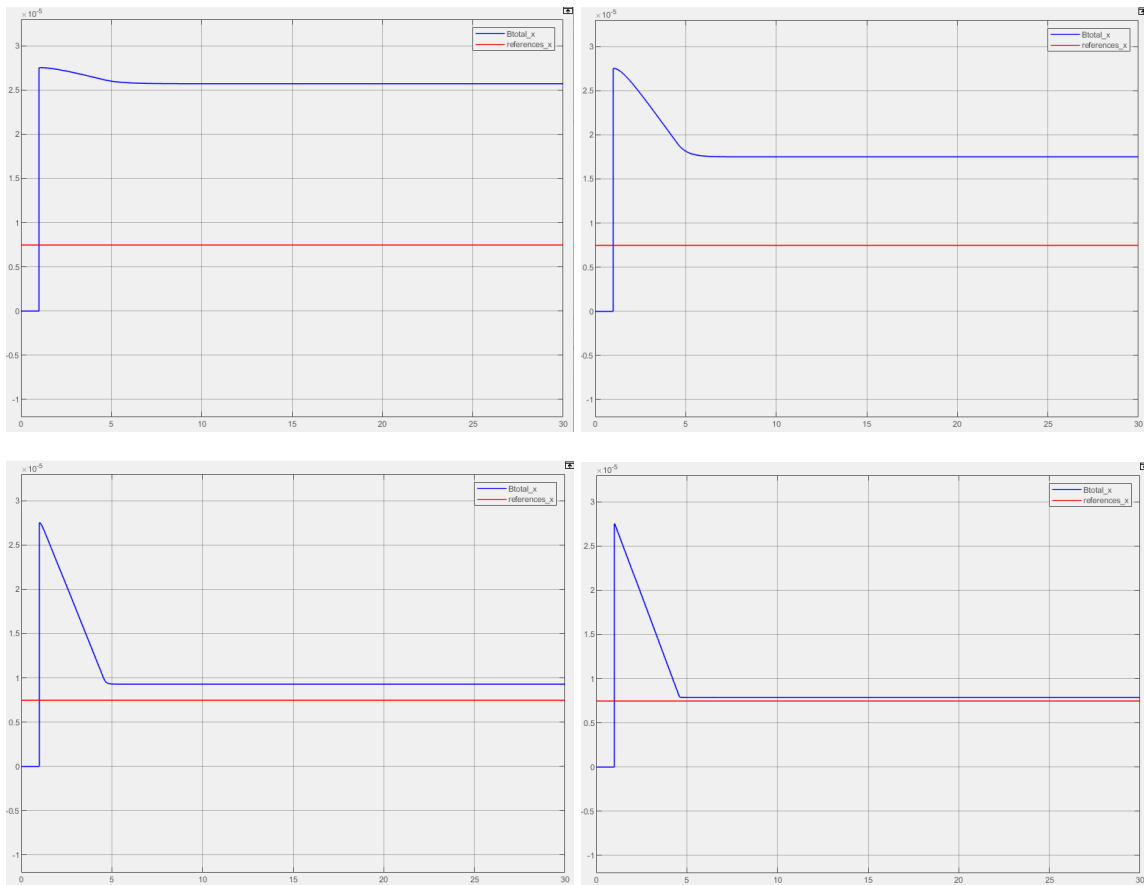


Figura 3.22: *Total Magnetic Field* con la aplicación de acción proporcional. $P=0.1$ (superior izquierda), $P=1$ (superior derecha), $P=10$ (inferior izquierda), $P=50$ (inferior derecha).

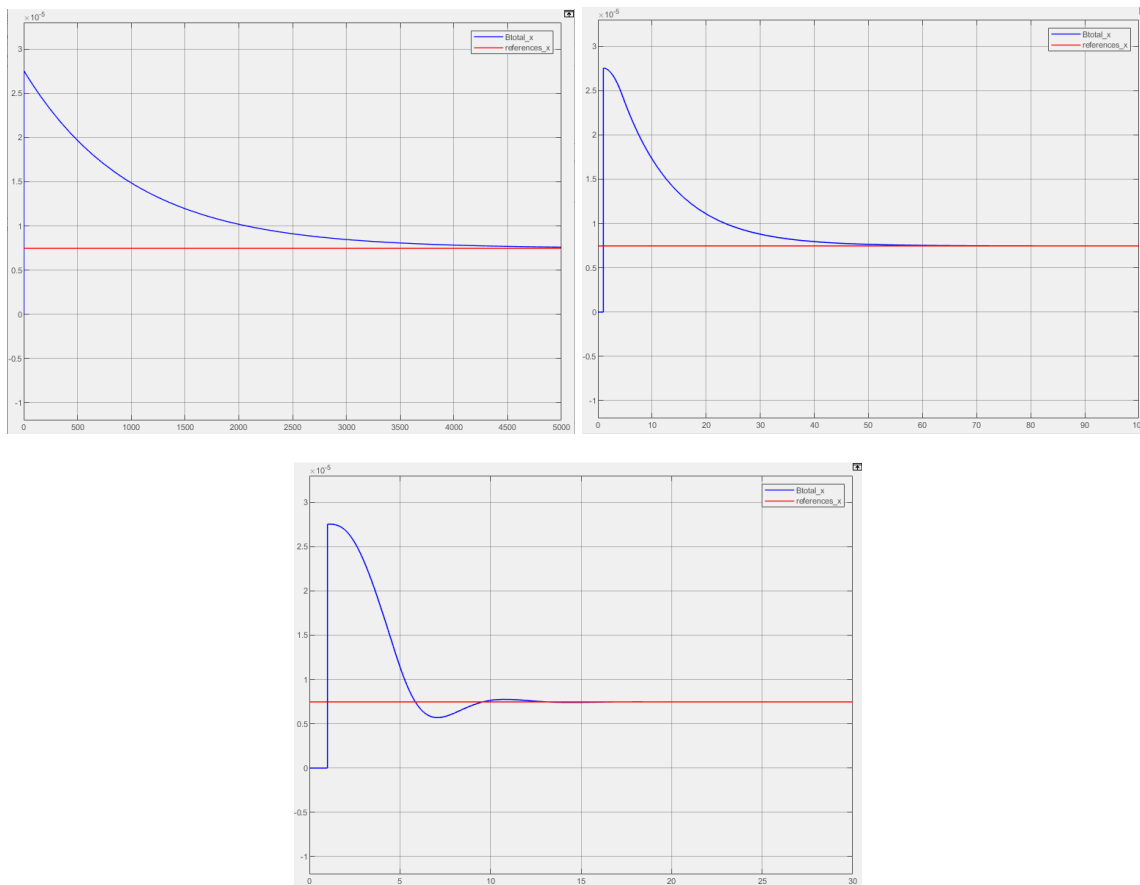


Figura 3.23: *Total Magnetic Field* con la aplicación de acción integral. $I=0.001$ (superior izquierda), $I=0.1$ (superior derecha), $I=1$ (abajo).

Ya que aplicando únicamente acción proporcional no se soluciona el error estacionario se decidió aplicar además acción integral. En la [Figura 3.24](#) se muestra la sintonización final del controlador PI con valores de $P=0.8$ e $I=1$, ya que presenta la respuesta ideal que se busca para el sistema, alcanzando la consigna de control en 10 segundos aproximadamente. Como la acción integral tiene dependencia con el tiempo se escogió un valor un poco más alto de este parámetro para alcanzar la consigna de forma más rápida, además se adjuntan 2 gráficas (ref. [Figura 3.24](#)) con valores distintos de P , para mostrar que aumentando esta acción se logra eliminar el rebote producido por la acción integral. No se implementa acción derivativa ya que no se considera necesaria para la obtención de la respuesta de control ideal del sistema.

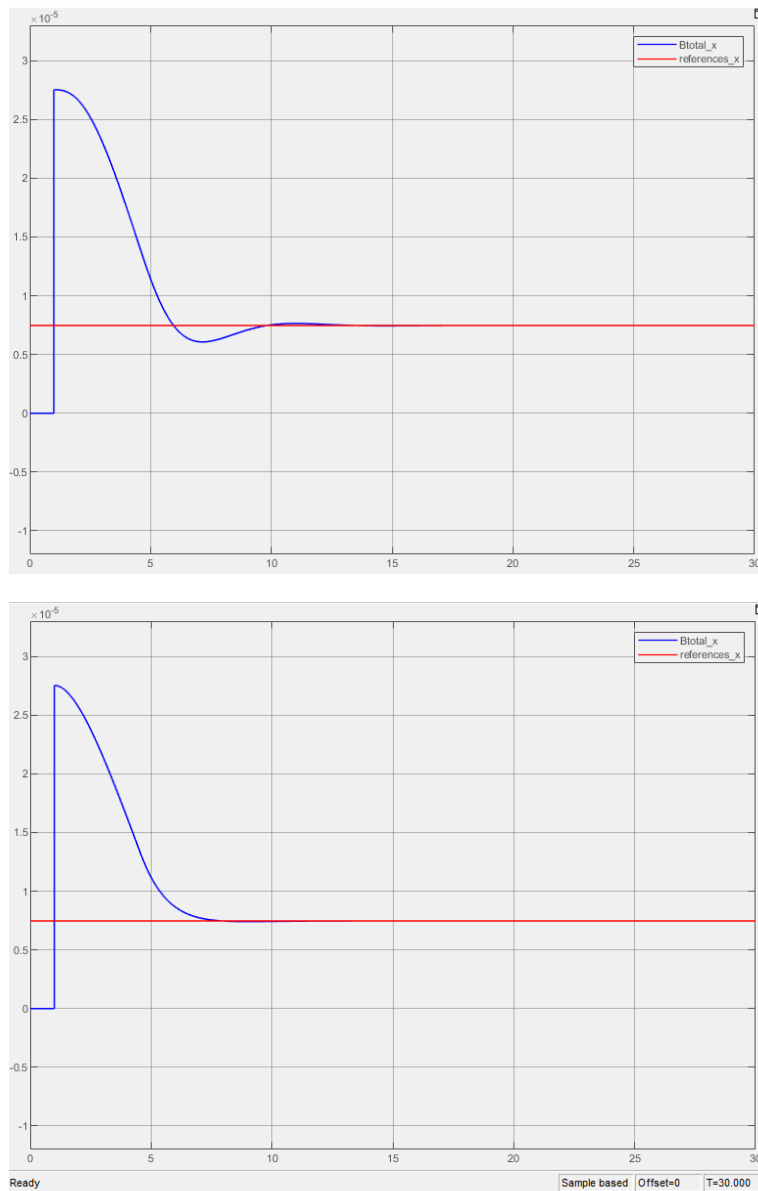


Figura 3.24: *Total Magnetic Field* con la aplicación de acción proporcional e integral. $P=0.1$ $I=1$ (superior), $P=0.8$ $I=1$ (inferior).

3.2.3. Electrónica

3.2.3.1. Funcionamiento general

Para la generación de campo magnético se requiere que por cada par de bobinas circule corriente eléctrica, cuya dirección y sentido son calculadas por el sistema de control en Matlab®. Como el campo magnético a simular es estático, la corriente de alimentación debe ser continua (CC). A continuación se listan los requerimientos del sistema de electrónica a los hay que regirse para el diseño, en la [Figura 3.25](#) se presenta un esquema con el comportamiento básico que se quiere obtener del sistema.

Requerimientos principales:

- 3 sistemas de electrónica iguales e independientes (uno por cada par de bobinas)
- Suministro de corriente continua bidireccional
- Corriente máxima de 5,71 A (ref. [3.2.1.2. Número de vueltas](#))
- Sistema compatible con Arduino®

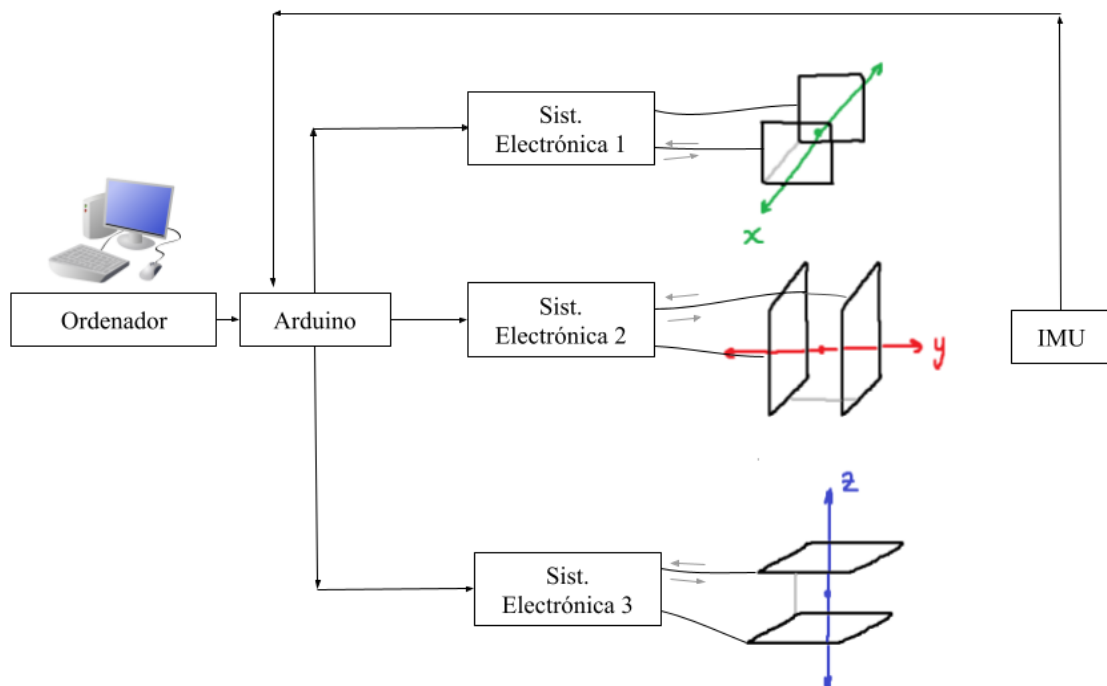


Figura 3.25: Funcionamiento general del sistema eléctrico de la Jaula de Helmholtz.

La razón por la que se requiere un sistema compatible con Arduino® es que tanto para la obtención de las medidas iniciales de campo magnético (ambiental/*bias*), como para la verificación del generado cuando la Jaula de Helmholtz esté activa, es que se usará el magnetómetro de una IMU compatible con Arduino® (el estudio de este instrumento se encuentra en el siguiente apartado), por lo que para tener el control centralizado se consideró que la mejor opción fue el uso de un Arduino®.

Como se requiere de la generación de corriente bidireccional se decidió por la implementación de puentes H. Este es un circuito de 4 interruptores que permiten el paso de corriente en una dirección u otra, y es uno de los componentes más populares para el control de motores de corriente continua (CC) y paso a paso. Existen diversidad de interruptores que se usan en su implementación: diodos, transistores BJT y MOSFET son de los más utilizados, sobre todo estos últimos.

En la [Figura 3.26](#) se presenta el circuito básico de un puente H con esquemas que ilustran su funcionamiento, básicamente se van alternando los interruptores entre sus estados de ON y OFF como se indica a continuación:

- S1, S4 = ON y S2, S3 = OFF
 - La corriente circula en sentido positivo a través del componente central
- S1, S4 = OFF y S2, S3 = ON
 - La corriente circula en sentido negativo través del componente central

Como la alimentación de corriente de cada par de bobinas es independiente, se hará uso de 3 puentes H, aunque se podrían implementar a través de MOSFETs se considera ideal para el control de estos componentes el uso de un driver para motores compatible con Arduino® (también conocidos como *shield*). Se usará el driver basado en el circuito integrado L293D (ref. [Figura 3.27](#)) cuyo datasheet se encuentra en el Anexo II del presente documento, y el análisis de este componente se hará en el siguiente apartado.

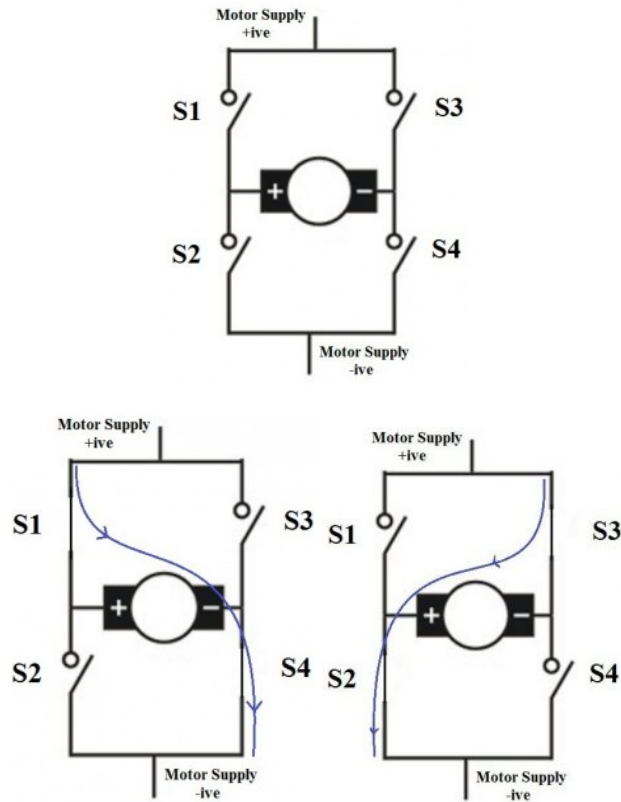


Figura 3.26: Circuito de un puente H (superior), circulación de corriente en distintas direcciones (inferior). [29]

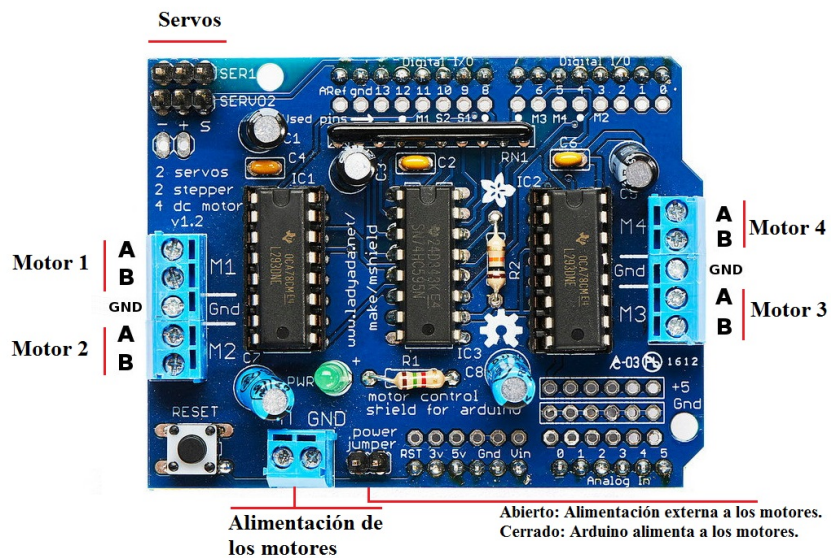


Figura 3.27: Motor driver *shield* para Arduino. [30]

3.2.3.2. Análisis de los componentes

En el presente apartado se hará el diseño del sistema de electrónica de la Jaula de Helmholtz, analizando individualmente sus componentes y luego presentando simulaciones para la verificación de su correcto funcionamiento.

3.2.3.2.1. Hilo de cobre, inductancia y resistencia interna

Antes de comenzar con el diseño del sistema de electrónica se procederá a calcular la inductancia (Ecuación 3.1, ref. Figura 3.28 para conocer los parámetros) y resistencia interna (Ecuación 3.2) teórica de las bobinas, ya que será necesaria para posteriores cálculos [32]. En el caso de las Bobinas de Helmholtz que se quieren diseñar el valor de los parámetros son: $a=l/2$ en donde $l=1,5$ m.

Es importante notar que se dispone de hilo de cobre esmaltado con una sección de 1 mm² por lo que este será el valor usado en los cálculos, además este fue una donación de *Peyman S.L.U.* [33]

$$L = \frac{0.0395 a^2 N^2}{l} \quad \mu \text{ henrys} \quad [\text{Ec. 3.1}]$$

$$R = \frac{l}{\sigma A} \quad [\text{Ec. 3.2}]$$

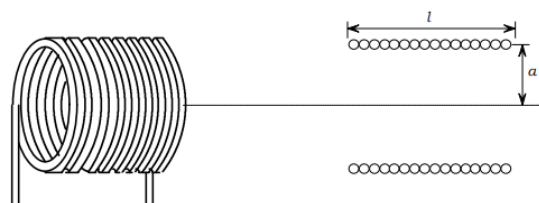


Figura 3.28: Parámetros necesarios para el cálculo de la inductancia de una bobina. [32]

La inductancia teórica de una bobina:

$$L = \frac{0,0395(l/2)^2 N^2}{l} = \frac{0,0395 * l * N^2}{4} = \frac{0,0395 * 1,5m * 10^2}{4} = 148,125 \mu H \approx 150 \mu H$$

Como un par de Bobinas de Helmholtz son dos bobinas en serie, la inductancia total sería:

$$L(\text{total}) = L(\text{bobina 1}) + L(\text{bobina 2}) = 2 * 150 \mu H = 300 \mu H$$

Como las bobinas serán construidas con hilo de cobre, su resistencia interna:

$$R_{int} = \frac{\text{longitud total}}{\sigma A} = \frac{N * 4 * \text{lado}}{\sigma A} = \frac{10 * 4 * (1,5 m)}{(5,6 * 10^7 \frac{1}{\Omega * m}) * (1 * 10^{-6} m^2)} = 1,071 \Omega \approx 1 \Omega$$

Como las bobinas están dispuestas en serie, la resistencia interna total:

$$R_{int}(\text{total}) = R(\text{bobina 1}) + R(\text{bobina 2}) = 2 * 1 \Omega = 2 \Omega$$

Esta última medida de resistencia se verificó con un multímetro, no se pudo hacer la verificación para la inductancia ya que los instrumentos disponibles no eran capaces de realizar una medida tan pequeña de este parámetro.

3.2.3.2.2. Puente H

El primer componente del sistema de electrónica es un driver para motores compatible con Arduino basado en el circuito integrado L293D, cuyo datasheet se encuentra en el Anexo II. El fabricante de este chip indica que este es capaz de conducir corrientes bidireccionales de hasta 600 mA con voltajes desde 4,5 hasta 36 V, además de ser ideal para alimentar cargas inductivas como solenoides, motores de corriente continua y paso a paso, que es justamente la aplicación que se le quiere dar.

En la [Figura 3.30](#) se adjuntan las tablas de los valores máximos y recomendados de diversos parámetros, los que son de más interés para el presente diseño son los siguientes:

- Voltaje de alimentación: 4,5 hasta 36 V
- Corriente continua de salida: -600 hasta 600 mA

Observando estos parámetros se nota que será necesario la amplificación de corriente a la salida del puente H, ya que uno de los requerimientos es ser capaces de alimentar a las bobinas con hasta 5,71 A. En principio se consideró el uso de algún convertidor DC/DC, sin embargo estos diseños sólo funcionan para una única polaridad de la alimentación de entrada, por lo que se decidió que la mejor opción sería la implementación de un amplificador push-pull.

Como se tiene este *shield* para Arduino se hizo una medida experimental del mayor voltaje de salida para decidir si hace falta la amplificación de voltaje, esta medida resultó ser de 5 V. Estudiemos a qué tensión deben estar sometidas las bobinas para la máxima circulación de corriente de 5,71 A:

$$V(max) = I(max) * \chi_L = I(max) * \sqrt{L^2 + R^2} = (5,71 A) * \sqrt{(300 \mu H)^2 + (2\Omega)^2} = 11,42 V$$

El voltaje para la máxima circulación de corriente es mayor al máximo que se puede entregar con el driver de puentes H disponible, por lo que se requiere de la implementación de un circuito que amplifique la tensión a la salida del driver para Arduino. Para esto se hará uso de un amplificador operacional ya que es la principal función de estos componentes, además de existir gran variedad de estos, son bastante accesibles.

6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

	MIN	MAX	UNIT
Supply voltage, V_{CC1} ⁽²⁾		36	V
Output supply voltage, V_{CC2}		36	V
Input voltage, V_I		7	V
Output voltage, V_O	-3	$V_{CC2} + 3$	V
Peak output current, I_O (nonrepetitive, $t \leq 5$ ms): L293	-2	2	A
Peak output current, I_O (nonrepetitive, $t \leq 100$ μ s): L293D	-1.2	1.2	A
Continuous output current, I_O : L293	-1	1	A
Continuous output current, I_O : L293D	-600	600	mA
Maximum junction temperature, T_J		150	$^{\circ}$ C
Storage temperature, T_{stg}	-65	150	$^{\circ}$ C

(1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

(2) All voltage values are with respect to the network ground terminal.

6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	NOM	MAX	UNIT
Supply voltage	V_{CC1}	4.5		7	V
	V_{CC2}	V_{CC1}		36	
V_{IH} High-level input voltage	$V_{CC1} \leq 7$ V	2.3		V_{CC1}	V
	$V_{CC1} \geq 7$ V	2.3		7	V
V_{IL} Low-level output voltage		-0.3 ⁽¹⁾		1.5	V
T_A Operating free-air temperature		0		70	$^{\circ}$ C

(1) The algebraic convention, in which the least positive (most negative) designated minimum, is used in this data sheet for logic voltage levels.

Figura 3.30: Condiciones de operación máximas y recomendadas del circuito integrado L293D. [Anexo II]

3.2.3.2.3. Amplificador Operacional

Se requiere de un amplificador operacional que amplifique la tensión a la salida del driver para Arduino®, sin embargo se necesita establecer cuál será la ganancia de amplificación para su posterior implementación en el sistema de control. Por esta razón se decidió por un amplificador operacional en configuración no inversora, cuyo esquema se presenta en la [Figura 3.31](#) y además se presentan las ecuaciones de la relación en voltaje entre la entrada y la salida (ref. [Ecuación 3.3](#)) y la ganancia del amplificador (ref. [Ecuación 3.4](#)).

Escogiendo los valores de las resistencias R1 y R2 se puede establecer la ganancia en voltaje que quiere a la salida del OPAMP, si $R1=R2$ se obtiene a la salida el doble de la tensión a la entrada, por lo que si el driver es capaz de entregar un máximo de 5 V y después

se pasa esta señal a través del OPAMP recién descrito, se podría alimentar al par de bobinas con 10 V.

A pesar de que no se llegan a los 11,42 V que se requieren para la máxima circulación de corriente, es importante notar que este valor de corriente no toma en cuenta la cancelación del campo magnético terrestre (lo que quiere decir que el verdadero valor de corriente para la generar el máximo valor de campo es menor a 5,71 A), por lo que para facilitar el sistema de control y tener una relación de ganancia sencilla se va a establecer $R1=R2$ para que $Av=2$.

Además, si se establece que $Av=2$, debido al valor pequeño de la inductancia de las bobinas se cumple la relación que se muestra a continuación, simplificando en gran medida el sistema de control de cada par de Bobinas de Helmholtz.

$$I = \frac{V_{out}}{X_L} = \frac{2 * V_{in}}{\sqrt{L^2 + R^2}} = \frac{2 * V_{in}}{\sqrt{(300 \mu H)^2 + (2\Omega)^2}} \approx \frac{2 * V_{in}}{2} \approx V_{in}$$

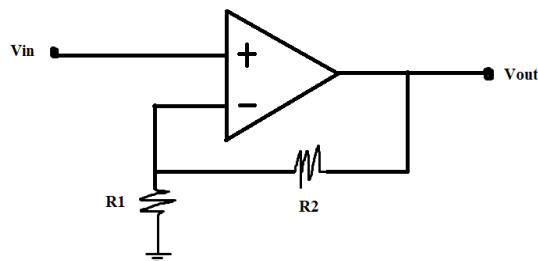


Figura 3.31: Amplificador Operacional en configuración no inversora.

