

CUADRUPOLO ELECTROMAGNÉTICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES INTELIGENTES

BAJO LA OPCIÓN:
TITULACIÓN INTEGRAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:
ING. JOSÉ LUIS GÓMEZ COLOR

ASESOR:
DR. LUIS MANUEL PALACIOS PINEDA

SINODALES:
DR. ENRIQUE MELGOZA VÁZQUEZ
DRA. ERIKA OSIRIS ÁVILA DÁVILA

Pachuca de Soto, Hidalgo, septiembre del 2022

93 PÁGINAS





**Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica
ACTA**

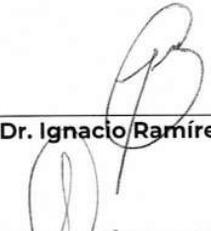
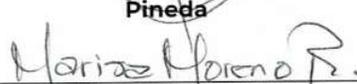
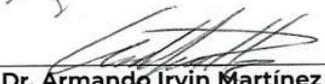
Siendo las 13:00 horas del 19 de febrero de 2022, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: *Cuadripolo electromagnético para la caracterización de materiales inteligentes*, con el siguiente contenido:

- Resumen/Abstract
- Nomenclatura
- Contenido
- Índice de cuadros, gráficas y figuras.
- 1- Introducción
- 2- Antecedentes
- 3- Marco teórico
- 4- Prueba biaxial
- 5- Dispositivo electromagnético
- 6- Construcción del cuadripolo
- 7- Caracterización del dispositivo
- 8- Funcionamiento del cuadripolo
- Conclusiones
- Bibliografía
- Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. José Luis Gómez Color obtenga el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Luis Manuel Palacios Pineda y la codirección del Dr. Enrique Melgoza Vázquez.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"®

 Dr. Ignacio Ramírez Vargas	 Dr. Juan Serrano Arellano	 Dr. Luis Manuel Palacios Pineda
 Dra. Erika Osiris Ávila Dávila	 Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas	 Dra. Marisa Moreno Ríos
 Dr. Armando Irvin Martínez Pérez	 Dr. Francisco Noe Demesa	 Dr. Hugo Francisco Abundis Fong



Instituto Tecnológico de Pachuca
ISO 9001:2015
Registro: RSCC-1002
Vigencia: 2022.07.28
Alcance: Proceso educativo, comprende desde la inscripción hasta la entrega del título profesional.

Carretera México – Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42080 Pachuca de Soto, Hidalgo.
Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399
e-mail: depi@pachuca.tecnm.mx | tecnm.mx | pachuca.tecnm.mx



2022 Ricardo Flores
Año de Magón
PRELUDIO DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



Pachuca, Hidalgo, **9/Septiembre/2022**
OFICIO No. DEPI-0125-22

**C. ING. JOSÉ LUIS GÓMEZ COLOR
PRESENTE**

La que suscribe, jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

**Cuadrupolo electromagnético para la
caracterización de materiales inteligentes**

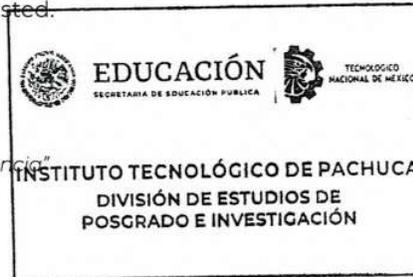
se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y, en consecuencia, se autoriza su impresión.

Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"



**M.A.C. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

C.p. Archivo
ECGO/LMPP



Instituto Tecnológico de Pachuca
ISO 9001:2015
Registro: RSGC-1002
Vigencia: 2022.07.28
Alcance: Proceso educativo, comprende desde la inscripción hasta la entrega del título profesional.

Carretera México – Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.

Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399

e-mail: depi@pachuca.tecnm.mx | tecnm.mx | pachuca.tecnm.mx



2022 Ricardo
Flores
Año de
Magón
PRELUDIO DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Dedicatoria

Para mi hermano **Carlos Alberto Becerril Vargas**.

D.E.P

Agradecimientos

A constant quest to be the best version of yourself.

Agradezco a cada persona que ha estado en mi camino y me ayudo a lograr mi mejor versión, amigos, profesores y familia.

