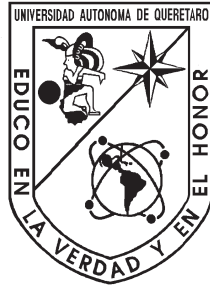


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO



FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRÍA EN INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL AUTOMÁTICO

TESIS
(ENERO 2020- ABRIL 2022)

Sistema de generación de campo magnético auto ajustable con base en bobinas de Helmholtz para disminuir sus defectos de fabricación

Alumno:
CRISTIAN FELIPE ROJAS
BELTRÁN

Sínodo:
Dr. ALEPH HAIN PACHECO ESTRADA, UAQ
Dr. SERGIO ANTONIO CAMPOS MONTIEL,
Dr. JUVENAL RODRÍGUEZ RESENDIZ, UAQ
Dr. MARIO ENRIQUE RODRIGUEZ GARCIA, UNAM
Dr. JOSÉ MANUEL ÁLVAREZ ALVARADO, UAQ

18 de mayo de 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Sistema de generación de campo magnético auto
ajustable con base en bobinas de Helmholtz para
disminuir sus defectos de fabricación.

por

Cristian Felipe Rojas Beltran

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](#).

Clave RI: IGMAC-300641

*Dedicado a mis padres
por su dedicación y apoyo
durante esta etapa de mi vida.*

Resumen

Dentro de este proyecto se plantea la generación de campos magnéticos homogéneos auto ajustables basados en bobinas de Helmholtz. El objetivo principal es dar una visión detallada de la generación de campos magnéticos homogéneos y como la automatización de este proceso puede ayudar a mejorar los resultados en diferentes campos. El proyecto comienza con una explicación de la teoría de los campos magnéticos, incluyendo la ley de Bois-Savart y la ley de Ampere. La ley de Bois-Savart establece que la fuerza magnética entre dos corrientes eléctricas es proporcional a la magnitud de las corrientes y a la distancia entre ellas. La ley de Ampere establece que la circulación de un campo magnético alrededor de una línea cerrada es igual a la corriente eléctrica que circula por la superficie delimitada por la línea cerrada. A continuación se describe la acción de las bobinas de Helmholtz, que se utilizan para crear campos magnéticos homogéneos. Las bobinas de Helmholtz consisten en dos bobinas idénticas separadas por una distancia igual al radio de las bobinas. Cuando se aplica una corriente eléctrica a las bobinas, se crea un campo magnético homogéneo en el centro de las mismas. Sin embargo, el proyecto también menciona defectos de fabricación que pueden afectar a la capacidad de las bobinas de Helmholtz para generar campos magnéticos homogéneos. Entre estos defectos se incluyen la disposición inadecuada de las bobinas, el cambio de la sección transversal de las bobinas y el cambio de la resistencia eléctrica de las bobinas. Además, se analizan los mecanismos y engranajes utilizados para generar campos magnéticos. Se mencionan los imanes permanentes, los electroimanes y los generadores de campos magnéticos pulsados. También se analiza la importancia de calibrar los sensores de flujo magnético con el efecto Hall para garantizar mediciones precisas y fiables.

Índice

Resumen	II
1. Glosario	V
2. Introducción	1
2.1. Justificación	4
2.2. Descripción del problema	4
2.3. Hipótesis	5
2.4. Objetivo general	5
2.5. Objetivos particulares	5
3. Fundamentación teórica	7
3.1. Campos magnéticos	7
3.1.1. Ley de Biot-Savart	7
3.1.2. Ley de Ampère	8
3.2. Bobinas de Helmholtz	9
3.2.1. Errores de fabricación	11
3.3. Mecanismos	13
3.3.1. Engranajes	13
3.3.2. Correas	15
3.4. Convertidores de modo de conmutación CC-CC	15
3.4.1. Control de convertidores CC-CC	16
3.4.2. Convertidor reductor (Buck)	17
4. Metodología	19
4.1. Diseño del sistema mecánico	19
4.1.1. Etapa 1: Diseños mecánicos	19
4.1.2. Etapa 2: Análisis de elementos finitos	23
4.1.3. Etapa 3: Análisis de movimiento	25
4.1.4. Etapa 4: Prototipo 3D	26
4.1.5. Etapa 5: Impresión del prototipo 3D	28
4.1.6. Etapa 6: Ensamble de las bobinas	29
4.1.7. Etapa 7: Ensamble del sistema	30
4.2. Diseño del sistema eléctrico	31
4.2.1. Etapa 1: Diseño del convertidor reductor (Buck)	31
4.2.2. Etapa 2: Simulación del circuito	32
4.2.3. Etapa 3: Diseño de PCB	34

4.2.4.	Etapa 4: Implementación de la PCB	36
4.3.	Diseño para la generación del campo magnético	38
4.3.1.	Etapa 1: Parámetros de la simulación	38
4.3.2.	Etapa 2: Simulación del campo magnético	43
5.	Resultados	45
5.1.	Pruebas del sistema previo a los sistemas de control	45
5.2.	Sistema mecánico y auto ajuste	46
5.3.	Variación del campo magnético con respecto a la corriente	51
5.4.	Generación de campo magnético	58
5.5.	Afectación de los cambios en las variables	61
6.	Impactos	62
6.1.	Impacto científico	62
6.2.	Impacto tecnológico	62
6.3.	Impacto social	62
6.4.	Impacto económico	63
6.5.	Consideraciones éticas	63
6.6.	Productos logrados	63
7.	Conclusiones	63
	Bibliografía	65

1. Glosario

Tabla 1: Glosario

Acrónimo	Definición
CC	Corriente continua
CA	Corriente alterna
PWM	pulse-width modulation
PLA	Acido Poliláctico
FEA	Finite Element Analysis
CAD	Diseño asistido por computadora
PCB	Placa de circuito impreso

2. Introducción

La presente investigación refiere a los métodos para la generación de campos magnéticos constantes y homogéneos. Existen diferentes fuentes de campos magnéticos constantes, como imanes permanentes [1], un campo eléctrico que cambia linealmente con el tiempo o mediante una corriente directa [2]. Mediante el uso de un par de bobinas con igual número de vueltas y separadas una distancia igual a su radio, conocidas en la literatura como bobinas de Helmholtz [3] es posible generar campos magnéticos homogéneos. La característica principal de estos sistemas es su homogeneidad en el flujo magnético cuando la distancia que separa las bobinas que generan el campo magnético es igual al radio de las bobinas [4].

Debido a estas propiedades, los arreglos de bobinas de Helmholtz son una excelente opción para calibrar sensores de campo magnético. Sin embargo, implementar un arreglo de bobinas de Helmholtz que cumpla estas propiedades de manera exacta no es posible. Durante el proceso de fabricación de las bobinas no es posible realizar dos bobinas que sean exactamente iguales, además, durante el proceso de montaje para las pruebas de calibración de los sensores diversos factores pueden influir en los resultados como los elementos que se utilizan para determinar la distancia de separación entre las bobinas para ajustar la distancia óptima, el error humano al momento de posicionar los elementos en el espacio, entre otros [5].

Por ley de Ampère es posible determinar que cuando existe una trayectoria cerrada hecha de un material conductor a través del cual fluye una corriente, el campo magnético será igual en cualquier parte de la trayectoria [6]. Cuando hay dos bobinas, que son conductores cerrados enfrentados entre sí, separados a una distancia igual a su radio y con un flujo de corriente en el mismo sentido a través de los dos, el valor del campo magnético debe ser homogéneo en el centro del montaje [7].

Mediante simulaciones es posible determinar el campo magnético total generado teniendo en cuenta factores como el flujo magnético, la corriente, el diámetro de las bobinas, el voltaje, el número de vueltas de cada bobinado que es proporcional a su peso, entre otros. Estas simulaciones pueden realizarse en plataformas como *Matlab* [8], o mediante programas de elemento finito como *ANSYS* [9] o *software COMSOL multiphysics* [10]. En este proyecto de investigación se realizarán simulaciones para determinar los parámetros de diseño bajo los cuales se estará desarrollando el montaje; con estos valores se desarrollará el diseño asistido por computadora (*CAD*) para analizar el montaje mecánico y posteriormente el montaje físico. También es posible determinar los elementos que se requerirán como el voltaje y corriente de la fuente de alimentación y los actuadores que se utilizarán para el desarrollo de este sistema. En este caso se busca que el sistema tenga la autonomía para ser operado en múltiples ubicaciones.

Es importante comprobar que los sistemas de generación funcionen como lo establece la teoría que lo respalda. La comprobación de los sistemas se puede hacer de la siguiente manera: el espacio entre las dos bobinas se puede ver como un cubo, el cual se divide en 27 puntos como se ve en la Figura 1. El sensor se desplazará por todos los puntos para determinar el valor del campo magnético en cada caso y se espera que en los puntos de color naranja el valor del campo sea homogéneo [11].

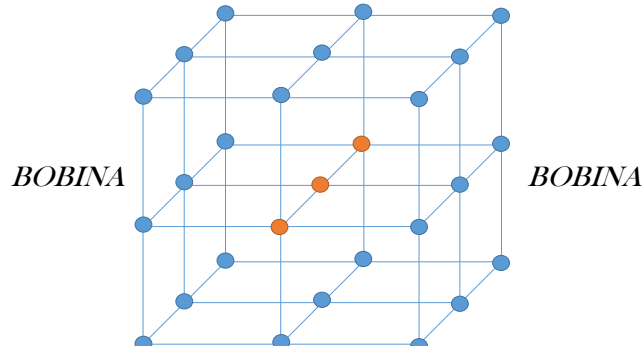


Figura 1: Calibración del sistema.

La finalidad de este trabajo es el desarrollo de un sistema ajustable que sea capaz de generar un campo constante y homogéneo de forma automática.

En la Tabla 2 se muestran algunos proyectos donde se utilizan bobinas de Helmholtz, así como su aporte y aplicación. Es importante mencionar que en todos los trabajos descritos en la Tabla 2 el posicionamiento del sensor se realiza de forma manual por parte del usuario, lo que da como resultado errores de posicionamiento. Debido a lo anteriormente mencionado, la aportación de esta investigación será buscar minimizar este tipo de errores.

Tabla 2: Listado de proyectos basados en arreglos de bobinas de Helmholtz.

Ref.	Aporte	Aplicación
[12]	Desarrollo de un sistema de actuación electromagnética con bobinas de Helmholtz para micro robot en forma de espiral.	Manipulación de micro robot como agente terapéutico para fármacos activos.
[13]	Utilización de bancos de condensadores para reducir las pérdidas de potencia en las bobinas de Helmholtz.	Diseño de bobinas de Helmholtz para medir los diferentes parámetros de la bobina.
[14]	Validación del modelo de forma homogénea y no homogénea de los campos magnéticos.	Validación de una sonda de campo magnético isotrópica de tres ejes con bobinas de Helmholtz.
[15]	Diseño de un sistema en 3D de bobinas de Helmholtz para generar un campo constante en cualquier dirección.	Caracterización de sondas Hall 3D en función de la orientación de campo medido.
[16]	Generación de campo magnético de hasta 50 mT con una precisión angular de 0.2 mrad.	El diseño de un sistema en 3D de bobinas de Helmholtz para generar un campo constante en cualquier dirección de hasta 50 mT para las sondas producidas por ALBA Synchrotron.

Dentro de los diferentes trabajos que se muestran en la Tabla 2, se presentan los diferentes proyectos en los cuales se aplican sistemas de bobinas de Helmholtz, los cuales permiten realizar diferentes actividades como por ejemplo: manipular micro robots como uso de agentes terapéuticos para fármacos activos; en este caso se tiene un sistema de bobinas de Helmholtz en 3 dimensiones, y se varían los diferentes parámetros.

En la Tabla 3 se recompilan algunos valores encontrados en la literatura de diferentes bobinas de Helmholtz que describen su geometría y la densidad de flujo que pueden generar.

Tabla 3: Valores de variables físicas de sistemas de bobinas encontrados en trabajos relacionados.

Referencia	Radio (mm)	N. Vueltas	Densidad de flujo (mT)	Corriente (A)	Voltaje (V)
[12]	195.00	556	2.560	//	//
[13]	145.00	//	22.000	40.71	500
[14]	300.00	132	0.397	1.00	//
[15]	125.71	304	5.000	2.30	5.3
[15]	175.89	418	5.000	2.30	10
[15]	236.59	572	5.000	2.30	19
[16]	125.74	304	4.996	2.30	//
[16]	172.84	418	4.997	2.30	//
[16]	236.54	572	4.998	2.30	//

2.1. Justificación

Los campos magnéticos están presentes en múltiples lugares, desde el campo magnético terrestre hasta aplicaciones modernas en medicina como el control de micro robots que se utilizan dentro del cuerpo humano [12], caracterización de propiedades físicas del hueso [17], resonancia magnética para monitorizar respuestas terapéutica [18]. Otra de las aplicaciones está presente en las comunicaciones inalámbricas de corto alcance [19], también es utilizado para la aceleración de partículas [20], en calibración de sensores [21], campos magnéticos residuales donde se requiere desmagnetización [22], entre otras múltiples áreas. Para cada aplicación se requiere de una calibración previa de los diferentes instrumentos que se utilizan, como sensores de campo magnético.

La generación de estos campos magnéticos de referencia para la calibración de sensores, se puede realizar mediante diferentes técnicas como por ejemplo las bobinas de Helmholtz [13]. La calibración de estos sensores se puede realizar en el intervalo de 1 a 20 mili Teslas (mT) gracias a la linealidad del campo [23]. Con este campo es posible caracterizar sensores que posteriormente serán utilizados en el sector automotriz, metal-mecánico, agroalimentario, minero, entre otros. Esta calibración esta sujeta a los errores humanos [5], como el error de posicionamiento del sensor. se requiere desarrollar un sistema de generación de campo magnético homogéneo que elimine los errores humanos de posicionamiento, porque se necesita que el campo de referencia en las calibraciones de sensores usados en las diferentes industrias sea constante.

2.2. Descripción del problema

En las diferentes situaciones en las que se debe realizar la calibración de sensores de campo magnético, usando bobinas o arreglos de bobinas para generar el campo magnético, la repetibilidad de las mediciones se ve afectada por la posición del sensor y las bobinas, ya que pequeños cambios en la posición generan cambios en la uniformidad del campo magnético [24]. Otro factor que in-

fluye dentro de la generación de campos magnéticos es la variabilidad de la corriente que fluye por la bobina. La calibración de los sensores de campo magnético se puede realizar mediante un arreglo de bobinas de Helmholtz debido a que generan una región de campo magnético uniforme. Sin embargo, el valor del campo generado se puede ver afectado por los defectos de fabricación de las bobinas. [14, 15]. Es requisito del sistema de calibración generar un campo magnético estable y uniforme.

Es necesario determinar si mediante el uso de sistemas de posicionamiento auto ajustables es posible encontrar el máximo local en el centro de un arreglo de bobinas de Helmholtz, el cual puede minimizar el error de posicionamiento manual realizado por un operario. Donde a su vez el control de la corriente eléctrica permita mantener su amplitud dentro de límites aceptables, que aseguren la estabilidad del campo magnético.

2.3. Hipótesis

Mediante el desarrollo de un sistema de generación de campo magnético, con base en la teoría que describe el principio de arreglos de bobinas de Helmholtz, que incorpore dos sistemas de control independientes, para corriente y posición, se minimizaran hasta en un 75 % las anomalías en la generación de campo magnético debidas a los defectos de fabricación y montaje de las bobinas y a la dispersión y error de la fuente que las alimenta.

2.4. Objetivo general

Desarrollar un sistema de generación de campo magnético, basado en bobinas de Helmholtz, que incorpore sistemas de control de corriente y posición de manera independiente, para disminuir el error de campo magnético generado.

2.5. Objetivos particulares

1. Diseñar el sistema mecánico y determinar los parámetros óptimos del arreglo de bobinas de Helmholtz y del sistema de ajuste de posición de las bobinas, para generar campos magnéticos homogéneos que puedan ser usados en la calibración de sensores de flujo magnético de efecto Hall.
2. Implementar el sistema mecánico y eléctrico de las bobinas de Helmholtz que permita disminuir las anomalías en la generación de campo magnético debidas a los defectos de fabricación y montaje de las bobinas.
3. Diseñar e implementar el control de posición y campo magnético del arreglo de bobinas de Helmholtz que permita minimizar hasta en un 75 % las anomalías en la generación de campo

magnético debidas a los defectos de fabricación y montaje de las bobinas y a la dispersión y error de la fuente que las alimenta.

4. Comprobar la hipótesis.

3. Fundamentación teórica

3.1. Campos magnéticos

Con el paso del tiempo la letra mediante la cual se han representado los campos magnéticos es \mathbf{B} y es la notación que se utilizará durante este trabajo. También se sabe que es posible representar los campos magnéticos de forma gráfica utilizando líneas de campo magnético, Por otro lado, es posible determinar la dirección del campo magnético \mathbf{B} mediante el uso de una brújula colocada en la posición donde se desea determinar la dirección y observando hacia donde apunta la aguja que esta posee [6]. Es posible decir que se presenta una fuerza \mathbf{F}_B , sobre una partícula cargada con carga q que se mueva con velocidad \mathbf{v} , debido a la presencia de un campo magnético \mathbf{B} . Esto se puede resumir en una expresión vectorial quedando como se muestra en la Ecuación (1) [6].

$$\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

Mediante el uso de la regla de la mano derecha es posible determinar la dirección del producto vectorial $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ y la dirección de \mathbf{F}_B , donde θ) es el ángulo entre la dirección del campo magnético y la velocidad. Además es posible determinar que la magnitud de la fuerza magnética esta representada por la Ecuación (2).

$$\mathbf{F}_B = |q|\mathbf{v}\mathbf{B} \sin(\theta) \quad (2)$$

De donde se puede decir que la unidad del campo magnetico esta dada por newton por coulombmetro por segundo, lo que es mejor conocido como **tesla** (T) como se ve en la Ecuación (3) [25].

$$1 T = 1 \frac{N}{C.m/s} \quad (3)$$

3.1.1. Ley de Biot-Savart

Posteriormente a que se determinara que la aguja de una brújula puede ser alterada mediante el uso de un conductor eléctrico que tenga corriente a través de el, se empiezan a realizar experimentos con respecto a la fuerza ejercida por corrientes eléctricas sobre algún imán, donde llegan a múltiples conclusiones teniendo en cuenta lo siguiente: Desde un punto P el campo magnético $d\mathbf{B}$ asociado a un elemento que tenga una longitud $d\mathbf{s}$ de un material conductor a través del cual fluya una corriente I se podrá expresar mediante la Ecuación (4) [6, 25].

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

Donde μ_0 es la permeabilidad del espacio libre que es igual a: $4 \pi \times 10^{-7} T.m/A$.

Se evidencia que con la Ecuación (4) se obtiene el campo magnético en un elemento de longitud ds , pero para tener el valor total del campo magnético \mathbf{B} es necesario sumar la totalidad de los elementos que la componen dando como resultado la Ecuación (5).

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (5)$$

Es importante dejar en claro que la integral se realiza entre un producto vectorial. Es importante notar que la magnitud del campo será proporcional a la corriente y disminuye con respecto a la distancia perpendicular entre el material por el cual fluye la corriente I y un punto P en el espacio a esta distancia se le llamará a , como se observa en la Figura 2.

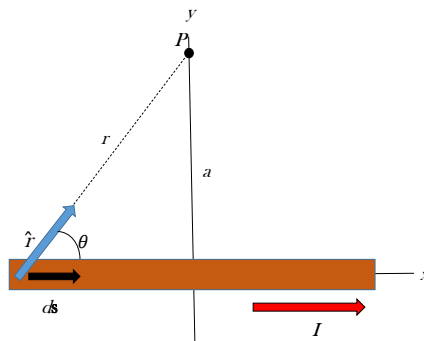


Figura 2: Flujo de corriente.

Teniendo en cuenta el análisis del producto cruz y el correspondiente análisis matemático se puede decir que el campo magnético de un alambre recto, a una distancia a del alambre, por el cual circula una corriente I , se puede expresar como la Ecuación (6) [6].

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (6)$$

3.1.2. Ley de Ampère

Cuando existe una trayectoria cerrada hecha por un material conductor a través del cual fluye una corriente I , se puede decir que por simetría la magnitud de \mathbf{B} será igual en cualquier parte de la trayectoria circular centrada sobre el alambre. Se debe tener en cuenta que si se modifica la corriente que fluye a través del material o la distancia desde donde se mide el campo magnético con respecto al alambre, el campo medido varía ya que el campo es directamente proporcional a la corriente e inversamente proporcional a la distancia. Al evaluar el producto de $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ como lo muestra la Ecuación (7)

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (7)$$

Sabiendo que campo es igual a la Ecuación (6) y que $\oint ds = 2\pi r$ se puede decir que la integral lineal de $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ a través de cualquier trayectoria cerrada se puede expresar como la Ecuación (8)[6].

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I \quad (8)$$

3.2. Bobinas de Helmholtz

Las bobinas de Helmholtz consisten en un par de bobinas con el mismo radio, mismo número de vueltas, mismo sentido de circulación de la corriente. Ubicadas de forma paralela, donde la distancia que las separa es igual al radio de las bobinas. Esta configuración es utilizada para la generación de campos magnéticos uniformes y estables, lo cual permite la aplicación de la ley de Biot-Savart para su solución, en este caso es posible genera un campo magnético por la corriente que circula a través del embobinado [26, 27].

Para calcular el campo magnético generado en una corriente rectilínea se utiliza la siguiente ecuación:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{r}' \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \quad (9)$$

Para solucionar la ecuación de Biot-Svart se debe tomar en cuenta las variables mostradas en la figura 3 para una espira se tiene que tener en cuenta las siguientes consideraciones.

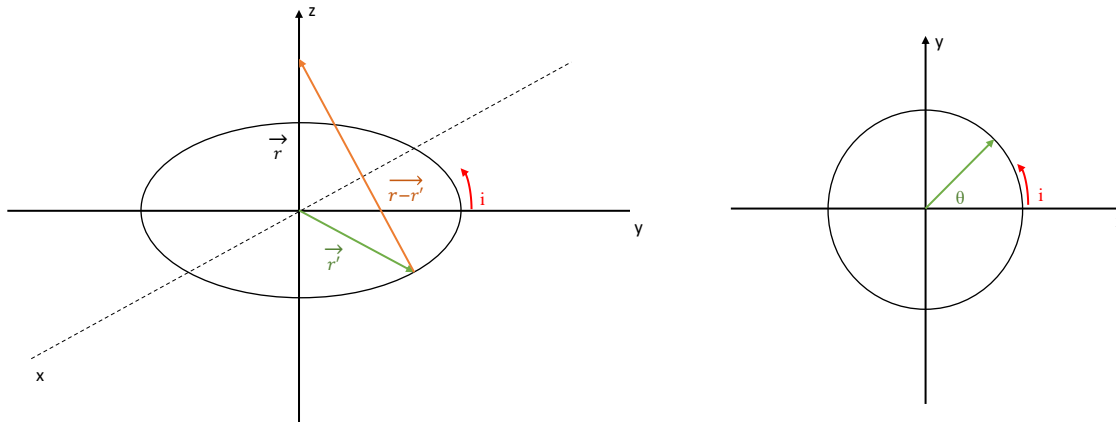


Figura 3: Biot-savart para una espira.