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad [\text{Ec. 3.3}]$$

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad [\text{Ec. 3.4}]$$

3.2.3.2.4. Etapa de salida. Amplificador push-pull

Un amplificador push-pull es un circuito basado en transistores BJT (ref. [Figura 3.32](#)), como esta etapa de salida se basa en un transistor NPN y otro PNP, dependiendo de la tensión a la base conduce uno u otro. Como se indica en [\[31\]](#) el transistor NPN conduce sólo cuando se aplican tensiones superior a la umbral, que para transistores de silicio suele estar alrededor de 0,5 V y el PNP cuando la tensión en su base es menor a este valor; no sólo se aprovecha la propiedad de los BJT de amplificación de corriente sino que además se puede controlar la dirección de la corriente estableciendo los valores de tensión a la base.

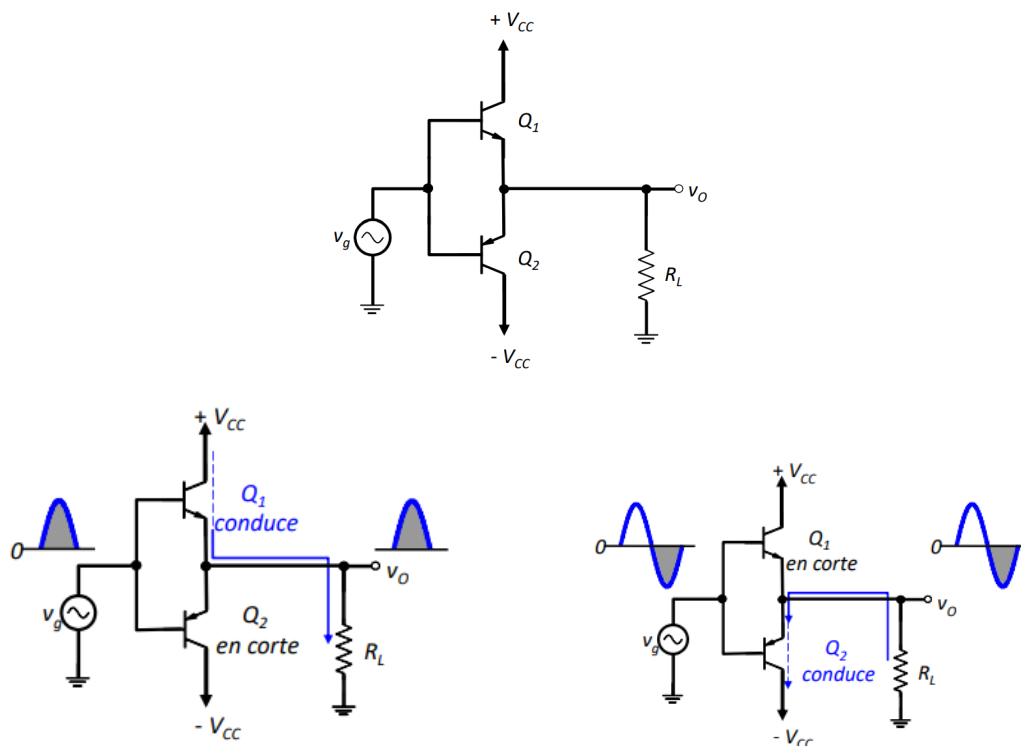


Figura 3.32: Esquema del amplificador push-pull (superior), conducción del NPN (inferior izquierda) y conducción del PNP (inferior derecha). [\[31\]](#)

Para el NPN se escogió el 2N3055 del fabricante *ON Semiconductor* (ref. [Figura 3.33](#)) cuyo datasheet se encuentra en el Anexo III, es un transistor de potencia cuyas características principales son:

- Máximo voltaje emisor-colector:

$$V_{CEO} = 60 \text{ Vdc}$$

- Máximo voltaje emisor-colector de saturación:

$$V_{CE(sat)} = 1,1 \text{ Vdc}$$

- Máxima corriente continua por el colector:

$$I_C = 15 \text{ Adc}$$

- Máxima disipación de potencia para $T_c = 25^\circ\text{C}$:

$$P_D = 115 \text{ W}$$

- Ganancia de corriente:

$$hfe = 20 - 70$$

Para el PNP se escogió el D45VH10 del fabricante *ON Semiconductor* (ref. [Figura 3.33](#)) a cuyo datasheet se puede hacer referencia en el Anexo IV, de igual manera que el anterior este es un transistor de potencia con las siguientes características principales:

- Máximo voltaje emisor-colector:

$$V_{CEO} = 80 \text{ Vdc}$$

- Máximo voltaje emisor-colector de saturación:

$$V_{CE(sat)} = 1,0 - 1,5 \text{ Vdc}$$

- Máxima corriente continua por el colector:

$$I_C = 15 \text{ Adc}$$

- Máxima disipación de potencia para $T_c = 25^\circ\text{C}$:

$$P_D = 83 \text{ W}$$

- Ganancia de corriente:

$$hfe = 20 - 35$$

La principal razón por las que se escogieron estos modelos de transistores BJT fue que además de que son componentes diseñados para sistemas de potencia sus modelos (o unos muy aproximados) se encuentran en la librería de LTSpice®, por lo que se podrán hacer simulaciones para el estudio del comportamiento real. Además ambos componentes están

disponibles en tiendas de Canarias, lo que facilitará su posterior adquisición (ref. [5. Presupuesto](#)).

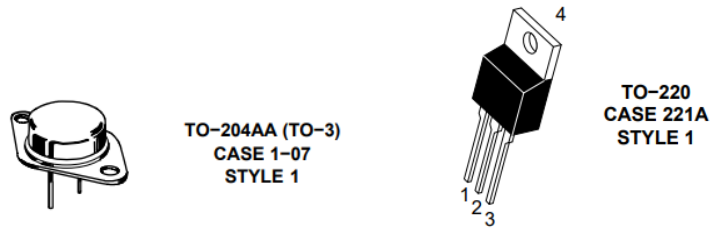


Figura 3.33: Encapsulados de los transistores NPN 2N3055 (izquierda) y PNP D45VH10 (derecha) del fabricante *ON Semiconductor*. [Anexos III y IV]

3.2.3.2.5. IMU: Magnetómetro

La Unidad de Medida Inercial (IMU) es un dispositivo electrónico que mide orientación y movimiento con respecto a un sistema de referencia inercial¹², consta de un conjunto de sensores: giroscopio, acelerómetro electrónico y magnetómetro (también conocido como brújula electrónica), teniendo así 9 grados de libertad¹³. En el caso del diseño de la Jaula de Helmholtz el sensor que nos es de interés es el magnetómetro, que permite la medición de campo magnético.

Se le darán 2 usos principales al magnetómetro: el primero es que se encargará de hacer las medidas iniciales/ambientales de campo magnético, y el siguiente es después de que la Jaula de Helmholtz esté activa verificar que se está alcanzando la consigna establecida por el sistema de control. Se tenía disponible la IMU LSM9DS1 del fabricante *Adafruit* (ref. Figura 3.34), cuyo datasheet se encuentra en el Anexo V, que es ideal para la aplicación que se le quiere dar ya que es un sensor compatible con Arduino®. Se implementará el código “*Simple Magnetometer*” disponible en la librería del software de Arduino® para las lecturas de campo magnético, como el magnetómetro tiene 3 grados de libertad es capaz de hacer las medidas de campo en las direcciones x, y, z, que es precisamente lo que se necesita para el sistema de control.

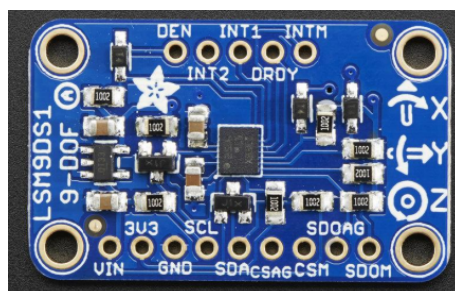


Figura 3.34: IMU LSM9DS1 del fabricante *Adafruit*. [Anexo V]

¹² ECI (Earth-Centered Inertial)

¹³ Los grados de libertad hacen referencia al número de ejes con respecto a los que un cuerpo puede moverse, en el caso de los IMU con 9DOF (degrees of freedom) cada uno de los 3 sensores provee 3 ejes de movimiento.

3.2.3.3. Diseño final y simulaciones

En la [Figura 3.35](#) se presenta el diseño final del sistema de electrónica para la Jaula de Helmholtz en el que se amplifica la tensión a la salida del puente H a través de un amplificador operacional, y luego se permite el paso de corriente bidireccional con la implementación de un etapa de salida push-pull, que además la amplifica.

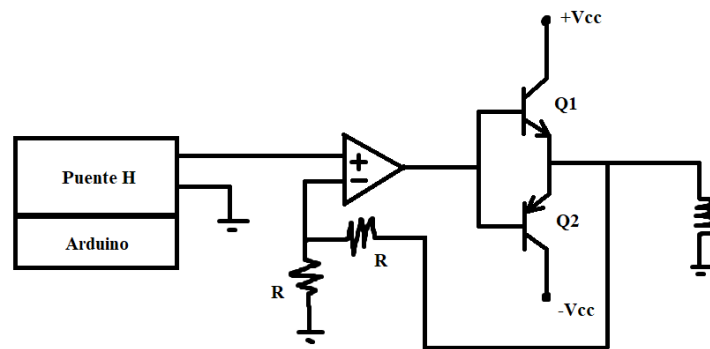


Figura 3.35: Esquema del sistema de electrónica de para un par de Bobinas de Helmholtz basado en un puente H, amplificador operacional y amplificador push-pull.

Se implementó este circuito con componentes ideales y reales en LTSpice® (ref. [Figura 3.36](#)), en la [Figura 3.37](#) se presentan las gráficas para cuando a la salida del puente H hay una tensión positiva y negativa como demostración de que el sistema de amplificación funciona para corrientes bidireccionales. Teóricamente cuando a la salida del puente H hay 5 V la corriente que circula por las bobinas debería ser de 5 A, como se muestran en los cálculos a continuación. Observando las gráficas se observa que efectivamente este es el valor que circula a través de ellas para ambas direcciones.

$$I = \frac{V}{X_L} = \frac{V}{\sqrt{L^2 + R^2}} = \frac{10 \text{ V}}{\sqrt{(300 \mu\text{H})^2 + (2\Omega)^2}} = 5 \text{ A}$$

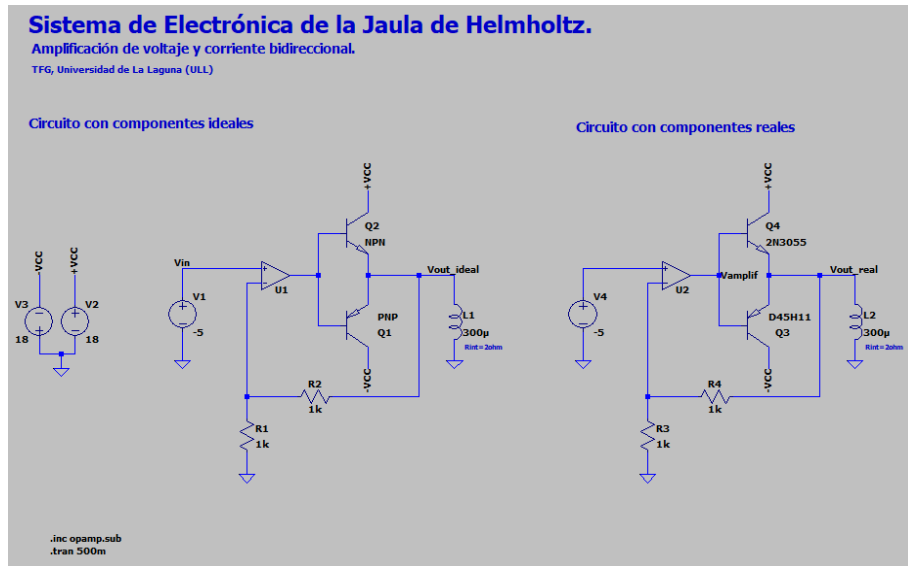


Figura 3.36: Circuitos en LTSpice® con componentes ideales (izquierda) y reales (derecha).

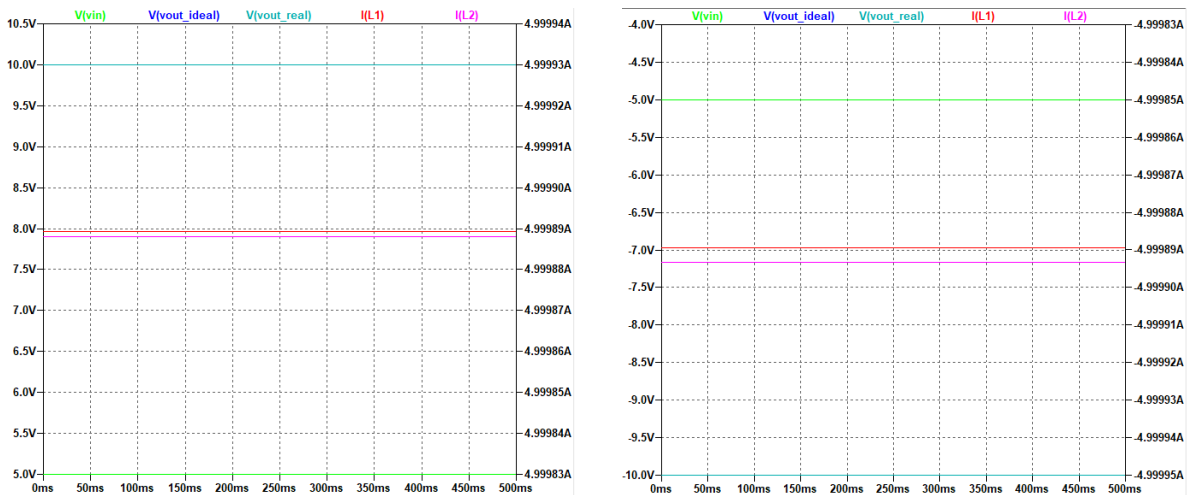


Figura 3.37: Gráficas de las simulaciones para los circuitos con componentes ideales y reales para corrientes bidireccionales.

Como se puede observar la implementación de los componentes reales casi no difiere de los cálculos teóricos, y además de eso se aprecia como el valor del voltaje de entrada coincide con el valor de la corriente que circula por las bobinas, como mencionado previamente.

3.2.3.4. Consideraciones térmicas

Ya que se están implementando transistores BJT en el sistema de electrónica, se considera importante hacer un análisis del equivalente térmico de los circuitos, ya que estos componentes se pueden deteriorar o destruir por sobrecalentamiento si disipan valores de potencia superiores a los máximos establecidos por el fabricante. Primero se calculará la potencia que disipan los transistores NPN y PNP para la máxima circulación de corriente.

Observando el esquema del circuito de la [Figura 3.36](#) el balance de potencia viene dado por:

$$P(V_{in}) + P(S +) + P(S -) - 2 * P(R) - P(NPN) - P(PNP) - P(OP AMP) - P(L) = 0$$

Notar que cuando el transistor NPN esté conduciendo y el PNP esté en corte:

$$P(S -) = 0 W$$

$$P(Q2) \approx 0 W$$

Y cuando el transistor PNP esté conduciendo y el NPN esté en corte:

$$P(S +) = 0 W$$

$$P(Q1) \approx 0 W$$

En donde, la potencia entregada por las fuentes +Vcc y -Vcc viene dada por:

$$P(S +) = V_{cc} * I_{C1 avg} = V_{cc} * I_{C1}$$

Y se puede hacer la siguiente aproximación:

$$I_{C1} \approx I(L) = 5 A$$

Por lo que:

$$P(S +) = V_{cc} * I_{C1} = 18 V * 5 A = 90 W$$

La potencia consumida por las resistencias:

$$P(R) = \frac{V_{in}^2}{R} = \frac{(5V)^2}{1000 \Omega} = 25 mW$$

La potencia que entrega la fuente a la entrada es nula ya que al OPAMP no le ingresa corriente:

$$P(V_{in}) = 0 \text{ W}$$

La potencia que consume un par de bobinas para la máxima circulación de corriente es:

$$P(L) = V_{out} * I_{out} = 10 \text{ V} * 5 \text{ A} = 50 \text{ W}$$

Haciendo la aproximación de que la potencia del OPAMP es nula, el transistor NPN consume:

$$P(NPN) = 90 \text{ W} - 2 * 25 \text{ mW} - 50 \text{ W} = 39,95 \text{ W}$$

A continuación se adjuntan las gráficas de potencia (ref. [Figura 3.38](#)) de las simulaciones del circuito con componentes reales, en donde se observa que cuando circula el máximo valor de corriente positiva el transistor NPN consume unos 37,5 W de potencia, la diferencia de esta medida a la teórica probablemente se deba a la aproximación que se hizo con respecto al amplificador operacional.

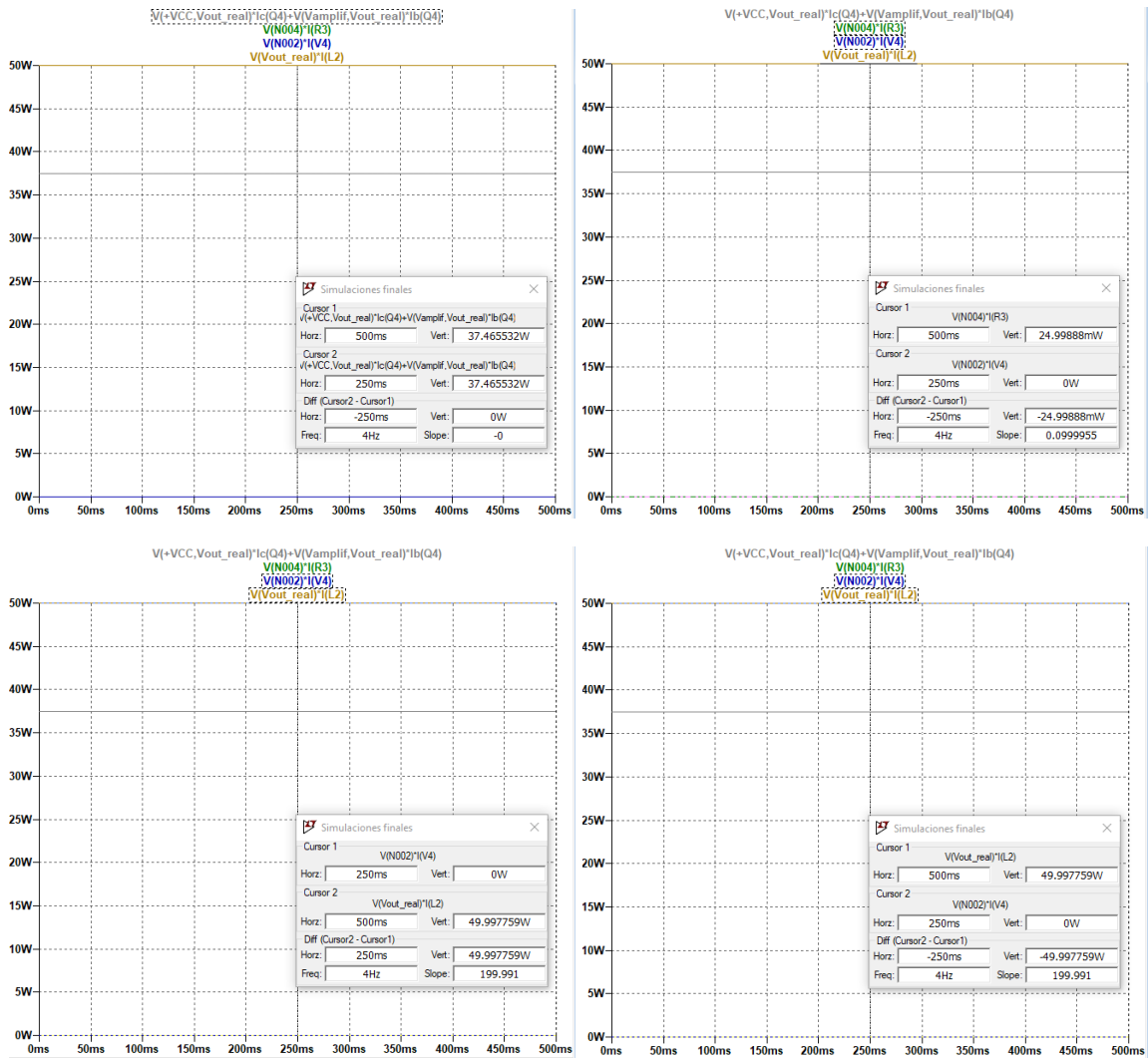


Figura 3.38: Gráficas de potencia de LTSpice® para el circuito con componentes reales. Transistor NPN (superior izquierda), resistencia (superior derecha), OPAMP (inferior izquierda) y fuente +Vcc (inferior derecha).

Los cálculos para el transistor PNP son iguales, por lo que lo siguiente será el análisis del circuito térmico (ref. [Figura 3.39](#)) para determinar la temperatura en la unión del transistor;

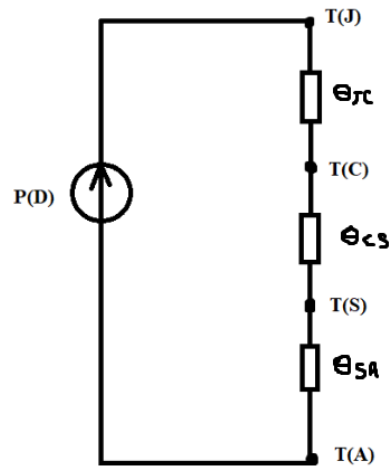


Figura 3.39: Circuito térmico equivalente de los transistores BJT.

Para el caso de NPN tenemos los siguientes datos:

- $\theta_{JC} = 1,52 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$
- $T_C = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $P_D \simeq 40 \text{ W}$
- $P_D(\text{max}) = 115 \text{ W}$
- $T_J(\text{max}) = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Luego,

$$T_J - T_C = \theta_{JC} * P_D$$

$$T_J = \theta_{JC} * P_D + T_C = (1,52 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}) * (40 \text{ W}) + 25 \text{ }^{\circ}\text{C} = 85,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Para este componente el rango de la temperatura de la unión está entre -65 a $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que para la máxima circulación de corriente el transistor se encuentra en una zona segura de operación. Ahora se hará el análisis del PNP, cuyos datos son:

- $\theta_{JC} = 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$
- $T_C = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $P_D \simeq 40 \text{ W}$

- $P_D(max) = 83 W$
- $T_J(max) = 150 ^\circ C$

Luego,

$$T_J - T_C = \theta_{JC} * P_D$$

$$T_J = \theta_{JC} * P_D + T_C = (1,5 ^\circ C/W) * (40 W) + 25 ^\circ C = 85 ^\circ C$$

En el caso de este componente el rango de la temperatura de la unión está entre -55 a 150°C, por lo que igualmente como para el componente anterior, para la máxima circulación de corriente el transistor se encuentra en una zona segura de operación.

4. Conclusiones / Conclusions

4.1. Conclusiones

Como la mayoría de los trabajos de ingeniería, el diseño de la Jaula de Helmholtz presentado en este Trabajo de Fin de Grado implicó una labor multidisciplinar, en donde los conocimientos de distintas áreas de ingeniería fueron necesarios para diseñar y dimensionar los distintos sistemas que, conjuntamente, conforman la Jaula de Helmholtz, necesaria para la fase de pruebas del *Cubesat*. El entendimiento de los principios físicos de las Bobinas de Helmholtz fue fundamental para el diseño de sus sistemas de control y electrónica, y la simulación de estos es la primera aproximación a una garantía de su correcto funcionamiento.

A través de este trabajo se ha diseñado un sistema de generación de campo magnético tridimensional, tanto de su estructura mecánica y su dimensionamiento, como el sistema de control de las Bobinas de Helmholtz que, conjuntamente con el sistema de electrónica diseñado, simularán en tierra de las condiciones que tendrá el nanosatélite en el espacio. Se muestra además el comportamiento satisfactorio del sistema en simulación bajo la acción de los controladores propuestos. Anticipando la implementación de la Jaula de Helmholtz, se adjunta un presupuesto de ejecución del proyecto propuesto.

Las misiones espaciales implican riesgos, ya que los posibles fallos que se puedan presentar son difíciles de corregir y además, en órbita, existen muchas más condiciones y situaciones fuera de nuestro control que en la Tierra. El diseño e implementación de dispositivos como una Jaula de Helmholtz, que ayudan a realizar verificaciones adicionales e intentan recrear las condiciones de órbita, se considera que son de gran importancia para este tipo de misiones, en las que el éxito es mucho más difícil de asegurar.

4.2. Conclusions

As it is the case with the majority of engineering projects, the design of the Helmholtz Cage presented in this work involved a multidisciplinary work. The knowledge of different areas of engineering were needed in the design and dimensioning of the different systems that, together, implement the Helmholtz Cage, needed for the following phase of the nanosatellite. Understanding the physical principles of Helmholtz Coils was fundamental for designing the control and electronic systems, and their simulations are the first approach for guaranteeing their expected operations.

The main conclusions of this work are that a three-dimensional magnetic field generation system has been designed, both in terms of its mechanical structure and dimensioning, as well as the Helmholtz Coil control system which, together with the electronic system designed, will be able to simulate the conditions that the nanosatellite will have in space. The satisfactory behavior of the system in simulation under the action of the proposed controllers is also shown. In anticipation of the implementation of the Helmholtz Cage, a budget for the execution of the proposed project is attached.

Space missions imply risks, the possible faults that may occur are hard to fix and, in orbit, there are many more conditions and situations out of our control than here on Earth. The design and implementation of devices like a Helmholtz Cage, that help to make additional verifications and try to recreate space conditions, are considered to be of a great importance for such missions, in which success is much more difficult to ensure.

5. Presupuesto

A continuación se presenta el presupuesto de los elementos principales necesarios para la construcción de la Jaula de Helmholtz, en donde se intentó que la mayoría de los materiales/componentes estuvieran disponibles en tiendas en Canarias.

Presupuesto Trabajo de Fin de Grado (TFG)								
<i>"Diseño e implementación de una Jaula de Helmholtz para el testeo de un Cubesat"</i>								
Autora: Andrea Valentina Pereira Serrano (alu0101278131)								
Tutor ULL: Santiago Torres Alvarez								
Septiembre 2022								
Elemento	Num. unidades	Cantidad [m]	Precio		Lugar de compra	Num. referencia	Observaciones	
Alambre de cobre esmaltado 1mm ²	-	1 bobina	60	1 kg	18,83 €	Dielca	H.E CU 1	Para D=1mm hay 143,22 m/kg
		1 par	122					
		Total	366	Total =	48,12 €			
Perfil de aluminio en U 40x20mm 150cm	24	-		Unitario 10,00 €	Total 240,00 €	Alucansa	P4020	-
Shield para arduino driver de motores DC (L293D)	1	-			8,00 €	Nalber	NEARD17	-
Placa compatible Arduino UNO	1	-			5,60 €		NEARD1E	-
IMU LM9DS1 compatible con Arduino	1	-			35,95 €	Adafruit	-	-
Transistor 2N3055 NPN 60V 15A 115W TO-3	3	-		Unitario 3,04 €	Total 9,12 €	Nalber	TR2N3055	-
Transistor D45VH10G BJT PNP 100V 15A 83W TO-220	3	-		Unitario 2,08 €	Total 6,24 €	Nalber	TRD45VH10G	-
Fuente de alimentación FA-350 0 a 30V / 5A, 12V, 5V Promax	1	-			350,00 €	Nalber	FA350	-
TOTAL =					703,03 €			

Para el caso de TEIDESAT este no es el presupuesto final, ya que muchos de los elementos ya se encuentran disponibles en el taller de la agrupación y/o han sido donados. Se adjunta el presupuesto que corresponde para este caso.