Resumen

La presente tesis describe el desarrollo, análisis y fabricación de un dispositivo electromagnético que será instalado en una banco de ensayos biaxiales con la finalidad de realizar experimentación con materiales inteligentes bajo el influjo de campos magnéticos. En este caso, el estudio se llevará a cabo en elastómeros magnetorreológicos, analizando probetas que poseen una geometría optimizada y un porcentaje en peso de partículas de carbonilo hierro, mejorando las propiedades mecánicas. El objetivo del dispositivo es generar un campo magnético homogéneo estacionario sobre una sección específica de la probeta; para esto, se hizo uso de conocimientos centrales sobre el diseño de máquinas eléctricas, tomando como parte fundamental el uso de aceros eléctricos. Para el diseño, la geometría del banco de ensayos es de suma importancia, ya que desde ahí deberá operar el dispositivo; durante su desarrollo se estableció un diseño final denominado **Cuadrupolo Electromagnético**, el cual posee una estructura de acero eléctrico cuya función es aumentar el campo magnético, reducir el uso de otros materiales y disminuir el consumo eléctrico. Su desarrollo fue realizado numéricamente con ayuda del software **ANSYS Maxwell**, el cual emplea el método de elemento finito; después de un proceso de diseño iterativo, se logró obtener un dispositivo que puede ofrecer el campo magnético deseado, al igual que algunas variantes de campo que podrán ser utilizadas para experimentar distintos comportamientos de los especímenes bajo estudio.

Abstract

This thesis describes the development, analysis, and manufacture of an electromagnetic device that will be installed in a biaxial stress machine in order to experiment with intelligent materials under the influence of magnetic fields. In this case, the study will be carried out on magnetorheological elastomers, analyzing specimens that have an optimized geometry and a percentage by weight of carbonyl iron particles, improving the mechanical properties. The objective of the device is to generate a stationary homogeneous magnetic field on a specific section of the probe; for this, use was made of central knowledge about the design of electrical machines, taking as a fundamental part the use of electrical steels. For the design, the geometry of the stress bench is of the most importance; during its development, a final design called **Electromagnetic Quadrupole** was established, which has a structure of electrical steel whose function is to increase the magnetic field, reduce the use of other materials and reduce electrical consumption. Its development was carried out numerically with the help of the software **ANSYS Maxwell**, which employs the finite element method; finally, after an iterative design process, it was possible to obtain a device that can offer the desired field as well as some field variants that can be used to experiment with different behaviors of the specimens under study.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
Capítulos	Página
<hr/>	
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivo general	3
1.4. Objetivo específico	3
1.5. Hipótesis	4
2. Antecedentes	5
3. Marco teórico	10
3.1. Polímeros	10
3.1.1. Tipos de polímeros	11
3.2. Materiales compuestos	12
3.2.1. Compuestos de fibras	13
3.2.2. Compuestos con partículas	14
3.3. Reología	15
3.4. Elastómeros magnetorreológicos	15
	V
	VII

3.5. Magnetostática	19
3.5.1. Campo magnético	19
3.5.2. Magnetismo	20
3.5.3. Fuentes de campo magnético	20
3.6. Ley de Biot-Savart	20
3.6.1. Corriente estacionaria	20
3.6.2. El campo magnético de una corriente constante	21
3.7. Ley de Ampère	22
3.7.1. Circuitos magnéticos	23
3.8. Diseño de máquinas eléctricas	26
3.8.1. Principio de diseño	26
3.8.2. Factores a considerar	26
3.8.3. Clasificación de problemas de diseño	27
3.8.4. Diseño asistido por computadora	28
3.8.5. Especificaciones y estándares	28
3.8.6. Restricciones de diseño	29
3.8.7. Materiales magnéticos	31
4. Prueba biaxial	35
4.1. Geometría óptima	35
4.1.1. Ensayo biaxial	36
4.1.2. Especificaciones técnicas del dispositivo magnético	37
5. Dispositivo electromagnético	38
5.1. Diseño 1	38
5.1.1. Análisis de campo magnético.	39
5.1.2. Diseño de la conexión	40
5.1.3. Selección de materiales	41
5.1.4. Modelo de elemento finito	44
5.1.5. Densidad de campo magnético	46
5.2. Cuadrupolo electromagnético	48
5.2.1. Diseño inicial	48

5.2.2. Modelado numérico	50
5.3. Mejoras	53
5.3.1. Geometría simétrica	55
5.3.2. Modelado numérico 3D	55
5.3.3. Análisis de resultados	58
6. Construcción del cuadrupolo	63
6.1. Selección del acero	63
6.2. Selección de conductor	67
6.3. Devanados	69
6.3.1. Circuito magnético	70
6.3.2. Dispositivo final	71
7. Caracterización del dispositivo	72
7.1. Dimensiones físicas	73
7.2. Parámetros de operación	73
7.3. Medición del campo magnético	75
7.3.1. Instrumentos de medición	75
8. Banco de ensayos biaxiales	84
8.1. Instalación del cuadrupolo	85
8.2. Alineación de micro partículas	86
8.2.1. Aplicación de campo magnético en las probetas	87
8.2.2. Alineación de micropartículas a 90°	88
8.2.3. Alineación de micropartículas a 45°	89
8.2.4. Conclusión	90