Donde se tienen los siguientes valores:

- r : Vector de posición del punto donde se va a calcular el campo.
- r' : Posición de un punto arbitrario sobre la distribución de corriente.

Ahora se necesita realizar las siguientes definiciones para la ecuación (9), se debe definir dr' , $r - r'$, $|r - r'|^3$. Para lo que se realizan las siguientes ecuaciones.

$$\vec{r} = Z\hat{k} \quad (10)$$

$$\vec{r}' = R \cos \theta \hat{i} + R \sin \theta \hat{j} = R(\cos \theta \hat{i} + \sin \theta \hat{j}) = R\hat{r}' \quad (11)$$

$$d\vec{r}' = -R \sin \theta d\theta \hat{i} + R \cos \theta d\theta \hat{j} = Rd\theta(\cos \theta \hat{j} - \sin \theta \hat{i}) = Rd\theta\hat{\theta} \quad (12)$$

Se empieza calculando $r - r'$.

$$\vec{r} - \vec{r}' = Z\hat{k} - R\hat{r}' \quad (13)$$

Posteriormente se procede a calcular $|r - r'|$ de la siguiente manera

$$|\vec{r} - \vec{r}'| = \sqrt{Z\hat{k} - R\hat{r}'} = (Z^2 + R^2)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

De igual manera se debe calcular $|r - r'|^3$

$$|\vec{r} - \vec{r}'|^3 = \left(\sqrt{Z\hat{k} - R\hat{r}'} \right)^3 = (Z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}} \quad (15)$$

Se calcula el $d\vec{r}' \times r - r'$.

$$d\vec{r}' \times \vec{r} - \vec{r}' = Rd\theta\hat{\theta} \times (Z\hat{k} - R\hat{r}') = RZd\theta\hat{r}' + R^2d\theta\hat{k} \quad (16)$$

Reemplazando las definiciones en la ecuación (9) se obtiene que:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{RZd\theta\hat{r}' \times R^2d\theta\hat{k}}{(Z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (17)$$

Resolviendo la ecuación 17 dando como limites a la integral cerrada entre 0 y 2π se obtiene el resultado mostrado en la siguiente ecuación:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I R^2}{2(Z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \hat{k} \quad (18)$$

La ecuación (19) es posible anexarle las siguientes conclusiones:

- Aplica para cualquier punto en el eje Z
- En $Z=0$ la solución depende proporcionalmente de la corriente e inversamente proporcional al radio de la bobina

En la Figura 4 es esquema de como sería el montaje de las bobinas Helmholtz, es posible aclarar que existen otras configuraciones, en este caso específico se busca la generación de un campo uniforme en el eje x.

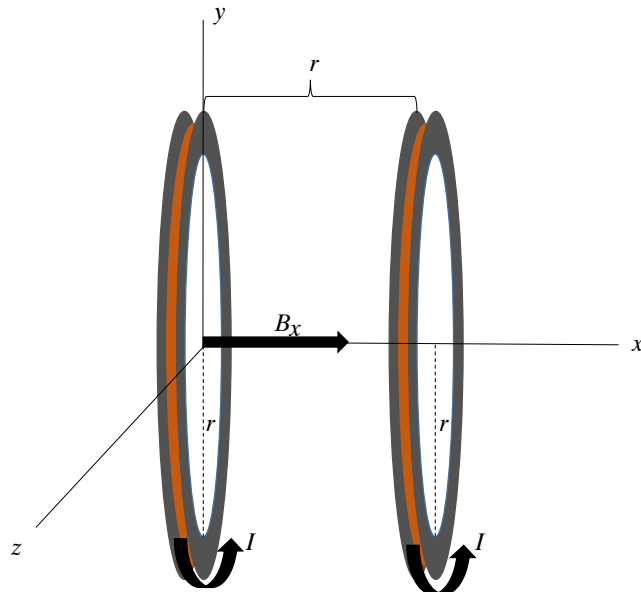


Figura 4: Bobinas Helmholtz.

Teniendo en cuenta la ecuación (19) y la figura 4 se puede resolver de la siguiente forma como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\vec{B}_p = \frac{\mu_0 I N}{\frac{5}{4} \frac{3}{2} R} \hat{k} \quad (19)$$

- B_p = Es el campo generado en un punto p ubicado en $R/2$
- m = La permeabilidad del espacio libre
- R = Radio de las bobinas

3.2.1. Errores de fabricación

Dentro de las bobinas de Helmholtz existen algunos errores de fabricación, como las rotaciones [28] que se generan como se muestra en la figura 5.

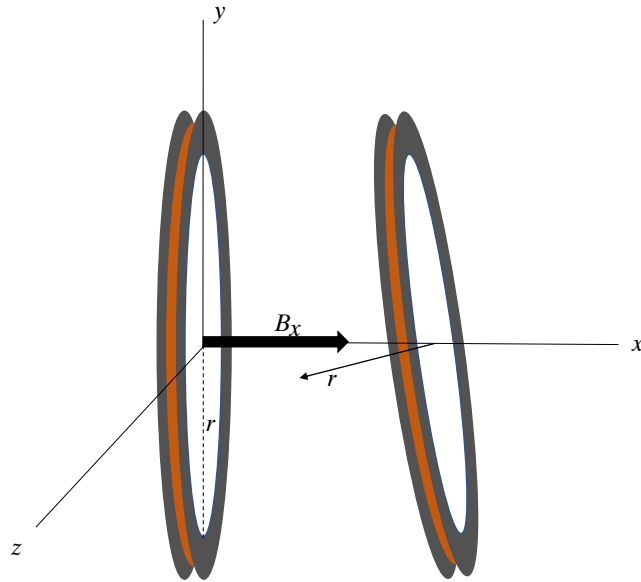


Figura 5: Bobinas Helmholtz defecto de fabricación de rotación.

También se debe tener en cuenta que se pueden tener diferentes tipos de embobinados, lo que puede generar diferentes magnitudes de campo magnético [28], algunos de las posibilidades se ven en la figura 6.

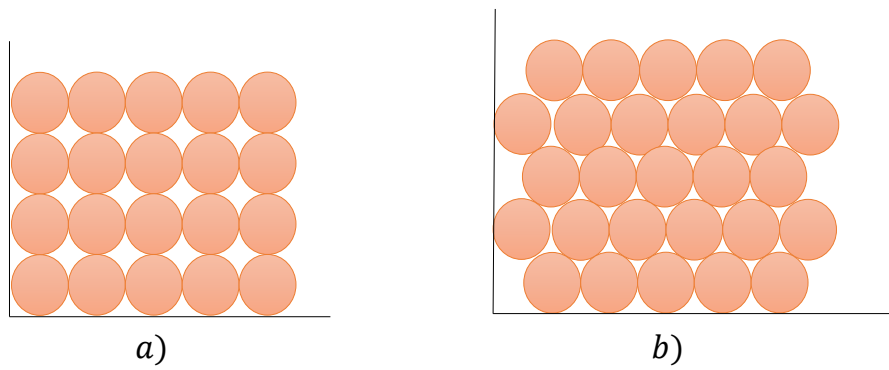


Figura 6: Bobinas Helmholtz defecto de fabricación por enrollado.

3.3. Mecanismos

Los mecanismos se pueden definir como una parte mecánica de una máquina, la cual se encarga de transmitir la fuerza o el movimiento de una fuente de potencia a uno de los puntos de salida de la máquina. Un mecanismo cuenta con una serie de partes individuales, las cuales se pueden definir como eslabones. Una unión es donde se encuentran las conexiones móviles entre eslabones y en la parte final del mecanismo se encuentra el actuador que es el punto donde se impulsa el mecanismo completo. Existen varias formas de realizar estos mecanismos como se muestra a lo largo del capítulo [29, 30].

3.3.1. Engranés

La función general de los engranes es la transmisión del movimiento desde un eje giratorio hasta otro. Además de la transmisión de movimiento, también se utilizan para variar la velocidad del sistema o cambiar la dirección del movimiento de un eje con respecto al otro. En la figura 7 se muestra un conjunto de engranes [29, 30].

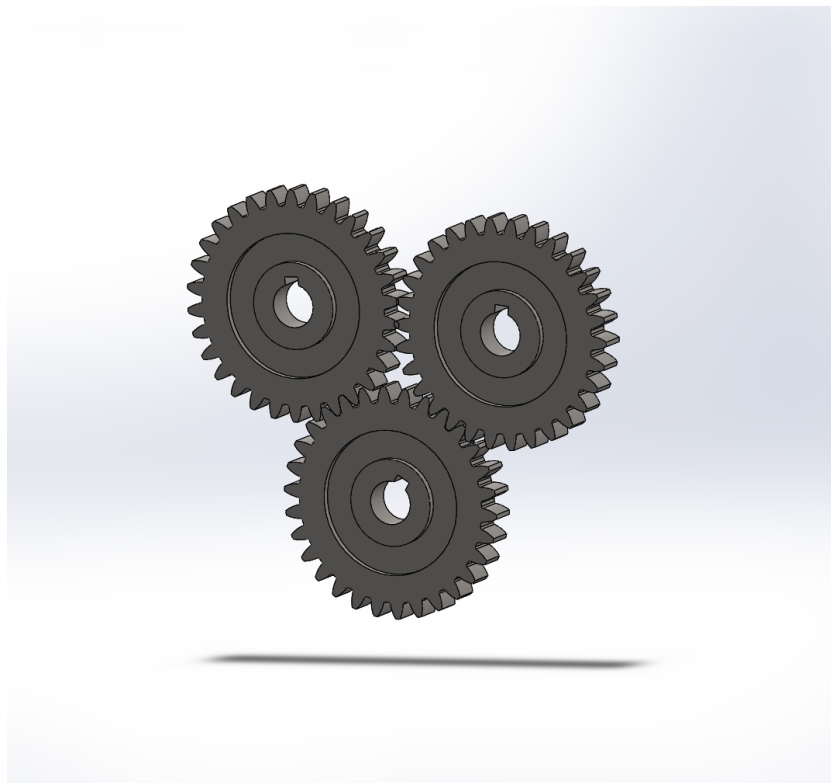


Figura 7: Engranés.

Existen varios tipos de engranes:

- Engranés rectos

- Cremallera
- Engranés internos o anulares
- Engranés helicoidales
- Engranés de espina de pescado
- Engranés cónicos
- Engranés inglete
- Tornillo sin fin

Existen varias características que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar un engrane como las que se mencionan a continuación: adendo, dededo, ancho de cara, paso circular, paso diámetro, espesor del diente, radio de punta, radio de filete. Definiendo los parámetros mencionados anteriormente es posible realizar el diseño y los cálculos correspondientes a cada engrane [29, 30].

El tornillo sin fin, el cual se muestra en la figura 8, permite transmitir el movimiento entre ejes que no sean paralelos, además, que no se intersectan. Este tipo de engranes presentan un diente en forma de espiral al rededor de un cilindro; por sus dimensiones, a este diente también se conoce como cuerda.

Los tornillo sin fin comúnmente son fabricados con una, dos o hasta cuatro cuerdas, de manera tal que el número de cuerdas (dientes) es una propiedad importante. Además, son un mecanismo auto bloqueante [29, 30].

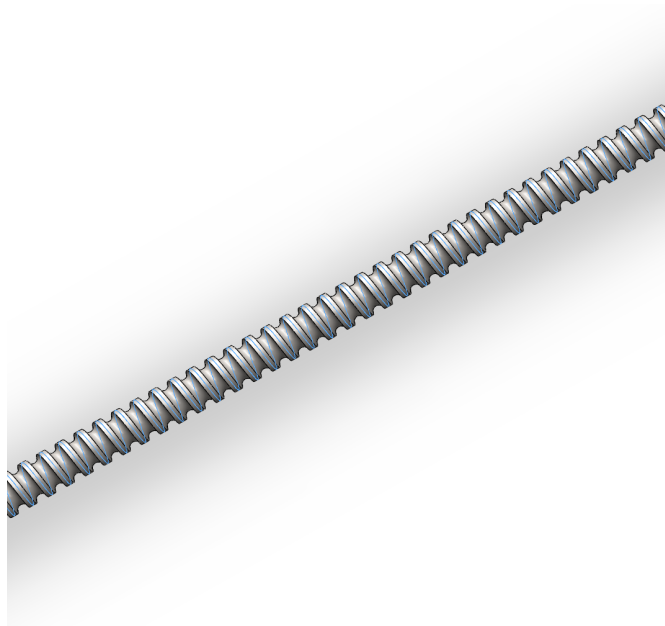


Figura 8: Eje roscado.

3.3.2. Correas

Una de las principales funciones de este tipo de transmisión, conocida como de correa o de cadena, es transmitir la potencia entre los ejes que giran. Este tipo de transmisiones son conocidas comúnmente como transmisiones flexibles. Presentan una cierta cantidad de comparaciones con respecto a los engranes como las siguientes:

- Un menor costo con respecto a los engranes
- Es posible variar la distancia al centro de los ejes
- Menor ruido a grandes velocidades
- No requiere lubricación
- Presentan sencillez para su ensamble e instalación además, de sus flexibles tolerancias
- Tienen absorción en cargas de choque

Existen varios tipos de correa que están disponibles de forma comercial, por ejemplo: correa plana, correa en V, correa en V múltiple, correa corrugada, correa de distribución, etc., [29, 30].

3.4. Convertidores de modo de conmutación CC-CC

Los convertidores en CC-CC han tenido una amplia aplicación en múltiples sistemas de suministro de energía CC regulada. Como se muestra en la figura 9, se tiene una entrada de voltaje CA la cual se rectifica y se genera una fuente de CC no regulada, posteriormente se le aplica una señal de control para obtener finalmente una fuente de CC regulada a un nivel de voltaje o de corriente deseado.

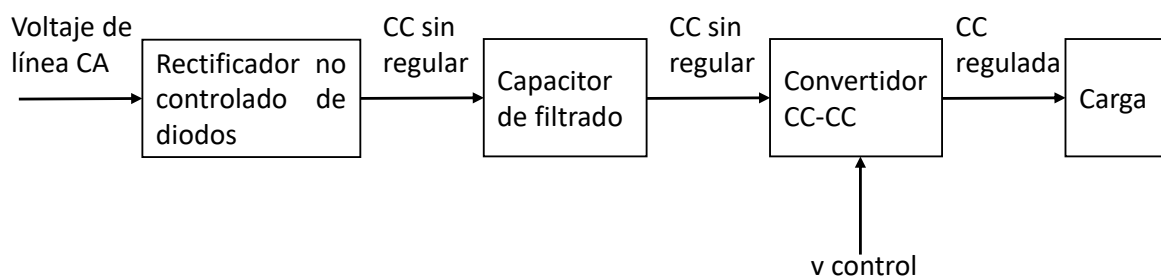


Figura 9: Sistema convertidor CC-CC

Dentro de este tipo de convertidores CC-CC se tienen algunas convertidores sin aislamiento eléctrico como los que se nombran a continuación.

- Convertidor reductor (buck)
- Convertidor elevador (boost)
- Convertidor reductor/elevador (buck-boost)
- Convertidor Cúk
- Convertidor de puente completo

3.4.1. Control de convertidores CC-CC

En los convertidores de CC-CC es necesario realizar el control del del voltaje a la salida para obtener un voltaje de salida deseado. En la figura 10a, se muestra un esquema simplificado de un convertidor CC-CC básico.

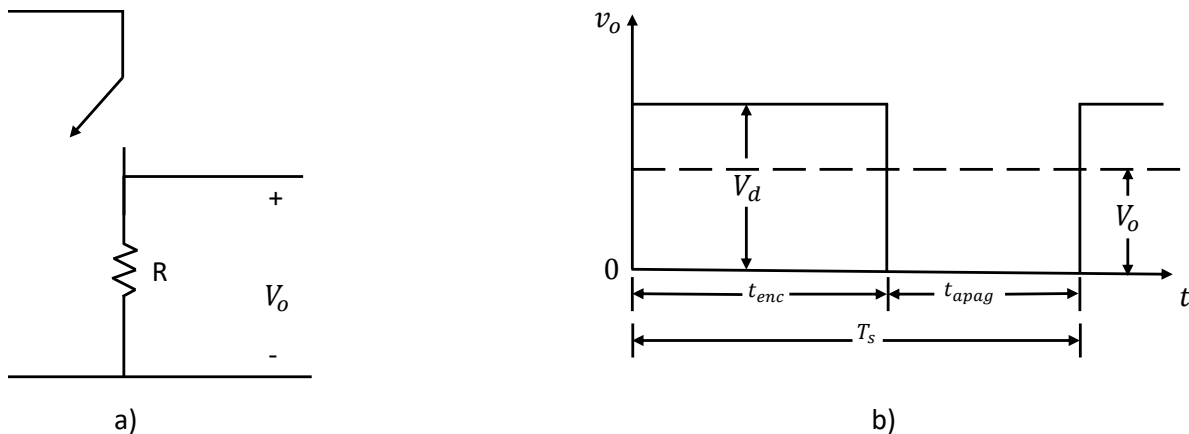


Figura 10: Conversor CC-CC simplificado.

En este caso para el convertidor CC-CC con un voltaje de entrada fijo, el voltaje a la salida del sistema sera equivalente al voltaje medio mediante el control de los tiempos de apagado y encendido (t_{enc} y t_{apag}). Como se ve en la figura 10b, se tiene un T_s que es el periodo de conmutación completa el cual es equivalente a la suma de $t_{enc} + t_{apag}$. Dando como resultado el valor de V_o . La modulación de esto se logra mediante el encendido y el apagado del interruptor mostrado en la figura 10a. Este metodo es conocido como conmutación por modulación por ancho de pulso (por sus sigas en ingles *pulse – widthmodulation*, PWM). La relación de trabajo se define como D, la cual representa la proporción del encendido de la conmutación.

Para el control del PWM del interruptor se utiliza un comparador como se muestra en la figura 11a, se tiene un valor de voltaje deseado el cual es comparado contra un voltaje en forma de diente de sierra, todo esto a través de un comparador que permite obtener una señal a la salida de t_{enc} y t_{apag} como se muestra en 11b.

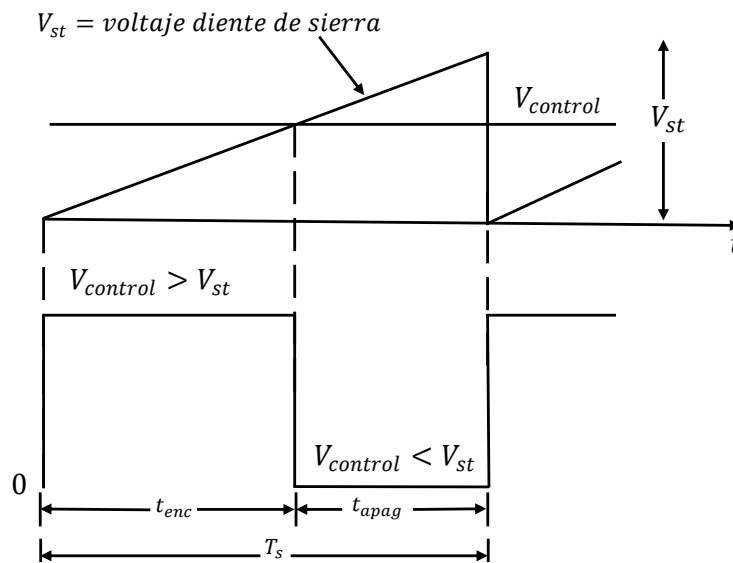
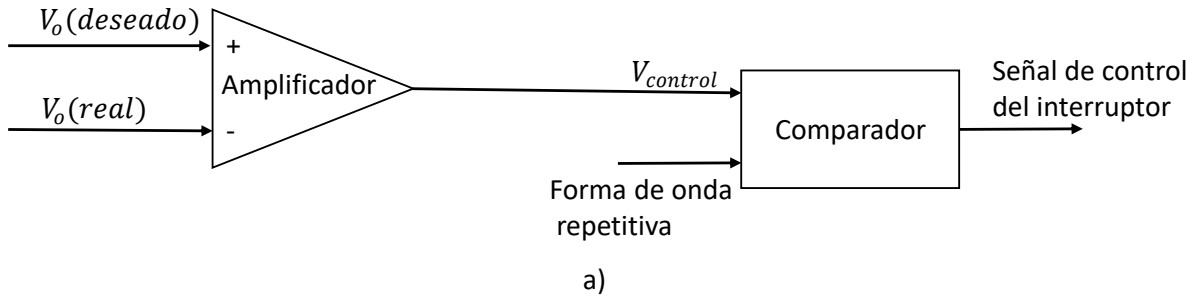


Figura 11: Modulador de PWM.

De donde se puede definir D como se muestra en la siguiente ecuación (20)

$$D = \frac{t_{enc}}{T_s} = \frac{v_{control}}{V_{st}} \quad (20)$$

3.4.2. Convertidor reductor (Buck)

Este tipo de convertidores permite la reducción del voltaje con respecto a la entrada V_d . Algunas de sus principales aplicaciones es la regulación de voltaje en fuentes CC y el control de velocidad en motores.

Como se observa en la figura 12, se ve un circuito simplificado de un convertidor buck, para el análisis del sistema se tiene en cuenta dos estados del interruptor, abierto y cerrado.

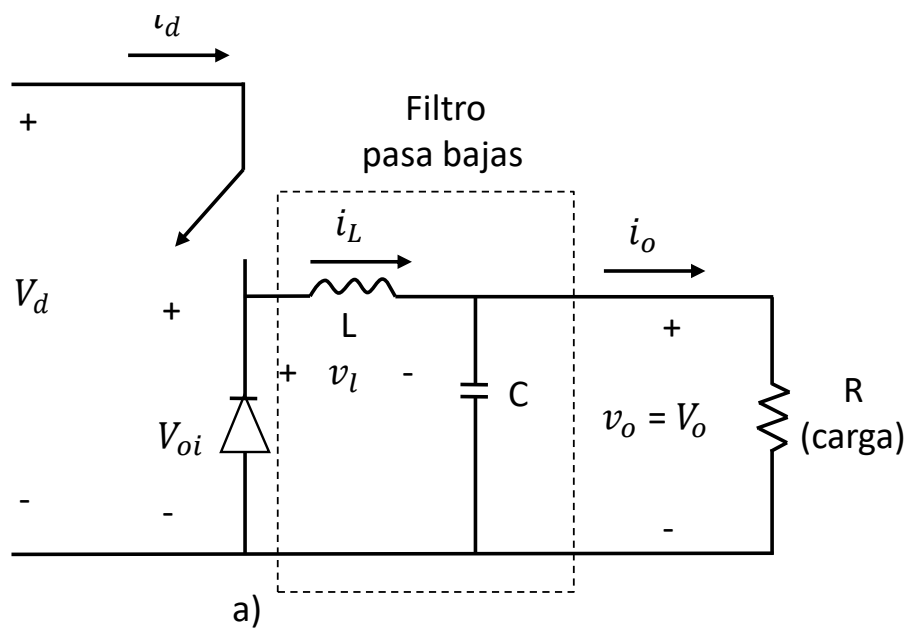


Figura 12: Esquema de convertidor BUCK.