Presupuesto Trabajo de Fin de Grado (TFG)
"Diseño e implementación de una Jaula de Helmholtz para el testeo de un Cubesat"
Autora: Andrea Valentina Pereira Serrano (alu0101278131)

Tutor ULL: Santiago Torres Alvarez

Septiembre 2022

Elemento	Num. unidades	Cantidad [m]	Precio	Lugar de compra	Num. referencia	Observaciones	
Alambre de cobre esmaltado 1mm ²		1 bobina	60				
	-	1 par	122			Donado por Peyman S.L.U.	
		Total	366				
Perfil de aluminio en U 40x20mm 150cm	24	-	Unitario 10,00 €	Total 240,00 € Alucansa	P4020	-	
Shield para arduino driver de motores DC (L293D)	1	-	8,00 €	Nalber	NEARD17	-	
Placa compatible Arduino UNO	1	-	5,60 €		NEARD1E	-	
IMU LM9DS1 compatible con Arduino	1	-				Disponible en TEIDESAT.	
Transistor 2N3055 NPN 60V 15A 115W TO-3	3	-	3,04 €	9,12 €	Nalber	TR2N3055	-
Transistor D45VH10G BJT PNP 100V 15A 83W TO-220	3	-	2,08 €	6,24 €	Nalber	TRD45VH10G	-
TOTAL =				268,96 €			

6. Bibliografía

- [1] “Earth’s inconstant magnetic field,” Nasa.gov. [Online]. Available: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/29dec_magneticfield. [Accessed: Feb-2022].
- [2] S. McLean, “Geomagnetism frequently asked questions,” Noaa.gov. [Online]. Available: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml>. [Accessed: Feb-2022].
- [3] Wikipedia contributors, “Campo magnético terrestre,” Wikipedia, The Free Encyclopedia. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Campo_magn%C3%A9tico_terrestre&oldid=144990466.
- [4] “Swarm probes weakening of Earth’s magnetic field,” Esa.int. [Online]. Available: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm/Swarm_probes_weakening_of_Earth_s_magnetic_field. [Accessed: Feb-2022].
- [5] M. Castro Santiago, “Cubesat Attitude Control System based on embedded magnetorquers in photovoltaic panels,” Universidad de Granada, Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores, 2018.
- [6] M. Nair, “IAGA V-MOD geomagnetic field modeling: International Geomagnetic Reference Field IGRF-13,” Noaa.gov. [Online]. Available: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>. [Accessed: Feb-2022].
- [7] B. Meyer, “World Magnetic Model - software download,” Noaa.gov. [Online]. Available: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/soft.shtml>. [Accessed: 02-Mar-2022].
- [8] P. Alken et al., “International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation,” Earth Planets Space, vol. 73, no. 1, 2021.

- [9] Rod Jones, NASA ISS Research Integration Office, “ISS Orbit and Ground Track Applicability for Earth Observation, Astrophysics and Heliophysics,” Astronautical.org. [Online]. Available: <https://www.astronautical.org/sites/default/files/attachment/Rod%20Jones%20AAS%202014rev2.pdf>. [Accessed: Feb-2022].
- [10] “Orbit tutorial,” Nasa.gov. [Online]. Available: <https://eol.jsc.nasa.gov/Tools/orbitTutorial.htm>. [Accessed: 27-Feb-2022].
- [11] “Magnetismo. Ley de Ampère,” Upm.es. [Online]. Available: <https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/magnet/ampere.html>. [Accessed: Mar-2022].
- [12] Afrotechmods, “Inductor basics - What is an inductor?,” 23-Aug-2011. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=NgwXkUt3XxQ>. [Accessed: Aug-2022].
- [13] “Helmholtz Coil,” Erau.edu. [Online]. Available: <https://physicsx.erau.edu/HelmholtzCoils/>. [Accessed: Mar-2022].
- [14] M. R. Brewer, “CUBESAT ATTITUDE DETERMINATION AND HELMHOLTZ CAGE DESIGN,” Air Force Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [15] “Helmholtz Cage,” Github.io. [Online]. Available: <https://uccubecats.github.io/HelmholtzCage.html>. [Accessed: 17-Aug-2022].
- [16] N. Theoret, “Attitude Determination Control Testing System (Helmholtz Cage and Air Bearing),” Western Michigan University, 2016.
- [17] F.M.Poppenk, R.Amini, and G.F.Brouwer, “DESIGN AND APPLICATION OF A HELMHOLTZ CAGE FOR TESTING NANO-SATELLITES,” Delft University of Technology.

[18] “Helmholtz coils,” L.R. Ingersoll Physics Museum. [Online]. Available: <https://www.physics.wisc.edu/ingersollmuseum/exhibits/em/helmholtz/>. [Accessed: 08-Mar-2022].

[19] “Vector plot of Helmholtz coil in earth’s magnetic field - wolfram demonstrations project,” Wolfram.com. [Online]. Available: <https://demonstrations.wolfram.com/VectorPlotOfHelmholtzCoilInEarthsMagneticField/>. [Accessed: Mar-2022].

[20] “Fly Your Satellite! Programme,” Esa.int. [Online]. Available: https://www.esa.int/Education/CubeSats_-_Fly_Your_Satellite/Fly_Your_Satellite!_programme. [Accessed: Aug-2022].

[21] ESA, “LIST OF DOCUMENTS,” Human Settlements and Energy, 1978. [Online]. Available: https://www.esa.int/Education/CubeSats_-_Fly_Your_Satellite/List_of_documents. [Accessed: Aug-2022].

[22] ESA Education Office, “‘Fly Your Satellite!’ Design Specification Version 3.0,” Dec. 2019.

[23] The CubeSat Program, Cal Poly SLO, “CubeSat Design Specification REV 13.”

[24] Real Decreto 299/2016, de 22 de julio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos.

[25] “Square Helmholtz coils - wolfram demonstrations project,” Wolfram.com. [Online]. Available: <https://demonstrations.wolfram.com/SquareHelmholtzCoils/>. [Accessed: Dec-2021].

- [26] “Finite Element Method Magnetics,” FEMM. [Online]. Available: <https://www.femm.info/wiki/HomePage>. [Accessed: Apr-2022].
- [27] C. Grassin, “ECE3SAT - Helmholtz coils,” Charles’ Labs. [Online]. Available: <http://charleslabs.fr/en/project-ECE3SAT+-+Helmholtz+Coils>. [Accessed: Dec-2021].
- [28] “Create an interactive map for selecting point features - MATLAB & Simulink example - MathWorks España,” Mathworks.com. [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/help/map/creating-an-interactive-map-for-selecting-point-features.html>. [Accessed: Apr-2022].
- [29] L. George, “DC Motor Driving using H Bridge,” electroSome, 13-May-2012. [Online]. Available: <https://electrosome.com/dc-motor-driving-using-h-bridge/>. [Accessed: Aug-2022].
- [30] “Un pequeño robot con tracción 4x4,” Prometec.net, 21-Mar-2015. [Online]. Available: <https://www.prometec.net/motorshieldv1/>. [Accessed: Aug-2022].
- [31] F. J. Llopis, “Etapas de Salida. Amplificadores de Potencia,” Universidad de La Laguna.
- [32] C. Pérez, “DISEÑO DE BOBINAS,” Unican.es. [Online]. Available: <https://personales.unican.es/perezvr/pdf/bobinas1.pdf>. [Accessed: 31-Aug-2022].
- [33] “INICIO,” Peyman.es. [Online]. Available: <http://www.peyman.es/index.php>. [Accessed: 01-Sep-2022].

7. Anexos

Anexo I

```

function [Ix, Iy, Iz, Bx, By, Bz, references_x, references_y, references_z, constant,
Box, Boy, Boz, Ireferenc_x, Ireferenc_y, Ireferenc_z, Bhelmx, Bhelmy, Bhelmz] =
helmholtz_cage()
    % Ix, Iy, Iz: Valores de corriente para al
    % Bx, By, Bz: Campo que se desea generar
    % Box, Boy, Boz: Valores iniciales de campo a altitud 0 km
    % constant: relacion entre B e I
    % Bhelmx, Bhelmy, Bhelmz: campo que genera cada par de bobinas
    % references_x, etc: referencias de campo para simulink
    % Ireferenc_x, etc: referencias de corriente para simulink

% Usuario escoge qué punto/s geográficos quiere simular con la Jaula
prompt=['-----\n' ...
'Modalidades de simulación con la Jaula de Helmholtz:\n' ...
'-----' ...si
'\n    Campo magnético de punto geográfico escogido (0)' ...
'\n    Input del campo magnético (1)\n'];

eleccion=input(prompt);

% Dependiendo de la elección:
if (eleccion==0)
    % Campo magnético de punto geográfico escogido
    choose_geopoint();

    % Determinamos el campo magnético para esa(s) coordenada(s) geográfica(s)
    [Bx, By, Bz, Bf] = data_geomag; % Teslas

    % Convertimos las referencias en vectores temporales para Simulink
    sampleTime = 0.01;
    numSteps = 1001;
    time = sampleTime*(0:numSteps-1);
    time = time';
    data_x = Bx;
    data_y = By;
    data_z = Bz;
    references_x = timeseries(data_x,time);
    references_y = timeseries(data_y,time);
    references_z = timeseries(data_z,time);

    % Calculamos la corriente necesaria para generar el campo magnético
    % deseado (en Amperios)
    [Ix, Iy, Iz, constant, Box, Boy, Boz, Bhelmx, Bhelmy, Bhelmz] = current_coils(Bx, By,
Bz);
    data_Ix = Ix;
    data_Iy = Iy;
    data_Iz = Iz;
    Ireferenc_x = timeseries(data_Ix,time);
    Ireferenc_y = timeseries(data_Iy,time);
    Ireferenc_z = timeseries(data_Iz,time);

```

```
% Pasamos la magnitud de campo a nT y Gauss
Bf_nT = Bf*10^(9);
Bf_G = Bf*10000;

% Mostrar los valores por pantalla
fprintf(['Para simular un campo magnético de %.1f nT = %.3f G hay que alimentar cada ↙
par de bobinas con:\n' ...
'Ix = %.2f A\n' ...
'Iy = %.2f A\n' ...
'Iz = %.2f A\n'], Bf_nT, Bf_G, Ix, Iy, Iz);

% QUITAR OUTPUT ESE DE GEOMAG

elseif (eleccion==1)
disp("Sin implementar.");

else
disp("No válido.");

end

end
```

```
function choose_geopoint

% Code is from Matlab's Mapping Toolkit example
% Set up a Map Axes Object and Render a Global Elevation Grid
figure
axesm bries
text(2.8,-1.8,'Geomagnetic Field Simulation','HorizontalAlignment','right')
framem('FLineWidth',1)

load topo60c
geoshow(topo60c,topo60cR,'DisplayType','texturemap')

% Improve the Terrain Display
demcmap(topo60c)
brighten(0.5)

% Add Simplified Coastlines
load coastlines
[rlat,r lon] = reducem(coastlat,coastlon,0.25);
geoshow(rlat,r lon,'Color',[.6 .5 .2],'LineWidth',1.5)

% Plot City Locations with Red Point Markers
cities = readgeotable('worldcities.shp');

lats = cities.Shape.Latitude;
lons = cities.Shape.Longitude;
geoshow(lats, lons,...
         'DisplayType', 'point',...
         'Marker', 'o',...
         'MarkerEdgeColor', 'r',...
         'MarkerFaceColor', 'r',...
         'MarkerSize', 3)
text(-2.8,-1.8,'Helmholtz Cage')

% Select Cities Interactively (Optional)

% We create .txt file to save the selected latitudes and longitudes
fileID=fopen('input_file.txt', 'w');

runCitySelectionLoop = true; % Set to true to run optional city selection loop

if(runCitySelectionLoop)
    h1 = text(-2.8, 1.9, 'Click on a dot for its coordinates. Press ENTER to stop');
    h2 = text(-2.8, 1.7, '');
    h3 = text(-2.8, 1.5, 'Geographic Coordinates. ');
    while true
        [selected_lat,selected_lon] = inputm(1);
        if isempty(selected_lat)
            break % User typed ENTER
        end
        d = distance(lats, lons, selected_lat, selected_lon);
    end
end
```

```
% Saves selected latitude and longitude in .txt file to be executed
% by IGRF
fprintf(fileID, '2025 D K400 %.1f %.1f\n', selected_lat, selected_lon);

% Para seleccionar la ciudad mas cercana a donde se dió click:
k = find(d == min(d(:)),1);
city = cities(k,:);
geoshow(city.Shape.Latitude, city.Shape.Longitude, ...
         'DisplayType', 'point', ...
         'Marker', 'o', ...
         'MarkerEdgeColor', 'k', ...
         'MarkerFaceColor', 'y', ...
         'MarkerSize', 3)
h2.String = 'Coordinates: ';
h3.String = num2str([selected_lat, selected_lon], '%10.2f');
end

disp('End of geographic coordinates selection.')
fclose(fileID);
close
end
```

```
% Extrae los datos de campo magnético del IGRF
function [Bx, By, Bz, Bf] = data_geomag
    % Teslas

% Ejecuto el IGRF13 con las coordenadas de entrada
!geomag70 IGRF13.COF f input_file.txt output_file.txt

% Paso los datos de salida a una tabla
datos_table = readtable('output_file.txt');
datos_matrix = readmatrix('output_file.txt');

% Guardo los datos de las direcciones y magnitud en variables individuales
campo_x = datos_matrix(:,11);
campo_y = datos_matrix(:,12);
campo_z = datos_matrix(:,13);
campo_f = datos_matrix(:,14);

% Quiero calcular la magnitud de cada dirección para obtener un valor
% promedio de todas las distintas coordenadas
Bx = mean(campo_x); % nanoTeslas
By = mean(campo_y);
Bz = mean(campo_z);
Bf = mean(campo_f);

% Conversión a Teslas
Bx = Bx*(10^(-9)); % Teslas
By = By*(10^(-9));
Bz = Bz*(10^(-9));
Bf = Bf*(10^(-9));

% % Conversión a Gauss
% Bx = Bx*10000; % Gauss
% By = By*10000;
% Bz = Bz*10000;
% Bf = Bf*10000;

end
```

```
% Corriente necesaria para las bobinas de Helmholtz
function [Ix, Iy, Iz, constant, Box, Boy, Boz, Bhelmx, Bhelmy, Bhelmz] = current_coils
(Bx, By, Bz)

% Campo Magnético Ambiental: medido a través de instrumento
% De momento saqué esta información del IGRF para altitud 0 km en T
Box = 27524.6*10(-9);
Boy = -2078.6*10(-9);
Boz = -16059.9*10(-9);

% Campo que generan las bobinas en T
Bhelmx = Bx - Box;
Bhelmy = By - Boy;
Bhelmz = Bz - Boz;

% Definimos parámetros:
L = 1.5; % longitud bobinas en metros
a = L/2;
gamma = 0.5; % (dist entre bobinas)/L = (L/2)/L = 1/2
N = 10; % número de vueltas
uo = 4*pi*10(-7); % permeabilidad en el vacío en T*m/A

% Calculo el valor constante de la ec:
%  $(\pi * a * (1 + \gamma^2) * \sqrt{2 + \gamma^2}) / (4 * u_0 * N)$ 
constant = (pi*a*(1+gamma^2)*sqrt(2+gamma^2))/(4*N*uo);

% Corriente necesaria para generar el campo Bhelm en A
Ix = Bhelmx*constant;
Iy = Bhelmy*constant;
Iz = Bhelmz*constant;
```


Anexo II

L293x Quadruple Half-H Drivers

1 Features

- Wide Supply-Voltage Range: 4.5 V to 36 V
- Separate Input-Logic Supply
- Internal ESD Protection
- High-Noise-Immunity Inputs
- Output Current 1 A Per Channel (600 mA for L293D)
- Peak Output Current 2 A Per Channel (1.2 A for L293D)
- Output Clamp Diodes for Inductive Transient Suppression (L293D)

2 Applications

- Stepper Motor Drivers
- DC Motor Drivers
- Latching Relay Drivers

3 Description

The L293 and L293D devices are quadruple high-current half-H drivers. The L293 is designed to provide bidirectional drive currents of up to 1 A at voltages from 4.5 V to 36 V. The L293D is designed to provide bidirectional drive currents of up to 600-mA at voltages from 4.5 V to 36 V. Both devices are designed to drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and bipolar stepping motors, as well as other high-current/high-voltage loads in positive-supply applications.

Each output is a complete totem-pole drive circuit, with a Darlington transistor sink and a pseudo-Darlington source. Drivers are enabled in pairs, with drivers 1 and 2 enabled by 1,2EN and drivers 3 and 4 enabled by 3,4EN.

The L293 and L293D are characterized for operation from 0°C to 70°C.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
L293NE	PDIP (16)	19.80 mm x 6.35 mm
L293DNE	PDIP (16)	19.80 mm x 6.35 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Logic Diagram

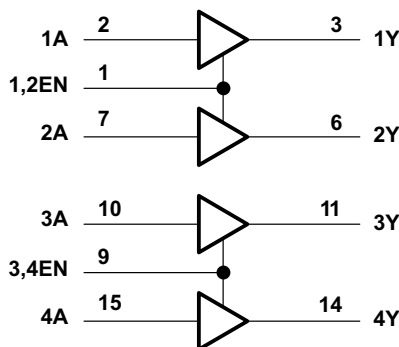


Table of Contents

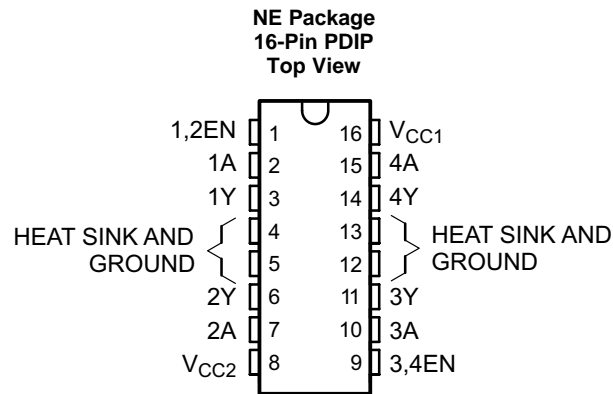
1 Features 1 2 Applications 1 3 Description 1 4 Revision History 2 5 Pin Configuration and Functions 3 6 Specifications 4 6.1 Absolute Maximum Ratings 4 6.2 ESD Ratings..... 4 6.3 Recommended Operating Conditions 4 6.4 Thermal Information 4 6.5 Electrical Characteristics..... 5 6.6 Switching Characteristics 5 6.7 Typical Characteristics 5 7 Parameter Measurement Information 6 8 Detailed Description 7 8.1 Overview 7 8.2 Functional Block Diagram 7	8.3 Feature Description..... 7 8.4 Device Functional Modes..... 8 9 Application and Implementation 9 9.1 Application Information..... 9 9.2 Typical Application 9 9.3 System Examples 10 10 Power Supply Recommendations 13 11 Layout 14 11.1 Layout Guidelines 14 11.2 Layout Example 14 12 Device and Documentation Support 15 12.1 Related Links 15 12.2 Community Resources..... 15 12.3 Trademarks 15 12.4 Electrostatic Discharge Caution..... 15 12.5 Glossary 15 13 Mechanical, Packaging, and Orderable Information 15
---	--

4 Revision History

NOTE: Page numbers for previous revisions may differ from page numbers in the current version.

Changes from Revision C (November 2004) to Revision D	Page
• Removed <i>Ordering Information</i> table	1
• Added <i>ESD Ratings</i> and <i>Thermal Information</i> tables, <i>Feature Description</i> section, <i>Device Functional Modes</i> , <i>Application and Implementation</i> section, <i>Power Supply Recommendations</i> section, <i>Layout</i> section, <i>Device and Documentation Support</i> section, and <i>Mechanical, Packaging, and Orderable Information</i> section.	1

5 Pin Configuration and Functions



Pin Functions

PIN		TYPE	DESCRIPTION
NAME	NO.		
1,2EN	1	I	Enable driver channels 1 and 2 (active high input)
<1:4>A	2, 7, 10, 15	I	Driver inputs, noninverting
<1:4>Y	3, 6, 11, 14	O	Driver outputs
3,4EN	9	I	Enable driver channels 3 and 4 (active high input)
GROUND	4, 5, 12, 13	—	Device ground and heat sink pin. Connect to printed-circuit-board ground plane with multiple solid vias
V _{CC1}	16	—	5-V supply for internal logic translation
V _{CC2}	8	—	Power VCC for drivers 4.5 V to 36 V

6 Specifications

6.1 Absolute Maximum Ratings

 over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

	MIN	MAX	UNIT
Supply voltage, V_{CC1} ⁽²⁾		36	V
Output supply voltage, V_{CC2}		36	V
Input voltage, V_I		7	V
Output voltage, V_O	-3	$V_{CC2} + 3$	V
Peak output current, I_O (nonrepetitive, $t \leq 5$ ms): L293	-2	2	A
Peak output current, I_O (nonrepetitive, $t \leq 100$ μ s): L293D	-1.2	1.2	A
Continuous output current, I_O : L293	-1	1	A
Continuous output current, I_O : L293D	-600	600	mA
Maximum junction temperature, T_J		150	°C
Storage temperature, T_{stg}	-65	150	°C

- (1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) All voltage values are with respect to the network ground terminal.

6.2 ESD Ratings

		VALUE	UNIT
$V_{(ESD)}$	Electrostatic discharge	Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	± 2000
		Charged-device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101 ⁽²⁾	± 1000
			V

- (1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.
- (2) JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	NOM	MAX	UNIT
Supply voltage	V_{CC1}	4.5		7	V
	V_{CC2}	V_{CC1}		36	
V_{IH}	High-level input voltage	$V_{CC1} \leq 7$ V		V_{CC1}	V
		$V_{CC1} \geq 7$ V	2.3	7	V
V_{IL}	Low-level output voltage	-0.3 ⁽¹⁾		1.5	V
T_A	Operating free-air temperature	0		70	°C

- (1) The algebraic convention, in which the least positive (most negative) designated minimum, is used in this data sheet for logic voltage levels.

6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾		L293, L293D	UNIT
		NE (PDIP)	
		16 PINS	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-ambient thermal resistance ⁽²⁾	36.4	°C/W
$R_{\theta JC(top)}$	Junction-to-case (top) thermal resistance	22.5	°C/W
$R_{\theta JB}$	Junction-to-board thermal resistance	16.5	°C/W
Ψ_{JT}	Junction-to-top characterization parameter	7.1	°C/W
Ψ_{JB}	Junction-to-board characterization parameter	16.3	°C/W

- (1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *Semiconductor and IC Package Thermal Metrics* application report, [SPRA953](#).
- (2) The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

6.5 Electrical Characteristics

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
V _{OH}	High-level output voltage	L293: I _{OH} = -1 A		V _{CC2} - 1.8	V _{CC2} - 1.4		V
		L293D: I _{OH} = -0.6 A					
V _{OL}	Low-level output voltage	L293: I _{OL} = 1 A			1.2	1.8	V
		L293D: I _{OL} = 0.6 A					
V _{OKH}	High-level output clamp voltage	L293D: I _{OK} = -0.6 A		V _{CC2} + 1.3			V
V _{OKL}	Low-level output clamp voltage	L293D: I _{OK} = 0.6 A		1.3			V
I _{IH}	High-level input current	A	V _I = 7 V	0.2		100	μA
		EN		0.2		10	
I _{IL}	Low-level input current	A	V _I = 0	-3		-10	μA
		EN		-2		-100	
I _{CC1}	Logic supply current	I _O = 0	All outputs at high level	13		22	mA
			All outputs at low level	35		60	
			All outputs at high impedance	8		24	
I _{CC2}	Output supply current	I _O = 0	All outputs at high level	14		24	mA
			All outputs at low level	2		6	
			All outputs at high impedance	2		4	

6.6 Switching Characteristics

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted) V_{CC1} = 5 V, V_{CC2} = 24 V, T_A = 25°C

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
t _{PLH}	Propagation delay time, low-to-high-level output from A input	L293NE, L293DNE		800			ns
		L293DWP, L293N L293DN		750			
t _{PHL}	Propagation delay time, high-to-low-level output from A input	L293NE, L293DNE		400			ns
		L293DWP, L293N L293DN		200			
t _{TLH}	Transition time, low-to-high-level output	L293NE, L293DNE		300			ns
		L293DWP, L293N L293DN		100			
t _{THL}	Transition time, high-to-low-level output	L293NE, L293DNE		300			ns
		L293DWP, L293N L293DN		350			

C_L = 30 pF, See Figure 2

6.7 Typical Characteristics

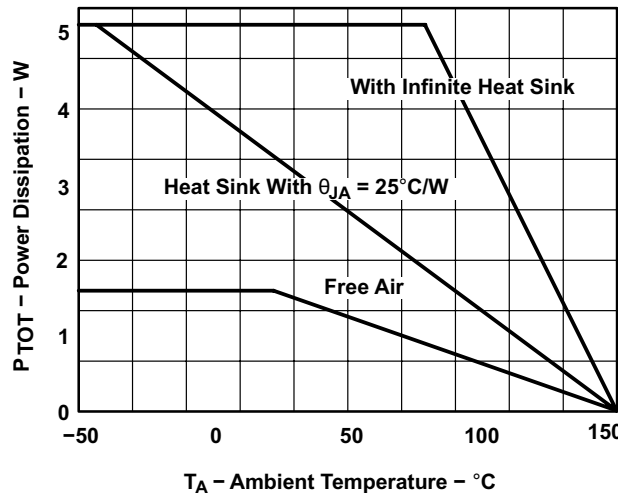
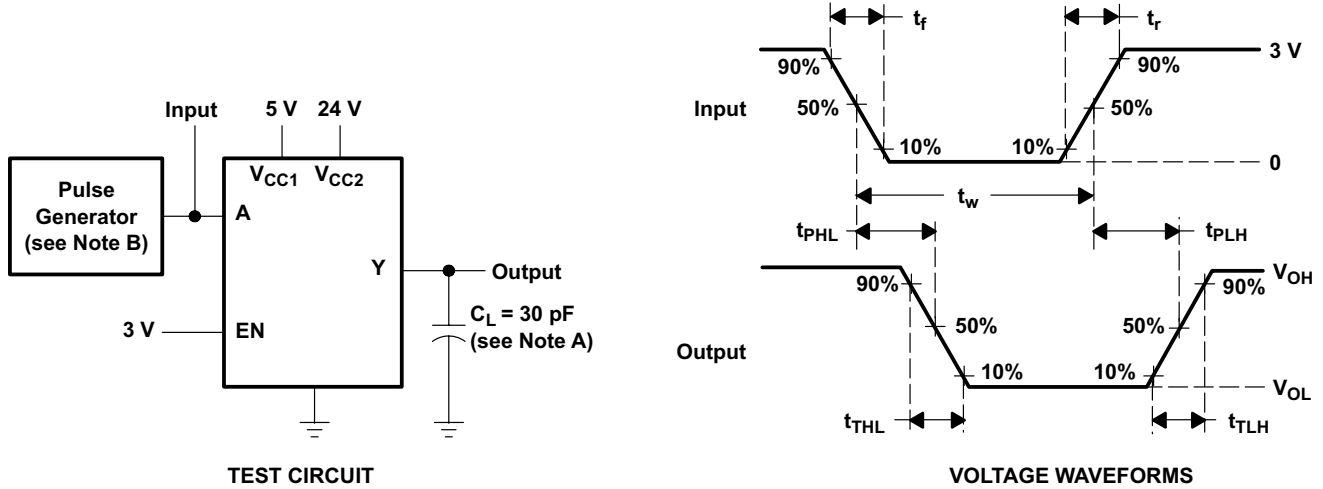


Figure 1. Maximum Power Dissipation vs Ambient Temperature

7 Parameter Measurement Information



NOTES: A. C_L includes probe and jig capacitance.