Índice de figuras

3.1. Unidad estructural del poliestireno [1].	11
3.2. Clases de materiales compuestos [1].	12
3.3. Posibles alineaciones de la fibra en los compuestos [1].	14
3.4. Magnetostricción en EMR bajo un campo magnético externo [2].	17
3.5. Microestructura esquemática de MRE: A) - isotrópico, B) - anisotrópico, distribución espacial de partículas [2].	18
3.6. Corriente en lazo cerrado.	21
3.7. Corriente que atraviesa una superficie.	23
3.8. Circuito magnético.	24
3.9. Comportamiento de las líneas de inducción.	24
3.10. Circuito eléctrico.	25
3.11. Circuito magnético.	25
3.12. Componentes básicos del diseño básicos de máquinas eléctricas [3].	27
3.13. Limitaciones de diseño [3].	29
3.14. Clasificación de materiales magnéticos [3].	31
3.15. Tipos de materiales magnéticos y su ciclo de histéresis [3].	32
3.16. Curva de histéresis de materiales magnéticos, suaves y duros [3].	33
4.1. Evolución de la geometría sujeta al proceso de optimización.	35
4.2. Probeta óptima bajo estudio.	36
4.3. Prueba biaxial.	36
4.4. Banco de ensayos biaxiales.	37
5.1. Solenoide.	38
5.2. Ilustración de vectores de campo en vista de sección de un solenoide.	39

5.3. Conexión serie de solenoides.	40
5.4. Conexión serie paralelo.	43
5.5. Distribución de voltaje y corriente.	43
5.6. Geometría CAD del dispositivo electromagnético.	44
5.7. Dirección de corriente en los solenoides.	44
5.8. Dirección de líneas de campo magnético sobre la probeta.	45
5.9. Discretización de la probeta.	45
5.10. Condiciones de frontera.	46
5.11. Distribución de campo \vec{B}	46
5.12. Distribución de esfuerzos.	46
5.13. Análisis de campo en el centro de la probeta.	47
5.14. Cuadrupolo inicial [4].	49
5.15. Propuesta inicial.	49
5.16. Curva B-H.	50
5.17. Selección de materiales.	50
5.18. Condiciones de frontera tipo balloon.	50
5.19. Condiciones de frontera tipo balloon.	51
5.20. Excitación del dispositivo magnético.	51
5.21. Configuración del solucionador.	52
5.22. Análisis de campo.	52
5.23. Densidad de flujo magnético al centro de la probeta.	53
5.24. Comparación de geometrías.	54
5.25. Densidad de flujo magnético sobre la nueva geometría.	54
5.26. Cuadrupolo simétrico.	55
5.27. Geometría del dispositivo magnético.	56
5.28. Selección de materiales.	56
5.29. Condición de aislamiento.	57
5.30. Condiciones de frontera.	57
5.31. Excitación.	58
5.32. Análisis de campo.	59
5.33. Análisis de campo.	60

5.34. Campo normal a la fuerza.	61
5.35. Campo tangencial a la fuerza.	62
5.36. Campo radial.	62
6.1. Curvas B-H.	64
6.2. Densidad de flujo \vec{B} en núcleo sin entrehierro	65
6.3. Núcleos sin entrehierro.	65
6.4. Densidad de flujo \vec{B} en núcleo con entrehierro.	66
6.5. Núcleo con entrehierro.	66
6.6. Devanado de cuarto de vuelta.	68
6.7. Geometría del núcleo.	69
6.8. Bobinadora.	69
6.9. Geometría del núcleo.	70
6.10. Circuito magnético desensamblado.	70
6.11. Dispositivo final.	71
7.1. Cuadrupolo electromagnético.	72
7.2. Dimensiones del dispositivo.	73
7.3. Medición de resistencia.	74
7.4. Gaussímetro.	75
7.5. Equipo de medición.	77
7.6. Equipo de medición del campo magnético.	77
7.7. Campo principal para configuración 1.	78
7.8. Campo para la configuración 2.	78
7.9. Diagrama de contorno para conexión 1.	79
7.10. Comparación de datos numéricos vs experimentales.	80
7.11. Diagrama de contorno para conexión 2.	81
7.12. Comparación de datos numéricos vs experimentales.	82
7.13. Caracterización de campo magnético.	83
8.1. Banco de ensayos.	84
8.2. Banco de ensayos biaxiales y cuadrupolo electromagnético.	85
8.3. Molde para probeta.	86