4. Metodología

4.1. Diseño del sistema mecánico

4.1.1. Etapa 1: Diseños mecánicos

Para realizar los diseños mecánicos se tuvieron en cuenta diferentes parámetros, primero hay que tener en cuenta que se cuenta con un espacio de trabajo, el cual es donde se podrá tener un campo magnético uniforme, al realizar un corte transversal a las bobinas para ver la geometría del espacio de trabajo se vería como en la figura 13, [28].

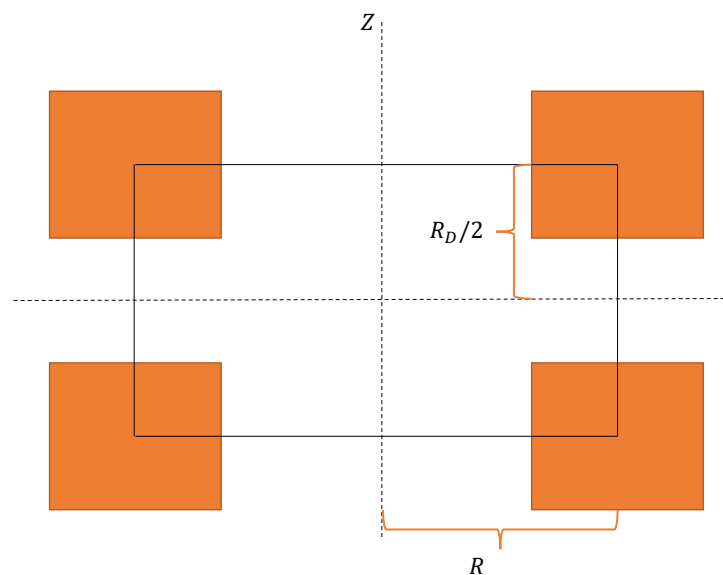
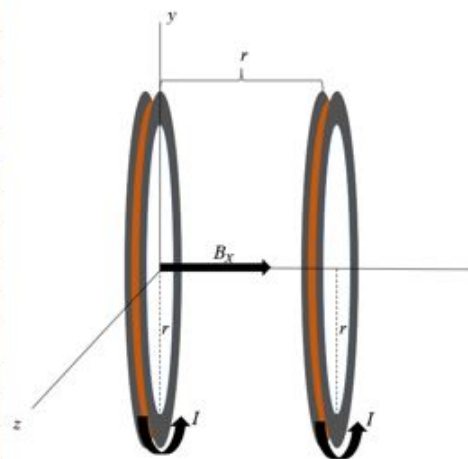


Figura 13: Espacio de trabajo.

Como se observa en la figura 13, si se incrementa mucho la superficie del cobre, representada por el color naranja. Se disminuye el espacio de trabajo. A su vez esto indica que el peso del sistema será mayor.

En este caso se tiene en cuenta la ecuación planteada en el capítulo anterior, para determinar algunos parámetros, como: la corriente, el número de vueltas, el radio de la bobina y el calibre del cobre. Se muestra en la siguiente figura 14

Parámetros que puedes cambiar	Valor	Unidad
Permeabilidad del vacío: μ_0	1.26E-06	(Tm/A)
Número de vueltas: n	400	vueltas
Corriente: I	3	(A)
Radio de la bobina: Ra	0.120 0	(m)
Densidad de flujo generado: B	0.008 992	(T)
	8.991762856	
Resistividad cobre	1.70E-08	(Wm)
Longitud de cable necesario para el devanado	301.593	(m)
Calibre	16	(AWG)
Calibre diámetro	1.290	(mm)
Área transversal	1.31E-06	(m ²)
Resistencia de la bobina	3.917	(W)
Tensión en la bobina	11.751	(V)
Potencia en la bobina	35.254	(VA)
Resistencia de dos bobinas	7.834	(W)
Tensión en las dos bobinas	23.503	(V)
Potencia de las dos bobinas	70.509	(VA)



$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{R_a} \quad (T)$$

Figura 14: Cálculos de las bobinas.

Teniendo en cuenta estos valores seleccionados y la figura 13, se puede determinar los valores del espacio de trabajo como se muestra en la figura 15. Aquí se puede determinar los valores de espacio de trabajo donde se podrán implementar y utilizar los diferentes sistemas.

Diámetro (mm)	Vueltas (n)	Ancho vueltas (mm)	Capas (m)	Altura vueltas (mm)	Total vueltas	Cobre (kg/m ³)	Cobre (m)	Cobre transversal (m ²)	Peso (kg)
1.29	20	25.8	2.58	25.8	0 400	8960	301.59	1.31E-06	3.53

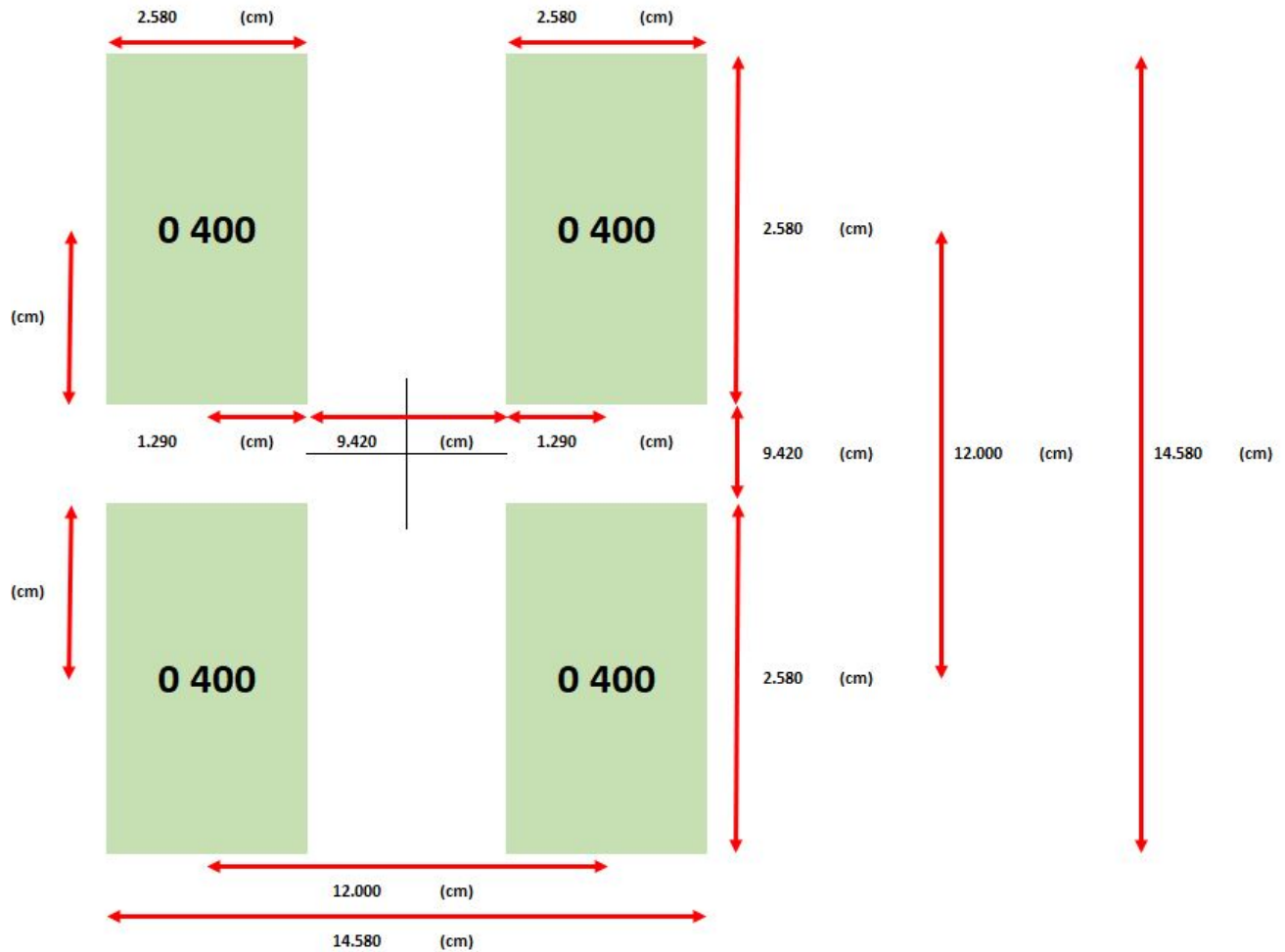


Figura 15: Cálculos de las bobinas, con espacio de trabajo.

Por tal motivo se procede a realizar un par de diseños, mediante los cuales se realizan las pruebas sobre el funcionamiento. el primero se implementa utilizando un sistema de correas, posteriormente se desarrolla un sistema utilizando un tornillo de potencia.

En la figura 16 se utiliza una correa para transmitir la potencia al sistema, en este caso se utilizan dos eje dos ejes laterales que permiten realizar el movimiento del sistema en el eje x.



Figura 16: Sistema de bobinas con correa.

En la figura 17 se utiliza un sistema de tornillo de potencia para transmitir la potencia el mecanismo, en este caso igualmente se tiene un eje central que es el tornillo de potencia, dos guías de eje acerado, unos soportes finales y también se utiliza un motor paso a paso para generar el desplazamiento como en el caso anterior.

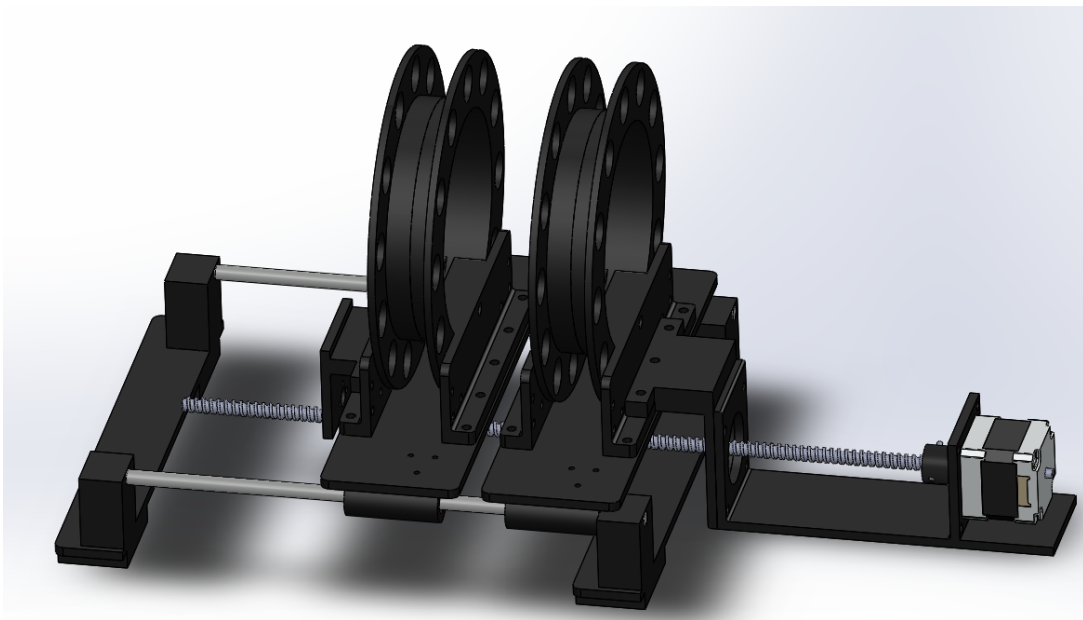


Figura 17: Sistema de bobinas con eje.

Aunque existen varias opciones para el mecanismo es posible determinar que existen ventajas y desventajas de cada uno, para este caso se selecciona el tornillo de potencia, aprovechando que es un mecanismo auto bloqueante, además, de que el no genera interferencia dentro de campo magnético.

4.1.2. Etapa 2: Análisis de elementos finitos

Existen diferentes materiales a través de los cuales se puede implementar estos diseños, para decidir que material se utilizara hay que tener en cuenta diferentes factores como, hay que tener en cuenta factores como sus propiedades magnéticas. Propiedades térmicas tales como: la conductividad térmica, el calor específico, el punto de fusión. Propiedades mecánicas tales como: densidad, dureza, elasticidad.

Es importante destacar que el proceso de mano-factura mediante el cual se implementan los diferentes diseños también, afecta dentro de la selección. Algunos de los métodos de mano-factura que existen son los siguientes:

- Torneado
- Fresado
- Corte láser
- Extrusión
- Inyección

Para este caso se realizara pos extrusión, específicamente mediante la impresión en 3D, para la cual se tienen materiales con algunas características como se muestra en las tablas 4, 6.

Tabla 4: Materiales y características.

Material	Temperatura de impresión (°C)	Temperatura de cama (°C)	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de distorsión (°C,0,45MPa)
3D				
ABS	220-260	110	1.04	78
ABS+	220-260	110	1.06	73
PLA	190-210	25-70	1.24	56
PLA+	205-225	25-70	1.24	54
eABS MAX	200-240	110	1.05	85

Tabla 5: Materiales y características.

Material	Índice de flujo de fusión	Resistencia a la tensión	Porcentaje de ruptura	Modulo de flexión
3D	(g/10min)	(Mpa)	%	(Mpa)
ABS	12(220°C/10Kg)	43	22	2348
ABS+	15(220°C/10Kg)	40	30	2443
PLA	5(190°C/2,16Kg)	65	8	3600
PLA+	2(190°C/2,16Kg)	60	29	3642
eABS MAX	60(220°C/10Kg)	45	30	2400

Teniendo en cuenta los materiales presentados anteriormente y las maquinas disponibles para realizar la impresión 3D. Se selecciona el PLA debido a que es un material termoplástico, compostable de origen natural, sus temperaturas de trabajo, su porcentaje de ruptura. Se procede a crear un análisis de elementos finitos, planteando los puntos de sujeción, las cargas distribuidas, los puntos de apoyo y las cargas puntuales. A continuación se presentan las imágenes de resultados, del análisis de vonMises en la figura 18 y los desplazamientos en la figura 19.

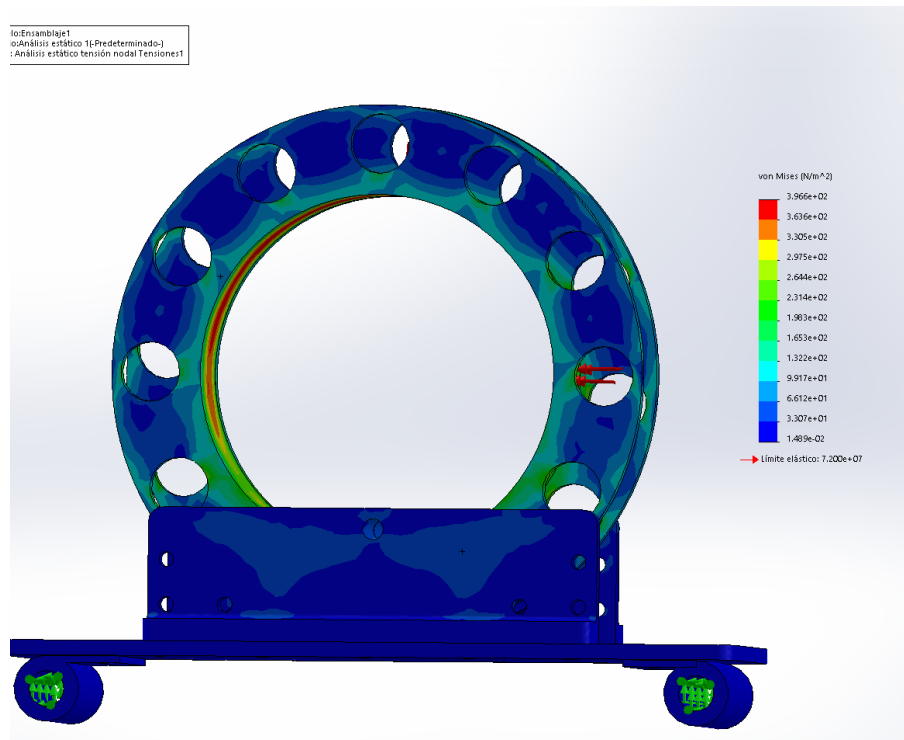


Figura 18: FEA, respuesta de vonMises.

En la figura 18, se ve el análisis de vonMises, el cual muestra las deformaciones de los elementos de la estructura, teniendo en cuenta los valores mostrados en las tablas 4, 6, para el material PLA, se evidencia que aunque existen algunas deformaciones, no son tan significativas.

En la figura 19, se analizan los desplazamientos que existirán dentro del montaje, con un valor máximo de 0.000013 mm, lo que es muy poco influyente dentro del mecanismo, teniendo en cuenta los valores mostrados en las tablas 4, 6, para el material PLA.

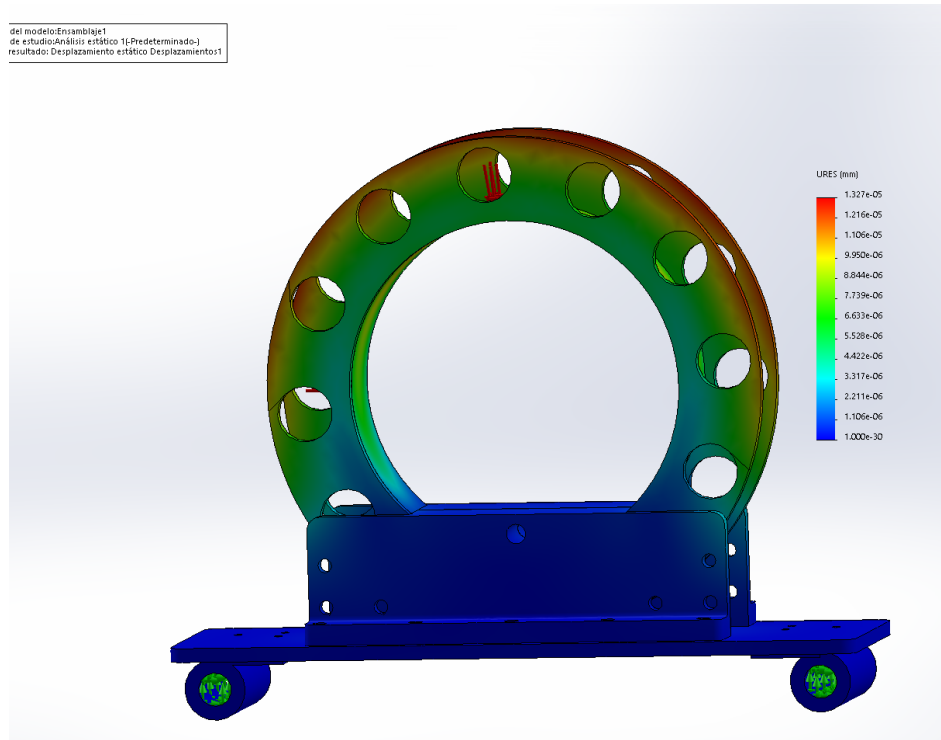


Figura 19: FEA, respuesta de desplazamiento.

4.1.3. Etapa 3: Análisis de movimiento

Para revisar el movimiento del sistema, se determina que ese se realiza en el eje x, a través de un tornillo de potencia desde un motor. Como se muestra en la figura . Donde se corrobora el correcto funcionamiento del sistema.

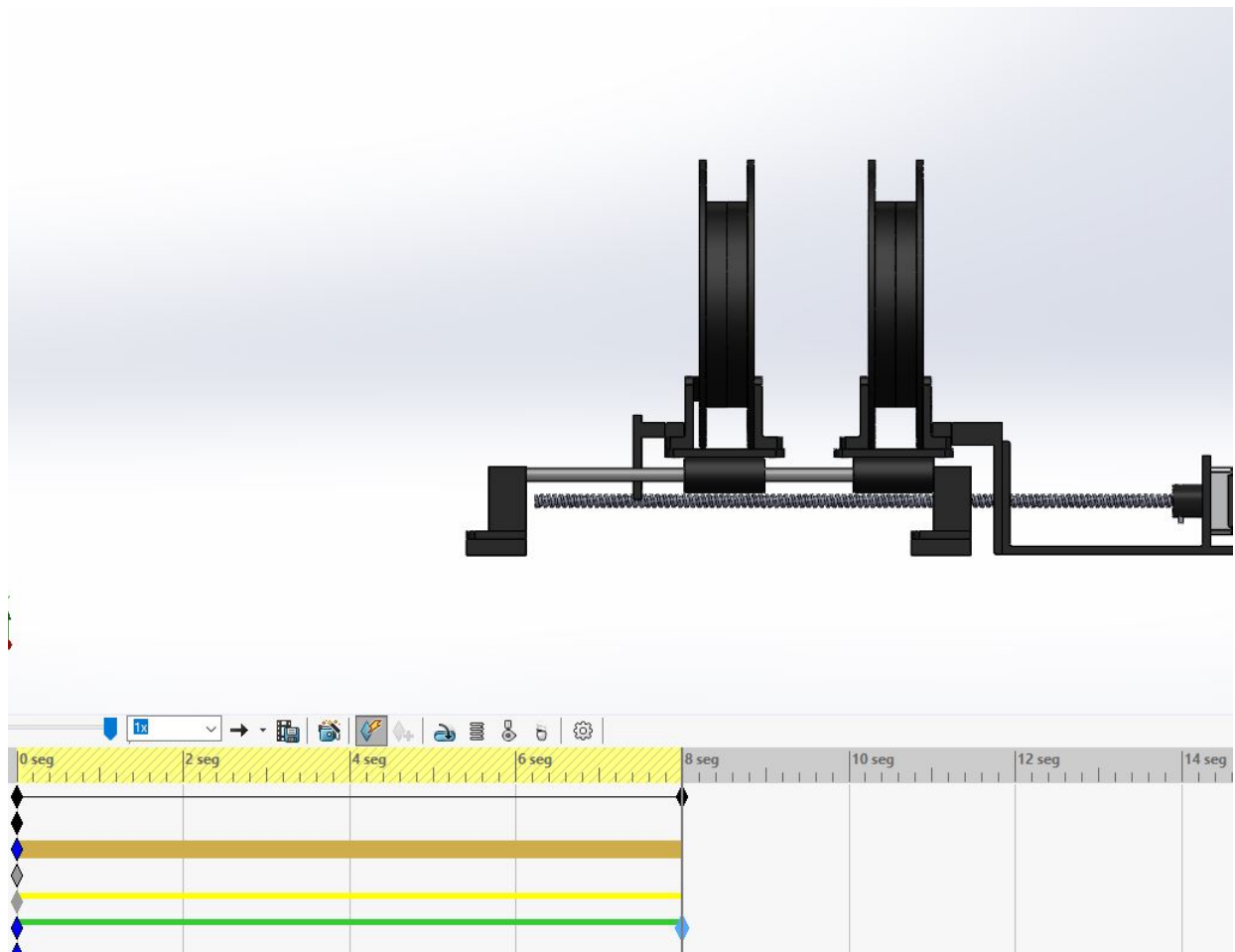


Figura 20: Análisis de movimiento.

Se evidencia el correcto funcionamiento del sistema y que no presenta ninguna restricción que le impida a sistema funcionar de forma adecuada, en el eje x.