B. The pulse generator has the following characteristics: $t_r \leq 10$ ns, $t_f \leq 10$ ns, $t_w = 10$ μ s, PRR = 5 kHz, $Z_O = 50$ Ω .

Figure 2. Test Circuit and Voltage Waveforms

8 Detailed Description

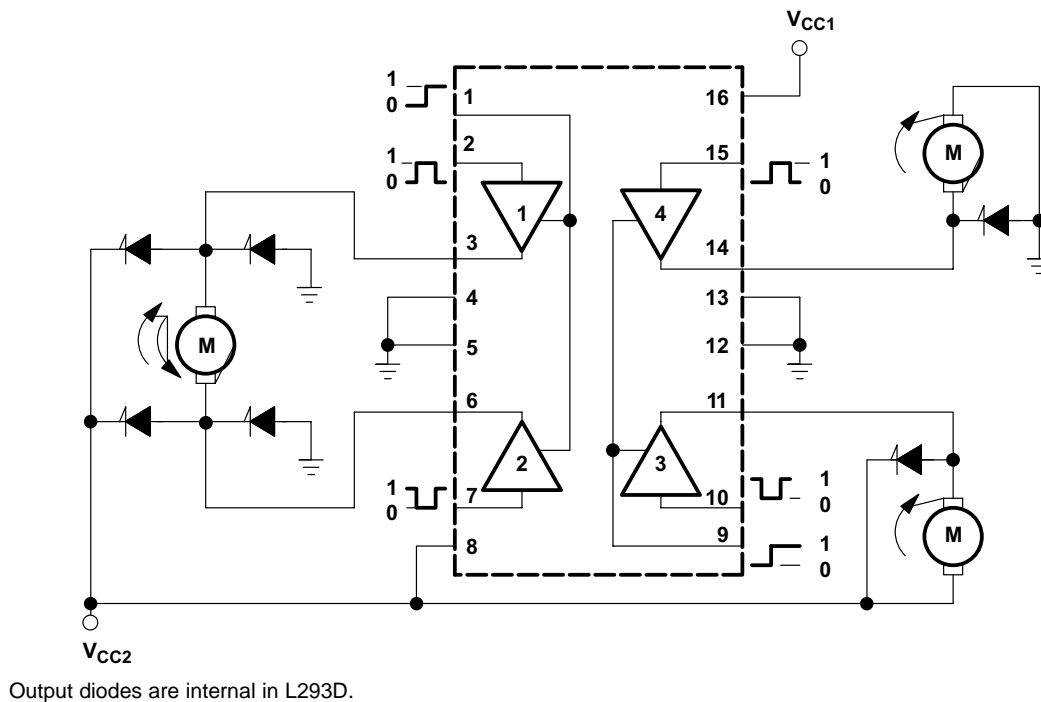
8.1 Overview

The L293 and L293D are quadruple high-current half-H drivers. These devices are designed to drive a wide array of inductive loads such as relays, solenoids, DC and bipolar stepping motors, as well as other high-current and high-voltage loads. All inputs are TTL compatible and tolerant up to 7 V.

Each output is a complete totem-pole drive circuit, with a Darlington transistor sink and a pseudo-Darlington source. Drivers are enabled in pairs, with drivers 1 and 2 enabled by 1,2EN and drivers 3 and 4 enabled by 3,4EN. When an enable input is high, the associated drivers are enabled, and their outputs are active and in phase with their inputs. When the enable input is low, those drivers are disabled, and their outputs are off and in the high-impedance state. With the proper data inputs, each pair of drivers forms a full-H (or bridge) reversible drive suitable for solenoid or motor applications.

On the L293, external high-speed output clamp diodes should be used for inductive transient suppression. On the L293D, these diodes are integrated to reduce system complexity and overall system size. A V_{CC1} terminal, separate from V_{CC2} , is provided for the logic inputs to minimize device power dissipation. The L293 and L293D are characterized for operation from 0°C to 70°C.

8.2 Functional Block Diagram



8.3 Feature Description

The L293x has TTL-compatible inputs and high voltage outputs for inductive load driving. Current outputs can get up to 2 A using the L293.

8.4 Device Functional Modes

Table 1 lists the functional modes of the L293x.

Table 1. Function Table (Each Driver)⁽¹⁾

INPUTS ⁽²⁾		OUTPUT (Y)
A	EN	
H	H	H
L	H	L
X	L	Z

- (1) H = high level, L = low level, X = irrelevant, Z = high impedance (off)
- (2) In the thermal shutdown mode, the output is in the high-impedance state, regardless of the input levels.

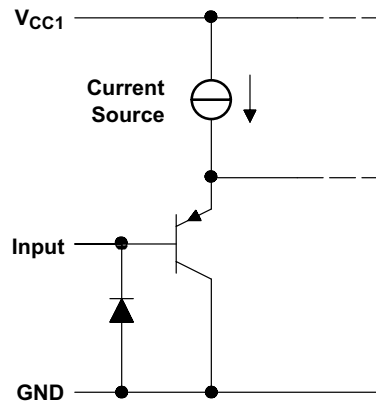


Figure 3. Schematic of Inputs for the L293x

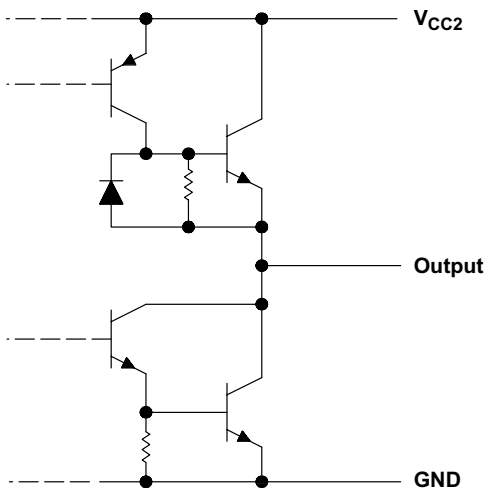


Figure 4. Schematic of Outputs for the L293

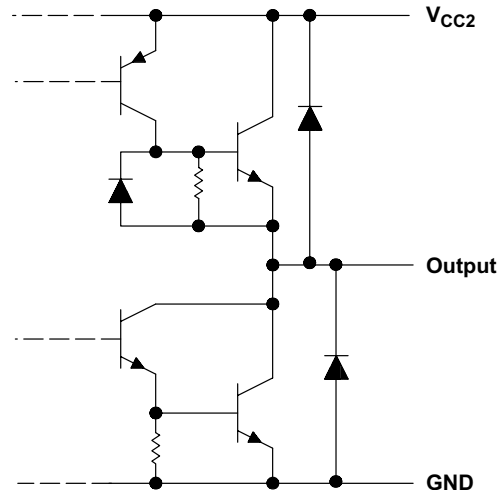


Figure 5. Schematic of Outputs for the L293D

9 Application and Implementation

NOTE

Information in the following applications sections is not part of the TI component specification, and TI does not warrant its accuracy or completeness. TI's customers are responsible for determining suitability of components for their purposes. Customers should validate and test their design implementation to confirm system functionality.

9.1 Application Information

A typical application for the L293 device is driving a two-phase motor. Below is an example schematic displaying how to properly connect a two-phase motor to the L293 device.

Provide a 5-V supply to V_{CC1} and valid logic input levels to data and enable inputs. V_{CC2} must be connected to a power supply capable of supplying the needed current and voltage demand for the loads connected to the outputs.

9.2 Typical Application

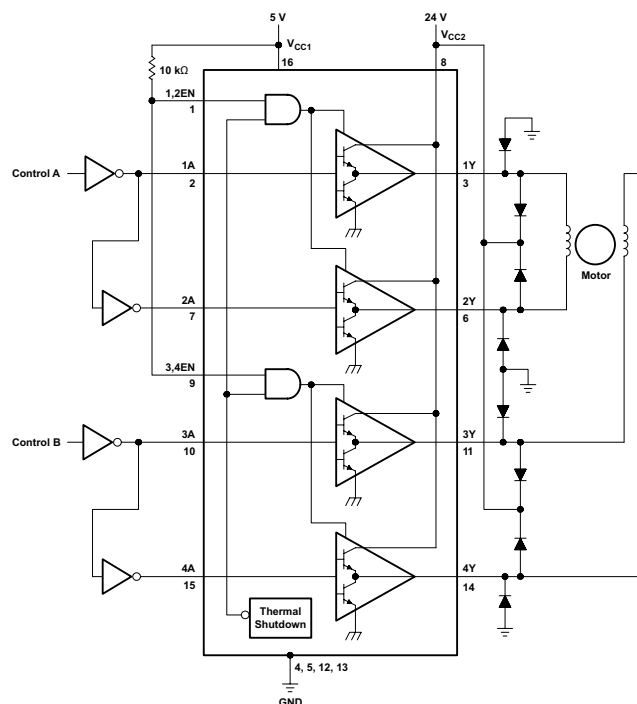


Figure 6. Two-Phase Motor Driver (L293)

9.2.1 Design Requirements

The design techniques in the application above as well as the applications below should fall within the following design requirements.

1. V_{CC1} should fall within the limits described in the [Recommended Operating Conditions](#).
2. V_{CC2} should fall within the limits described in the [Recommended Operating Conditions](#).
3. The current per channel should not exceed 1 A for the L293 (600mA for the L293D).

9.2.2 Detailed Design Procedure

When designing with the L293 or L293D, careful consideration should be made to ensure the device does not exceed the operating temperature of the device. Proper heatsinking will allow for operation over a larger range of current per channel. Refer to the [Power Supply Recommendations](#) as well as the [Layout Example](#).

Typical Application (continued)

9.2.3 Application Curve

Refer to [Power Supply Recommendations](#) for additional information with regards to appropriate power dissipation. [Figure 7](#) describes thermal dissipation based on [Figure 14](#).

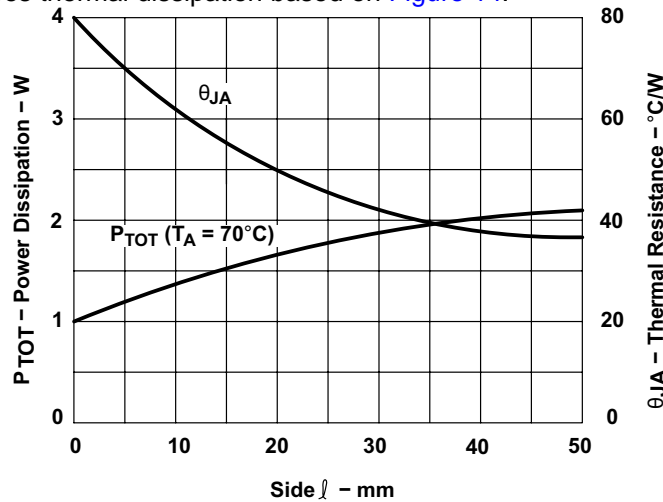


Figure 7. Maximum Power and Junction vs Thermal Resistance

9.3 System Examples

9.3.1 L293D as a Two-Phase Motor Driver

[Figure 8](#) below depicts a typical setup for using the L293D as a two-phase motor driver. Refer to the [Recommended Operating Conditions](#) when considering the appropriate input high and input low voltage levels to enable each channel of the device.

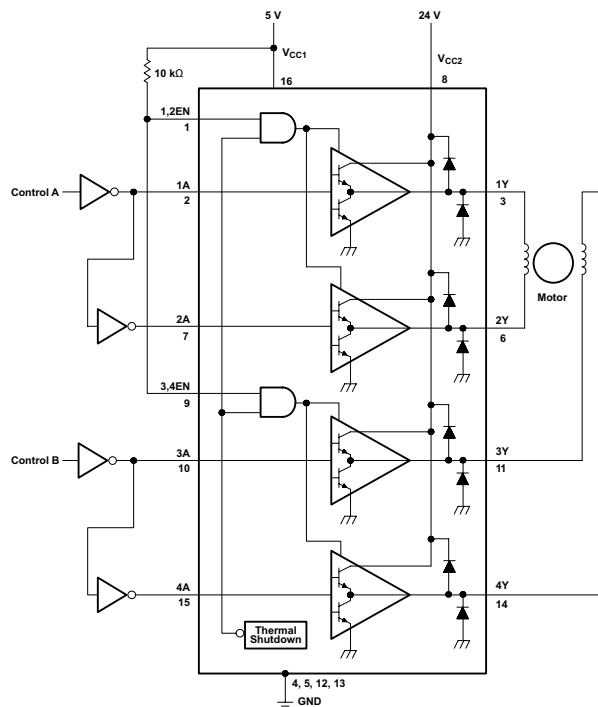
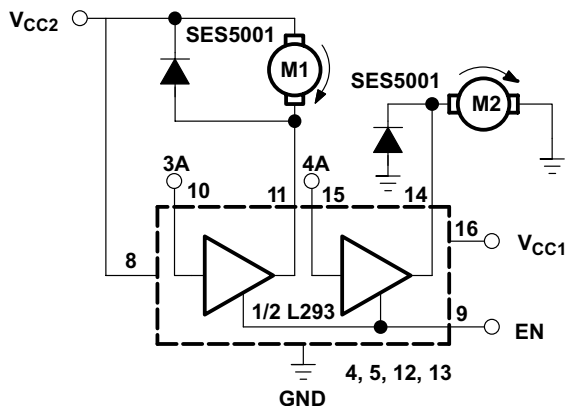


Figure 8. Two-Phase Motor Driver (L293D)

System Examples (continued)

9.3.2 DC Motor Controls

Figure 9 and Figure 10 below depict a typical setup for using the L293 device as a controller for DC motors. Note that the L293 device can be used as a simple driver for a motor to turn on and off in one direction, and can also be used to drive a motor in both directions. Refer to the function tables below to understand unidirectional vs bidirectional motor control. Refer to the *Recommended Operating Conditions* when considering the appropriate input high and input low voltage levels to enable each channel of the device.



Connections to ground and to supply voltage

Figure 9. DC Motor Controls

Table 2. Unidirectional DC Motor Control

EN	3A	M1 ⁽¹⁾	4A	M2
H	H	Fast motor stop	H	Run
H	L	run	L	Fast motor stop
L	X	Free-running motor stop	X	Free-running motor stop

(1) L = low, H = high, X = don't care

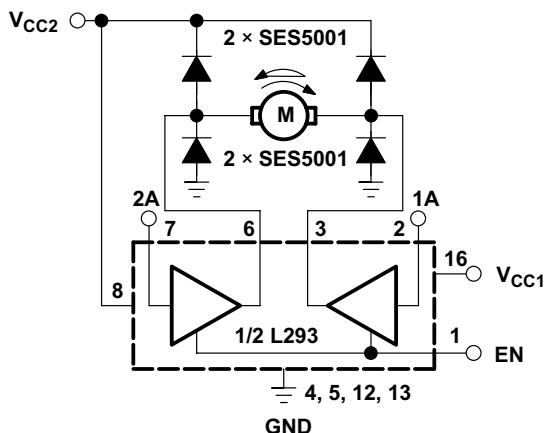


Figure 10. Bidirectional DC Motor Control

Table 3. Bidirectional DC Motor Control

EN	1A	2A	FUNCTION ⁽¹⁾
H	L	H	Turn right
H	H	L	Turn left

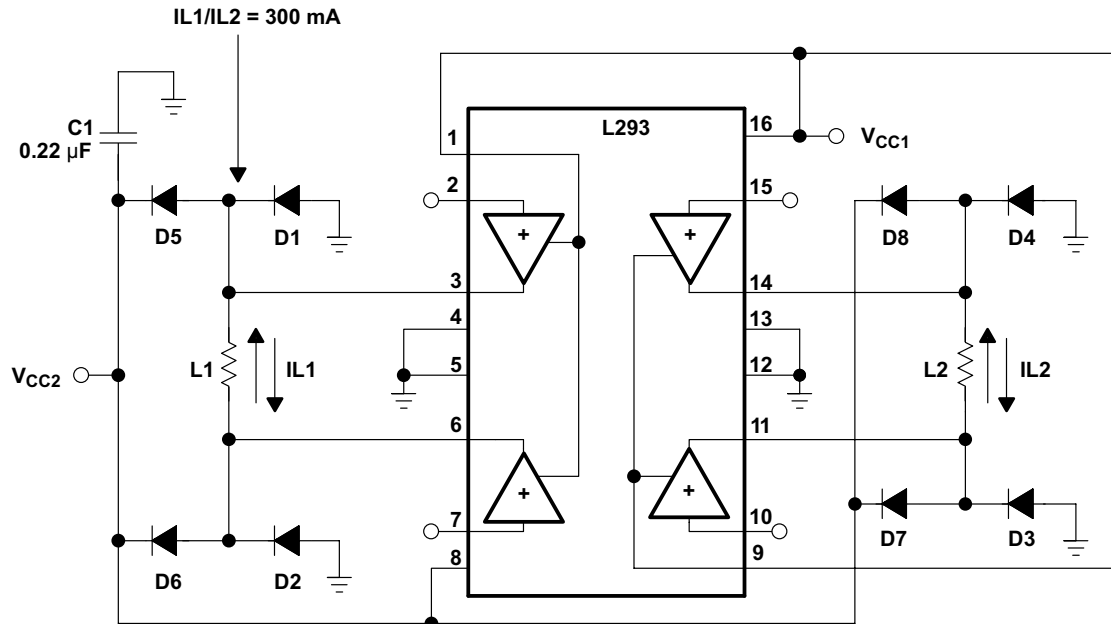
(1) L = low, H = high, X = don't care

Table 3. Bidirectional DC Motor Control (continued)

EN	1A	2A	FUNCTION ⁽¹⁾
H	L	L	Fast motor stop
H	H	H	Fast motor stop
L	X	X	Free-running motor stop

9.3.3 Bipolar Stepping-Motor Control

Figure 11 below depicts a typical setup for using the L293D as a two-phase motor driver. Refer to the [Recommended Operating Conditions](#) when considering the appropriate input high and input low voltage levels to enable each channel of the device.



D1–D8 = SES5001

Figure 11. Bipolar Stepping-Motor Control

10 Power Supply Recommendations

V_{CC1} is $5\text{ V} \pm 0.5\text{ V}$ and V_{CC2} can be same supply as V_{CC1} or a higher voltage supply with peak voltage up to 36 V. Bypass capacitors of 0.1 μF or greater should be used at V_{CC1} and V_{CC2} pins. There are no power up or power down supply sequence order requirements.

Properly heatsinking the L293 when driving high-current is critical to design. The $R_{thj-amp}$ of the L293 can be reduced by soldering the GND pins to a suitable copper area of the printed circuit board or to an external heat sink.

Figure 14 shows the maximum package power $PTOT$ and the θ_{JA} as a function of the side of two equal square copper areas having a thickness of 35 μm (see Figure 14). In addition, an external heat sink can be used (see Figure 12).

During soldering, the pin temperature must not exceed 260°C, and the soldering time must not exceed 12 seconds.

The external heatsink or printed circuit copper area must be connected to electrical ground.

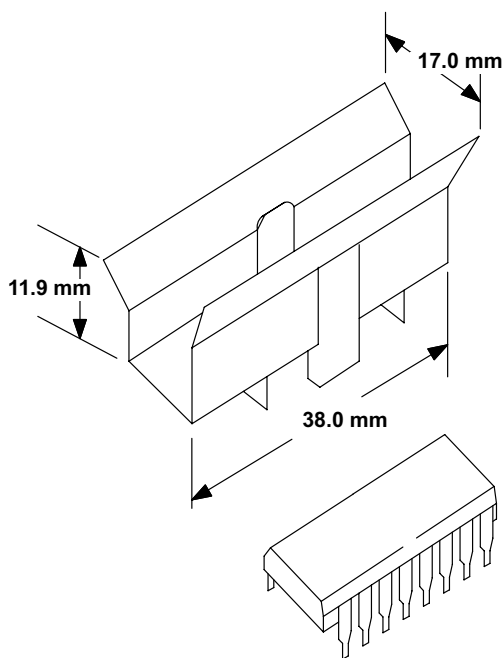


Figure 12. External Heat Sink Mounting Example ($\theta_{JA} = 25^\circ\text{C/W}$)

11 Layout

11.1 Layout Guidelines

Place the device near the load to keep output traces short to reduce EMI. Use solid vias to transfer heat from ground pins to ground plane of the printed-circuit-board.

11.2 Layout Example

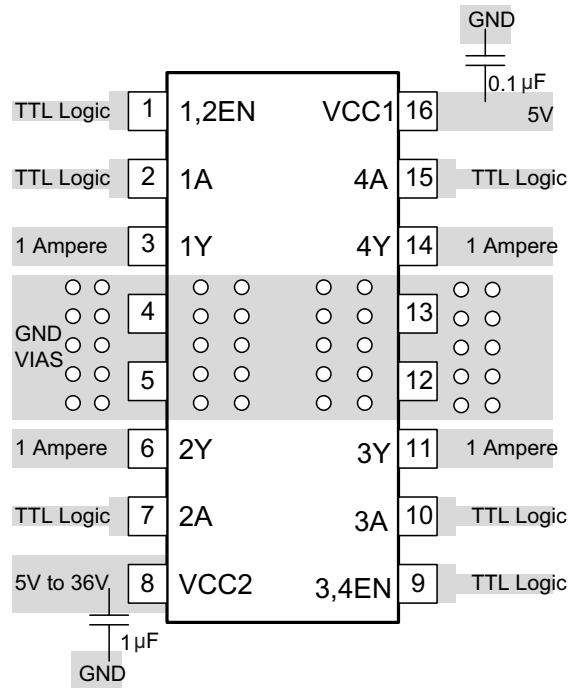


Figure 13. Layout Diagram

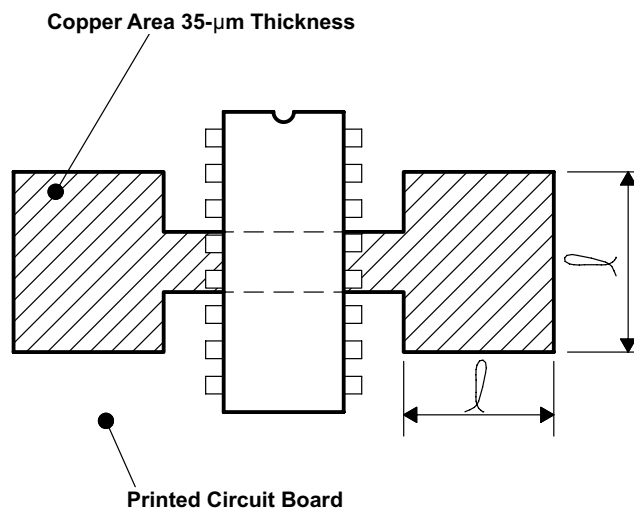


Figure 14. Example of Printed-Circuit-Board Copper Area (Used as Heat Sink)

12 Device and Documentation Support

12.1 Related Links

The table below lists quick access links. Categories include technical documents, support and community resources, tools and software, and quick access to sample or buy.

Table 4. Related Links

PARTS	PRODUCT FOLDER	SAMPLE & BUY	TECHNICAL DOCUMENTS	TOOLS & SOFTWARE	SUPPORT & COMMUNITY
L293	Click here	Click here	Click here	Click here	Click here
L293D	Click here	Click here	Click here	Click here	Click here

12.2 Community Resources

The following links connect to TI community resources. Linked contents are provided "AS IS" by the respective contributors. They do not constitute TI specifications and do not necessarily reflect TI's views; see TI's [Terms of Use](#).

TI E2E™ Online Community *TI's Engineer-to-Engineer (E2E) Community*. Created to foster collaboration among engineers. At e2e.ti.com, you can ask questions, share knowledge, explore ideas and help solve problems with fellow engineers.

Design Support *TI's Design Support* Quickly find helpful E2E forums along with design support tools and contact information for technical support.

12.3 Trademarks

E2E is a trademark of Texas Instruments.
All other trademarks are the property of their respective owners.

12.4 Electrostatic Discharge Caution



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

12.5 Glossary

SLYZ022 — *TI Glossary*.

This glossary lists and explains terms, acronyms, and definitions.

13 Mechanical, Packaging, and Orderable Information

The following pages include mechanical, packaging, and orderable information. This information is the most current data available for the designated devices. This data is subject to change without notice and revision of this document. For browser-based versions of this data sheet, refer to the left-hand navigation.

PACKAGING INFORMATION

Orderable Device	Status (1)	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan (2)	Lead finish/ Ball material (6)	MSL Peak Temp (3)	Op Temp (°C)	Device Marking (4/5)	Samples
L293DNE	ACTIVE	PDIP	NE	16	25	RoHS & Green	NIPDAU	N / A for Pkg Type	0 to 70	L293DNE	Samples
L293DNEE4	ACTIVE	PDIP	NE	16	25	RoHS & Green	NIPDAU	N / A for Pkg Type	0 to 70	L293DNE	Samples
L293NE	ACTIVE	PDIP	NE	16	25	RoHS & Green	NIPDAU	N / A for Pkg Type	0 to 70	L293NE	Samples
L293NEE4	ACTIVE	PDIP	NE	16	25	RoHS & Green	NIPDAU	N / A for Pkg Type	0 to 70	L293NE	Samples

(1) The marketing status values are defined as follows:

ACTIVE: Product device recommended for new designs.

LIFEBUY: TI has announced that the device will be discontinued, and a lifetime-buy period is in effect.

NRND: Not recommended for new designs. Device is in production to support existing customers, but TI does not recommend using this part in a new design.

PREVIEW: Device has been announced but is not in production. Samples may or may not be available.

OBSOLETE: TI has discontinued the production of the device.

(2) **RoHS:** TI defines "RoHS" to mean semiconductor products that are compliant with the current EU RoHS requirements for all 10 RoHS substances, including the requirement that RoHS substance do not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, "RoHS" products are suitable for use in specified lead-free processes. TI may reference these types of products as "Pb-Free".

RoHS Exempt: TI defines "RoHS Exempt" to mean products that contain lead but are compliant with EU RoHS pursuant to a specific EU RoHS exemption.

Green: TI defines "Green" to mean the content of Chlorine (Cl) and Bromine (Br) based flame retardants meet JS709B low halogen requirements of <=1000ppm threshold. Antimony trioxide based flame retardants must also meet the <=1000ppm threshold requirement.

(3) MSL, Peak Temp. - The Moisture Sensitivity Level rating according to the JEDEC industry standard classifications, and peak solder temperature.

(4) There may be additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category on the device.

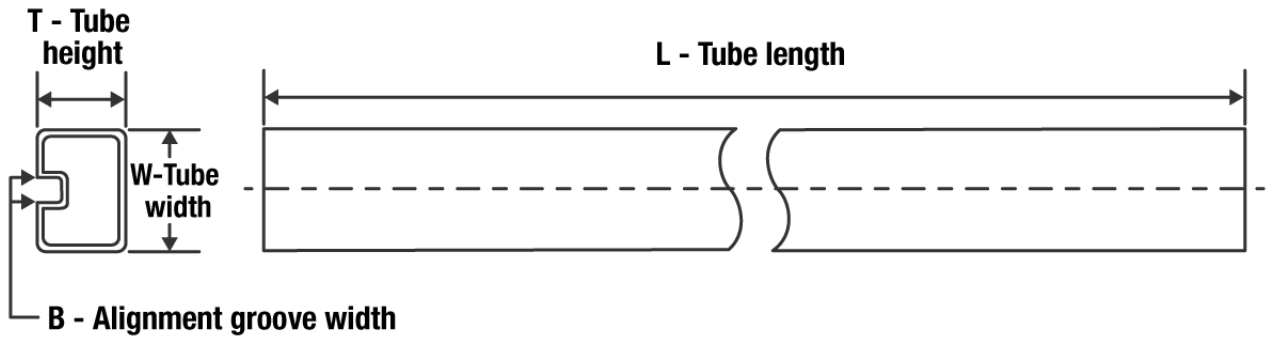
(5) Multiple Device Markings will be inside parentheses. Only one Device Marking contained in parentheses and separated by a "-" will appear on a device. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire Device Marking for that device.

(6) Lead finish/Ball material - Orderable Devices may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead finish/Ball material values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

Important Information and Disclaimer:The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and

continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

TUBE


*All dimensions are nominal

Device	Package Name	Package Type	Pins	SPQ	L (mm)	W (mm)	T (μm)	B (mm)
L293DNE	NE	PDIP	16	25	506	13.97	11230	4.32
L293DNEE4	NE	PDIP	16	25	506	13.97	11230	4.32
L293NE	NE	PDIP	16	25	506	13.97	11230	4.32
L293NEE4	NE	PDIP	16	25	506	13.97	11230	4.32

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on ti.com or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2022, Texas Instruments Incorporated

Anexo III

2N3055(NPN), MJ2955(PNP)

Preferred Device

Complementary Silicon Power Transistors

Complementary silicon power transistors are designed for general-purpose switching and amplifier applications.

Features

- DC Current Gain – $h_{FE} = 20-70 @ I_C = 4 \text{ Adc}$
- Collector–Emitter Saturation Voltage – $V_{CE(sat)} = 1.1 \text{ Vdc (Max) @ } I_C = 4 \text{ Adc}$
- Excellent Safe Operating Area
- Pb–Free Packages are Available*

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector–Emitter Voltage	V_{CEO}	60	Vdc
Collector–Emitter Voltage	V_{CER}	70	Vdc
Collector–Base Voltage	V_{CB}	100	Vdc
Emitter–Base Voltage	V_{EB}	7	Vdc
Collector Current – Continuous	I_C	15	A dc
Base Current	I_B	7	A dc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate Above 25°C	P_D	115 0.657	W W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to +200	$^\circ\text{C}$

Maximum ratings are those values beyond which device damage can occur. Maximum ratings applied to the device are individual stress limit values (not normal operating conditions) and are not valid simultaneously. If these limits are exceeded, device functional operation is not implied, damage may occur and reliability may be affected.

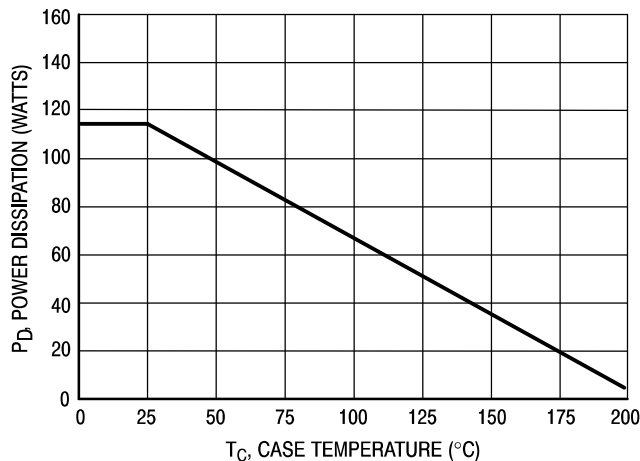


Figure 1. Power Derating

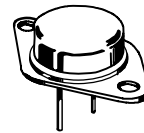
*For additional information on our Pb–Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

**15 AMPERE
POWER TRANSISTORS
COMPLEMENTARY SILICON
60 VOLTS, 115 WATTS**



TO-204AA (TO-3)
CASE 1-07
STYLE 1

MARKING DIAGRAM



xxxx55 = Device Code
 xxxx = 2N30 or MJ20
 G = Pb–Free Package
 A = Location Code
 YY = Year
 WW = Work Week
 MEX = Country of Origin

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
2N3055	TO-204AA	100 Units / Tray
2N3055G	TO-204AA (Pb–Free)	100 Units / Tray
MJ2955	TO-204AA	100 Units / Tray
MJ2955G	TO-204AA (Pb–Free)	100 Units / Tray

Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.

2N3055(NPN), MJ2955(PNP)

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	1.52	$^{\circ}\text{C/W}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
----------------	--------	-----	-----	------

OFF CHARACTERISTICS*

Collector-Emitter Sustaining Voltage (Note 1) ($I_C = 200\text{ mA dc}$, $I_B = 0$)	$V_{CEO(sus)}$	60	-	Vdc
Collector-Emitter Sustaining Voltage (Note 1) ($I_C = 200\text{ mA dc}$, $R_{BE} = 100\ \Omega$)	$V_{CER(sus)}$	70	-	Vdc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 30\text{ Vdc}$, $I_B = 0$)	I_{CEO}	-	0.7	mA dc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 100\text{ Vdc}$, $V_{BE(off)} = 1.5\text{ Vdc}$) ($V_{CE} = 100\text{ Vdc}$, $V_{BE(off)} = 1.5\text{ Vdc}$, $T_C = 150^{\circ}\text{C}$)	I_{CEX}	-	1.0 5.0	mA dc
Emitter Cutoff Current ($V_{BE} = 7.0\text{ Vdc}$, $I_C = 0$)	I_{EBO}	-	5.0	mA dc

ON CHARACTERISTICS* (Note 1)

DC Current Gain ($I_C = 4.0\text{ A dc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$) ($I_C = 10\text{ A dc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$)	h_{FE}	20 5.0	70 -	-
Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_C = 4.0\text{ A dc}$, $I_B = 400\text{ mA dc}$) ($I_C = 10\text{ A dc}$, $I_B = 3.3\text{ A dc}$)	$V_{CE(sat)}$	-	1.1 3.0	Vdc
Base-Emitter On Voltage ($I_C = 4.0\text{ A dc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$)	$V_{BE(on)}$	-	1.5	Vdc

SECOND BREAKDOWN

Second Breakdown Collector Current with Base Forward Biased ($V_{CE} = 40\text{ Vdc}$, $t = 1.0\text{ s}$, Nonrepetitive)	$I_{s/b}$	2.87	-	A dc
---	-----------	------	---	------

DYNAMIC CHARACTERISTICS

Current Gain - Bandwidth Product ($I_C = 0.5\text{ A dc}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ MHz}$)	f_T	2.5	-	MHz
*Small-Signal Current Gain ($I_C = 1.0\text{ A dc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	h_{fe}	15	120	-
*Small-Signal Current Gain Cutoff Frequency ($V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$, $I_C = 1.0\text{ A dc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	f_{hfe}	10	-	kHz

*Indicates Within JEDEC Registration. (2N3055)

1. Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\ \mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2.0\%$.

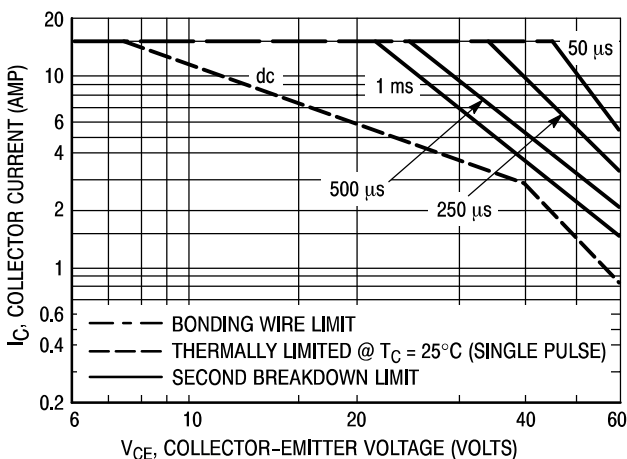


Figure 2. Active Region Safe Operating Area

There are two limitations on the power handling ability of a transistor: average junction temperature and second breakdown. Safe operating area curves indicate $I_C - V_{CE}$ limits of the transistor that must be observed for reliable operation; i.e., the transistor must not be subjected to greater dissipation than the curves indicate.

The data of Figure 2 is based on $T_C = 25^{\circ}\text{C}$; $T_{J(pk)}$ is variable depending on power level. Second breakdown pulse limits are valid for duty cycles to 10% but must be derated for temperature according to Figure 1.

2N3055(NPN), MJ2955(PNP)

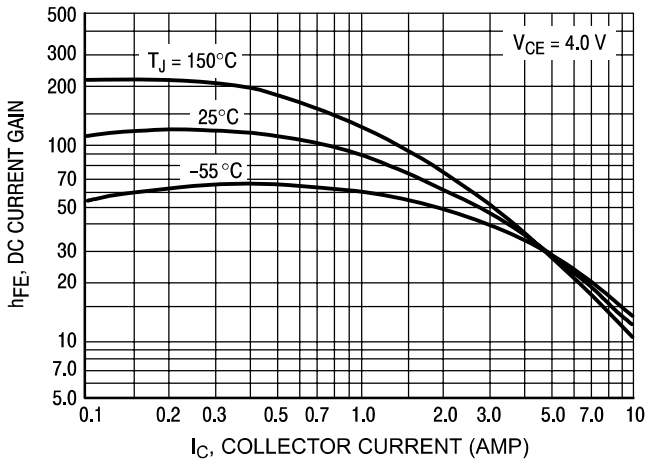


Figure 3. DC Current Gain, 2N3055 (NPN)

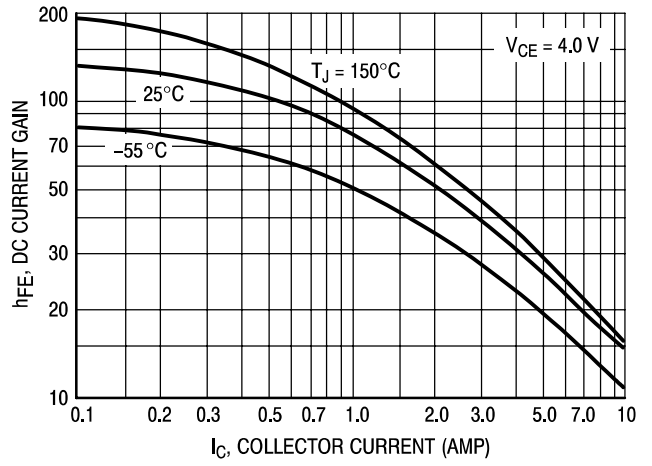


Figure 4. DC Current Gain, MJ2955 (PNP)

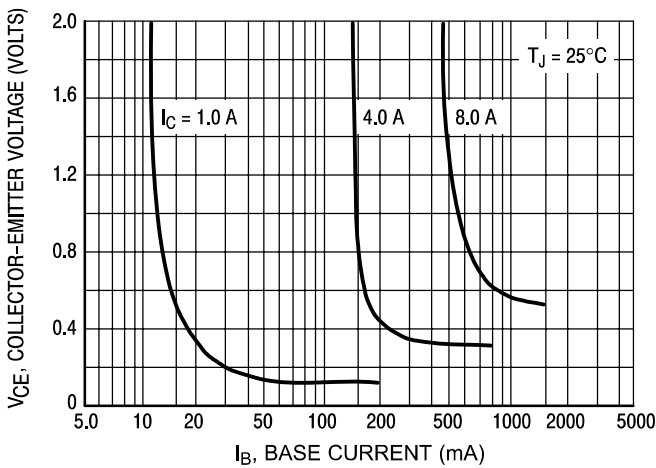


Figure 5. Collector Saturation Region, 2N3055 (NPN)

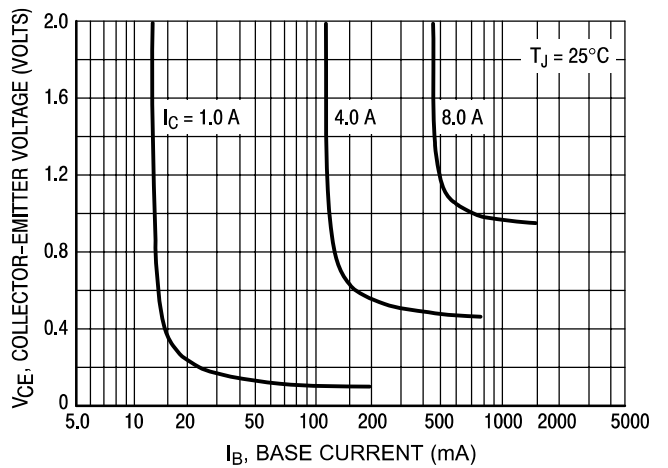


Figure 6. Collector Saturation Region, MJ2955 (PNP)

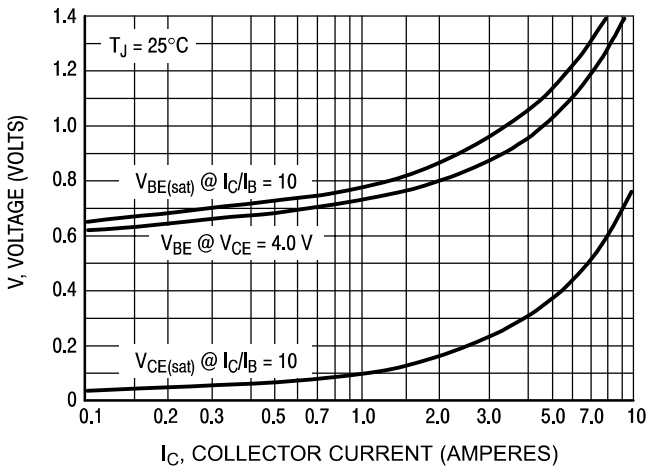


Figure 7. "On" Voltages, 2N3055 (NPN)

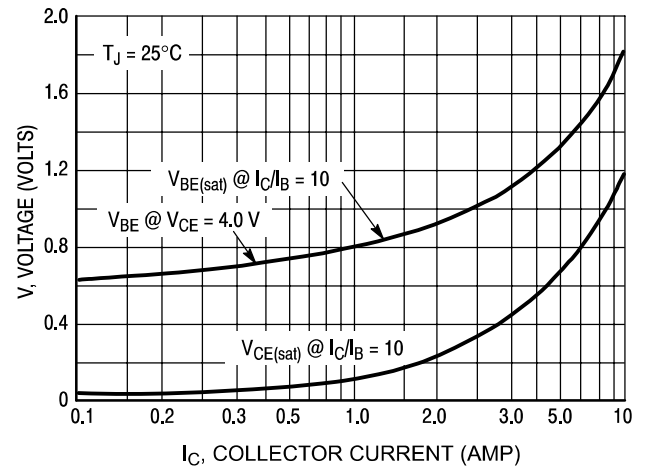
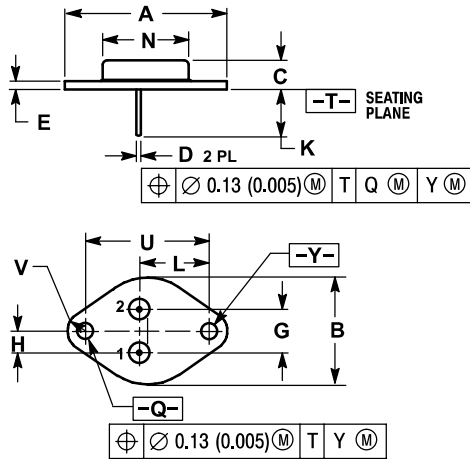


Figure 8. "On" Voltages, MJ2955 (PNP)

2N3055(NPN), MJ2955(PNP)

PACKAGE DIMENSIONS

TO-204 (TO-3)
CASE 1-07
ISSUE Z




NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. ALL RULES AND NOTES ASSOCIATED WITH REFERENCED TO-204AA OUTLINE SHALL APPLY.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.550 REF		39.37 REF	
B	---	1.050	---	26.67
C	0.250	0.335	6.35	8.51
D	0.038	0.043	0.97	1.09
E	0.055	0.070	1.40	1.77
G	0.430 BSC		10.92 BSC	
H	0.215 BSC		5.46 BSC	
K	0.440	0.480	11.18	12.19
L	0.665 BSC		16.89 BSC	
N	---	0.830	---	21.08
Q	0.151	0.165	3.84	4.19
U	1.187 BSC		30.15 BSC	
V	0.131	0.188	3.33	4.77

STYLE 1:

- PIN 1: BASE
 - EMITTER
- CASE: COLLECTOR

ON Semiconductor and  are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:

Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 61312, Phoenix, Arizona 85082-1312 USA
Phone: 480-829-7710 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 480-829-7709 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free
USA/Canada

Japan: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center
2-9-1 Kamimeguro, Meguro-ku, Tokyo, Japan 153-0051
Phone: 81-3-5773-3850

ON Semiconductor Website: <http://onsemi.com>

Order Literature: <http://www.onsemi.com/litorder>

For additional information, please contact your local Sales Representative.

2N3055/D

Anexo IV

D44VH10 (NPN), D45VH10 (PNP)

Complementary Silicon Power Transistors

These complementary silicon power transistors are designed for high-speed switching applications, such as switching regulators and high frequency inverters. The devices are also well-suited for drivers for high power switching circuits.

Features

- Fast Switching
- Key Parameters Specified @ 100°C
- Low Collector–Emitter Saturation Voltage
- Complementary Pairs Simplify Circuit Designs
- These Devices are Pb–Free and are RoHS Compliant*

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector–Emitter Voltage	V_{CEO}	80	Vdc
Collector–Emitter Voltage	V_{CEV}	100	Vdc
Emitter Base Voltage	V_{EB}	7.0	Vdc
Collector Current – Continuous	I_C	15	Adc
Collector Current – Peak (Note 1)	I_{CM}	20	Adc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	83 0.67	W W/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	–55 to 150	°C

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

1. Pulse Width ≤ 6.0 ms, Duty Cycle $\leq 50\%$.

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	1.5	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	62.5	°C/W
Maximum Lead Temperature for Soldering Purposes: 1/8" from Case for 5 Seconds	T_L	275	°C

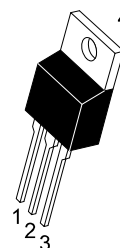
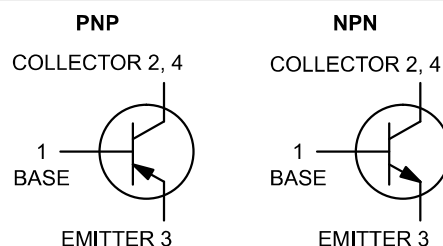
*For additional information on our Pb–Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.



ON Semiconductor®

www.onsemi.com

15 A COMPLEMENTARY SILICON POWER TRANSISTORS 80 V, 83 W



TO-220
CASE 221A
STYLE 1

MARKING DIAGRAM



x = 4 or 5
A = Assembly Location
Y = Year
WW = Work Week
G = Pb–Free Package

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
D44VH10G	TO-220 (Pb–Free)	50 Units/Rail
D45VH10G	TO-220 (Pb–Free)	50 Units/Rail

D44VH10 (NPN), D45VH10 (PNP)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Collector–Emitter Sustaining Voltage (Note 2) ($I_C = 25\text{ mAdc}$, $I_B = 0$)	$V_{CEO(sus)}$	80	–	–	Vdc
Collector–Emitter Cutoff Current ($V_{CE} = \text{Rated } V_{CEV}$, $V_{BE(off)} = 4.0\text{ Vdc}$) ($V_{CE} = \text{Rated } V_{CEV}$, $V_{BE(off)} = 4.0\text{ Vdc}$, $T_C = 100^\circ\text{C}$)	I_{CEV}	–	–	10 100	μAdc
Emitter Base Cutoff Current ($V_{EB} = 7.0\text{ Vdc}$, $I_C = 0$)	I_{EBO}	–	–	10	μAdc

ON CHARACTERISTICS (Note 2)

DC Current Gain ($I_C = 2.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 1.0\text{ Vdc}$) ($I_C = 4.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 1.0\text{ Vdc}$)	h_{FE}	35 20	– –	– –	–
Collector–Emitter Saturation Voltage ($I_C = 8.0\text{ Adc}$, $I_B = 0.4\text{ Adc}$) D44VH10 ($I_C = 8.0\text{ Adc}$, $I_B = 0.8\text{ Adc}$) D45VH10 ($I_C = 15\text{ Adc}$, $I_B = 3.0\text{ Adc}$, $T_C = 100^\circ\text{C}$) D44VH10 D45VH10	$V_{CE(sat)}$	– – – –	– – – –	0.4 1.0 0.8 1.5	Vdc
Base–Emitter Saturation Voltage ($I_C = 8.0\text{ Adc}$, $I_B = 0.4\text{ Adc}$) D44VH10 ($I_C = 8.0\text{ Adc}$, $I_B = 0.8\text{ Adc}$) D45VH10 ($I_C = 8.0\text{ Adc}$, $I_B = 0.4\text{ Adc}$, $T_C = 100^\circ\text{C}$) D44VH10 ($I_C = 8.0\text{ Adc}$, $I_B = 0.8\text{ Adc}$, $T_C = 100^\circ\text{C}$) D45VH10	$V_{BE(sat)}$	– – – –	– – – –	1.2 1.0 1.1 1.5	Vdc

DYNAMIC CHARACTERISTICS

Current Gain Bandwidth Product ($I_C = 0.1\text{ Adc}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 20\text{ MHz}$)	f_T	–	50	–	MHz
Output Capacitance ($V_{CB} = 10\text{ Vdc}$, $I_C = 0$, $f_{test} = 1.0\text{ MHz}$) D44VH10 D45VH10	C_{ob}	– –	120 275	– –	pF

SWITCHING CHARACTERISTICS

Delay Time	$(V_{CC} = 20\text{ Vdc}$, $I_C = 8.0\text{ Adc}$, $I_{B1} = I_{B2} = 0.8\text{ Adc}$)	t_d	–	–	50	ns
Rise Time		t_r	–	–	250	
Storage Time		t_s	–	–	700	
Fall Time		t_f	–	–	90	

Product parametric performance is indicated in the Electrical Characteristics for the listed test conditions, unless otherwise noted. Product performance may not be indicated by the Electrical Characteristics if operated under different conditions.

2. Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\ \mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2\%$.

D44VH10 (NPN), D45VH10 (PNP)

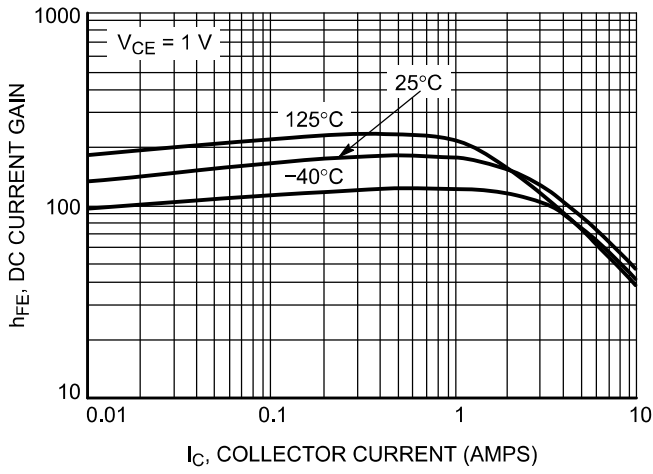


Figure 1. D44VH10 DC Current Gain

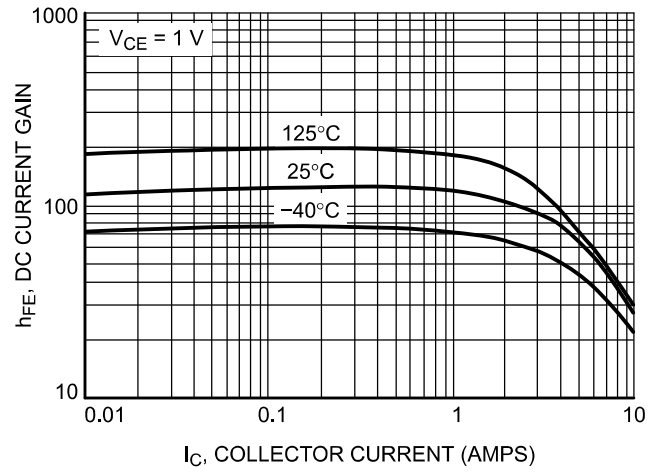


Figure 2. D45VH10 DC Current Gain

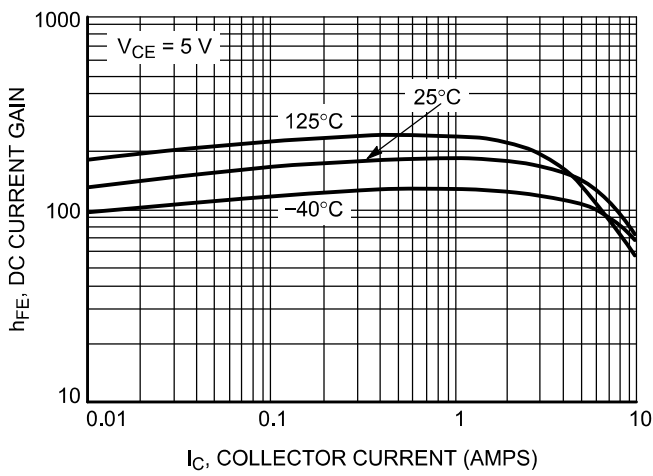


Figure 3. D44VH10 DC Current Gain

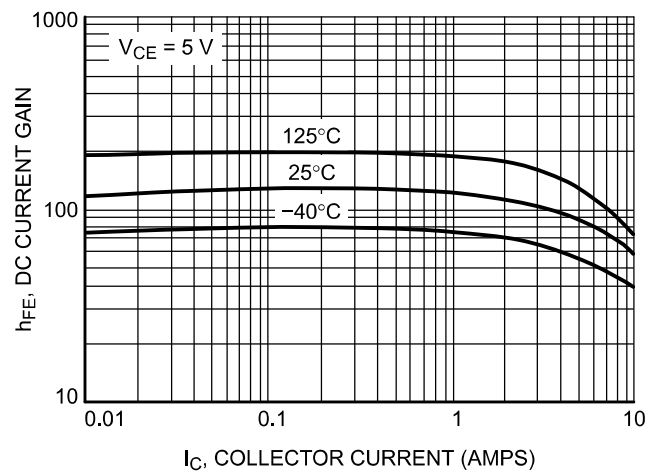


Figure 4. D45VH10 DC Current Gain

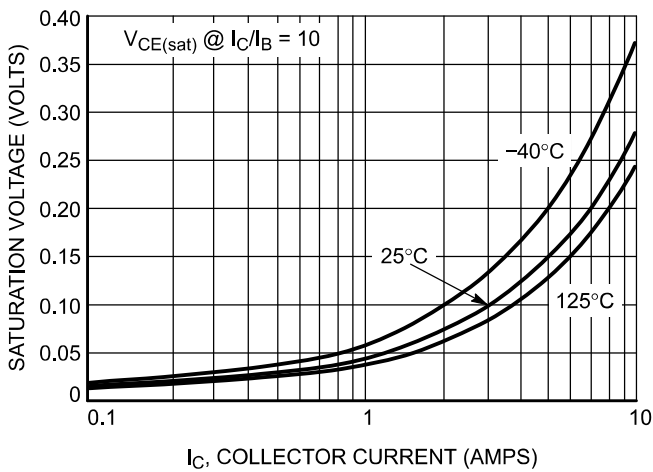


Figure 5. D44VH10 ON-Voltage

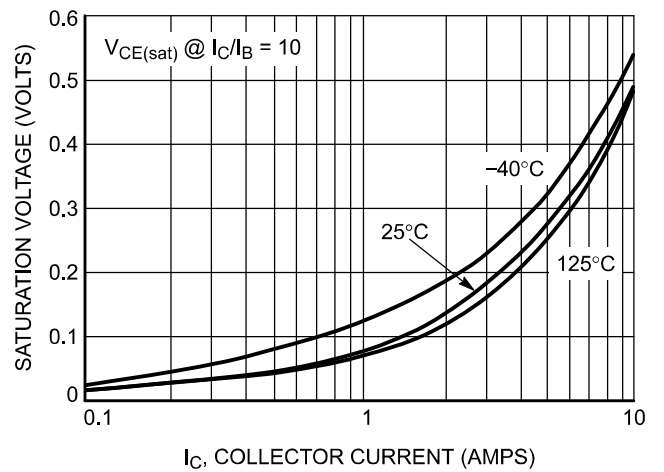


Figure 6. D45VH10 ON-Voltage

D44VH10 (NPN), D45VH10 (PNP)