4.1.4. Etapa 4: Prototipo 3D

Dentro de esta parte se ven las diferentes piezas que se imprimirán y los parámetros que se tendrán en cuenta para su impresión. Para este caso se utilizara el programa cura *ultimaker*, el cual permite configurar diferentes parámetros para el proceso de impresión, entre los cuales están los siguientes:

- Altura de capa
- Altura de capa inicial
- Ancho de línea
- Grosor de la pared

- Expansión horizontal
- Grosor superior
- Grosor inferior
- Densidad del relleno
- Temperatura de impresión
- Temperatura de la placa de impresión
- Velocidad de impresión
- Velocidad de relleno
- Velocidad de desplazamiento
- Velocidad de capa inicial

Configurando estos parámetros se obtienen los siguientes valores de impresión de tiempo y de cantidad de material.

Tabla 6: Trabajos relacionados.

Pieza	Numero de pieza	Tiempo (m)	Cantidad	Cantidad de material (g)
Unión motor y base	1	111	1	44
Base motor	2	293	1	107
Unión eje	3	86	1	34
Base del sistema	4	413	2	179
Base bobinas	5	309	2	109
Soporte bobina	6	205	4	86
Bobina interior	7	255	2	93
Bobina exterior	8	186	2	68

En la figura 21, se muestran las piezas en el programa para impresión.

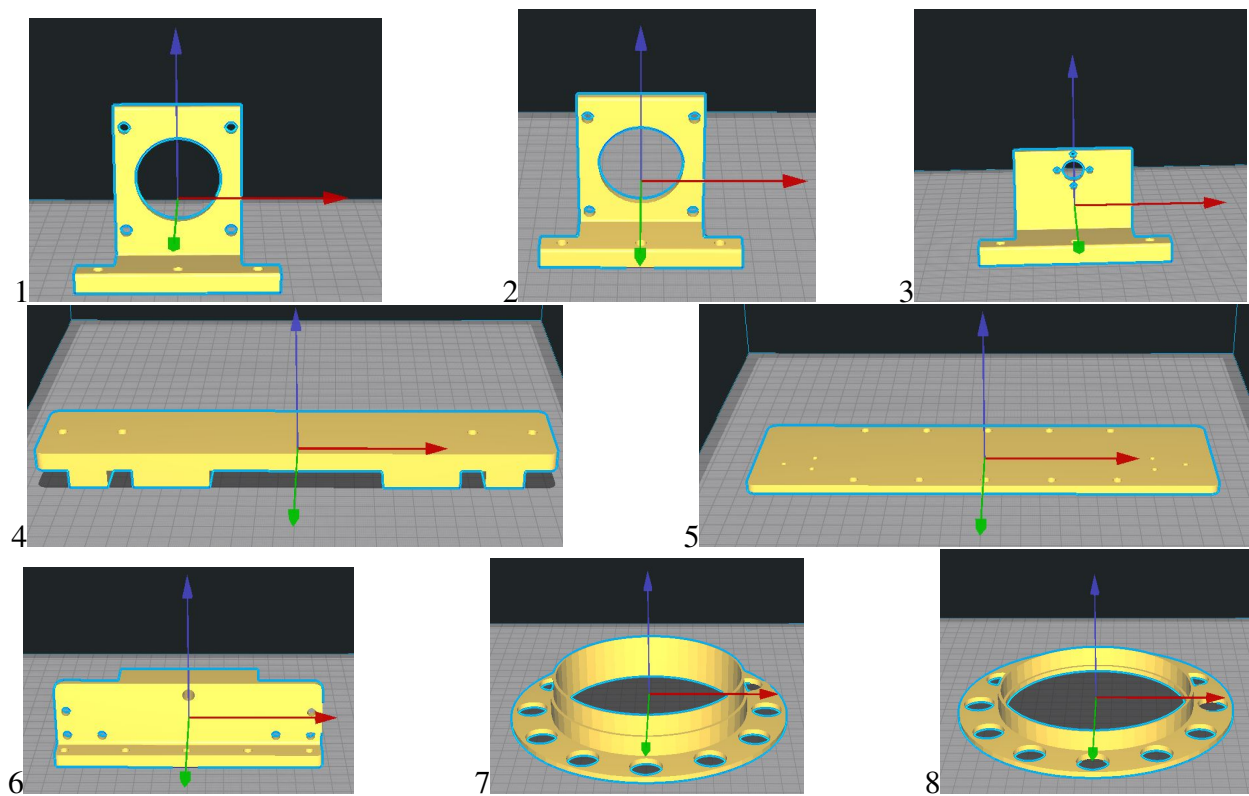


Figura 21: Piezas del sistema.

4.1.5. Etapa 5: Impresión del prototipo 3D

Posteriormente se procede a realizar los diferentes archivos que se envían a la impresora para obtener las piezas, en la figura 22, donde se pueden ver los bordes externos de la pieza que para este caso son 3, los cuales tienen color verde, una capa exterior de color rojo y un relleno de color amarillo.

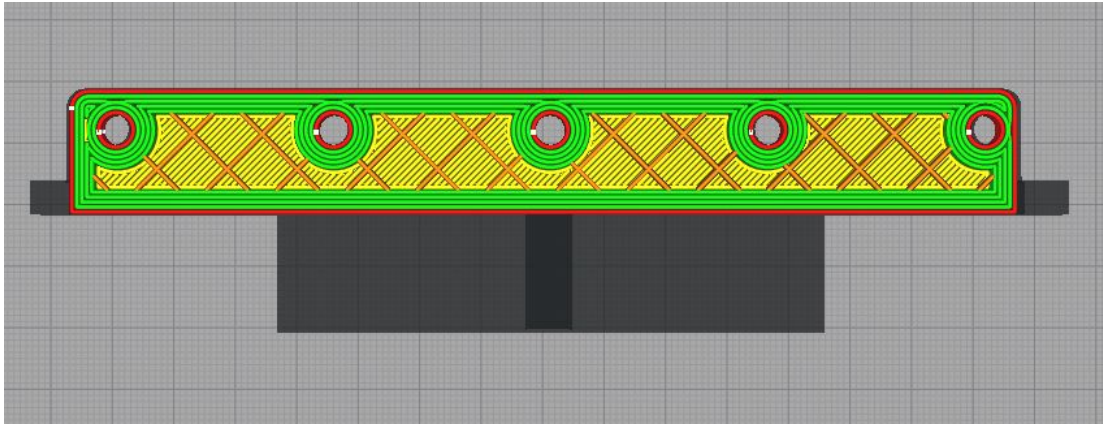


Figura 22: Pieza en cura

En la figura 23, se muestra las primeras piezas del sistema ya impresas, previas al ensamble.



Figura 23: Bobinas impresas.

4.1.6. Etapa 6: Ensamble de las bobinas

Posteriormente se procede a realizar el ensamble de las bobinas se unen las dos piezas y se empieza a enrollar el alambre de cobre. Teniendo en cuenta los valores de la figura 15, realizando 20 vueltas desde la capa 1 como se ve en la figura 24. Hasta la capa numero 20, dando un total de 400 vueltas en la bobina como se ve en la figura 25.

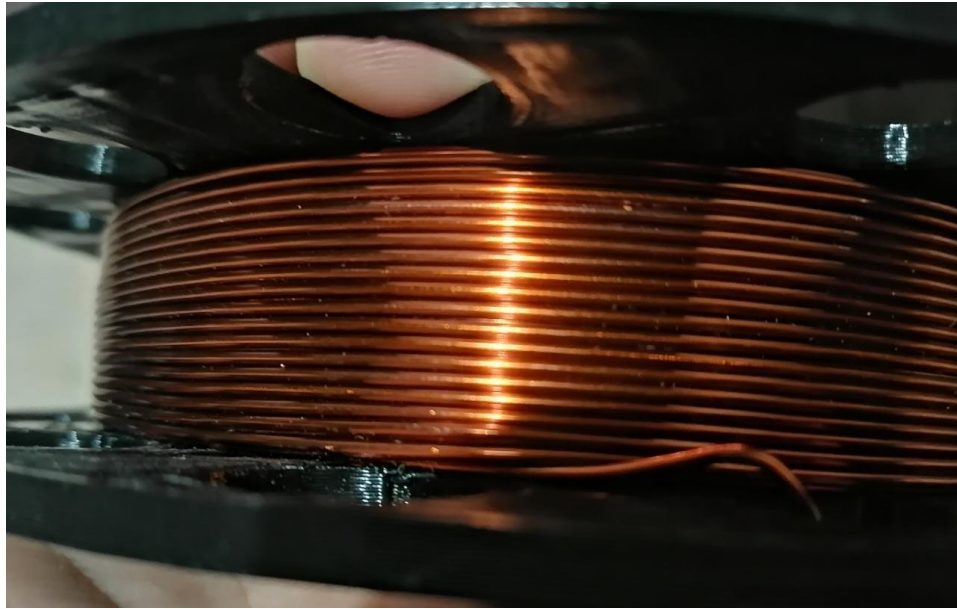


Figura 24: Primera capa.

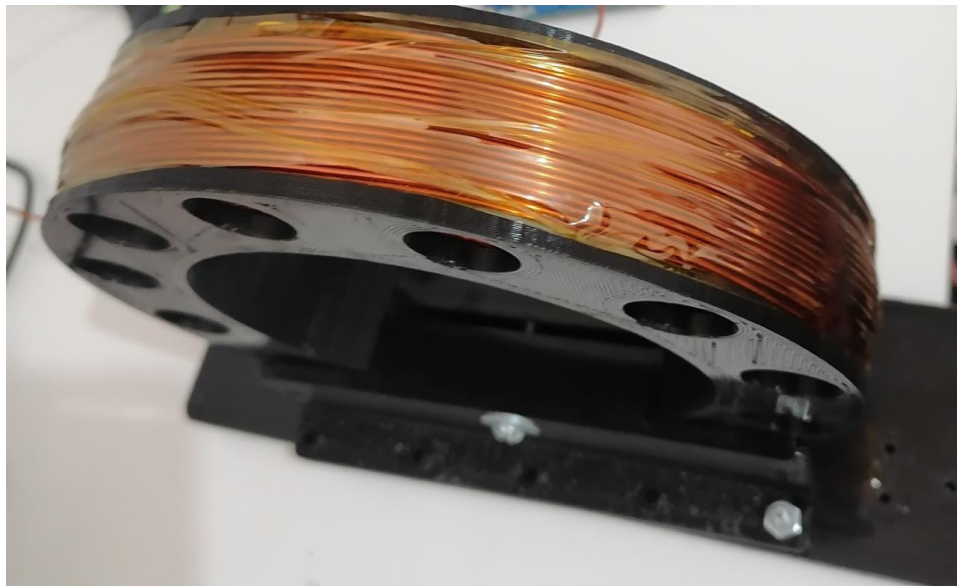


Figura 25: Bobina final.

4.1.7. Etapa 7: Ensamble del sistema

Para el ensamble del sistema, se procede a unir todas las partes mecánicas como en el diseño 3D, para la bobina uno se tienen dos piezas de 21 6. Se utiliza una pieza 21 5, una pieza 21 7 una pieza 21 8. Para el resto del sistema se utilizan las piezas 21 1, 21 2, 21 3, 21 4. Como se muestra en la figura 26.

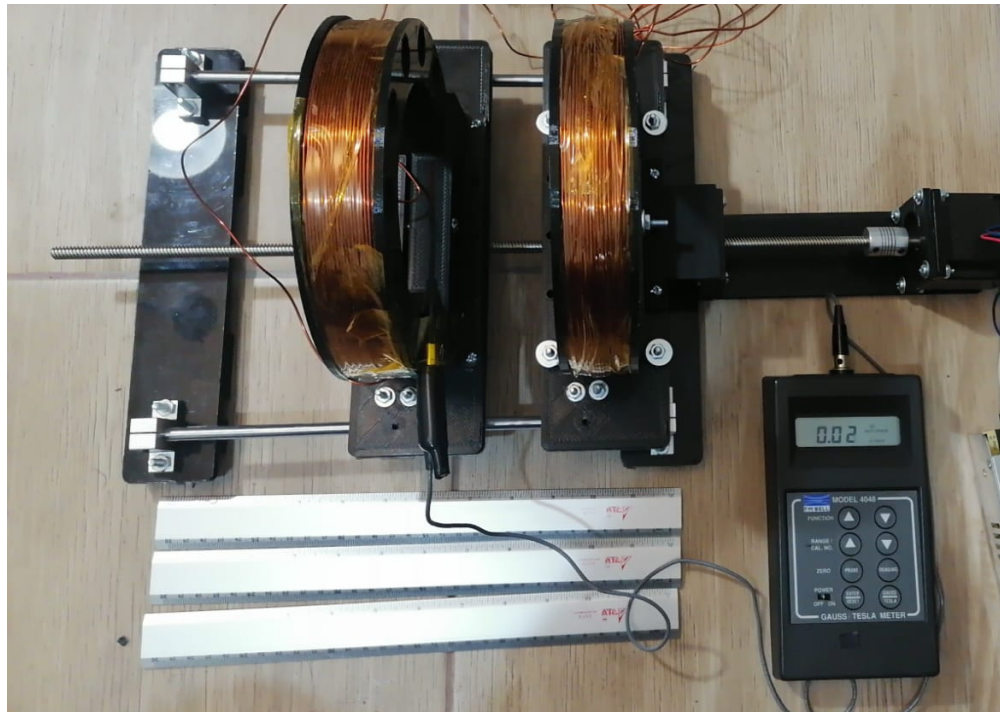


Figura 26: Sistema mecánico completo

4.2. Diseño del sistema eléctrico

4.2.1. Etapa 1: Diseño del convertidor reductor (Buck)

Como se mostró en la sección Convertidores de modo de conmutación CC-CC, una de las posibles configuraciones es el modelo buck, el cual permite tener un voltaje de salida controlado, que presenta un menor valor al voltaje de entrada. Para esto se inicia con una simulación en *LTspice* utilizando los elementos mostrados en la siguiente figura 27. Se tiene una fuente de entrada de 24V, se utiliza un inductor de $40 \mu\text{H}$, una RL de $100 \text{ m}\Omega$ que representa la resistividad del inductor en el modelo, un capacitor de $10 \mu\text{F}$ y una resistencia de carga de 5Ω , la cual representa la resistencia de las bobinas.

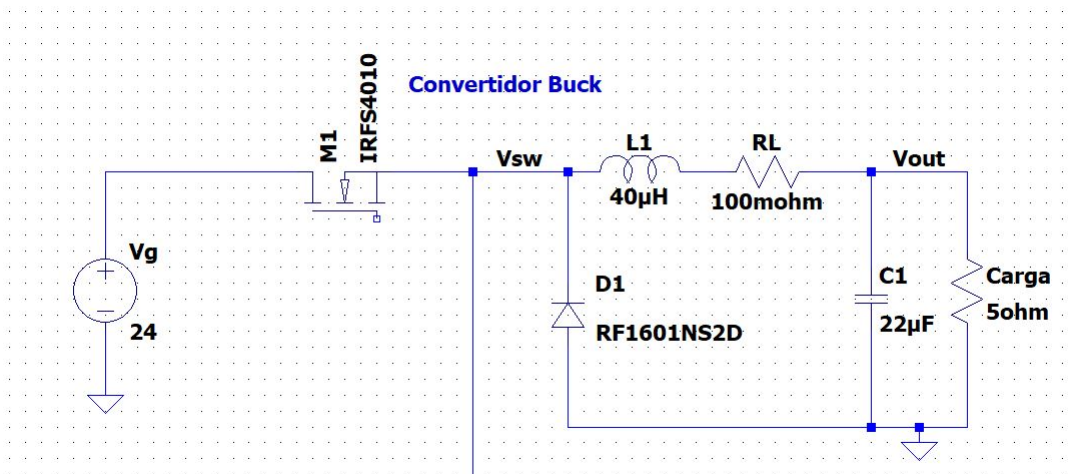


Figura 27: Simulación buck.

4.2.2. Etapa 2: Simulación del circuito

Para realizar la simulación del sistema, se tiene que generar una señal PWM que controle el ciclo de trabajo del transistor. Para esto se genera un modulo de PWM, que ante una entrada de voltaje de entre 0 V y 1 V, se genere una salida de PWM entre 0 % y 100 %. La conexión se realiza como se muestra en la figura 28.

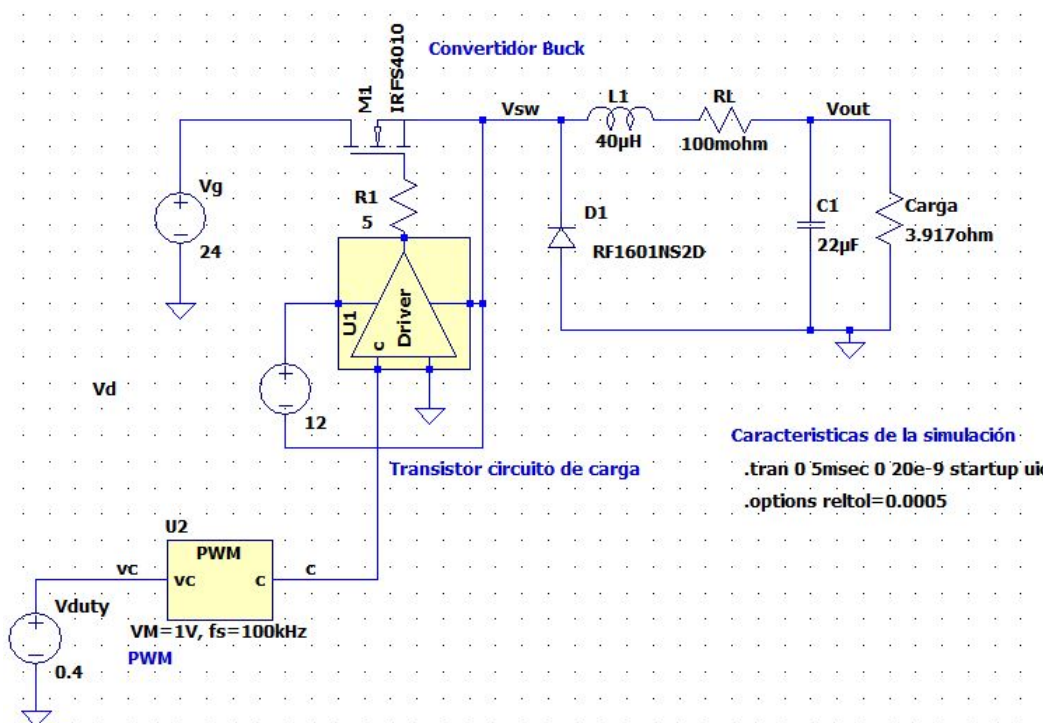


Figura 28: Simulación buck con variación de PWM

Posteriormente se realiza la simulación en el sistema en dos variaciones de PWM para ver las respuestas. En la figura 29 tiene un valor de PWM de 0.4. Para la figura 30 tiene un valor de PWM de 0.6.

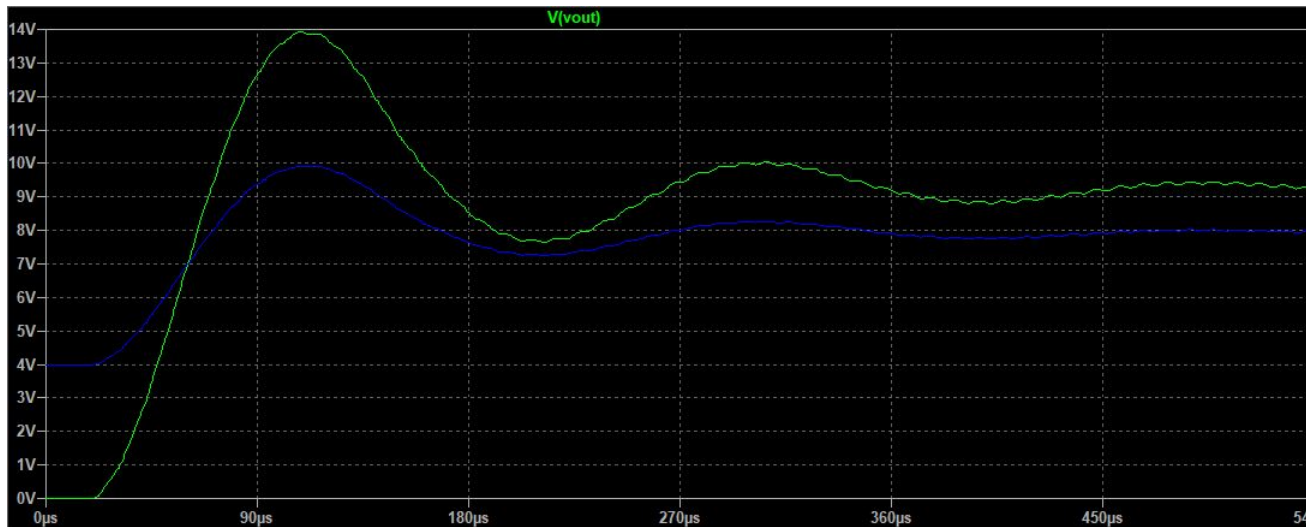


Figura 29: Simulación buck con variación de PWM a 0.4.

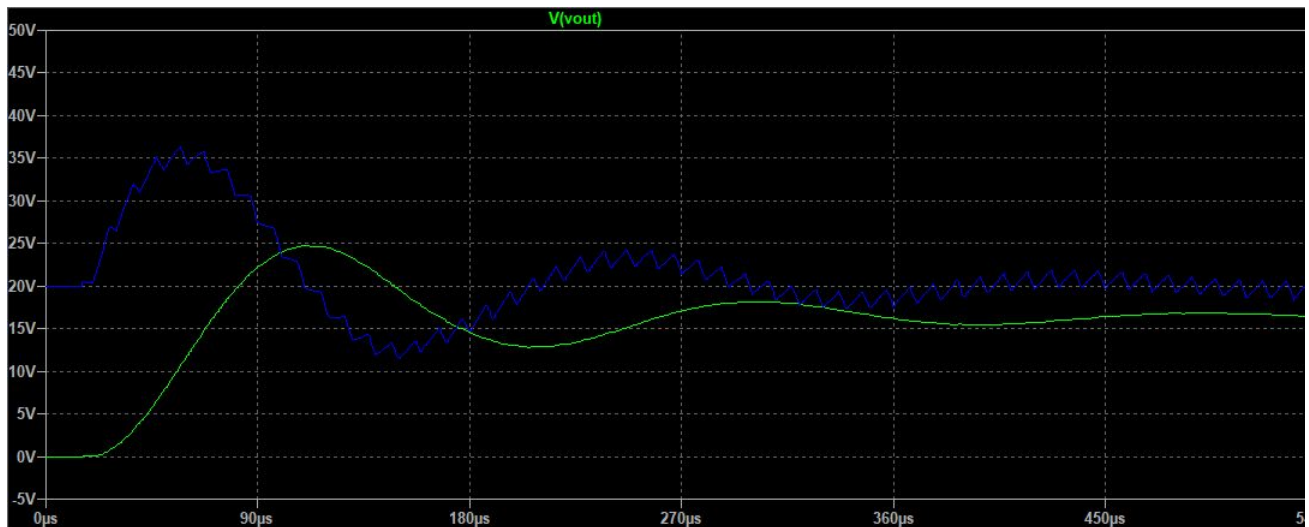


Figura 30: Simulación buck con variación de PWM a 0.6.

En la línea verde en ambas figuras 29, 30 representa el voltaje al cual puede llegar el sistema. Por el contrario la línea azul representa la corriente a la que se tiene en el sistema. Por cada 5 voltios de la gráfica, representan 1 A.