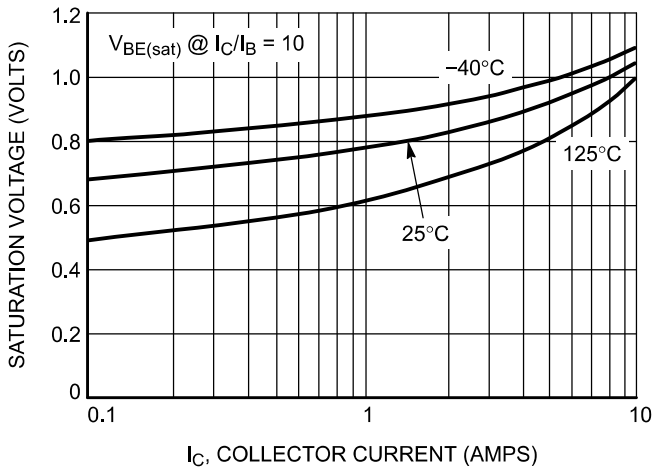


Figure 7. D44VH10 ON-Voltage

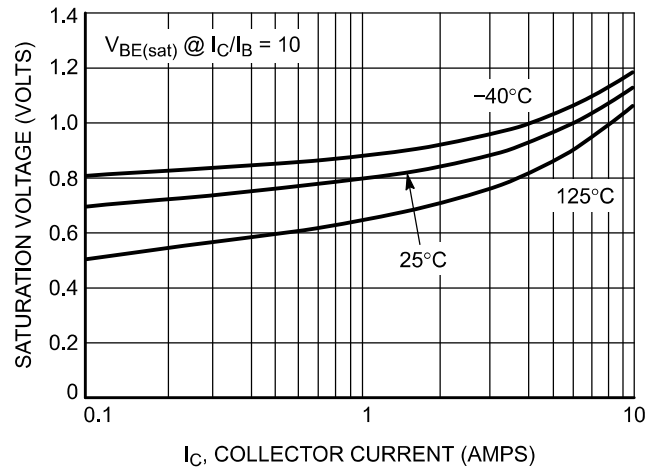


Figure 8. D45VH10 ON-Voltage

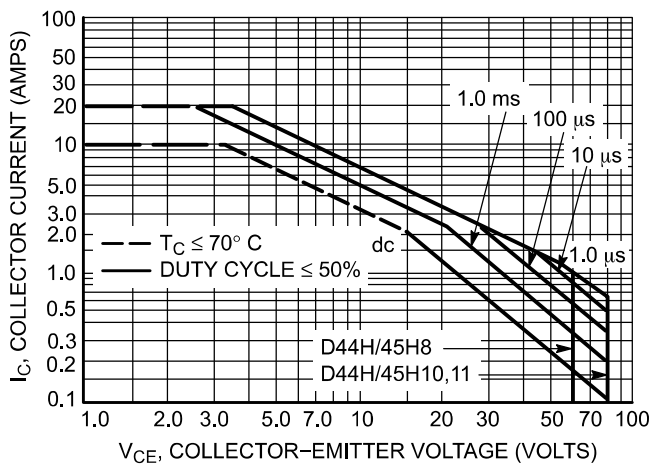


Figure 9. Maximum Rated Forward Bias Safe Operating Area

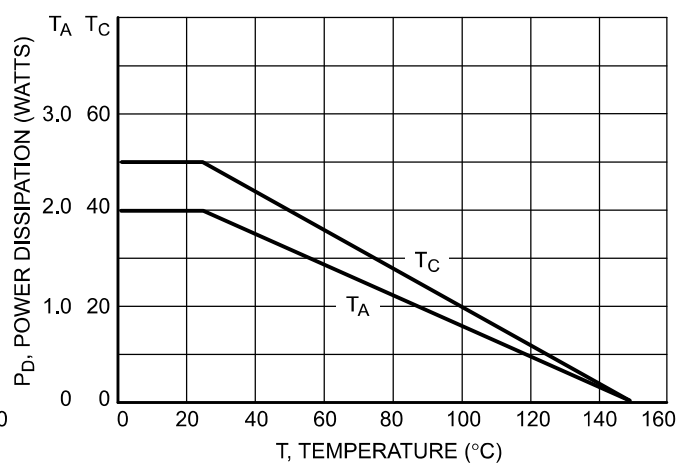


Figure 10. Power Derating

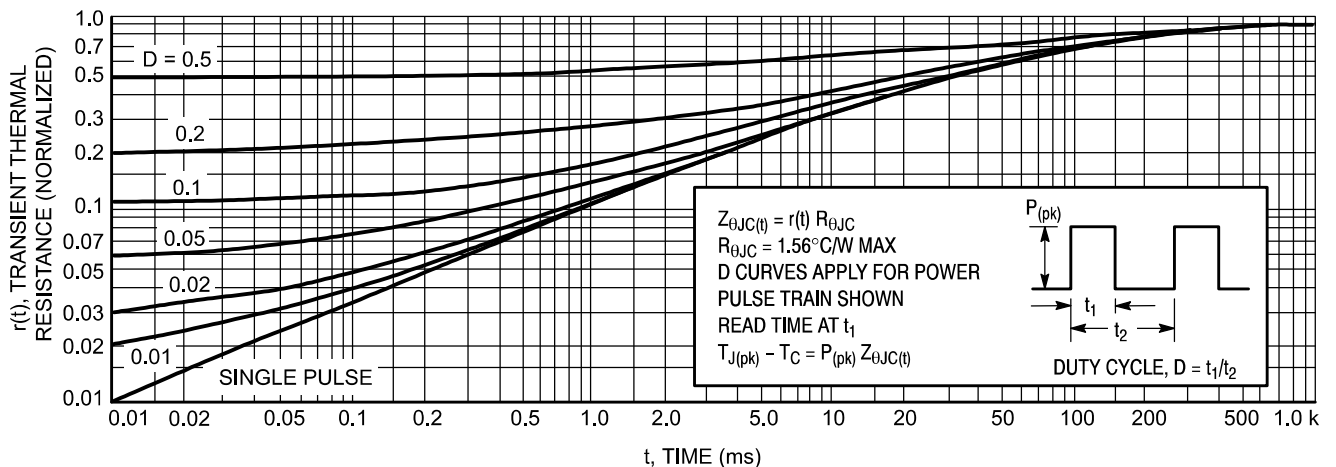
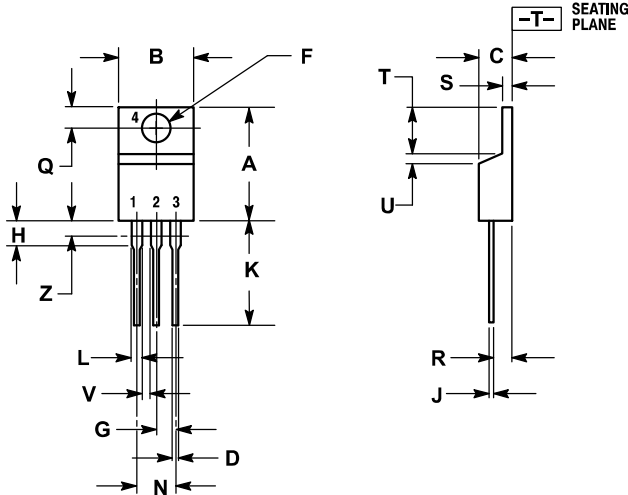


Figure 11. Thermal Response

D44VH10 (NPN), D45VH10 (PNP)

PACKAGE DIMENSIONS

TO-220
CASE 221A-09
ISSUE AH



NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION Z DEFINES A ZONE WHERE ALL BODY AND LEAD IRREGULARITIES ARE ALLOWED.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.570	0.620	14.48	15.75
B	0.380	0.415	9.66	10.53
C	0.160	0.190	4.07	4.83
D	0.025	0.038	0.64	0.96
F	0.142	0.161	3.61	4.09
G	0.095	0.105	2.42	2.66
H	0.110	0.161	2.80	4.10
J	0.014	0.024	0.36	0.61
K	0.500	0.562	12.70	14.27
L	0.045	0.060	1.15	1.52
N	0.190	0.210	4.83	5.33
Q	0.100	0.120	2.54	3.04
R	0.080	0.110	2.04	2.79
S	0.045	0.055	1.15	1.39
T	0.235	0.255	5.97	6.47
U	0.000	0.050	0.00	1.27
V	0.045	---	1.15	---
Z	---	0.080	---	2.04

STYLE 1:

- PIN 1. BASE
2. COLLECTOR
3. EMITTER
4. COLLECTOR

ON Semiconductor and the are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC) or its subsidiaries in the United States and/or other countries. SCILLC owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of SCILLC's product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:

Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free
USA/Canada

Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910

Japan Customer Focus Center
Phone: 81-3-5817-1050

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com

Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>

For additional information, please contact your local Sales Representative

D44VH/D

Mouser Electronics

Authorized Distributor

Click to View Pricing, Inventory, Delivery & Lifecycle Information:

[ON Semiconductor:](#)

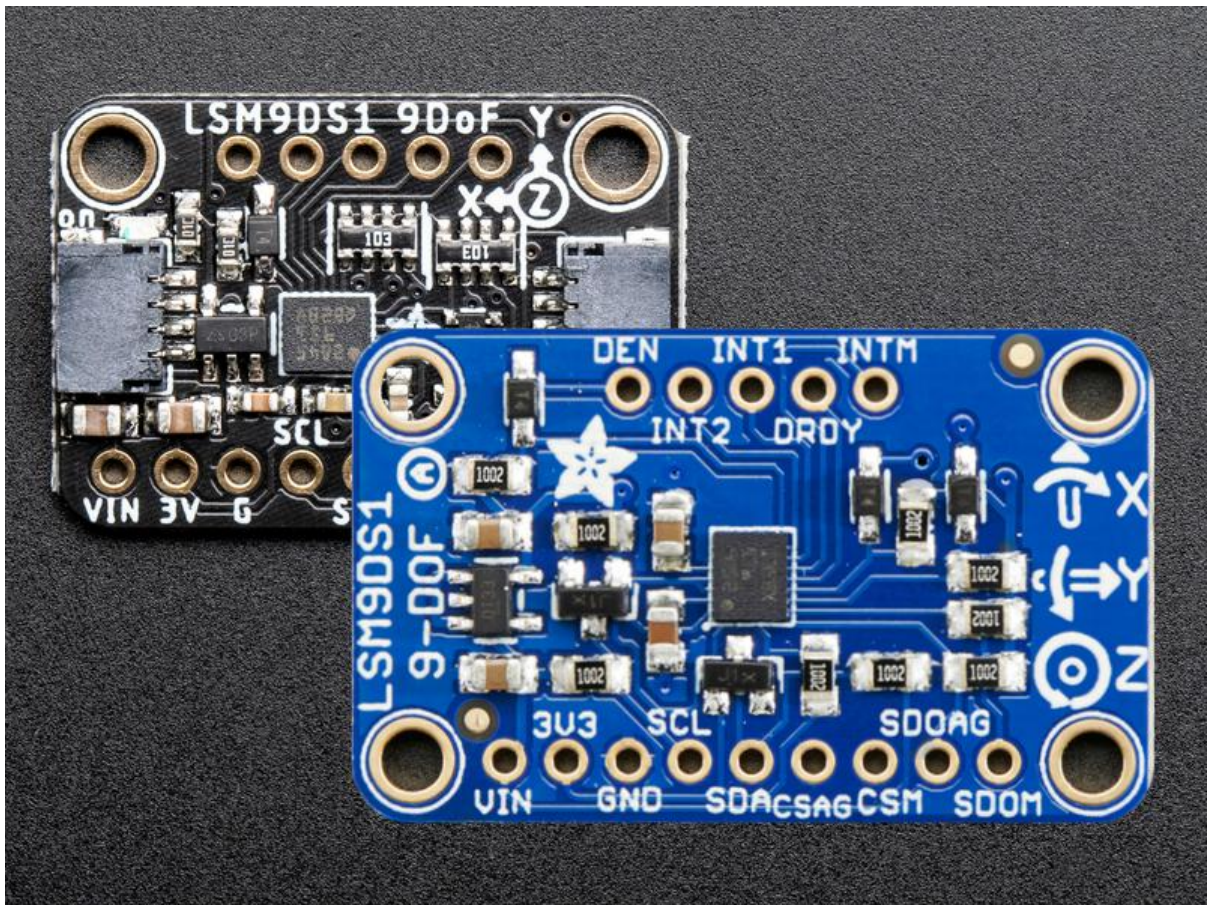
[D44VH10G](#) [D45VH10G](#)

Anexo V



Adafruit LSM9DS1 Accelerometer + Gyro + Magnetometer 9-DOF Breakout

Created by lady ada



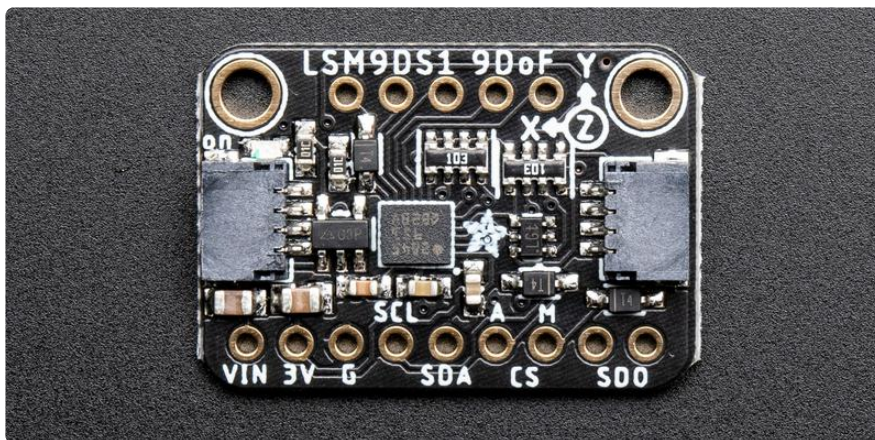
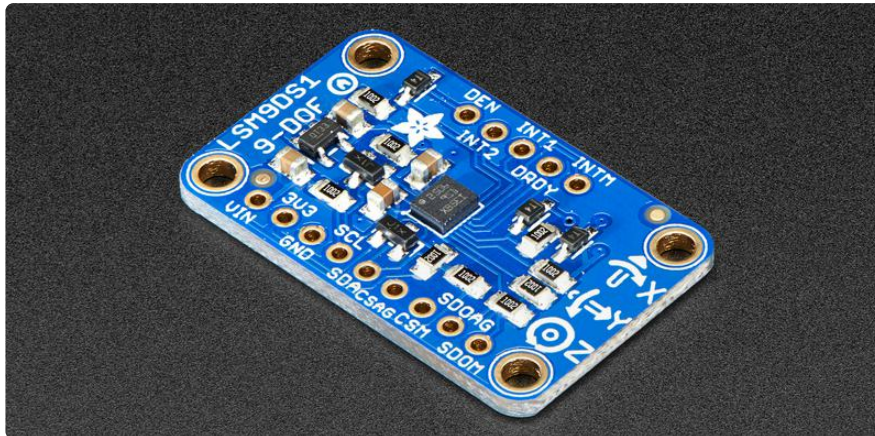
<https://learn.adafruit.com/adafruit-lsm9ds1-accelerometer-plus-gyro-plus-magnetometer-9-dof-breakout>

Last updated on 2021-11-15 06:52:12 PM EST

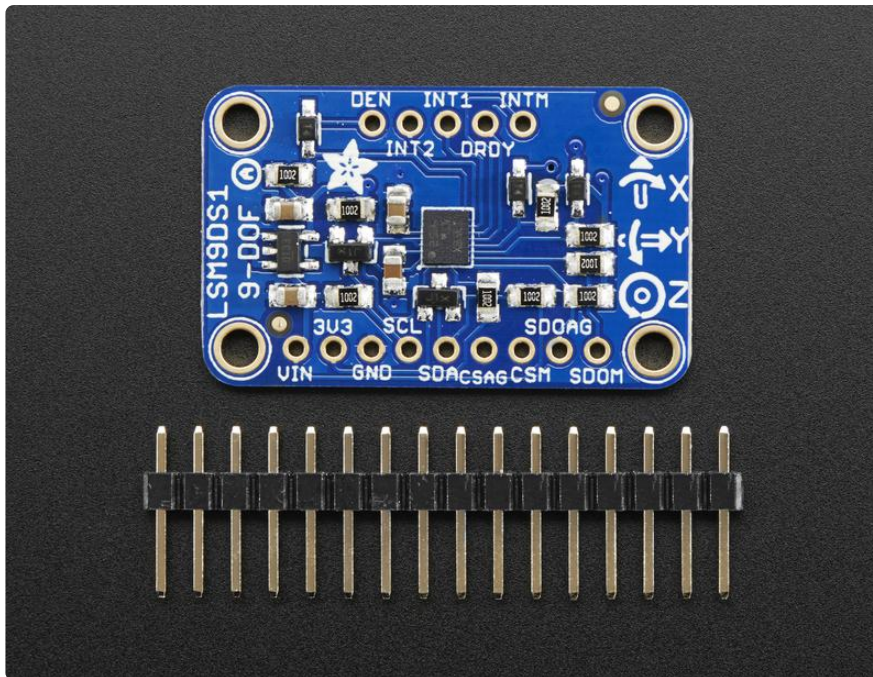
Table of Contents

Overview	3
• New New NEW for 2020!	5
Pinouts	6
• Power Pins	7
• I2C Pins	7
• SPI Pins	8
• Interrupt & Misc Pins	8
Assembly	9
• Prepare the header strip:	9
• Add the breakout board:	10
• And Solder!	10
Arduino Code	11
• Wiring for Arduino	11
• Download Arduino libraries	13
• Load Demo Sketch	14
• Library Reference	16
• Begin!	16
• Set Ranges	17
• Read data	17
Python & CircuitPython	18
• CircuitPython Microcontroller Wiring	18
• I2C	18
• SPI	19
• Python Computer Wiring	20
• I2C	21
• SPI	21
• CircuitPython Installation of LSM9DS1 Library	22
• CircuitPython & Python Usage	23
• Full Example Code	24
Python Docs	25
Downloads	25
• Files	25
• Schematic	26
• Classic/Blue	26
• Stemma QT/Black	26
• Fabrication Print	27
• Classic/Blue	27
• Stemma QT/Black	27

Overview



Add motion, direction and orientation sensing to your Arduino project with this all-in-one 9-DOF sensor. Inside the chip are three sensors, one is a classic 3-axis accelerometer, which can tell you which direction is down towards the Earth (by measuring gravity) or how fast the board is accelerating in 3D space. The other is a 3-axis magnetometer that can sense where the strongest magnetic force is coming from, generally used to detect magnetic north. The third is a 3-axis gyroscope that can measure spin and twist. By combining this data you can REALLY orient yourself.



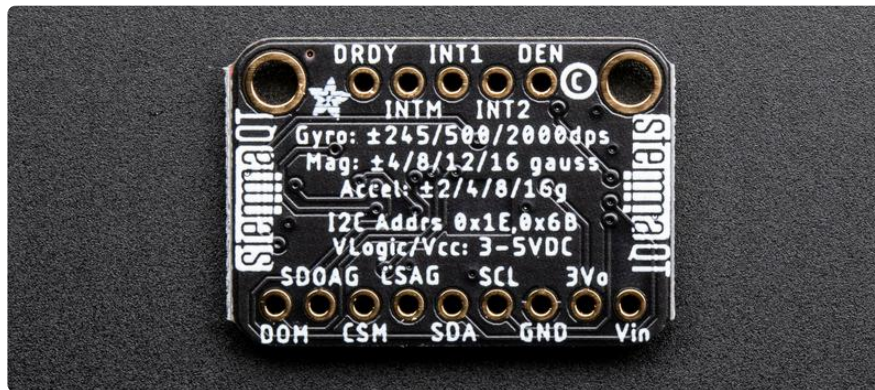
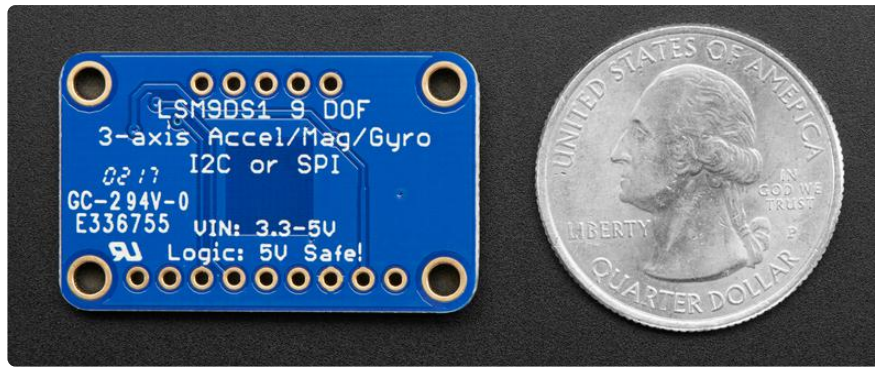
We've carried the LSM9DS0 from ST for a while, and the LSM9DS1 is their latest offering. We thought this could really make for a great breakout, at a very nice price! Design your own activity or motion tracker with all the data... We spun up a breakout board that has all the extra circuitry you'll want, for use with an Arduino (or other microcontroller)

The LSM9DS1 is not the same set of sensors as the LSM9DS0. Here are some of the differences

- LSM9DS0 accelerometer has $\pm 2/\pm 4/\pm 6/\pm 8/\pm 16$ g ranges. The LSM9DS1 has $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ g (no ± 6 g range)
- LSM9DS0 magnetometer has $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 12$ gauss ranges. The LSM9DS1 has $\pm 4/\pm 8/\pm 12/\pm 16$ gauss ranges. So the LSM9DS0 has ± 2 gauss low range where-as the LSM9DS1 has ± 16 gauss high range
- LSM9DS0 and LSM9DS1 gyros both have the same $\pm 245/\pm 500/\pm 2000$ dps ranges.

There are other differences, for example we noticed the LSM9DS1 has slightly worse accuracy. The gyro angular zero-rate (± 25 for the LSM9DS0 and ± 30 for the LSM9DS1 at the highest sensing range). The accelerometer offset accuracy is ± 90 mg for the LSM9DS1 and ± 60 mg for the LSM9DS0.

However, these offsets may not matter for most projects and the pricing of the LSM9DS1 is lower than the LSM9DS0

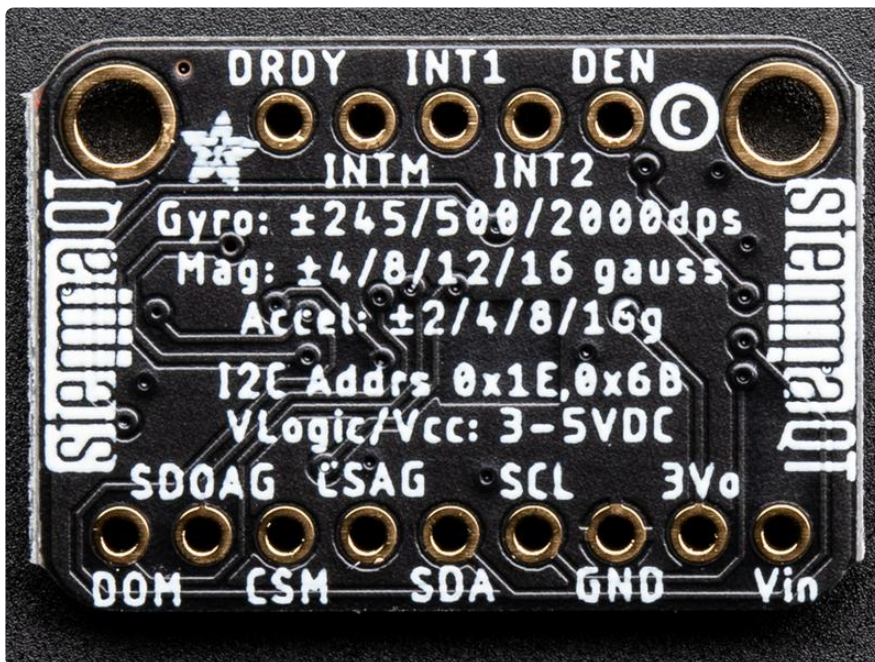
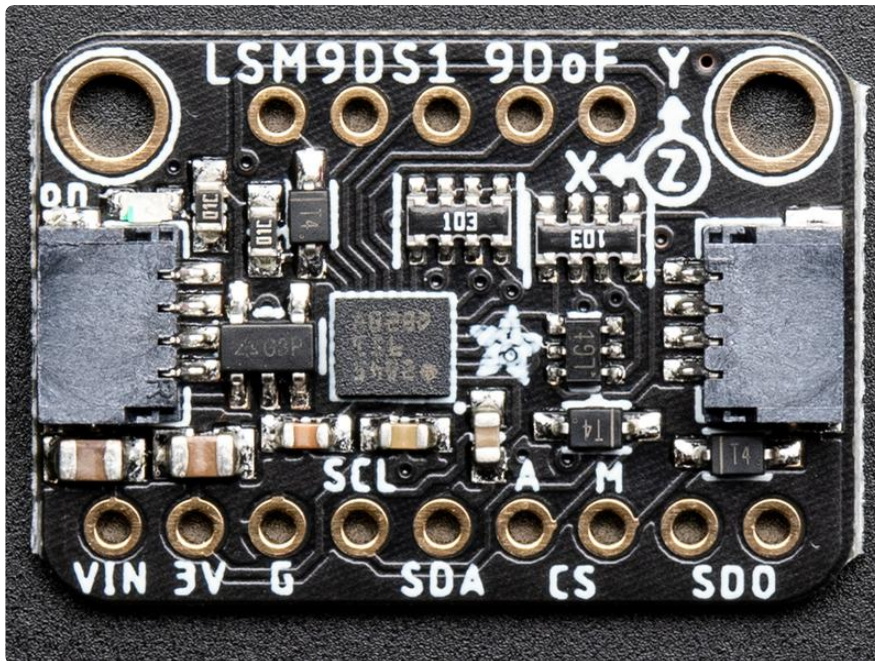


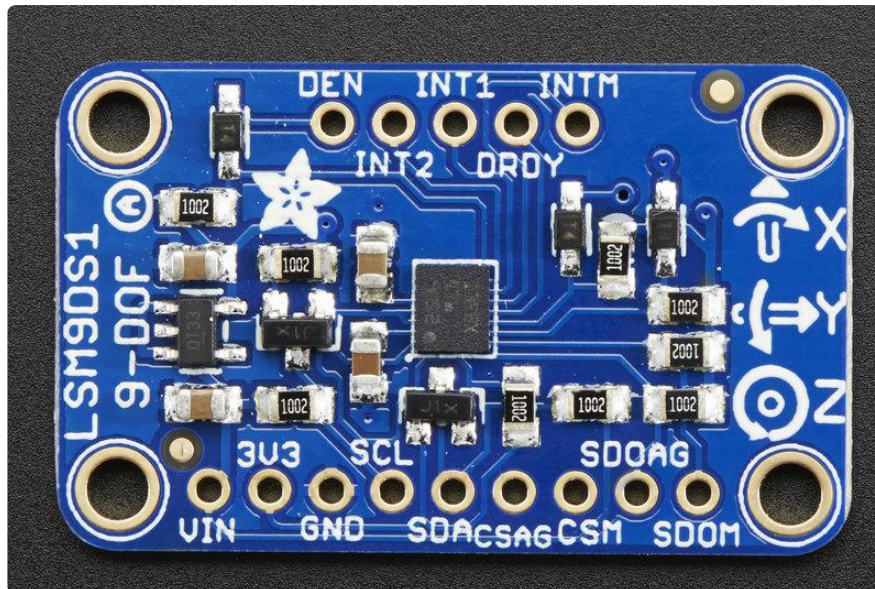
The breakout board version of this sensor has both I2C and SPI interfaces. Attaching it to the Arduino is simple, power Vin and GND with 3-5VDC, and wire up I2C data on SCL and SDA, and you're ready to go! More advanced users can use SPI, our library has support for both. The breakout comes fully assembled and tested, with some extra header so you can use it on a breadboard. Four mounting holes make for a secure connection, and we put the popular power+data pins on one side, and the interrupt pins on the other side for a nice & compact breakout.

New New NEW for 2020!

The Classic Blue revision of the popular LSM9DS1 breakout has a new baby sister in Adafruit Black! Fabbed at 1 x 0.7 inches and weighing just a few grams, she's everything you like about the Classic Blue LSM9DS1 in a smaller package, and somehow we managed to add the new [SparkFun qwiic \(https://adafru.it/Fpw\)](https://adafru.it/Fpw) compatible [STEMMA QT \(https://adafru.it/Ft4\)](https://adafru.it/Ft4) connectors for the I2C bus so you don't even need to solder! Just wire one up to your favorite micro with a [plug-and-play cable \(https://adafru.it/JnB\)](https://adafru.it/JnB) and use our example code and libraries to measure those DoF's!

Pinouts





Power Pins

The sensor on the breakout requires 3V power. Since many customers have 5V microcontrollers like Arduino, we tossed a 3.3V regulator on the board. Its ultra-low dropout so you can power it from 3.3V-5V just fine.

- Vin - this is the power pin. Since the chip uses 3 VDC, we have included a voltage regulator on board that will take 3-5VDC and safely convert it down. To power the board, give it the same power as the logic level of your microcontroller - e.g. for a 5V micro like Arduino, use 5V
- 3V3 - this is the 3.3V output from the voltage regulator, you can grab up to 100mA from this if you like
- GND - common ground for power and logic

I2C Pins

- SCL - I2C clock pin, connect to your microcontrollers I2C clock line. This pin is level shifted so you can use 3-5V logic, and there's a 10K pullup on this pin.
- SDA - I2C data pin, connect to your microcontrollers I2C data line. This pin is level shifted so you can use 3-5V logic, and there's a 10K pullup on this pin.

See the back of the Adafruit Black version for the full pin labels.

SPI Pins

If you're interested in using SPI to interface with the LSM9DS1, you can!

- SCL - this is also the SPI clock pin, it's level shifted so you can use 3-5V logic input
- SDA - this is also the SPI MOSI pin, it's level shifted so you can use 3-5V logic input
- CSAG - this is the Accelerometer+Gyro subchip Chip Select, it's level shifted so you can use 3-5V logic input
- CSM - this is the Magnetometer subchip Select, it's level shifted so you can use 3-5V logic input
- SDOAG - this is the Accelerometer+Gyro subchip MISO pin - it's 3V logic out, but can be read properly by 5V logic chips.
- SDOM/DOM- this is the Magnetometer subchip MISO pin - it's 3V logic out, but can be read properly by 5V logic chips.

Interrupt & Misc Pins

Since there's so many sensors in the LSM9DS1, there's quite a number of interrupt outputs.

- DEN - this is a pin that supposedly could be used to dynamically enable/disable the Gyro. There's actually no documentation on it but we break it out for you anyways.
- INT1 & INT2 - These are interrupts from the accelerometer/gyro subchip. We don't have specific library support for these so check the datasheet for what you can make these indicate. They are 3V-logic outputs
- DRDY - this is the accelerometer/gyro subchip data ready output. We don't have specific library support for these so check the datasheet for how you can set the registers to enable this pin. It is a 3V-logic output.
- INTM - This is the interrupt from the magnetometer subchip. We don't have specific library support for it so check the datasheet for what you can make it indicate. It is a 3V-logic output.

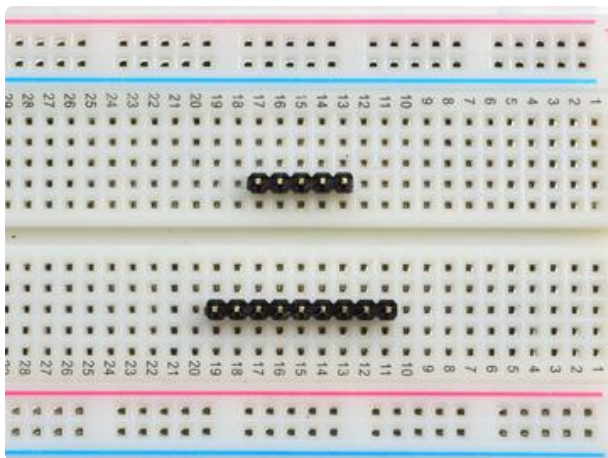
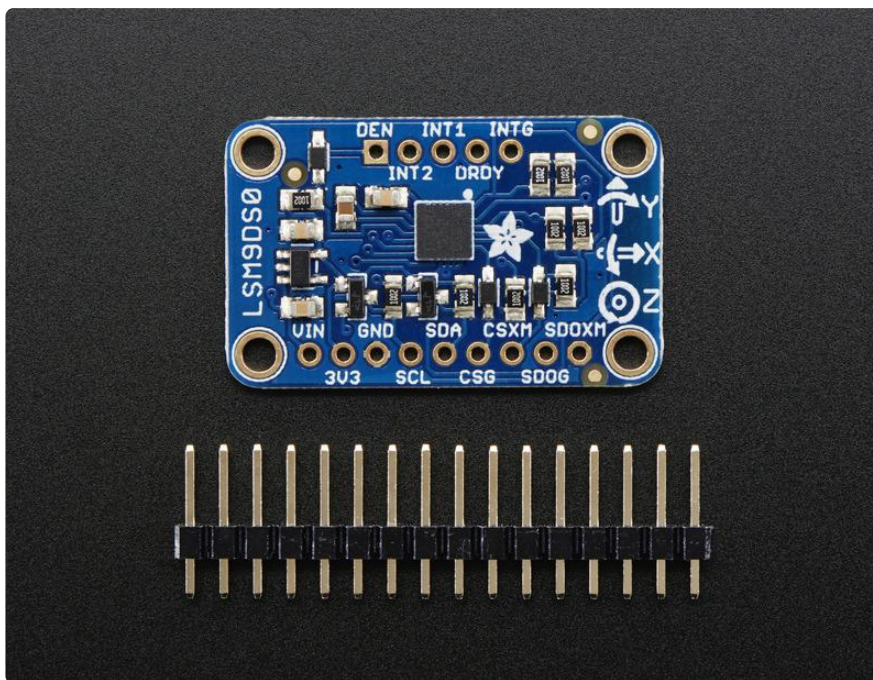
Note that the pinouts for the new Adafruit Black Stemma QT version are slightly different, with the positions of the DRDY and INTM pins swapped when compared to the Classic Blue revision

Black/Stemma QT Version only

- [STEMMA QT Connectors](https://adafru.it/Ft4) (https://adafru.it/Ft4) - These connectors allow you to make solderless connections to dev boards and [various other QT accessories](https://adafru.it/Ft6) (https://adafru.it/Ft6) using [Stemma QT cables](https://adafru.it/JnB) (https://adafru.it/JnB)

Assembly

If you have the breadboard version of this sensor, you'll want to solder some header onto the sensor so it can be used in a breadboard. The Flora version does not require any extra assembly



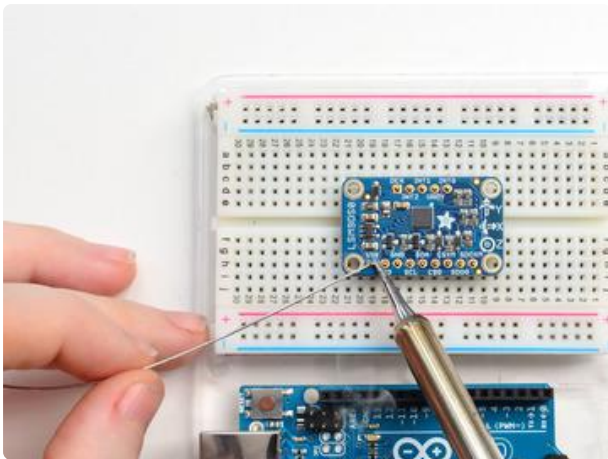
Prepare the header strip:

Cut the strip to length if necessary. It will be easier to solder if you insert it into a breadboard - long pins down



Add the breakout board:

Place the breakout board over the pins so that the short pins poke through the breakout pads

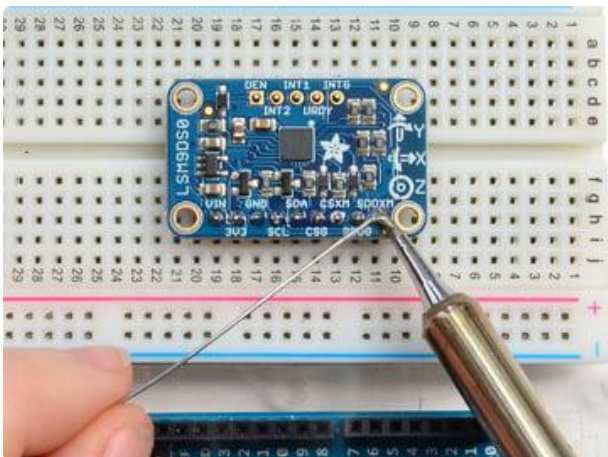
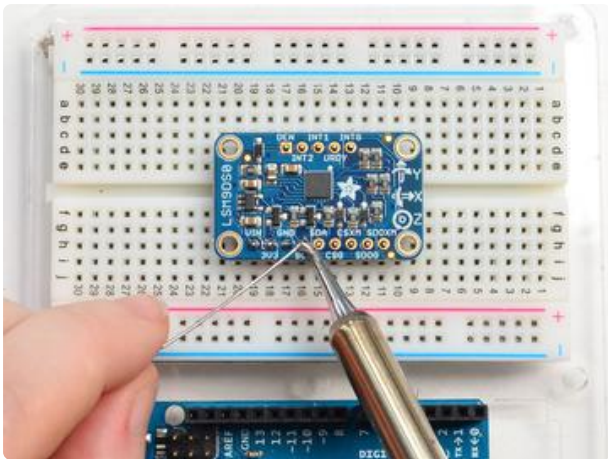


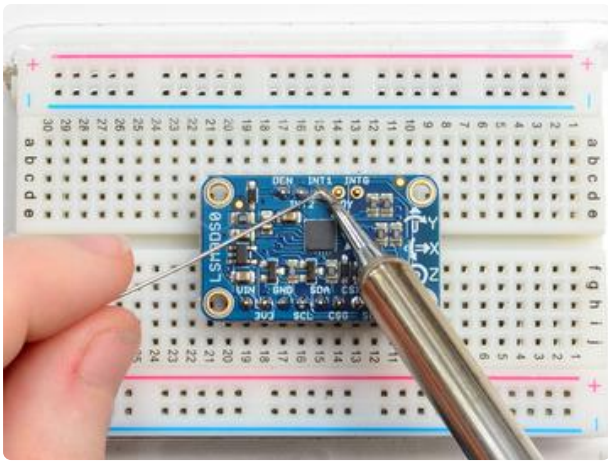
And Solder!

Be sure to solder all pins for reliable electrical contact.

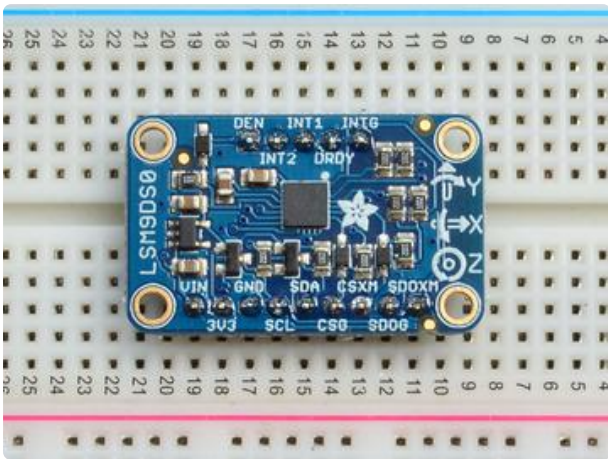
Solder the longer power/data strip first

(For tips on soldering, be sure to check out our [Guide to Excellent Soldering \(https://adafru.it/aTk\)](https://adafru.it/aTk)).





If you plan to use the interrupts and/or you want the board to sit flatter in a breadboard, solder up the other strip!



You're done! Check your solder joints visually and continue onto the next steps

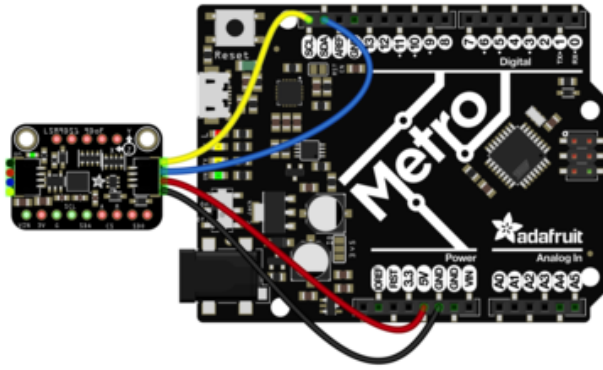
Arduino Code

Wiring for Arduino

Note that the new Adafruit black revision with Stemma QT connectors has some of the pin labels on the back of the board. See the Pinouts page for more information

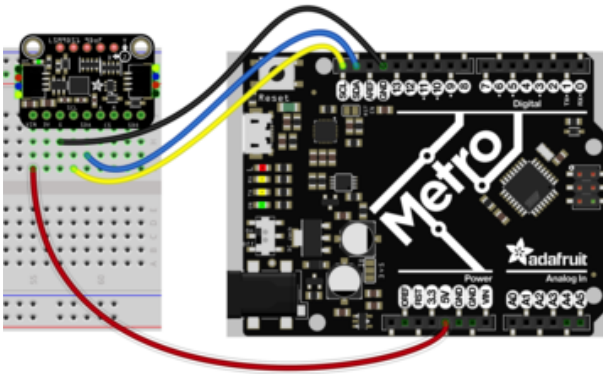
You can easily wire this breakout to any microcontroller, we'll be using a Metro, Adafruit's Arduino compatible board. For another kind of microcontroller, just make sure it has I2C or SPI, then port the code - its pretty simple stuff!

Let's start with just I2C interfacing since it requires the fewest number of wires. Here is how you would wire up one of the newer revision boards with the black PCB by using the new Stemma QT connectors:



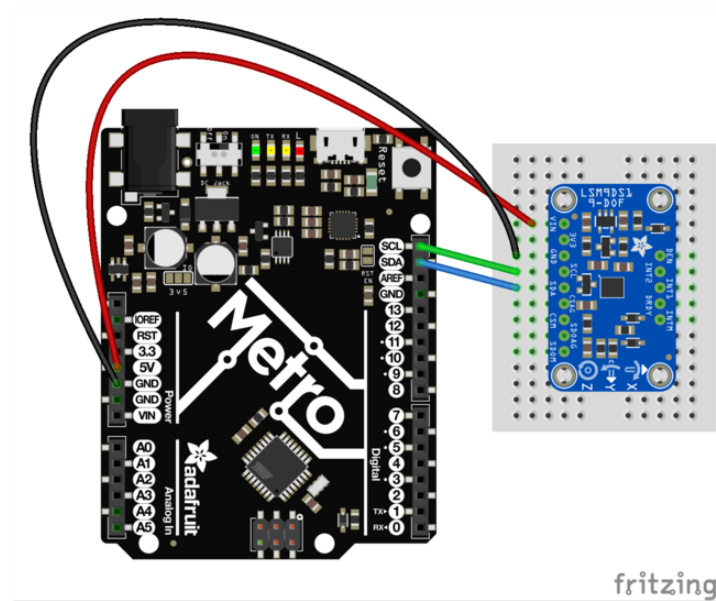
- Connect board VIN (red wire) to Arduino 5V if you are running a 5V board Arduino (Uno, etc.). If your board is 3V, connect to that instead.
- Connect board GND (black wire) to Arduino GND
- Connect board SCL (yellow wire) to Arduino SCL
- Connect board SDA (blue wire) to Arduino SDA

If you prefer to use a breadboard wire up the sensor like this:



- Connect board VIN (red wire) to Arduino 5V if you are running a 5V board Arduino (Uno, etc.). If your board is 3V, connect to that instead.
- Connect board GND (black wire) to Arduino GND
- Connect board SCL (yellow wire) to Arduino SCL
- Connect board SDA (blue wire) to Arduino SDA

If you have one of the classic blue versions of the LSM9DS1, you'll wire it up like so:

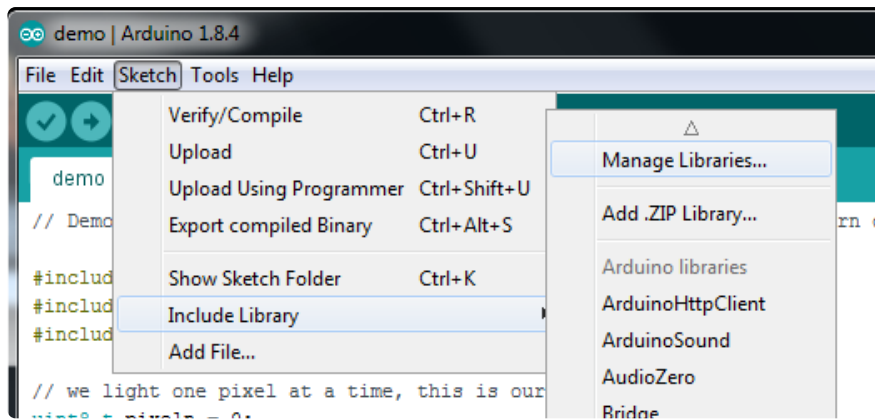


- Connect Vin to the power supply, 3-5V is fine. Use the same voltage that the microcontroller logic is based off of. For most Arduinos, that is 5V
- Connect GND to common power/data ground
- Connect the SCL pin to the I2C clock SCL pin on your Arduino. On an UNO & '328 based Arduino, this is also known as A5, on a Mega it is also known as digital 21 and on a Leonardo/Micro, digital 3
- Connect the SDA pin to the I2C data SDA pin on your Arduino. On an UNO & '328 based Arduino, this is also known as A4, on a Mega it is also known as digital 20 and on a Leonardo/Micro, digital 2

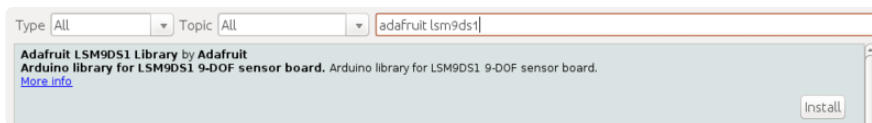
Download Arduino libraries

To begin reading sensor data, you will need to download the `Adafruit_LSM9DS1` library and the `Adafruit_Sensor` library from the Arduino library manager.

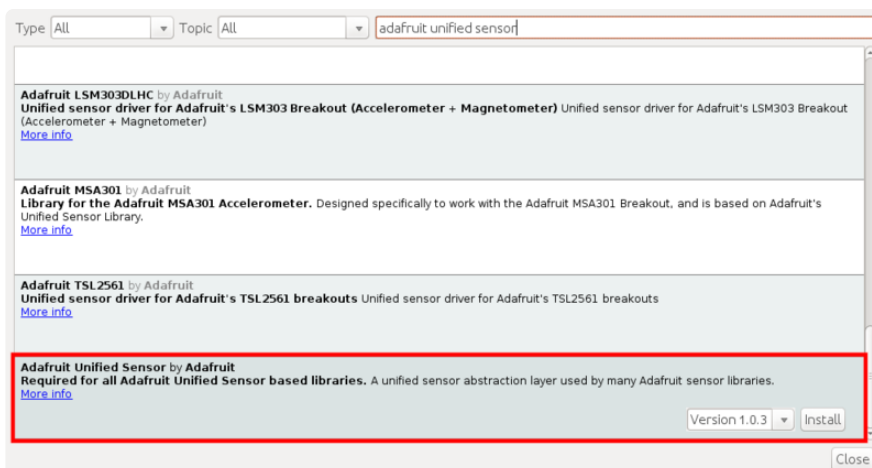
Open up the Arduino library manager:



Search for the Adafruit LSM9DS1 library and install it



Search for the Adafruit Unified Sensor library and install it (You may have to scroll down pretty far to find it)

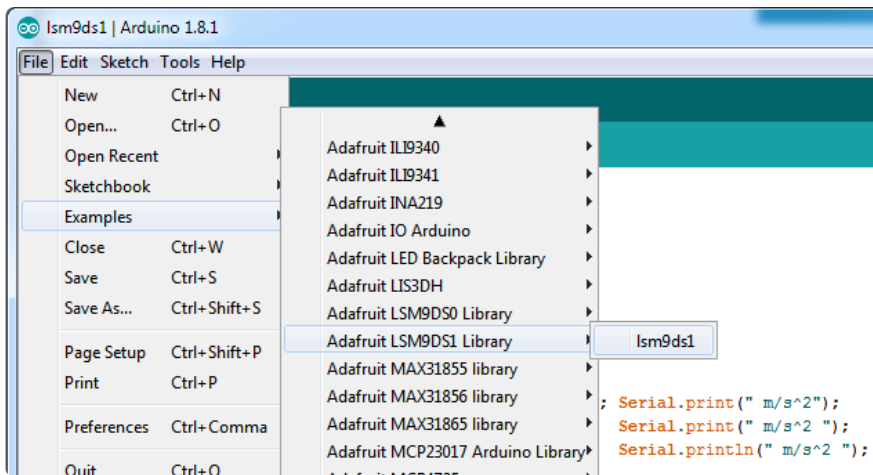


We also have a great tutorial on Arduino library installation at:

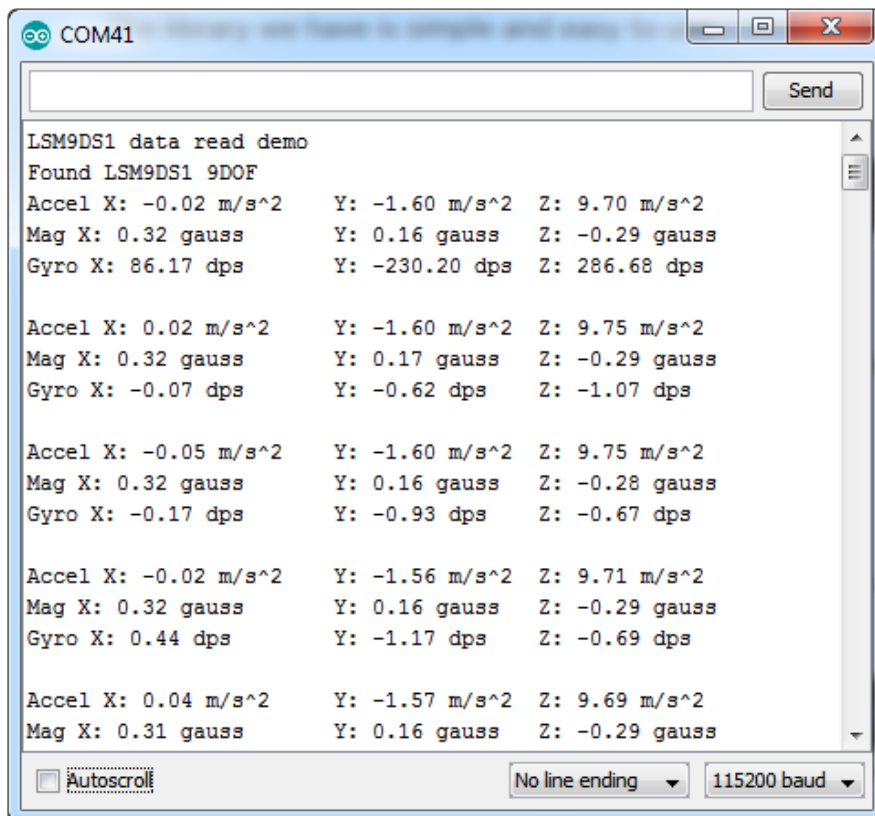
<http://learn.adafruit.com/adafruit-all-about-arduino-libraries-install-use> (<https://adafru.it/aYM>)

Load Demo Sketch

Now you can open up File->Examples->Adafruit_LSM9DS1->lsm9ds1 and upload to your Arduino wired up to the sensor



Then open up the Serial console at 115200 baud to read the sensor output! You'll get 9 distinct data points, accelerometer x/y/z in meters/s², magnetometer x/y/z in gauss and gyroscope in x/y/x degrees/second



We suggest using this Adafruit_Sensor interface as shown in this demo, since it will let you swap sensors without having to worry about units compatibility. Try twisting and moving the board around to see the sensors change value.

Library Reference

The library we have is simple and easy to use

You can create the Adafruit_LSM9DS1 object with:

```
Adafruit_LSM9DS1 lsm = Adafruit_LSM9DS1(); // i2c sensor
```

I2C does not have pins, as they are fixed in hardware.

If you're using "hardware" SPI, you will have to wire up the pins as follows:

- SCL -> SPI CLK
- SDA -> SPI MOSI
- SDO_AG & SDO_M -> SPI MISO (both together)

[You can determine the hardware SPI pins for your Arduino here \(https://adafru.it/d5h\)](https://adafru.it/d5h)

Then pick two pins for the CS lines

```
Adafruit_LSM9DS1 lsm = Adafruit_LSM9DS1(LSM9DS1_XGCS, LSM9DS1_MCS);
```

If you don't want to use the hardware SPI, you can also try the soft SPI capability, which is bitbanged. You can basically use any pins you like!

```
Adafruit_LSM9DS1 lsm = Adafruit_LSM9DS1(LSM9DS1_SCK, LSM9DS1_MISO, LSM9DS1_MOSI, LSM9DS1_XGCS, LSM9DS1_MCS);
```

Begin!

To initialize the sensor, call `lsm.begin()` which will check the sensor can be found. It returns true/false depending on these checks. We suggest you wrap `begin()` in a statement that will check if the sensor was located:

```
if(!lsm.begin())
{
  /* There was a problem detecting the LSM9DS1 ... check your connections */
  Serial.print(F("Oops, no LSM9DS1 detected ... Check your wiring!"));
  while(1);
}
```

Set Ranges

These chips have tons of registers, we basically provide interface code for the most useful stuff, such as setting the range. Each subsensor has it's own range. Higher ranges have less precision but can measure larger movements!