4.2.3. Etapa 3: Diseño de PCB

Posteriormente se procede a diseñar una PCB utilizando el programa *easyeda*, donde se seleccionan los diferentes componentes para realizar las diferentes conexiones además, se presenta una etapa de realimentación, para realizar un control de corriente, esto se realiza colocando una resistencia en serie con la carga, para medir por ley de ohm la corriente que cae sobre la carga, esto se logra con una resistencia en serie vista en la figura 31 como RSEN. Estas resistencias para evitar la pérdida de voltaje en el sistema suelen utilizarse del orden de los mili Ω .

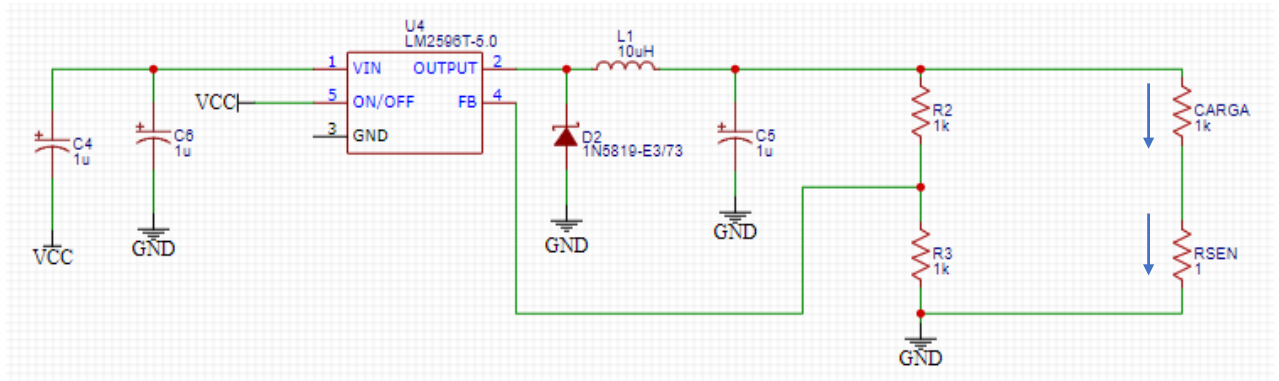


Figura 31: Resistencia retroalimentación.

Como el valor de la resistencia RSEN se encuentra en un orden muy pequeño, es necesario utilizar un amplificador de voltaje, en este caso se utiliza un amplificador en modo diferencial como se muestra en la figura 32.

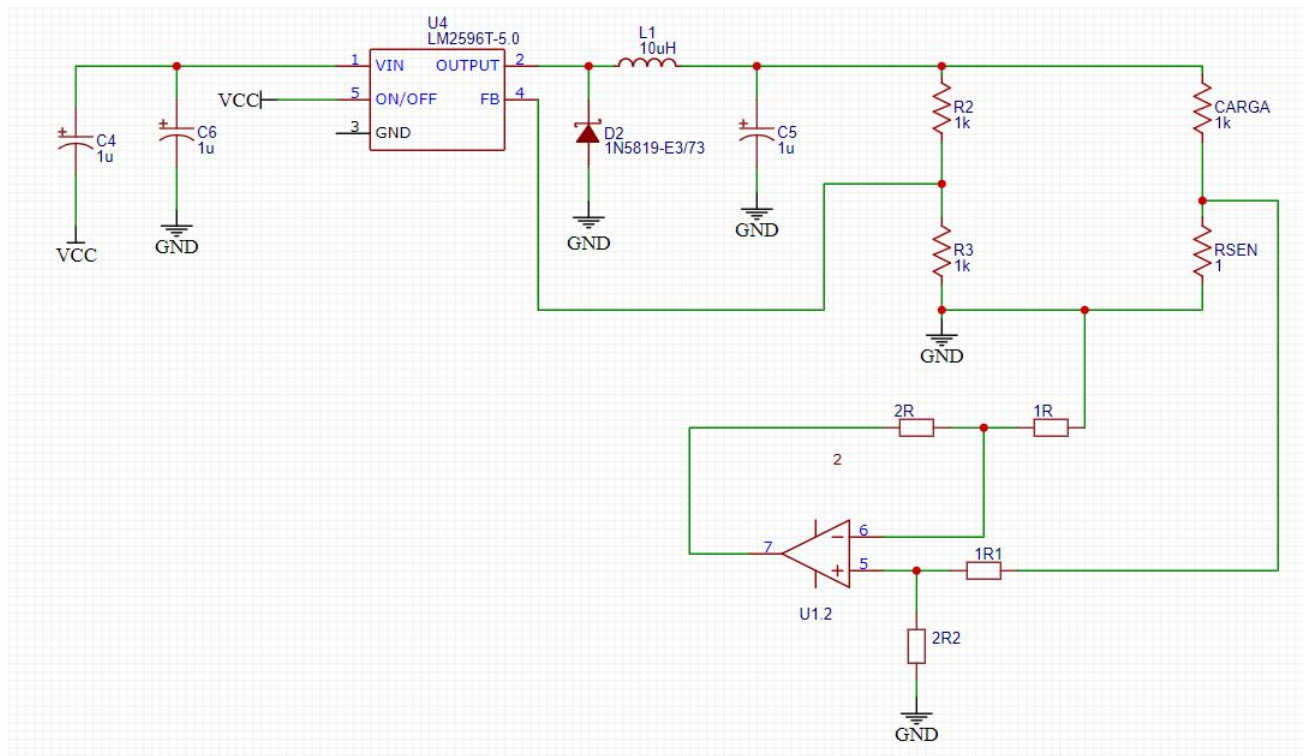


Figura 32: Resistencia retroalimentación con amplificador.

En este caso se tienen en cuenta que la resistencia $1R$ es igual a la resistencia $1R1$ y la resistencia $2R$ es igual a la resistencia $2R2$ donde se obtiene la ecuación 21 la cual representa la entrada contra la salida del amplificador operacional, donde A_v representa el valor de voltaje de salida del amplificador operacional.

$$A_v = \frac{R2}{R1} \quad (21)$$

De esta manera se asegura un voltaje que estará a la salida del amplificador que ira entre 0 V y VCC. Para la ultima etapa se necesita implementar un comparador, el cual tendrá un potenciómetro para ajustar el limite de corriente, y por otro lado vuelve a ser parte de la retro alimentación del sistema como se muestra en la figura 33.

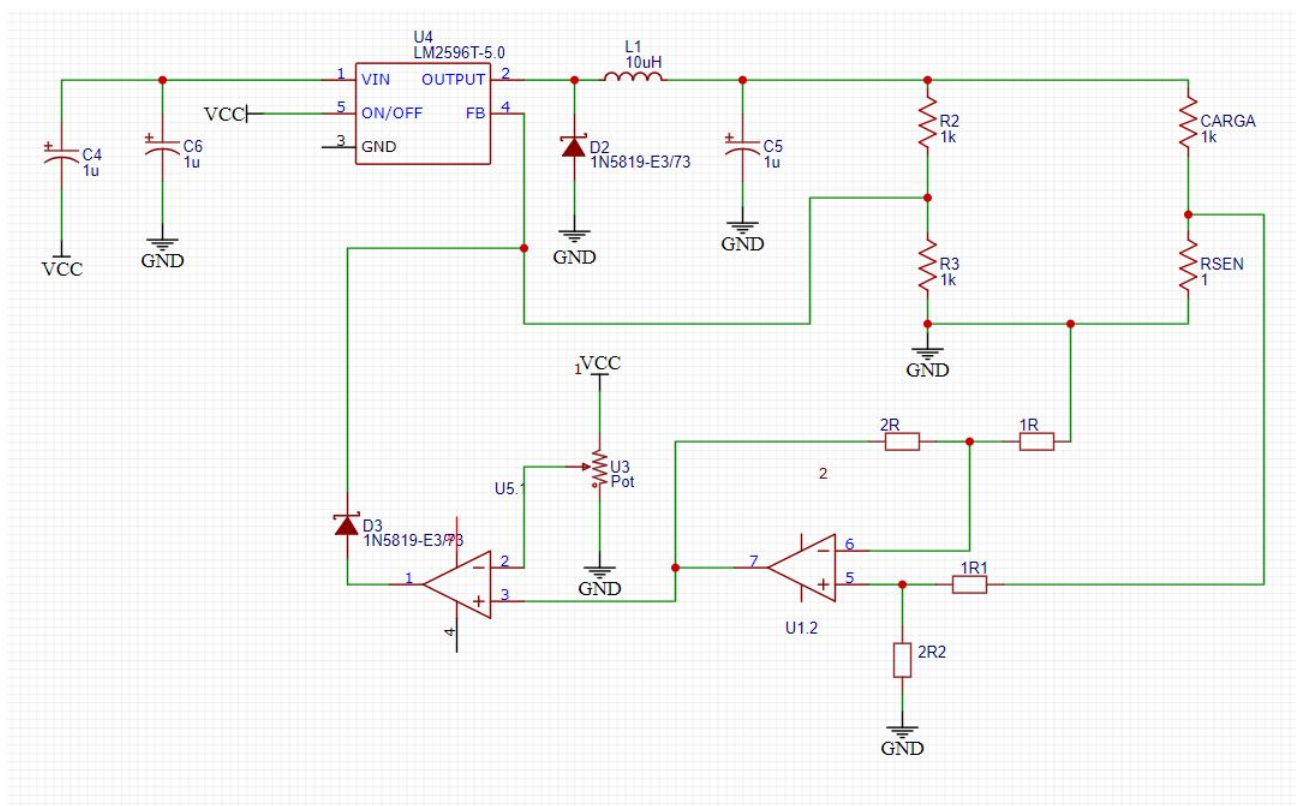


Figura 33: Resistencia retroalimentación con amplificador y comparador.

4.2.4. Etapa 4: Implementación de la PCB

Teniendo el diseño anterior se procede a realizar la ubicación de los elementos y el ruteo de las pistas de los elementos como se muestra en la siguiente figura 34. En este caso se tiene en cuenta de que puede ser de dos caras. También, se agrega una etapa de alimentación con un TI7805 el cual es un limitador de voltaje a 5 V. Que permite la alimentación de los amplificadores operacionales.

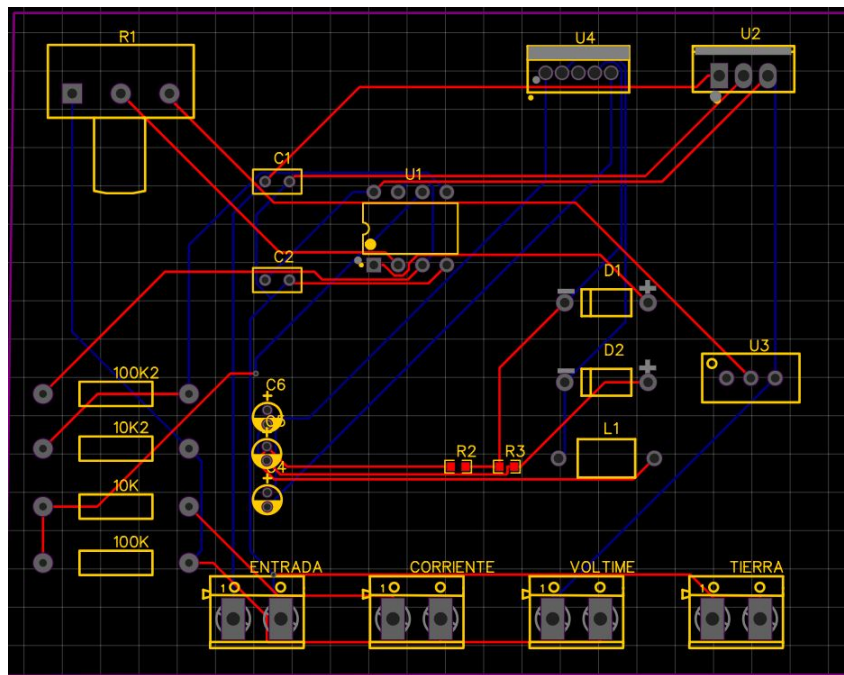


Figura 34: PCB, para imprimir.

Posteriormente se realiza un prototipo 3d para poder observar el resultado de la placa como se observa en la figura 35.

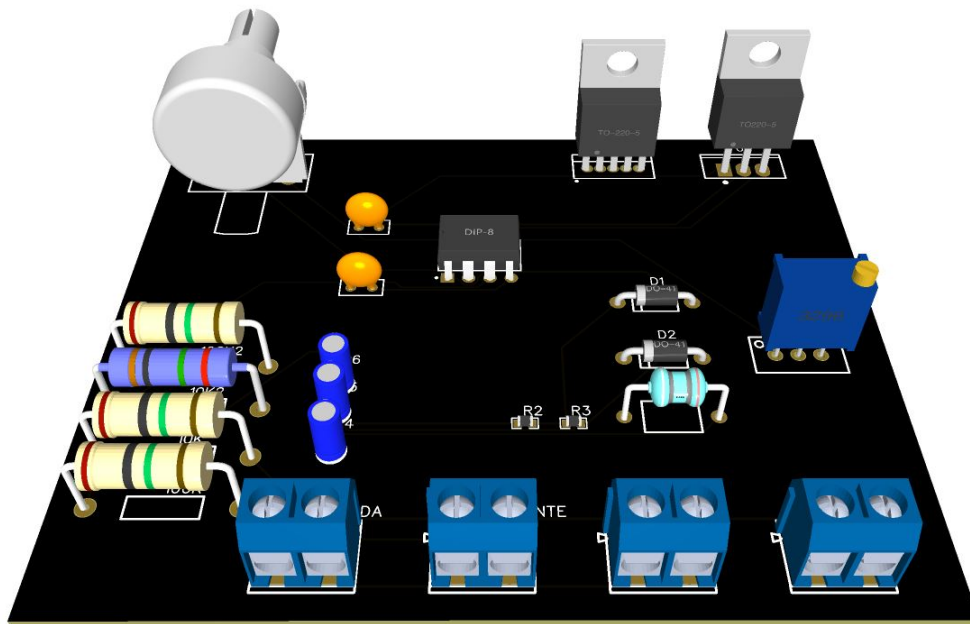


Figura 35: PCB en 3D.

Luego de esto se procede a imprimir una PCB para realizar las pruebas del sistema, se utiliza un circuito de una fuente buck ya comercial puesto que algunos de los elementos que se requiere soldar tienen soldadura de superficie. Externamente se realiza un control de corriente que se conecta de forma externa, y se utiliza una resistencia para simular la carga como se muestra en la figura 36.

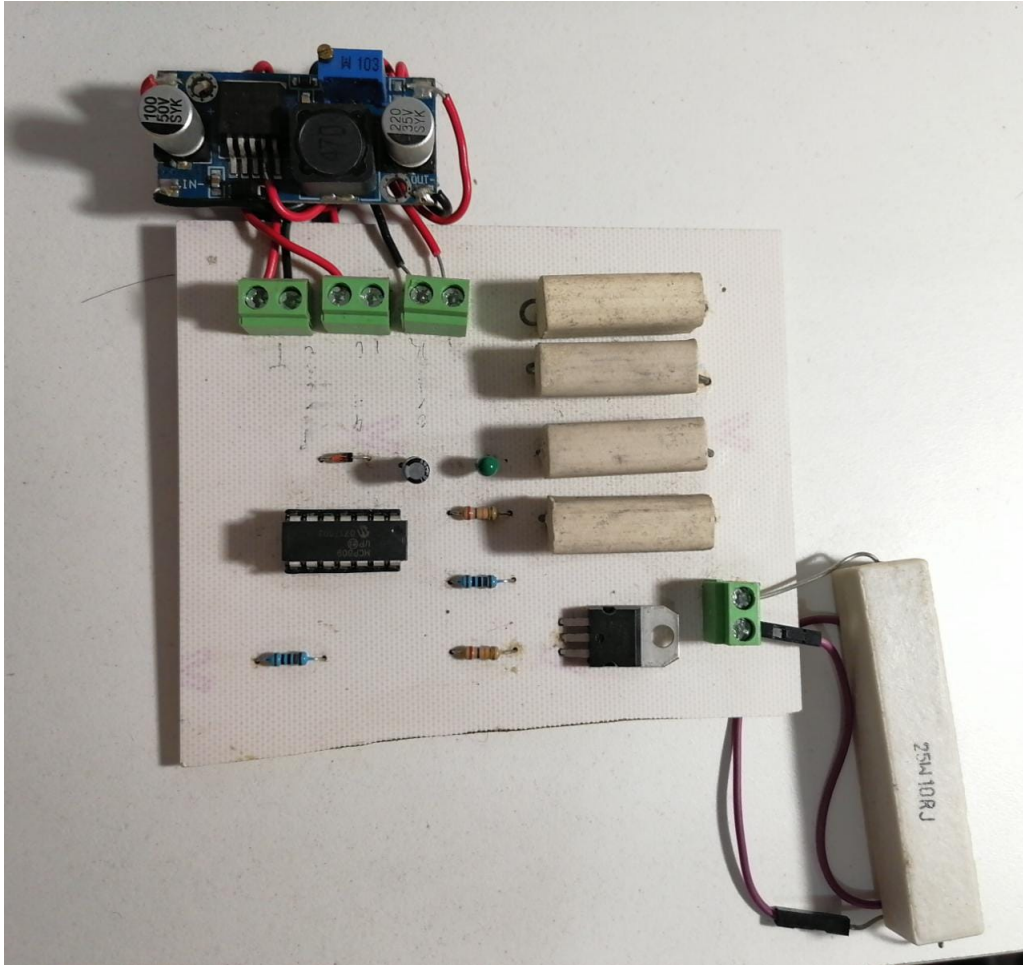


Figura 36: PCB implementada.

De esta manera se prueba el control de corriente mediante un comparador.

4.3. Diseño para la generación del campo magnético

4.3.1. Etapa 1: Parámetros de la simulación

Dentro de ansys existen diferentes tipos de programas que permiten realizar diferentes simulaciones. Una de las dependencias es Maxwell, el cual es una herramienta de análisis electro magnética, que sirve para el análisis de bajas frecuencias y dispositivos que las generan. Además, este se puede integrar con otras plataformas de ansys para poder crear análisis multifísicos. Las geometrías

sobre las cuales se simula en Maxwell pueden ser creadas dentro del mismo programa o pueden ser importadas desde otra herramienta CAD. Maxwell además, utiliza análisis de elementos finitos (FEA por sus siglas en inglés) para resolver los diferentes problemas magnético o eléctricos que se presentan. Para la resolución de los diferentes problemas de campo electromagnético, se resuelven las ecuaciones de Maxwell, en una región delimitada, es decir una región finita con condiciones iniciales especificadas por el usuario. Maxwell tiene algunos tipos de diseños dependiendo el objetivo, se tiene diseño RMXprt, el cual sirve para analizar y diseñar maquinas eléctricas. Se tiene el Maxwell 2D, el cual sirve para simular y resolver campos electromagnéticos en los planos RZ o XY, mediante el uso de análisis de elementos finitos. También, esta el Maxwell 3D que permite resolver problemas de campo electromagnético en 3 dimensiones mediante el usos de análisis de elementos finitos. Se empieza determinando cual va a ser el tipo de solución como se muestra en la figura 37.

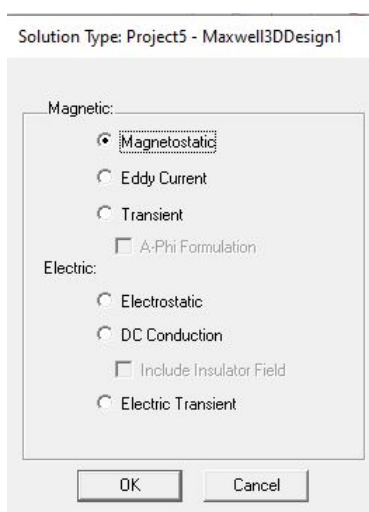


Figura 37: Tipos de solución en Ansys.

Se tienen varias opciones dependiendo del tipo de simulación que se desea realizar. Las soluciones magnéticas son 3. La primera es *Magnetostatic*. Esta sirve para resolver campos magnéticos estáticos, causados por corrientes continuas o algunos imanes permanentes, esta permite resolver tanto materiales lineales como materiales no lineales. El segundo tipo de solución es *Eddy Current Solver* el cual se utiliza para resolver campos magnéticos que varían sinusoidal mente en el dominio de la frecuencia, también, resuelve materiales lineales y no lineales. Se considera también, corrientes de desplazamiento, campos inducidos y proximidad de corriente. El tercer método de solución es *Transient* El cual resuelve campos magnéticos transitorios causados por fuentes eléctricas que pueden ser variables en el tiempo o en movimiento. Además, algunos imanes permanentes con materiales lineales y no lineales, algunos campos inducidos. Maxwell también cuenta con una malla adaptativa lo cual permite tener mejores resultados a la hora de obtener los resultados.

El *Magnetostatic*, permite la solución de un campo magnético estático resultante de una corrien-

te que fluya de manera continua a través de un bobinado o como resultado de un imán permanente. Las pérdidas presentadas se deben únicamente a las pérdidas óhmicas en los conductores que transportan la corriente.

También es necesario seleccionar las propiedades del material con el cual se va a trabajar. Algunas de las principales características a tener en cuenta dentro de la simulación son las siguientes:

- Coercitividad magnética.
 - Permite definir las propiedades de los imanes permanentes.
 - Se debe especificar la magnitud y la dirección.
 - La dirección es dada con respecto a la orientación de cuerpos a los que se asigna el material
- Composición.
 - El material puede encontrarse como una sola pieza sólida, o por capas en forma laminada.
 - Se debe especificar la dirección normal a la laminación.
- Permeabilidad relativa.
 - Esta se puede presentar en varias formas como permeabilidad simple o lineal, no lineal, y/o anisotrópica.
- Conductividad de la masa
 - Esta se utiliza para poder determinar como se distribuye la corriente dentro de los diferentes conductores.
 - Puede ser simple o anisotrópica.

Para este caso se utilizan los siguientes parámetros, como se muestra en la figura 38.

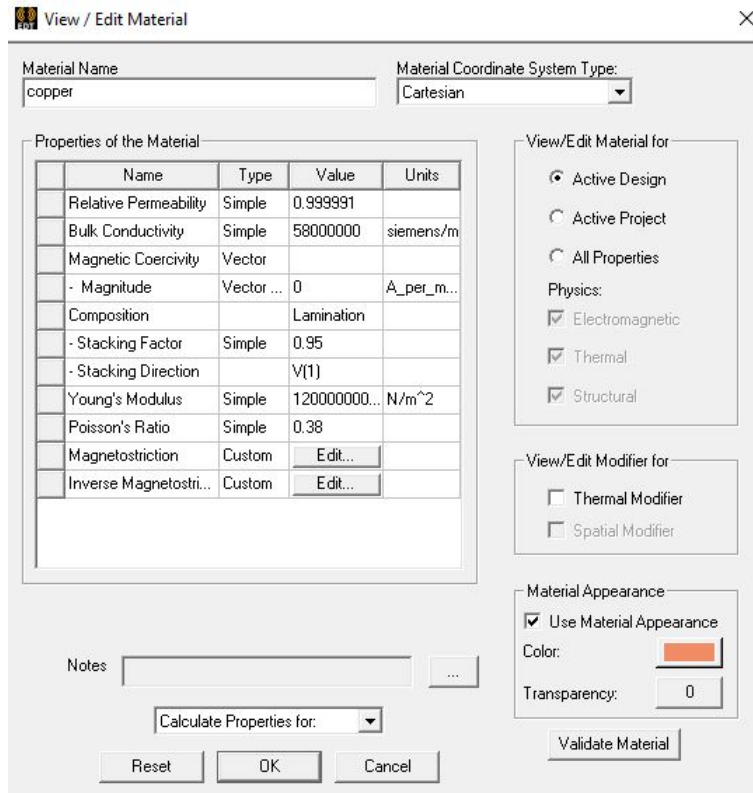


Figura 38: Características del material en Ansys.

Asignación de las condiciones de contorno, es mediante las cuales se puede definir el comportamiento del campo magnético en las diferentes interfases, es posible definir limites a una arista, a una cara o a una región dependiendo de las características de cada problema. Existen diferentes tipo de limites, para este caso en los limites 3D se tiene los limites naturales, los cuales están definidos por las propiedades de los materiales, es decir de un objeto del ensamblaje al otro. Además, están los limites de Neumann, los cuales representan las fronteras exteriores del dominio de la solución. Para este caso se utilizaron los siguientes limites como se muestra en la figura 39. Los limites se dan por un solido el cual tiene sus bordes en color morado, para ser apreciados de mejor manera, el sistema a simular se encuentra dentro de los limites, por facilidad de computo se omiten algunas piezas del sistema como soportes, bases entre otros.

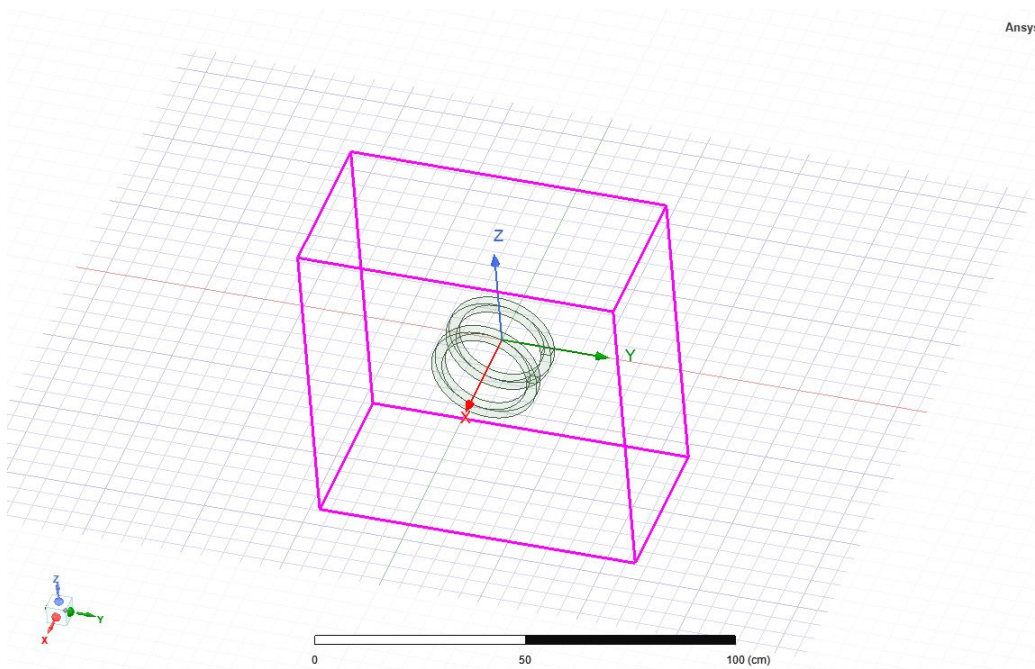


Figura 39: Límites de la simulación en Ansys.

Posteriormente se deben definir las excitaciones del sistema o también conocidas como fuentes de energía del sistema. Se utiliza la densidad de corriente, es posible asignar este tipo de fuentes para lazos cerrados o abiertos, solo es necesario determinar cuál es la terminal de densidad de corriente en el sistema, para este caso se realiza la siguiente asignación como se muestra en la figura 40. Se utiliza un valor en corriente de 0.33 A el cual es para generar un campo de 1 mT. Además, se selecciona tipo *Stranded*. Posteriormente se realiza la misma simulación con un valor de 3.33 A para generar 10 mT.

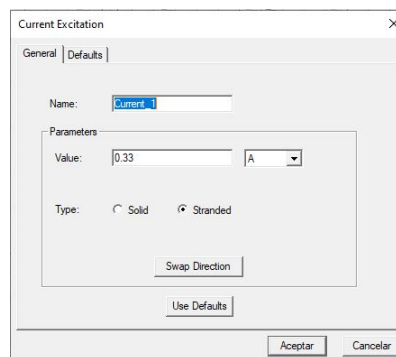


Figura 40: Corriente en Ansys.

4.3.2. Etapa 2: Simulación del campo magnético

Posteriormente se procede a realizar las diferentes simulaciones, teniendo en cuenta los parámetros planteados en la sección anterior. Primero se realizara la simulación para un campo de 1 mT es decir se utilizaran 0.33 A. En las siguientes figuras se muestran los resultados de las simulaciones.

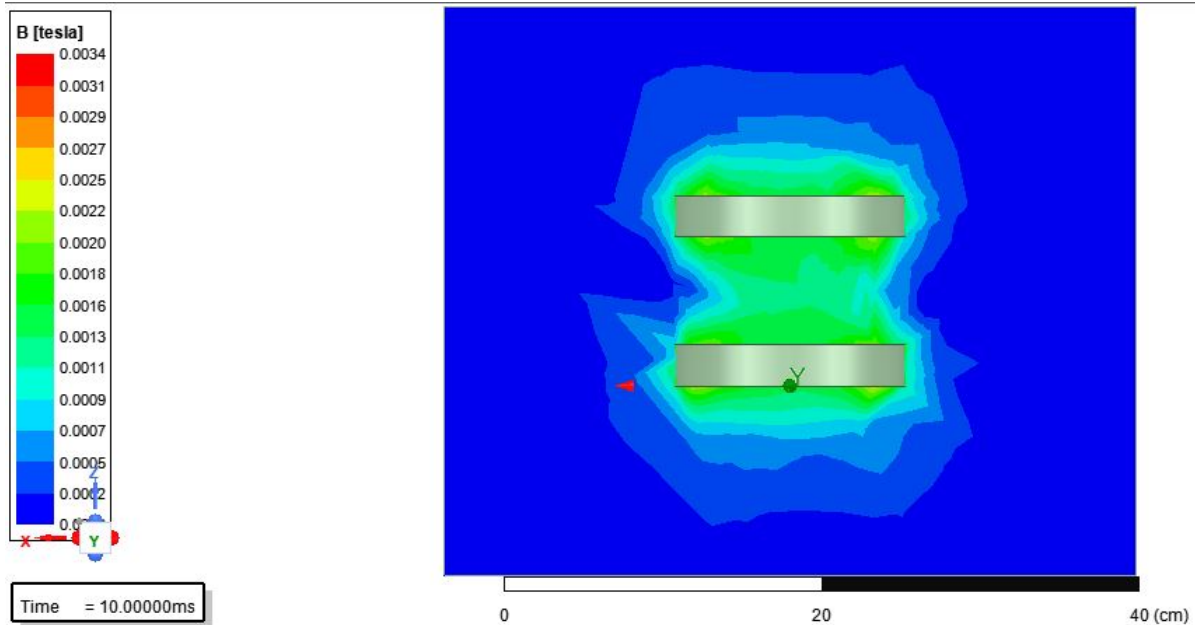


Figura 41: Campo generado a 0.33 A plano X y Z.

Dentro de esta se observa como aunque en los bordes se genera un campo mayor, es en el centro de las dos bobinas donde se mantiene de forma homogénea. Esta imagen es una visión de la simulación en los ejes X y Z, como se muestra en la figura 41. En la siguiente figura se muestra desde una vista del plano Z 42.

Dentro de esta imagen se puede ver como se realiza una distribución de forma concéntrica con respecto a la geometría de las bobinas.

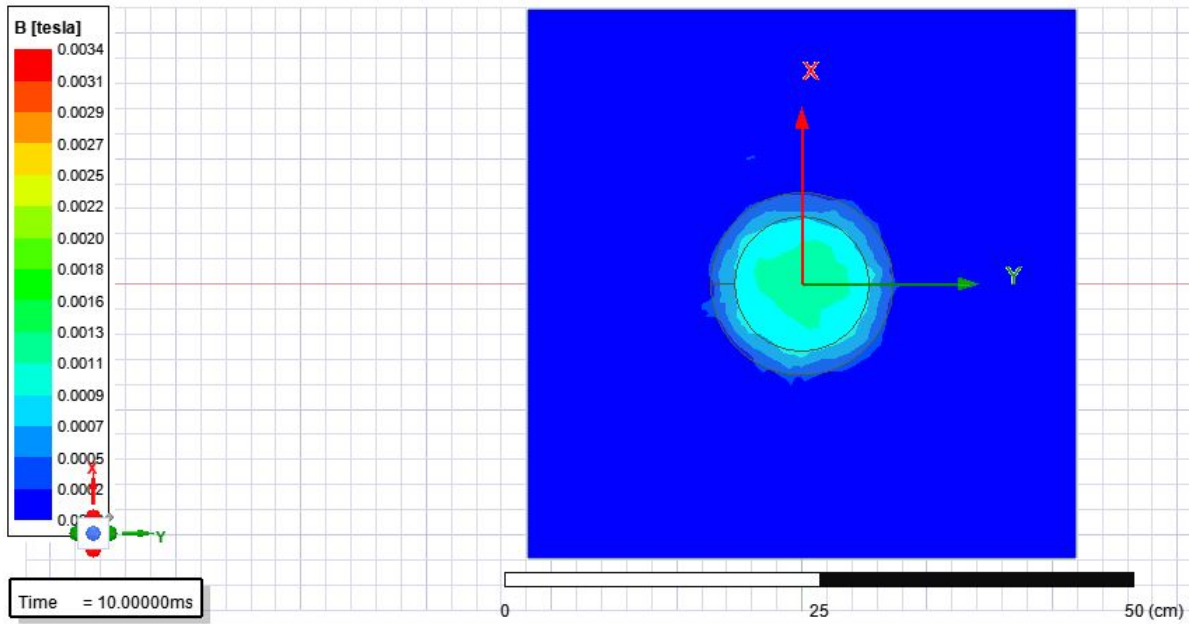


Figura 42: Campo generado a 0.33 A plano Z.

Se obtienen simulaciones con un segundo valor de 3.33 A para obtener 10 mT dentro de la simulación como se observa en la siguiente figura 43.

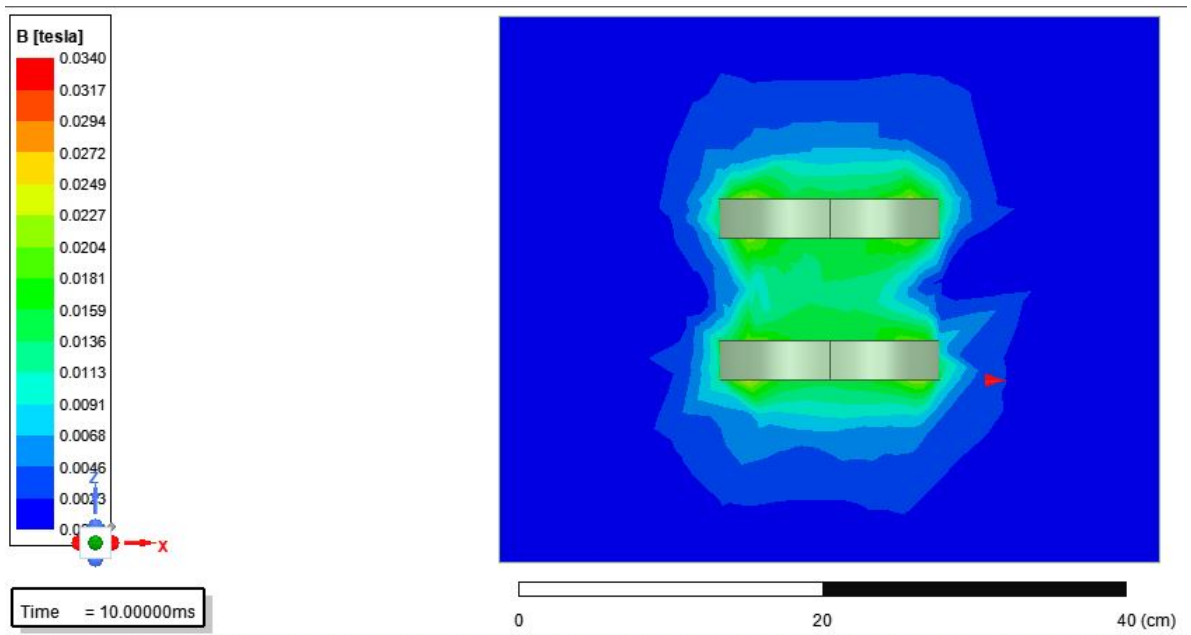


Figura 43: Campo generado a 3.33 A plano X y Z.

En la siguiente figura se observa desde el plano Z 44.

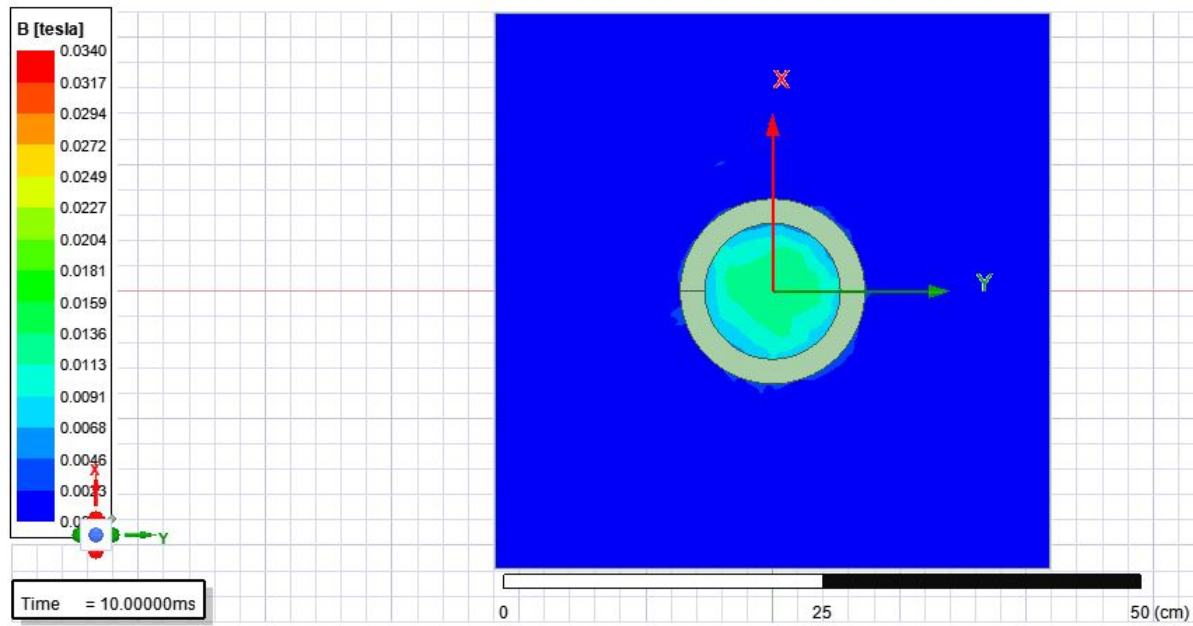


Figura 44: Campo generado a 3.33 A plano Z.

En esta simulación se observa de mejor manera la forma concéntrica en la que se genera el campo magnético.

5. Resultados

Dentro de esta sección se mostraran los resultados dentro de los diferentes etapas del proyecto, teniendo en cuenta algunos ajustes que se realizaron a los diseños iniciales con base, en las etapas de simulación y desarrollo de cada parte del proyecto. Se iniciara con los resultados mecánicos obtenidos, es decir la plataforma experimental y su funcionamiento. Posteriormente se presentaran las variaciones del campo magnético con respecto a la variación de corriente en el sistema, y por ultimo se presentara la homogeneidad del campo magnético. Además, se presentara un pequeño trabajo en conjunto el cual permite tener una visión mucho mas limpia del campo magnético generado por las bobinas.

5.1. Pruebas del sistema previo a los sistemas de control

Dentro de esta sección se mostrara, los valores de campo que se obtendrían del sistema si no se utilizan sistemas de control, tanto de posición como de corriente. Se realiza la medición del flujo de campo, posicionando de forma manual el sensor entre las bobinas y ubicando las bobinas de forma manual una frente a la otra. También se generan variaciones de la corriente de una y otra bobina.

Tabla 7: Valores obtenidos

Flujo (mT)	Corriente f (A)	Corriente m (A)	Voltaje f (V)	Voltaje m (V)	Distancia (cm)
12.510	3.33	4.33	8.34	10.94	0
12.439	3.33	3.83	8.44	9.81	0
12.350	3.33	3.33	8.53	8.53	0
12.162	3.33	2.83	8.58	7.32	0
11.410	3.33	2.33	8.67	6.01	0
11.403	2.33	3.33	6.09	8.66	0
12.160	2.83	3.33	7.4	8.71	0
12.421	3.83	3.33	10.11	8.79	0
12.611	4.33	3.33	11.71	8.88	0
12.240	3.33	3.33	9.03	8.88	2
12.559	3.33	4.33	9.07	11.7	2
10.838	3.33	2.33	9.09	6.28	2
12.484	4.33	3.33	12	9.07	2
10.705	2.33	3.33	6.48	9.07	2

Dentro de la tabla 7 se tiene lo siguiente. En la primera columna se ve la variación del Flujo del campo magnético, en la segunda columna se tiene la corriente aplicada a la bobina que estará fija dentro de las pruebas del sistema, en la tercer columna se muestra la corriente aplicada a la bobina que se moverá dentro del experimento, en la cuarta se muestra el voltaje que se aplica en la bobina que estará fija, en la quinta columna se muestra la corriente que se aplica a la bobina móvil, el la ultima columna se muestra la variación de distancia entre las bobinas. Se debe aclarar que el valor presentado es una medida promedio de los datos obtenidos durante la medición.

Se puede ver como los cambios de corriente de las bobinas o los cambios de posicionamiento del sistema afectan el valor del campo magnético que se obtiene. Por lo que es posible determinar que el no tener un correcto control de la corriente en el sistema, o un mal posicionamiento afectaría el valor del campo magnético que se puede generar.

5.2. Sistema mecánico y auto ajuste

Se realiza el montaje mecánico, luego de realizar los diseños en 3D, realizar sus respectivos análisis de elementos finitos, para ver las fuerzas que actuaran sobre el sistema, también, se tiene en cuenta el estudio de movimiento mediante el cual se puede ver como funcionaria el sistema en la vida real.

Como se muestra en la siguiente figura 45. Se tiene un botón para encender y apagar todo el sistema. Posteriormente se tiene una fuente de 24 V con salida dual, la cual esta conectada a dos circuitos electrónicos controlados por corriente, como los que se explicaron anteriormente. Se

encuentra un motor nema 23, el cual esta conectado a un driver de control de referencia TB6600, controlado mediante el microcontrolador node ESP8266.

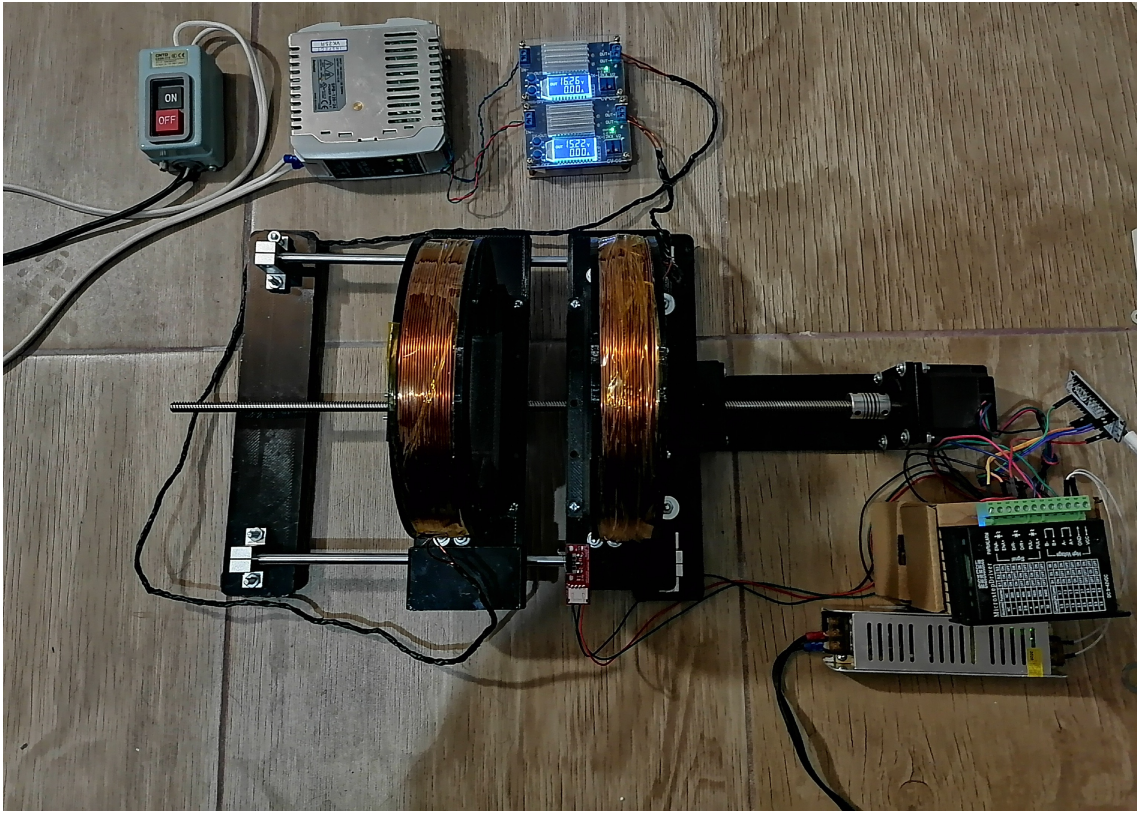


Figura 45: Montaje completo

Para el sistema de ajuste de posición se tiene un final de carrera como sensor de posicionamiento, como se muestra en la siguiente figura

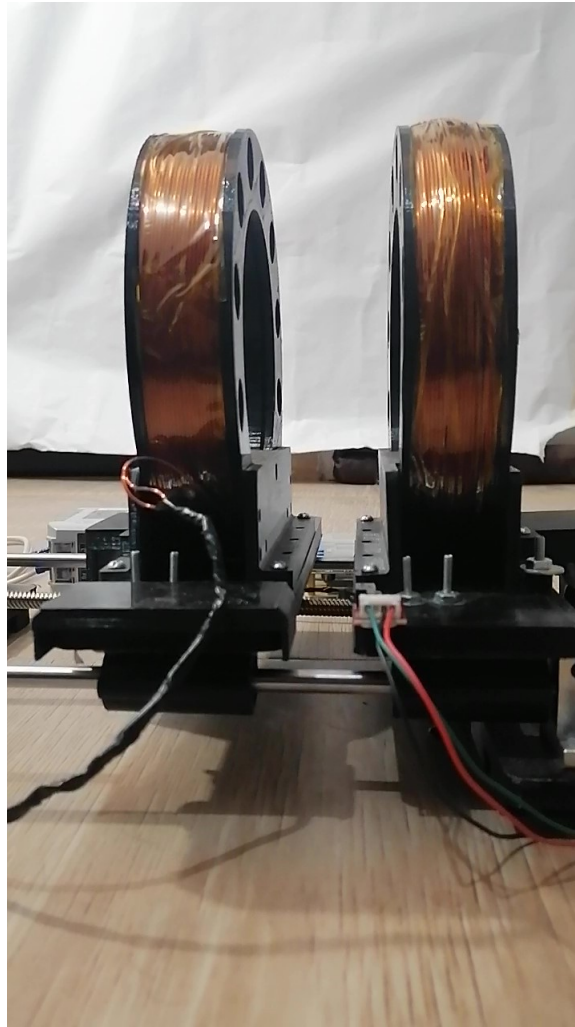


Figura 46: Sensor final de carrera

Se utiliza el siguiente código para determinar la posición del sistema y realizar el posicionamiento de forma automática.

```
//Definición de los pines que se utilizaran
int fin = D0;
int pul = D5;
int dir = D6;
int en = D7;
// Definición e inicialización de las variables del programa
int i=0;
int x=0;
//Configuración de los pines
```

```

void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  pinMode(pul, OUTPUT);
  pinMode(dir, OUTPUT);
  pinMode(en, OUTPUT);
  digitalWrite(en, LOW);
  digitalRead(fin);

}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {

  if (x==0){
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    digitalWrite(dir, HIGH);
    for(int i=0; i < 133; i++)
    {
      digitalWrite(pul, HIGH);
      delayMicroseconds(400);
      digitalWrite(pul, LOW);
      delayMicroseconds(400);
    }
    if(not (digitalRead(fin))){
      x=x+1;
    }
    delay(100);
  }

  else if (x==1){

    digitalWrite(dir, LOW);
    for(int i=0; i < 2554; i++)/*7cm*/
    {
      digitalWrite(pul, HIGH);

```



```
    delayMicroseconds(400);
    digitalWrite(pul, LOW);
    delayMicroseconds(400);

    }
    if (i<=2553)
    {
        x=x+1;
    }
}
    delay(100);
if (x==2)
    {
        digitalWrite(dir, LOW);
        digitalWrite(pul, LOW);
        digitalWrite(pul, LOW);
    }
}
```

5.3. Variación del campo magnético con respecto a la corriente

Para realizar las pruebas de la variación de corriente se utilizó el gausometro, para validar la generación de campo magnético. Primero se realiza la prueba para la generación de campo magnético a 1 mT, posteriormente se realizan las mediciones en cada una de las bobinas a diferentes distancias y, por último se realizaron las mediciones de los dos bobinas al tiempo. Al finalizar se realizaron las mismas mediciones para la generación de 10 mT, en el centro de las bobinas. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes tablas y gráficas del sistema. Se utilizan los elementos mostrados en la siguiente figura 47.