Set up the ranges with the setup functions:

```
// 1.) Set the accelerometer range
lsm.setupAccel(lsm.LSM9DS1_ACCELRange_2G);
//lsm.setupAccel(lsm.LSM9DS1_ACCELRange_4G);
//lsm.setupAccel(lsm.LSM9DS1_ACCELRange_8G);
//lsm.setupAccel(lsm.LSM9DS1_ACCELRange_16G);

// 2.) Set the magnetometer sensitivity
lsm.setupMag(lsm.LSM9DS1_MAGGAIN_4GAUSS);
//lsm.setupMag(lsm.LSM9DS1_MAGGAIN_8GAUSS);
//lsm.setupMag(lsm.LSM9DS1_MAGGAIN_12GAUSS);
//lsm.setupMag(lsm.LSM9DS1_MAGGAIN_16GAUSS);

// 3.) Setup the gyroscope
lsm.setupGyro(lsm.LSM9DS1_GYROSCALE_245DPS);
//lsm.setupGyro(lsm.LSM9DS1_GYROSCALE_500DPS);
//lsm.setupGyro(lsm.LSM9DS1_GYROSCALE_2000DPS);
```

Choose whichever range you like, after you begin() the sensor!

Read data

Read data using the Adafruit_Sensor API by first creating four events, one for each sub-sensor:

```
sensors_event_t accel, mag, gyro, temp;
```

Then pass these into the getEvent function

```
lsm.getEvent(&accel, &mag, &gyro, &temp);
```

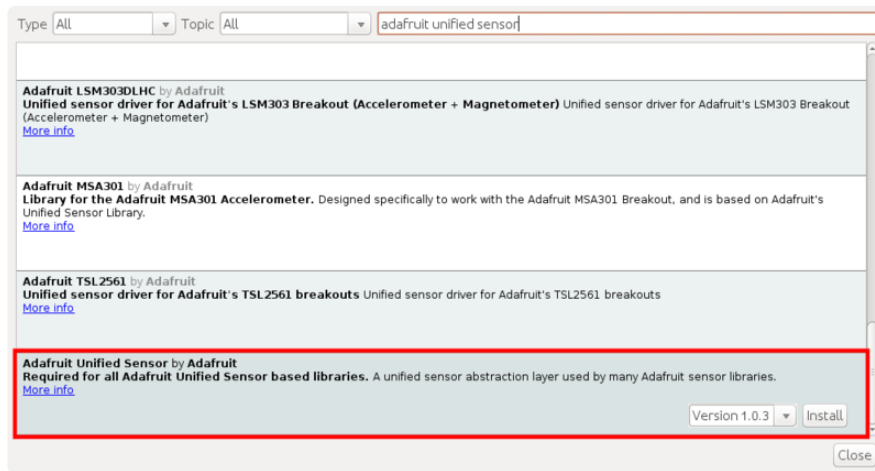
The data is snapshotted at once, so you can read and manage the data later.

For the Accelerometer event you can read accel.acceleration.x, accel.acceleration.y or accel.acceleration.z which are in meters/second*second.

For the Magnetometer event you can read mag.magnetic.x, mag.magnetic.y or mag.magnetic.z which are in gauss.

For the Gyro event you can read gyro.gyro.x, gyro.gyro.y or gyro.gyro.z, which are in degrees-per-second (dps)

The temperature event data is in temp.temperature, but we don't guarantee that the temperature data is in degrees C



Python & CircuitPython

Note that the new Adafruit black revision with Stemma QT connectors has some of the pin labels on the back of the board. See the Pinouts page for more information

CircuitPython Microcontroller Wiring

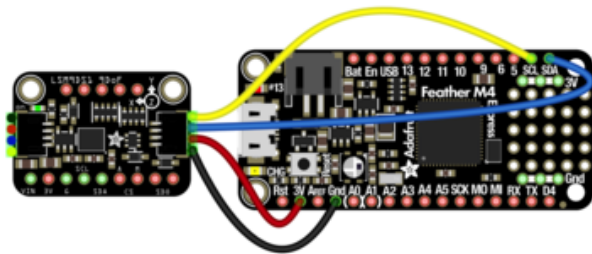
First wire up a LSM9DS1 to your board exactly as shown on the previous pages for Arduino. You can use either I2C or SPI wiring, although it's recommended to use I2C for simplicity.

I2C

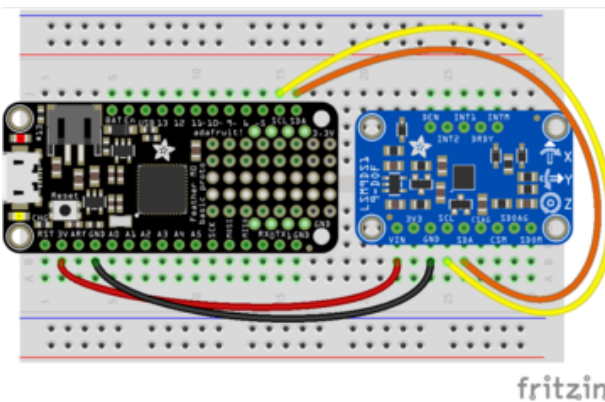
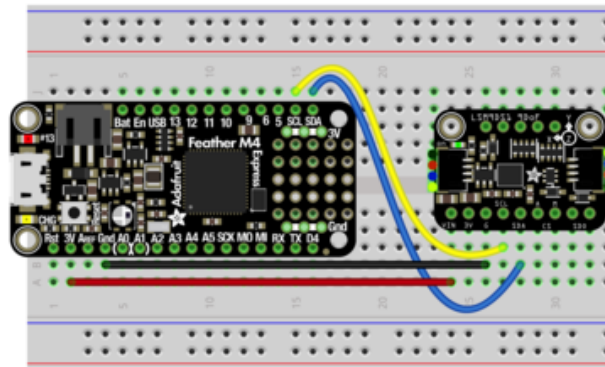
Here's an example of wiring a Feather M0 to the sensor with an I2C connection, either the new classic blue form factor, or the newer revisions either on a breadboard or using the Stemma QT connectors:

It's easy to use the LSM9DS1 sensor with Python or CircuitPython, and the [Adafruit CircuitPython LSM9DS1 \(https://adafru.it/C5b\)](https://adafru.it/C5b) module. This module allows you to easily write Python code that reads the accelerometer, magnetometer, and gyroscope from the sensor.

You can use this sensor with any CircuitPython microcontroller board or with a computer that has GPIO and Python [thanks to Adafruit_Blinka, our CircuitPython-for-Python compatibility library](https://adafru.it/BSN) (<https://adafru.it/BSN>).

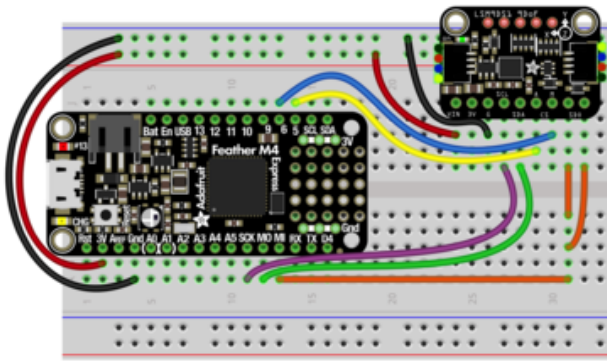


- Board 3V to sensor VIN
- Board GND to sensor GND
- Board SCL to sensor SCL
- Board SDA to sensor SDA



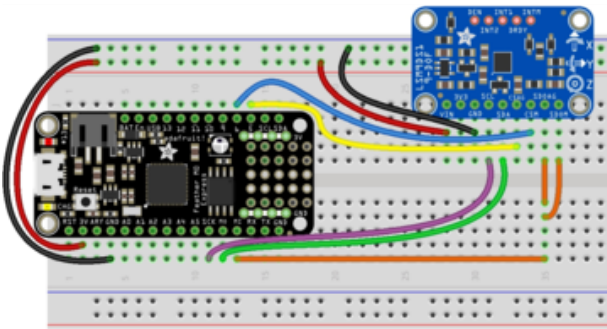
SPI

Wiring up the LSM9DS1 to a Feather M0 using SPI is a bit more complicated due to the addition of two sets of Sensor Out and CS pins. Wiring for the newer or older versions of the board are pretty similar



- Board 3V to sensor VIN (Red)
- Board GND to sensor GND (Black)
- Board SCK to sensor SCL (Purple)
- Board MOSI to sensor SDA (Green)
- Board MISO to sensor SDOAG AND sensor DOM (Orange)
- Board D5 to sensor CSAG (Yellow)
- Board D6 to sensor CSM (Blue)

To use the classic blue board with SPI

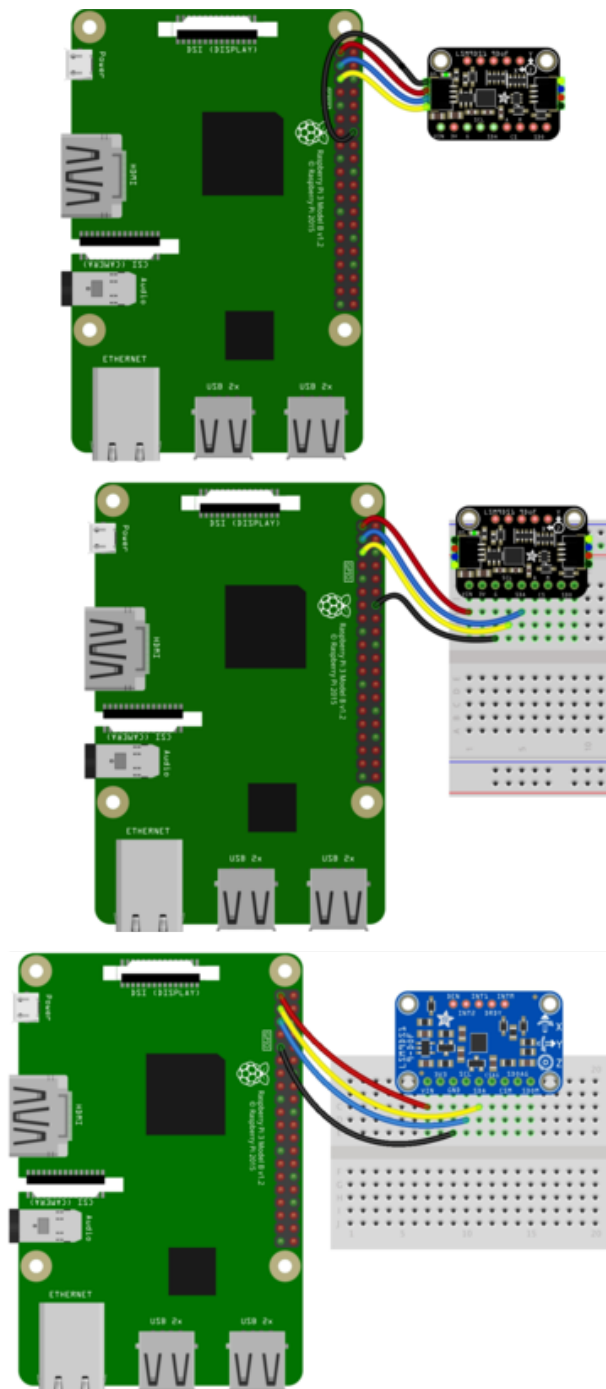


- Board 3V to sensor VIN (Red)
- Board GND to sensor GND (Black)
- Board SCK to sensor SCL (Purple)
- Board MOSI to sensor SDA (Green)
- Board MISO to sensor SDOAG AND sensor SDOM (Orange)
- Board D5 to sensor CSAG (Yellow)
- Board D6 to sensor CSM (Blue)

Python Computer Wiring

Since there's dozens of Linux computers/boards you can use we will show wiring for Raspberry Pi. For other platforms, [please visit the guide for CircuitPython on Linux to see whether your platform is supported \(https://adafru.it/BSN\)](https://adafru.it/BSN).

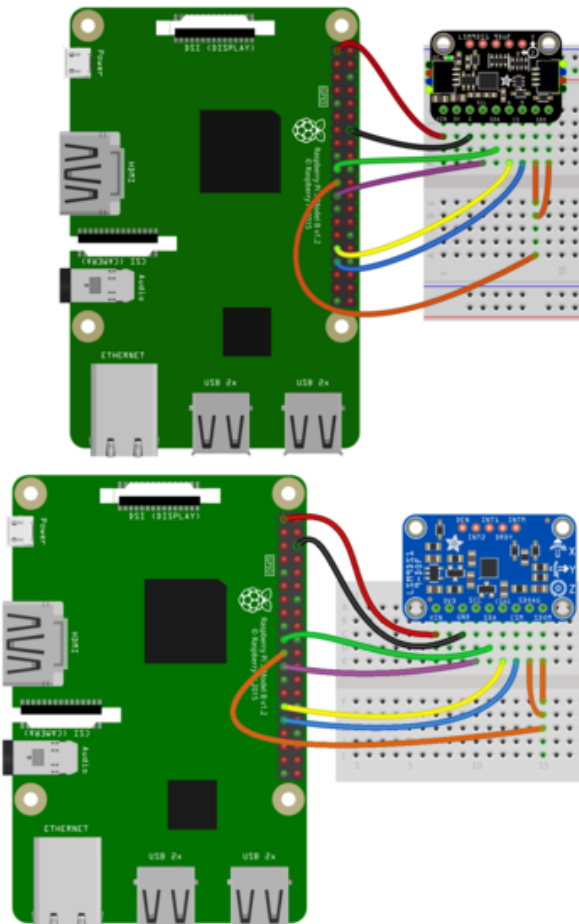
I2C



- Pi 3V3 to sensor VIN
- Pi GND to sensor GND
- Pi SCL to sensor SCL
- Pi SDA to sensor SDA

SPI

Here's the Raspberry Pi wired with SPI:



- Pi 3V3 to sensor VIN
- Pi GND to sensor GND
- Pi SCLK to sensor SCL
- Pi MOSI to sensor SDA
- Pi MISO to sensor SDOAG AND sensor SDOM
- Pi GPIO5 to sensor CSAG
- Pi GPIO6 to sensor CSM

CircuitPython Installation of LSM9DS1 Library

You'll need to install the [Adafruit CircuitPython LSM9DS1 \(https://adafru.it/C5b\)](https://adafru.it/C5b) library on your CircuitPython board.

First make sure you are running the [latest version of Adafruit CircuitPython \(https://adafru.it/Amd\)](https://adafru.it/Amd) for your board.

Next you'll need to install the necessary libraries to use the hardware--carefully follow the steps to find and install these libraries from [Adafruit's CircuitPython library bundle \(https://adafru.it/zdx\)](https://adafru.it/zdx). Our introduction guide has [a great page on how to install the library bundle \(https://adafru.it/ABU\)](https://adafru.it/ABU) for both express and non-express boards.

Remember for non-express boards like the, you'll need to manually install the necessary libraries from the bundle:

- adafruit_lsm9ds1.mpy

- adafruit_bus_device

Before continuing make sure your board's lib folder or root filesystem has the adafruit_lsm9ds1.mpy, and adafruit_bus_device files and folders copied over.

Next [connect to the board's serial REPL \(https://adafru.it/Awz\)](https://adafru.it/Awz) so you are at the CircuitPython >>> prompt.

CircuitPython & Python Usage

To demonstrate the usage of the sensor we'll initialize it and read the accelerometer, magnetometer, and more from the board's Python REPL.

Run the following code to import the necessary modules and initialize the I2C connection with the sensor:

```
import board
import adafruit_lsm9ds1
i2c = board.I2C()
sensor = adafruit_lsm9ds1.LSM9DS1_I2C(i2c)
```

If you're connected using SPI, run the following code to initialise the SPI connection with the sensor:

```
import board
from digitalio import DigitalInOut, Direction
spi = board.SPI()
csag = DigitalInOut(board.D5)
csag.direction = Direction.OUTPUT
csag.value = True
csm = DigitalInOut(board.D6)
csm.direction = Direction.OUTPUT
csm.value = True
sensor = adafruit_lsm9ds1.LSM9DS1_SPI(spi, csag, csm)
```

Now you're ready to read values from the sensor using any of these properties:

- accelerometer - A 3-tuple of X, Y, Z axis accelerometer values in meters/second squared.
- magnetometer - A 3-tuple of X, Y, Z axis magnetometer values in gauss.
- gyroscope - A 3-tuple of X, Y, Z axis gyroscope values in degrees/second.
- temperature - The sensor temperature in degrees Celsius.

```
print('Acceleration (m/s^2): ({0:0.3f},{1:0.3f},\n{2:0.3f})'.format(*sensor.accelerometer))
```



```
print('Magnetometer (gauss): ({0:0.3f},{1:0.3f},
{2:0.3f})'.format(*sensor.magnetometer))
print('Gyroscope (degrees/sec): ({0:0.3f},{1:0.3f},
{2:0.3f})'.format(*sensor.gyroscope))
print('Temperature: {0:0.3f}C'.format(sensor.temperature))
```

```
>>> print('Acceleration (m/s^2): ({0:0.3f},{1:0.3f},{2:0.3f})'.format(*sensor.accelerometer))
Acceleration (m/s^2): (-0.121,-0.246,9.721)
>>> print('Magnetometer (gauss): ({0:0.3f},{1:0.3f},{2:0.3f})'.format(*sensor.magnetometer))
Magnetometer (gauss): (0.132,0.374,-0.331)
>>> print('Gyroscope (degrees/sec): ({0:0.3f},{1:0.3f},{2:0.3f})'.format(*sensor.gyroscope))
Gyroscope (degrees/sec): (0.356,23.144,-21.079)
>>> print('Temperature: {0:0.3f}C'.format(sensor.temperature))
Temperature: 22.500C
>>>
```

In addition you can adjust some properties by getting and setting their values:

- `accel_range` - The range of the accelerometer, should be a value of `ACCELRange_2G`, `ACCELRange_4G`, `ACCELRange_8G`, or `ACCELRange_16G` from the `adafruit_lsm9ds1` module. The default is 2G.
- `mag_gain` - The gain of the magnetometer, should be a value of `MAGGAIN_4GAUSS`, `MAGGAIN_8GAUSS`, `MAGGAIN_12GAUSS`, or `MAGGAIN_16GAUSS` from the `adafruit_lsm9ds1` module. The default is 4 gauss.
- `gyro_scale` - The scale of the gyroscope, should be a value of `GYROSCALE_245DPS`, `GYROSCALE_500DPS`, or `GYROSCALE_2000DPS` from the `adafruit_lsm9ds1` module. The default is 245 DPS.

```
sensor.accel_range = adafruit_lsm9ds1.ACCELRange_4G
sensor.mag_gain = adafruit_lsm9ds1.MAGGAIN_8GAUSS
sensor.gyro_scale = adafruit_lsm9ds1.GYROSCALE_500DPS
```

```
>>> sensor.accel_range = adafruit_lsm9ds1.ACCELRange_4G
>>> sensor.mag_gain = adafruit_lsm9ds1.MAGGAIN_8GAUSS
>>> sensor.gyro_scale = adafruit_lsm9ds1.GYROSCALE_500DPS
>>> print('Acceleration (m/s^2): ({0:0.3f},{1:0.3f},{2:0.3f})'.format(*sensor.accelerometer))
Acceleration (m/s^2): (-0.123,-0.236,9.680)
>>> print('Magnetometer (gauss): ({0:0.3f},{1:0.3f},{2:0.3f})'.format(*sensor.magnetometer))
Magnetometer (gauss): (0.140,0.388,-0.347)
>>> print('Gyroscope (degrees/sec): ({0:0.3f},{1:0.3f},{2:0.3f})'.format(*sensor.gyroscope))
Gyroscope (degrees/sec): (0.452,23.397,-20.965)
>>> print('Temperature: {0:0.3f}C'.format(sensor.temperature))
Temperature: 22.500C
>>>
```

See the [simplestest.py example \(https://adafru.it/C5d\)](https://adafru.it/C5d) for a complete demo of printing the accelerometer, magnetometer, gyroscope every second. Save this as `code.py` on the board and examine the REPL output to see the range printed every second.

That's all there is to using the LSM9DS1 with CircuitPython!

Full Example Code

```
# SPDX-FileCopyrightText: 2021 ladyada for Adafruit Industries
# SPDX-License-Identifier: MIT

# Simple demo of the LSM9DS1 accelerometer, magnetometer, gyroscope.
# Will print the acceleration, magnetometer, and gyroscope values every second.
```

```

import time
import board
import adafruit_lsm9ds1

# Create sensor object, communicating over the board's default I2C bus
i2c = board.I2C() # uses board.SCL and board.SDA
sensor = adafruit_lsm9ds1.LSM9DS1_I2C(i2c)

# SPI connection:
# from digitalio import DigitalInOut, Direction
# spi = board.SPI()
# csag = DigitalInOut(board.D5)
# csag.direction = Direction.OUTPUT
# csag.value = True
# csm = DigitalInOut(board.D6)
# csm.direction = Direction.OUTPUT
# csm.value = True
# sensor = adafruit_lsm9ds1.LSM9DS1_SPI(spi, csag, csm)

# Main loop will read the acceleration, magnetometer, gyroscope, Temperature
# values every second and print them out.
while True:
    # Read acceleration, magnetometer, gyroscope, temperature.
    accel_x, accel_y, accel_z = sensor.acceleration
    mag_x, mag_y, mag_z = sensor.magnetic
    gyro_x, gyro_y, gyro_z = sensor.gyro
    temp = sensor.temperature
    # Print values.
    print(
        "Acceleration (m/s^2): ({0:0.3f},{1:0.3f},{2:0.3f})".format(
            accel_x, accel_y, accel_z
        )
    )
    print(
        "Magnetometer (gauss): ({0:0.3f},{1:0.3f},{2:0.3f})".format(mag_x, mag_y,
mag_z)
    )
    print(
        "Gyroscope (rad/sec): ({0:0.3f},{1:0.3f},{2:0.3f})".format(
            gyro_x, gyro_y, gyro_z
        )
    )
    print("Temperature: {0:0.3f}C".format(temp))
    # Delay for a second.
    time.sleep(1.0)

```

Python Docs

[Python Docs \(https://adafru.it/C5e\)](https://adafru.it/C5e)

Downloads

Files

- [EagleCAD PCB files on GitHub \(https://adafru.it/ub2\)](https://adafru.it/ub2)
- [Classic/Blue Fritzing object available in Adafruit Fritzing library \(https://adafru.it/LKA\)](https://adafru.it/LKA)

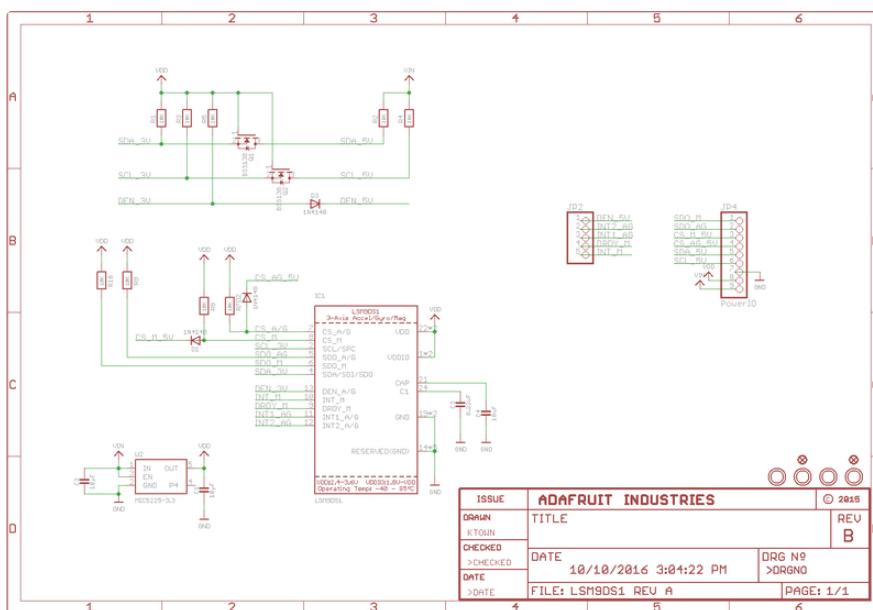
- [Stemma QT/Black Fritzing object available in Adafruit Fritzing library \(https://adafru.it/LKB\)](https://adafruit.com/library/stemma-qt-black-fritzing-object)

LSM9DS1.pdf Datasheet

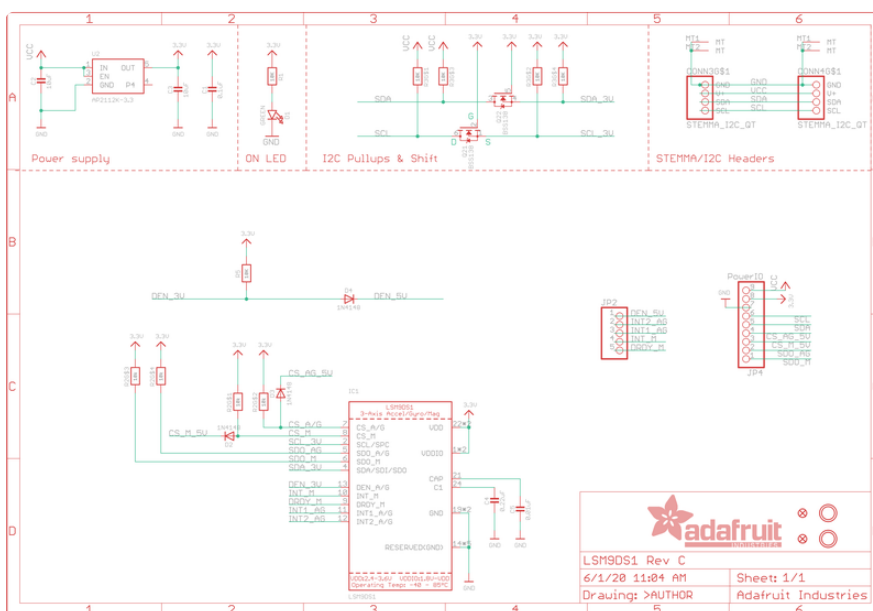
<https://adafru.it/ub3>

Schematic

Classic/Blue

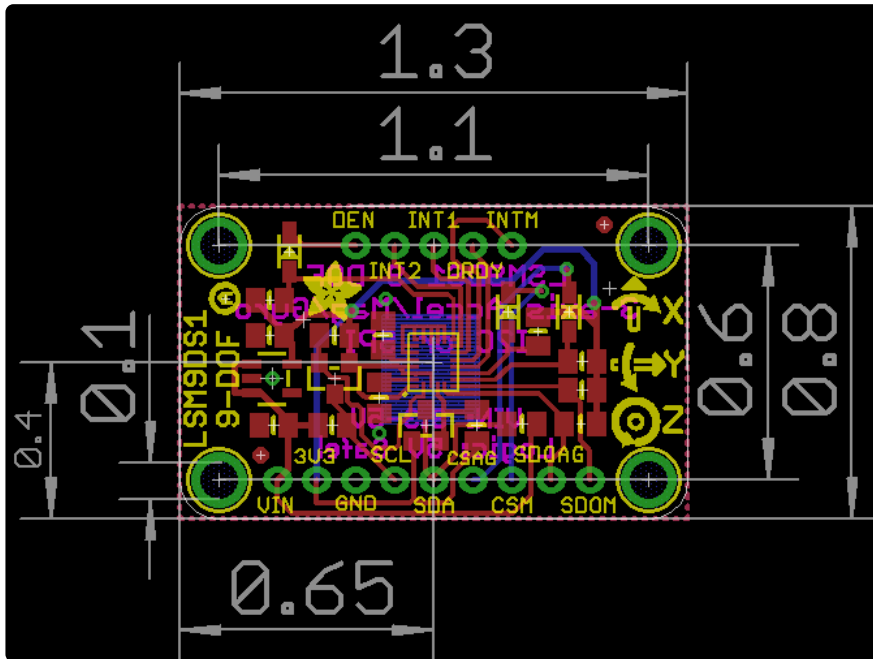


Stemma QT/Black



Fabrication Print

Classic/Blue



Stemma QT/Black