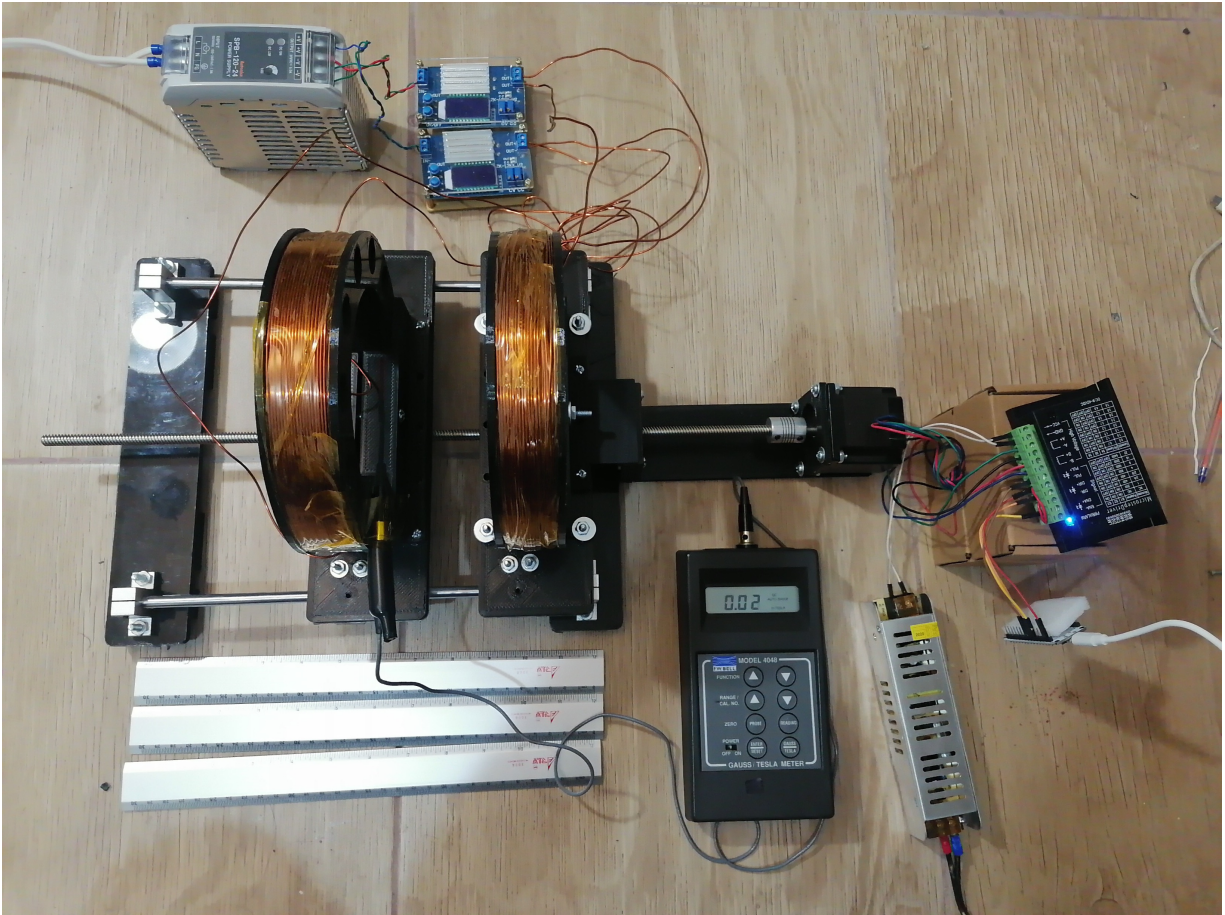


Figura 47: Elementos de medición.

En la tabla 8, se tienen los valores obtenidos a diferentes distancias para las bobinas, en este caso se tiene en cuenta que se apaga la bobina opuesta.

Tabla 8: Parámetros para 1 mT

Parametros		Bobina Movil		Bobina Fija	
Corriente (A)	Distancia (cm)	Voltaje (V)	Flujo (T)	Voltaje (V)	Flujo (T)
0.33	13	2.41	0.14	2.51	0.12
0.33	12	2.41	0.16	2.51	0.13
0.33	11	2.41	0.20	2.51	0.16
0.33	10	2.41	0.25	2.51	0.19
0.33	9	2.41	0.29	2.51	0.24
0.33	8	2.41	0.36	2.51	0.29
0.33	7	2.41	0.44	2.51	0.34
0.33	6	2.41	0.52	2.51	0.43
0.33	5	2.41	0.60	2.51	0.49
0.33	4	2.41	0.73	2.51	0.62
0.33	3	2.41	0.85	2.51	0.73
0.33	2	2.41	0.93	2.51	0.83
0.33	1	2.41	0.99	2.51	0.96
0.33	0	2.41	1.04	2.51	1.06
0.33	-1	2.41	0.99	2.51	1.04
0.33	-2	2.41	0.91	2.51	0.98
0.33	-3	2.41	0.81	2.51	0.86
0.33	-4	2.41	0.71	2.51	0.75
0.33	-5	2.41	0.60	2.51	0.64
0.33	-6	2.41	0.51	2.51	0.54
0.33	-7	2.41	0.42	2.51	0.42
0.33	-8	2.41	0.35	2.51	0.34
0.33	-9	2.41	0.29	2.51	0.28
0.33	-10	2.41	0.24	2.51	0.23
0.33	-11	2.41	0.20	2.51	0.19
0.33	-12	2.41	0.17	2.51	0.16
0.33	-13	2.41	0.14	2.51	0.13

De las tabla 8 anteriores se obtienen las gráficas de las siguientes figuras 49 y 49.

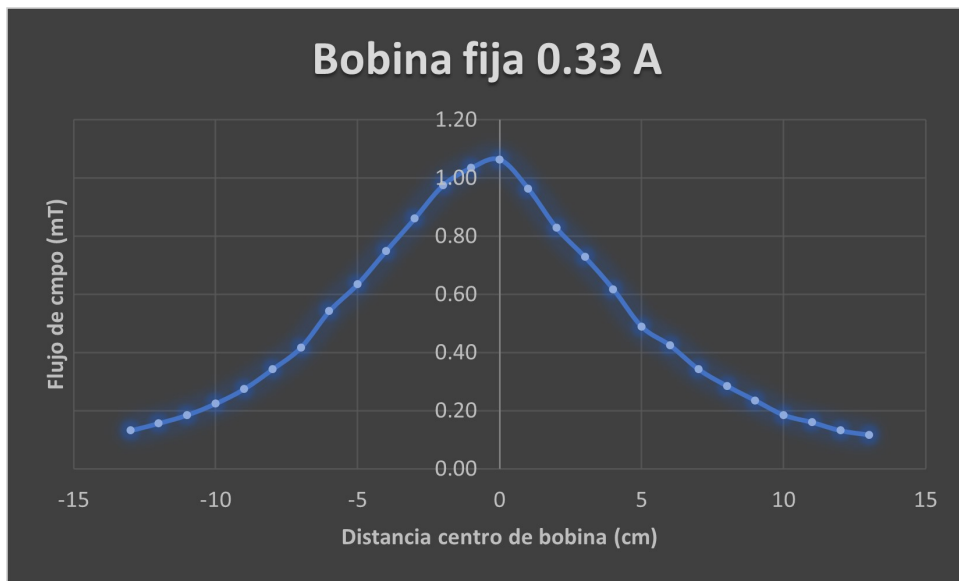


Figura 48: Bobina fija a 0.33 A

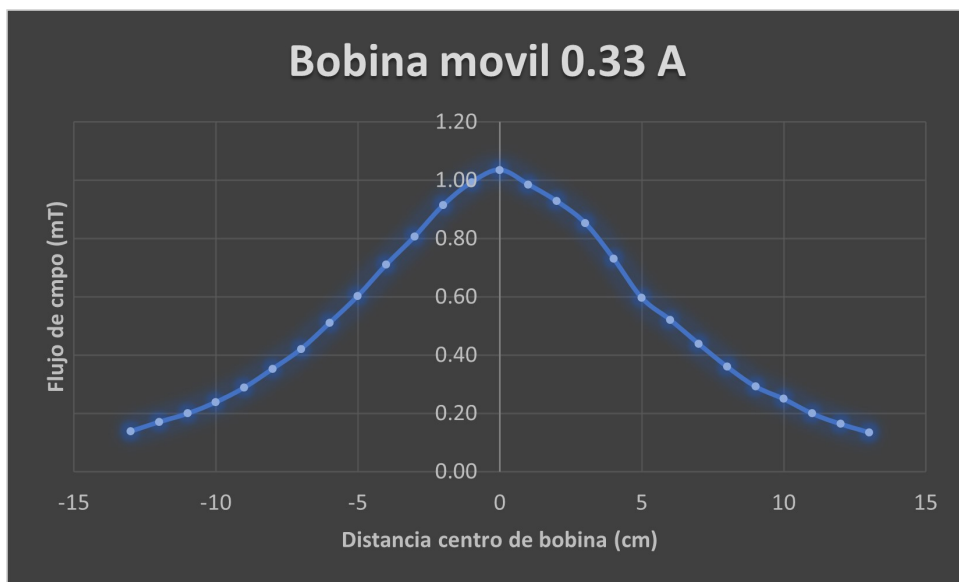


Figura 49: Bobina móvil a 0.33 A

Tabla 9: Parámetros para 10 mT

Parametros		Bobina Movil		Bobina Fija	
Corriente (A)	Distancia (cm)	Voltaje (V)	Flujo (T)	Voltaje (V)	Flujo (T)
3.33	13	7.27	1.37	7.5	1.22
3.33	12	7.27	1.60	7.5	1.47
3.33	11	7.27	1.96	7.5	1.81
3.33	10	7.27	2.29	7.5	2.20
3.33	9	7.27	2.80	7.5	2.58
3.33	8	7.27	3.43	7.5	3.22
3.33	7	7.27	4.49	7.5	3.89
3.33	6	7.27	5.22	7.5	4.69
3.33	5	7.27	6.11	7.5	5.69
3.33	4	7.27	7.18	7.5	6.71
3.33	3	7.27	8.22	7.5	7.67
3.33	2	7.27	9.00	7.5	8.78
3.33	1	7.27	9.56	7.5	9.44
3.33	0	7.27	9.89	7.5	9.93
3.33	-1	7.27	9.43	7.5	9.60
3.33	-2	7.27	8.40	7.5	8.90
3.33	-3	7.27	7.74	7.5	7.90
3.33	-4	7.27	6.50	7.5	7.14
3.33	-5	7.27	5.60	7.5	5.79
3.33	-6	7.27	4.67	7.5	4.70
3.33	-7	7.27	3.84	7.5	4.03
3.33	-8	7.27	3.22	7.5	3.17
3.33	-9	7.27	2.61	7.5	2.86
3.33	-10	7.27	2.08	7.5	2.20
3.33	-11	7.27	1.76	7.5	1.77
3.33	-12	7.27	1.48	7.5	1.48
3.33	-13	7.27	1.22	7.5	1.23

De la tabla 9 se obtienen las gráficas de las siguientes figuras 50 y 51.

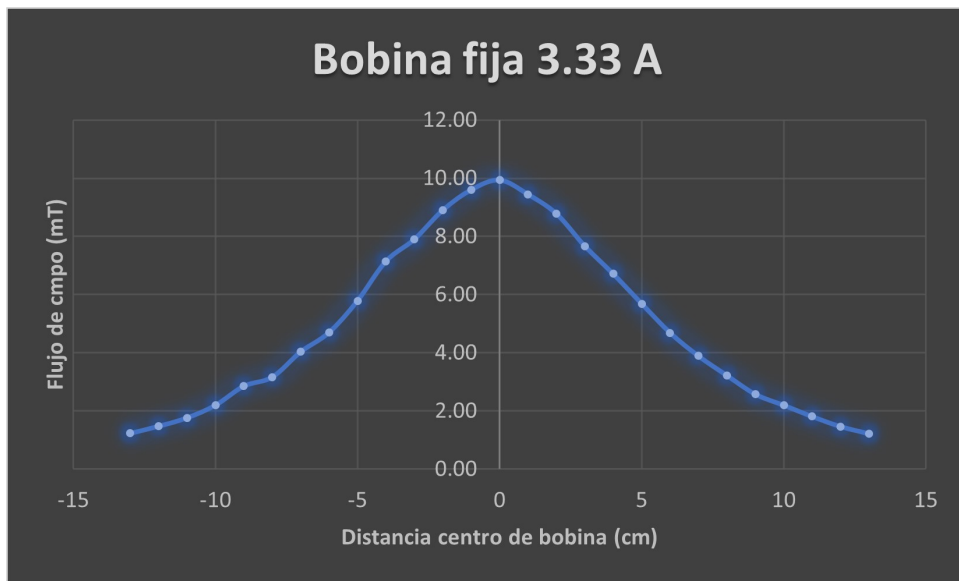


Figura 50: Bobina fija a 3.33 A

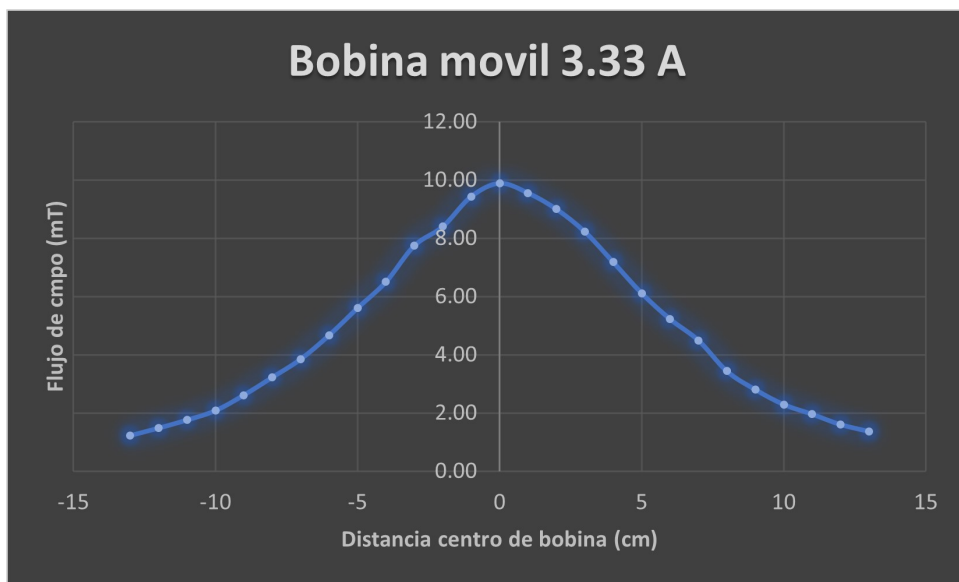


Figura 51: Bobina móvil a 3.33 A

Tabla 10: Generación de campo

Parametros		Bobinas 0.33 A		Bobinas 3.33 A	
Corriente (A)	Distancia (cm)	Voltaje (V)	Flujo (T)	Voltaje (V)	Flujo (T)
3.33	13	2.51	0.36	7.5	3.37
3.33	12	2.51	0.45	7.5	4.09
3.33	11	2.51	0.52	7.5	4.89
3.33	10	2.51	0.62	7.5	5.88
3.33	9	2.51	0.77	7.5	7.07
3.33	8	2.51	0.90	7.5	8.11
3.33	7	2.51	1.06	7.5	9.67
3.33	6	2.51	1.14	7.5	10.56
3.33	5	2.51	1.15	7.5	11.44
3.33	4	2.51	1.17	7.5	11.33
3.33	3	2.51	1.19	7.5	10.82
3.33	2	2.51	1.13	7.5	10.48
3.33	1	2.51	1.10	7.5	10.00
3.33	0	2.51	1.07	7.5	10.03
3.33	-1	2.51	1.09	7.5	10.00
3.33	-2	2.51	1.11	7.5	10.50
3.33	-3	2.51	1.15	7.5	11.37
3.33	-4	2.51	1.19	7.5	11.67
3.33	-5	2.51	1.16	7.5	11.37
3.33	-6	2.51	1.12	7.5	10.78
3.33	-7	2.51	1.02	7.5	9.67
3.33	-8	2.51	0.90	7.5	8.50
3.33	-9	2.51	0.78	7.5	7.57
3.33	-10	2.51	0.69	7.5	6.28
3.33	-11	2.51	0.57	7.5	5.39
3.33	-12	2.51	0.47	7.5	4.34
3.33	-13	2.51	0.39	7.5	3.37

De las tabla 10 se obtienen las gráficas de las siguientes figuras 52 y 53.

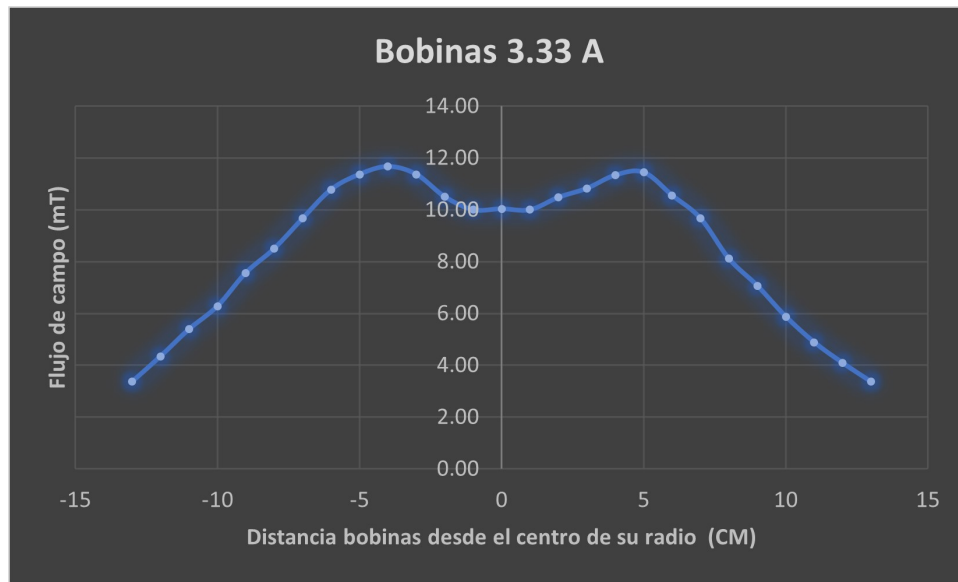


Figura 52: Bobinas a 3.33 A

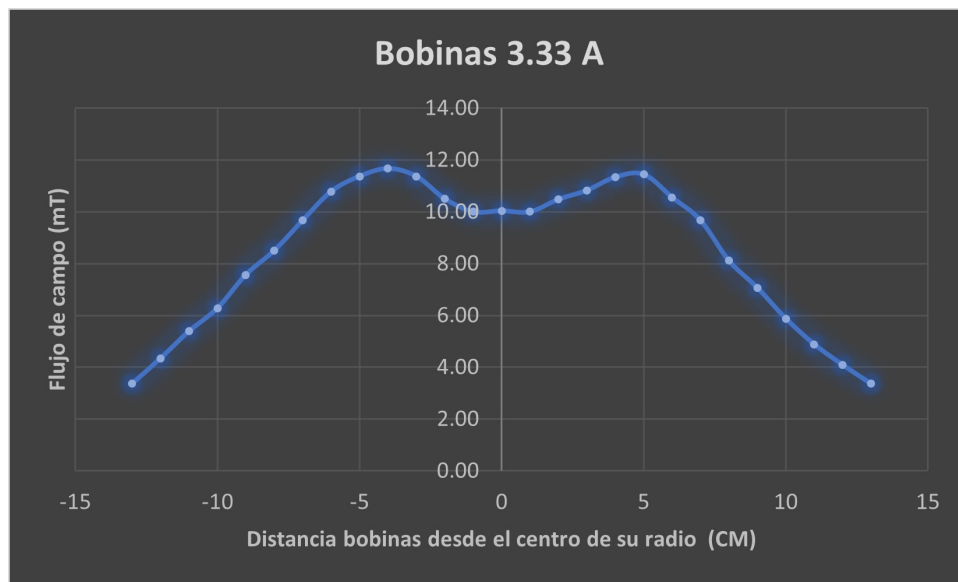


Figura 53: Bobinas a 3.33 A

5.4. Generación de campo magnético

Se realiza la medición del campo magnético utilizando el sistema de posicionamiento automático para realizar un mapeo del campo, se realizan dos experimentos diferentes, el primero para generar un campo magnético de 1 mT. En el segundo caso se genera para 10 mT.

Para realizar este experimento se utilizó el siguiente montaje donde se ven involucrados dos sistemas diferentes, el sistema de generación de campos magnéticos, que es la base fundamental de este proyecto en unión con un sistema de medición de campo magnético con el cual es posible integrar el sistema como se muestra en la siguiente figura 54.

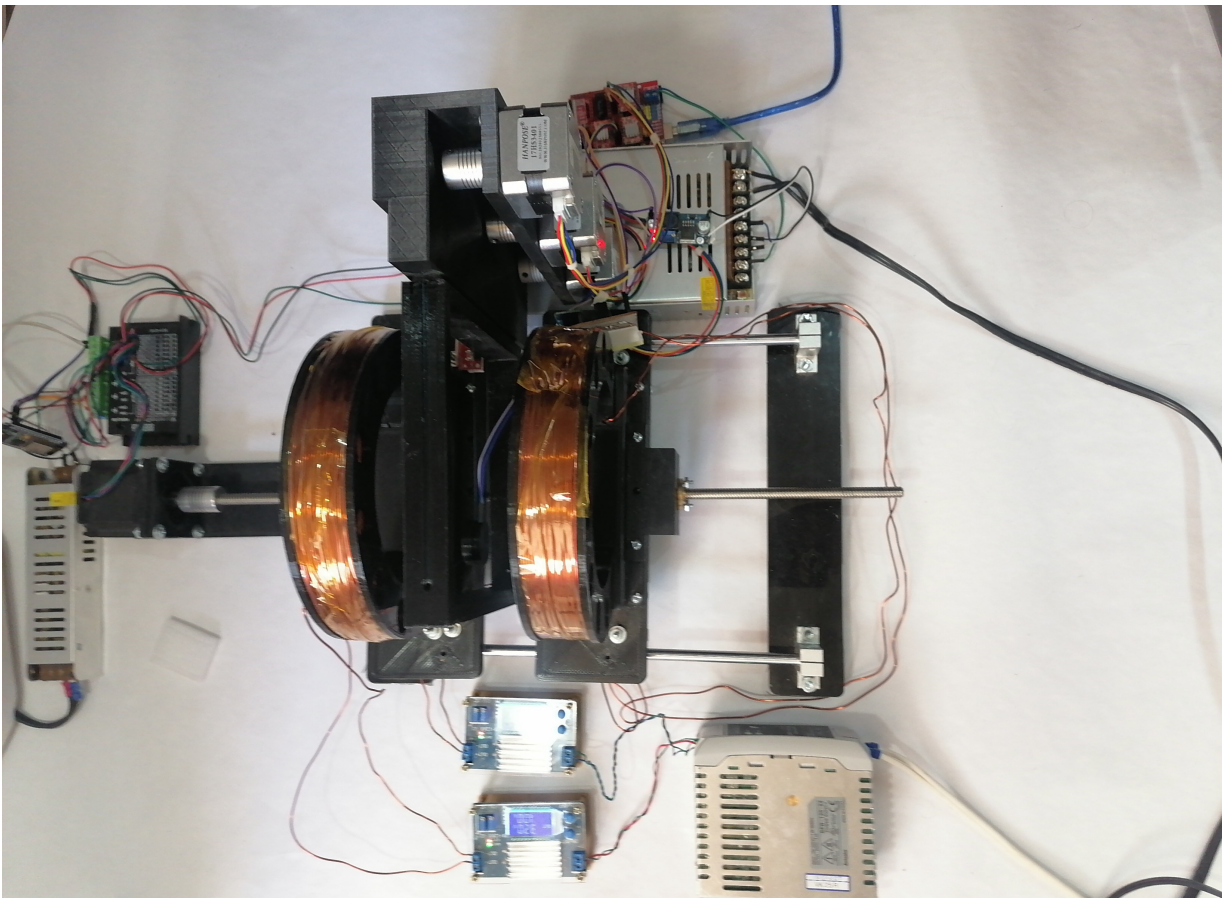


Figura 54: Implementación de los sistemas.

En la siguiente figura 55 se muestra el primer campo, contrastando contra la simulación se observa como en el centro del sistema se tiene una mayor concentración y disminuye a medida que se aleja del centro.

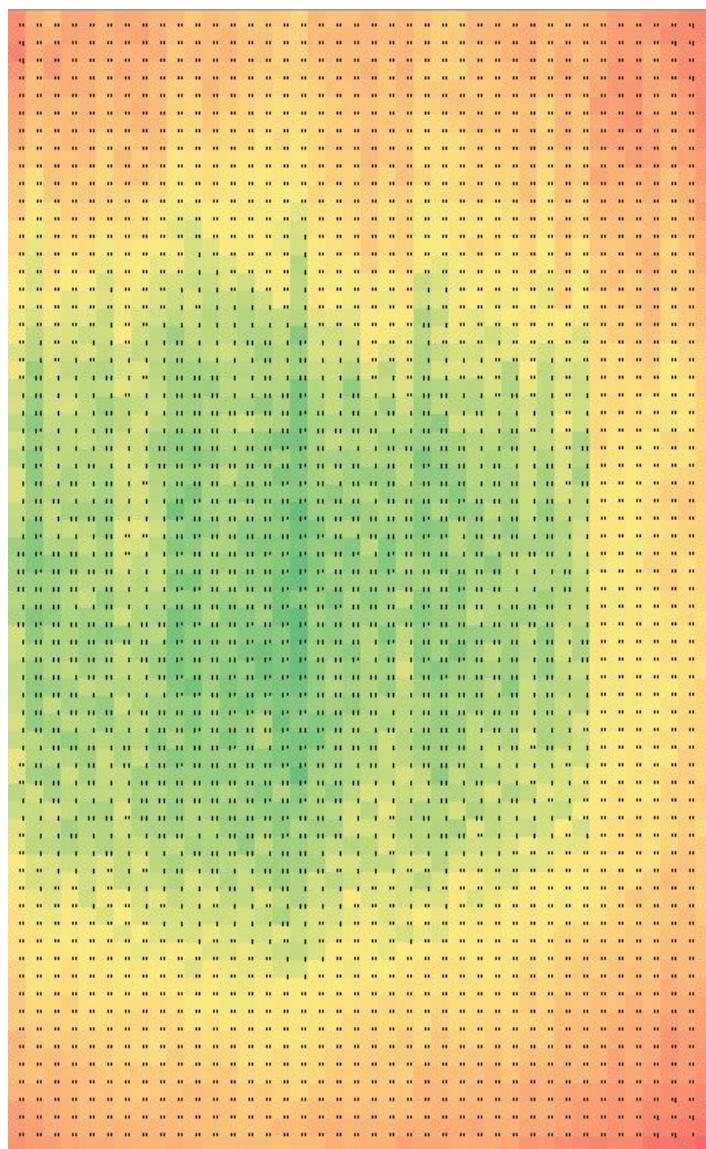


Figura 55: Mapeo del campo magnético para 1 mT.

Dentro de este experimento se recorrió dentro de una zona en el centro del sistema de generación de campo magnético. Se mantuvieron valores constantes en corriente y voltaje. Con respecto a la parte teórica se tienen los siguientes valores:

- $n = 400$
- $I = 0.33 \text{ A}$
- $R_a = 0.12 \text{ m}$

Utilizando la siguiente ecuación de campo magnético:

$$B = \frac{4^{\frac{3}{2}} \mu_0 n I}{5 R_a} \quad (22)$$

Se genera un campo magnético teórico de:

$$B = 0,98$$

De manera teórica teniendo en cuenta todos los puntos obtenidos dentro de las mediciones se obtiene un valor promedio de 1.02 mT. Lo que da como resultado un porcentaje de error de 3.83 %

Para realizar el segundo proceso se desea generar un campo magnético para 10mT Dentro de este experimento se recorrió dentro de una zona en el centro del sistema de generación de campo magnético. Se mantuvieron valores constantes en corriente y voltaje. Con respecto a la parte teórica se tienen los siguientes valores:

- $n = 400$
- $I = 3.33 \text{ A}$
- $R_a = 0.12 \text{ m}$

Utilizando la siguiente ecuación de campo magnético:

$$B = \frac{4^{\frac{3}{2}} \mu_0 n I}{5 R_a} \quad (23)$$

Se genera un campo magnético teórico de:

$$B = 9,98$$

De manera teórica teniendo en cuenta todos los puntos obtenidos dentro de las mediciones se obtiene un valor promedio de 10.21 mT. Lo que da como resultado un porcentaje de error de 2.29 %

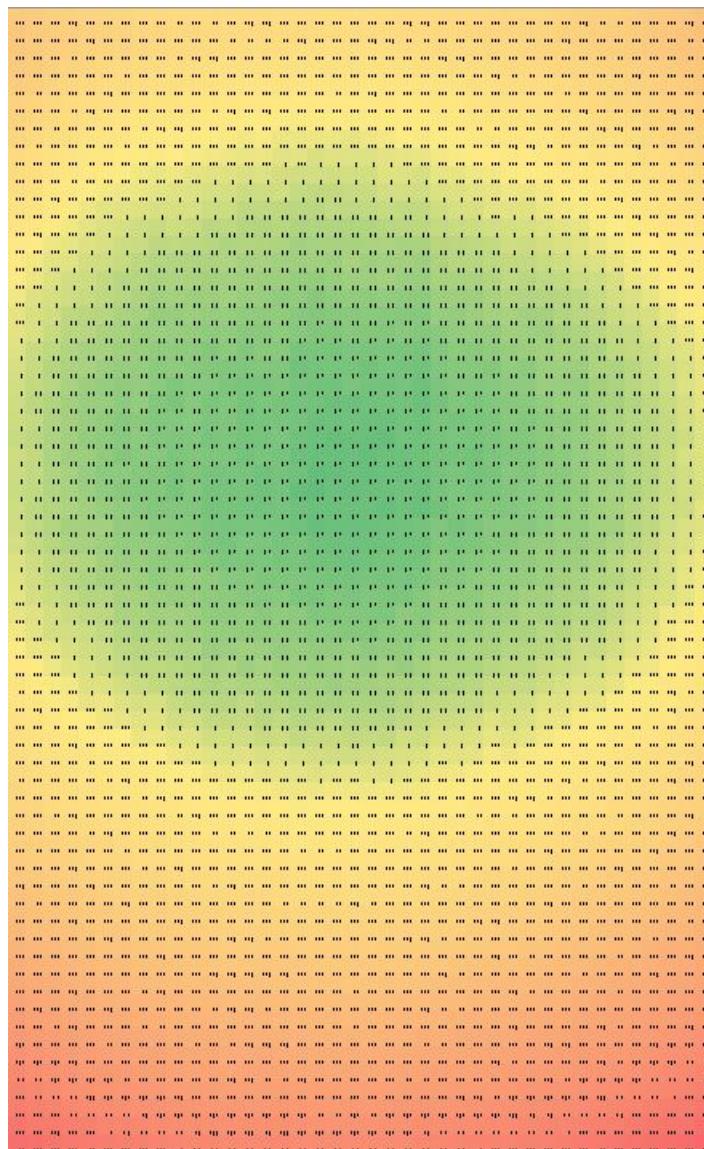


Figura 56: Mapeo del campo magnético para 10 mT.

Como se observa en la figura 56 se observa mucho mas definido el campo magnético.

5.5. Afectación de los cambios en las variables

Cuando se realizan diferentes modificaciones dentro del sistema, como variar la corriente de una sola bobina, o alejar una bobina de la otra se generan variaciones del sistema de hasta el 25 % como se muestra en la siguiente tabla

En la tabla se ve como algunos cambios en la corriente, o en la variación de la posición presentan cambios en el campo generado. El cambiar la intensidad de la corriente en una u otra bobina, pueden presentar cambios significativos en el sistema.

Tabla 11: Medidas con diferentes cambios del sistema

Campo (mT)	Corriente f (A)	Corriente m (A)	Voltaje f (V)	Voltaje m (V)	Dist (cm)	Cam. Teor. (mT)	Error (%)
12.51	3.33	4.33	8.34	10.94	0	10	25.1
12.439	3.33	3.83	8.44	9.81	0	10	24.4
12.35	3.33	3.33	8.53	8.53	0	10	23.5
12.162	3.33	2.83	8.58	7.32	0	10	21.6
11.41	3.33	2.33	8.67	6.01	0	10	14.1
11.403	2.33	3.33	6.09	8.66	0	10	14
12.16	2.83	3.33	7.4	8.71	0	10	21.6
12.421	3.83	3.33	10.11	8.79	0	10	24.2
12.611	4.33	3.33	11.71	8.88	0	10	26.1
12.24	3.33	3.33	9.03	8.88	2	10	22.4
12.559	3.33	4.33	9.07	11.7	2	10	25.6
10.838	3.33	2.33	9.09	6.28	2	10	8.38
12.484	4.33	3.33	12	9.07	2	10	24.8
10.705	2.33	3.33	6.48	9.07	2	10	7.05

6. Impactos

6.1. Impacto científico

Diseño e implementación de un sistema de generación de flujo magnético mediante el uso de bobinas de Helmholtz auto ajustable en el eje x, para generar un flujo magnético constante.

6.2. Impacto tecnológico

En tanto a la mejora tecnológica este sistema cuenta con ajuste automático, para la generación de campo con un sensor de corriente y el distanciamiento automático en el eje x mitigando de esta manera errores humanos.

6.3. Impacto social

Este desarrollo tiene aplicaciones en múltiples ramas como lo son el sector alimenticio se utiliza para la calibración de sensores para detectar trazas de metales. En el sector metal mecánico se utiliza para calibrar sensores que sirven en la medición de la desmagnetización de las piezas. Incluso aplicaciones en el área médica donde utilizan sistemas de bobinas de Helmholtz para controlar robots dentro del cuerpo humano los cuales pueden ayudar a mejorar la calidad de vida de las personas.

6.4. Impacto económico

La correcta generación de campo magnético constante puede reducir costos, ya que la con estos se puede calibrar correctamente los sensores de campo magnético reduciendo el error humano.

6.5. Consideraciones éticas

Para el desarrollo de este proyecto no se requiere experimentación en seres vivos, además, todos los miembros que participan del proyecto quieren hacerlo y tienen conocimientos en el uso de los diferentes equipos que se requieren para la implementaciones y pruebas, se tomarán las siguientes consideraciones éticas:

- Conocimiento abierto a la comunidad para futuras investigaciones y desarrollos.
- Validación de experimentos con base en metodologías y protocolos planteados.
- Resultados verídicos abiertos al público en general.
- Evaluación por el comité de posgrado.
- Respeto por la autonomía de autor.

6.6. Productos logrados

7. Conclusiones

Se determina que es posible generar un campo magnético constante, mediante el uso de las bobinas de Helmholtz. Además, por el uso de su control de posición y de corriente en el sistema, se puede generar un campo magnético el cual al ser comparado con el campo magnético teórico, se obtiene un error inferior al 5 %. También, se puede ver que los cambios en el sistema pueden presentar hasta el 25 % de variación en el sistema.

Se plantearon 4 objetivos, que permitían realizar de una manera coherente y progresiva el desarrollo de un sistema completo. El primer objetivo fue determinar los parámetros bajo los cuales se realizó el resto del proyecto, esto incluía parámetros como: Dimensión de las bobinas, cantidad de flujo magnético que se va a generar, espacio de trabajo, entre otros. Esto se realizó de manera exitosa ya que fue la base de los parámetros de diseño que se utilizaron a lo largo de todo el proyecto. Desde la implementación de los cálculos teóricos, pasando por las simulaciones y culminando en la implementación del sistema.

El segundo objetivo era el desarrollo del sistema mecánico, esto contempla el diseño mecánico, el análisis de elementos finitos, la selección de los materiales, y la fabricación del sistema, el cual se culminó de forma exitosa, puesto que, la base de este trabajo se probó sobre el sistema diseñado

y posteriormente implementado. La segunda parte de este objetivo era el diseño eléctrico de las bobinas, esto implica los cálculos, las simulaciones y posteriores implementaciones mediante las cuales fue posible controlar todo el proyecto, por tal motivo es posible determinar que se cumplió de manera exitosa este objetivo.

Por ultimo se implementaron los controles, mediante los cuales fue posible determinar una posición constante y una corriente constante lo que nos permitió generar un flujo de campo constante. Cumpliendo de manera exitosa con el tercer objetivo planteado.

El desarrollo de esta tecnología nos permite generar campos magnéticos constantes, como se observo en los resultados, y de manera muy cercana a los cálculos teóricos, lo que nos permite tener una mejora tecnológica que se ve reflejada una medida de manera confiable en los diferentes proyectos que se realicen.

Referencias

- [1] Amirmasood Bagheri, Behzad Rejaei, and Amin Khavasi. Implementation of a unidirectional-mode ferrite disk antenna using permanent magnets and a two-stage matching network. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 521:167529, 2021.
- [2] Jr William H. Hayt and John A. Buck. *Teoría electromagnética*, volume 1. Mc. Graw Hill, 2006.
- [3] W.G. Fano, Ramiro Alonso, and Gonzalo Quintana. El campo magnético generado por las bobinas de helmholtz y sus aplicaciones a calibración de sondas. *Elektron*, 1:91–96, Agosto 2017.
- [4] M. A. Brito and S. A. Rodriguez Gonzalez. Simulación en tiempo real del campo magnético terrestre para una misión orbital. In *2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, pages 322–327, 2014.
- [5] R. Beiranvand. Analyzing the uniformity of the generated magnetic field by a practical one-dimensional helmholtz coils system. *AIP Publishing LLC.*, 2013.
- [6] Raymonnd A Serway and John W Jewett. *Física para ciencias e ingenierías.*, volume II. Thomson, sixth edition, jan 2004.
- [7] Dejan Petkovic and Milica Radic. Generalization of helmholtz coil problem. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 12:375–384, jan 2015.
- [8] Shreedhar Kolekar, V. Dhinakaran, T. Jagadeesha, and Choi Seung Bok. Design, fabrication and testing of magnetorheological damper system for machine tool application. In A. Arockiarajan, M. Duraiselvam, and Ramesh Raju, editors, *Advances in Industrial Automation and Smart Manufacturing*, pages 13–31, Singapore, 2021. Springer Singapore.
- [9] N. Lin, P. Liu, and V. Dinavahi. Component-level thermo-electromagnetic nonlinear transient finite element modeling of solid-state transformer for dc grid studies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(2):938–948, 2021.
- [10] Baranov, Pavel and Baranova, Vitalia. Modeling axial 8-coil system for generating uniform magnetic field in comsol. *MATEC Web of Conferences*, 48:03001, 2016.
- [11] Y. Huang, P. Fu, L. Jiang, and Z. Huang. Design and error analysis of a large-caliber steady-state magnetic-field testing system. *IEEE Transactions on Magnetics*, 56(4):1–9, 2020.

- [12] Choi Hyunchul, Jeong Semi, Go Gwangjun, Lee Cheong, Zhen Jin, Young Ko Seong, Park Jong-Oh, and Sukho Park. Equitranslational and axially rotational microrobot using electromagnetic actuation system. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15(3):1342–1350, 2017.
- [13] M. Saqib, F. S. N., and F. J. N. Design and development of helmholtz coils for magnetic field. In *2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, pages 1–5, 2020.
- [14] M. Messer and M. Kühn. Validation of a three-axis magnetic field probe model for homogeneous and inhomogeneous fields. In *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, pages 179–184, 2019.
- [15] A. Fontanet, J. Marcos, Ll. Ribó, V. Massana, and J. Campmany. Design and construction of 3d helmholtz coil system to calibrate 3d hall probes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1350:012167, nov 2019.
- [16] Andrea del Carme Fontanet Valls. Design and construction of a 3d helmholtz coil system for the alba magnetic measurements laboratory.
- [17] Lee R. Moore, Meredith Midura, Robert Royer, Charlie Androjna, Richard Rozic, Erik I. Waldorff, Nianli Zhang, James T. Ryaby, Ronald J. Midura, and Maciej Zborowski. Mechanical resonator to measure magnetic susceptibility of structurally intact bone. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 521:167488, 2021.
- [18] Liang Pan, Na Shang, Junjie Shanguan, Matteo Figini, Wei Xing, Bin Wang, Chong Sun, Jia Yang, Yaqi Zhang, Su Hu, Quanhong Ma, Jian Wang, Yury Velichko, Vahid Yaghmai, Al Benson, and Zhi Zhang. Magnetic resonance imaging monitoring therapeutic response to dendritic cell vaccine in murine orthotopic pancreatic cancer models. *American journal of cancer research*, 9:562–573, mar 2019.
- [19] Mordechai Guri. Magneto: Covert channel between air-gapped systems and nearby smartphones via cpu-generated magnetic fields. *Future Generation Computer Systems*, 115:115 – 125, 2021.
- [20] Josep Campmany, Jordi Marcos, and Valentí Massana. New improvements in magnetic measurements laboratory of the alba synchrotron facility. *Physics Procedia*, 75:1214–1221, 12 2015.
- [21] Pavel Baranov, Vitalia Baranova, S. Uchaikin, and Yana Pisarenko. Creating a uniform magnetic field using axial coils system for calibration of magnetometers. pages 1–5, 11 2016.

- [22] L. Tomkow, A. Smara, and B. A. Glowacki. Application of hot press bending for shaping a stack of hts tapes operating as a trapped flux magnet. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(8):1–5, 2020.
- [23] R. A. Pahl, J. L. Rovey, and D. J. Pommerenke. Calibration of magnetic field probes at relevant magnitudes. In *2013 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, pages 1–6, 2013.
- [24] Ratan Singh, Sonal Jain, Vikas Singh, and Faruk Kazi. Design of equidistant hexagonal coil system for demagnetization of naval vehicles. In S. N. Singh, R. K. Pandey, Bijaya Ketan Panigrahi, and D. P. Kothari, editors, *Advances in Power and Control Engineering*, pages 251–262, Singapore, 2020. Springer Singapore.
- [25] John R Reitz, Frederick J Milford, and Robert W Christy. *Fundamentos de la teoría electromagnética*, volume 1. Addison-Wesley Iberoamericana, fourth edition, jan 2004.
- [26] SHASHI RAJ GYAWALI. Design and construction of helmholtz coil for biomagnetic studies on soybean. Master’s thesis, University of Missouri-Columbia, 2008.
- [27] A. Mukhamedgali and Z. B. Rakisheva. Design and simulation of uniform magnetic field. *BALKAN JOURNAL OF ELECTRICAL & COMPUTER ENGINEERING*, 6(4):232–236, 2018.
- [28] Reza Beiranvand. Effects of the winding cross-section shape on the magnetic field uniformity of the high field circular helmholtz coil systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(9):7120–7131, 2017.
- [29] David H Myszka. Máquinas y mecanismos. cuarta edición, 2012. *Editorial PEARSON*.
- [30] Jaime Domínguez Abascal. Teoría de máquinas y mecanismos. *Teoría de máquinas y mecanismos*, pages 1–451, 2020.