8.4. Aplicación de campo magnético durante curado de probetas.	87
8.5. Alineación de micropartículas.	87
8.6. Alineación de micropartículas a 90°	88
8.7. Alineación de micropartículas a 45°	89
8.8. Probeta isotrópica cruciforme bajo un estado biaxial de esfuerzos y un campo magnético homogéneo con orientación de 90°	91

Índice de tablas

4.1. Requerimientos técnicos.	37
5.1. Datos del conductor eléctrico seleccionado.	41
5.2. Características del núcleo.	41
5.3. Características de la bobina.	42
5.4. Características físicas del solenoide.	42
6.1. Datos técnicos.	67
6.2. Tabla de datos para alambre magneto.	67
6.3. Cálculo de longitud del conductor.	68
7.1. Datos técnicos reales.	74
7.2. Datos técnicos del gaussímetro 5180.	76

Símbolos

\vec{B}	—	Densidad de flujo magnético (Tesla).
\vec{H}	—	Intensidad de campo magnético (A/m).
\vec{J}	—	Densidad de corriente (A/m ²).
\vec{E}	—	Campo eléctrico (V/m).
\vec{M}	—	Magnetización (A/m).
I	—	Intensidad de corriente eléctrica (Amperes).
Ω	—	Resistencia eléctrica (Ohms).
V	—	Diferencia de potencial eléctrico (Volts).
μ_0	—	Permeabilidad magnética del vacío (T-m/A).
ϵ_0	—	Permitividad eléctrica del vacío (C ² /(N-m ²)).
ϵ_n	—	Permitividad eléctrica relativa (F/m).
σ	—	Conductividad eléctrica(S/m).
\mathcal{F}	—	Fuerza magnetomotriz(A-vta).
ϕ	—	Flujo magnético (Wb).
\mathcal{R}	—	Reluctancia (A-vta/Wb).
A	—	Amperes - (unidad de intensidad de corriente eléctrica).
Wb	—	Weber - (unidad de flujo magnético).
H	—	Henrios - (unidad de inductancia eléctrica).
F	—	Farad - (unidad de capacitancia eléctrica).
S	—	Siemens - (unidad para conductancia eléctrica).

Abreviaturas

<i>ITP</i>	— Instituto Tecnológico de Pachuca.
<i>EMR</i>	— Elastómero Magneto Reológico.
<i>CIP</i>	— Micropartículas de carbonilo hierro.
<i>MR</i>	— Magnetorreológico.
<i>T</i>	— Teslas.
<i>mT</i>	— Militesla.
<i>G</i>	— Gauss.
<i>IUOAC</i>	— Unión de Química Pura y Aplicada.
<i>N</i>	— Número de vueltas.
<i>A - vta</i>	— Amperes por vuelta.
<i>fmm</i>	— Fuerza magnetomotriz.
<i>MEF</i>	— Método de elemento finito.
<i>ISO</i>	— Organización internacional de normalización.
<i>CAD</i>	— Diseño Asistido por Computadora.
<i>I.max</i>	— Corriente eléctrica máxima.
<i>ITESM</i>	— Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey.

Capítulo 1

Introducción

En este trabajo de investigación, se pretende generar el diseño de un banco experimental para poder caracterizar elastómeros magnetorreológicos. La realización de este proyecto facilitará la comprensión del comportamiento de los elastómeros magnetorreológicos bajo el influjo de un campo magnético estacionario y su respuesta a los esfuerzos biaxiales. El diseño y los cálculos respectivos para obtener el campo magnético serán algunos de los factores más relevantes, al igual que buscar optimizar el uso de materiales, diseño y geometrías especiales para mejorar la propagación del flujo magnético de la manera deseada. Para generar el dispositivo que complementara la plataforma de esfuerzos equiaxiales, se utilizarán los fundamentos de diseño de máquinas eléctricas de la mano con software como SolidWorks, pudiendo generar diseños conceptuales hasta obtener la mejor opción, al igual que el software ANSYS MAXWELL para obtener el diseño y la simulación de un dispositivo que deberá generar un campo magnético adecuado para la correcta caracterización del elastómero.

Esto está pensado con la finalidad de crear un equipo que permita la realización de distintas pruebas a estos materiales magnetoactivos, con un amplio rango de campo magnético para distintos ensayos futuros.

1.1. Planteamiento del problema

El problema que se busca solucionar es la adaptación de un banco de ensayos equibiaxiales para realizar análisis de elastómeros magnetorreológicos bajo la influencia de un campo magnético estacionario homogéneo sobre un espécimen con una sección de deformaciones unitarias lo más amplia posible.

La realización de este proyecto facilitará la comprensión del comportamiento del material bajo el influjo de un campo magnético estacionario y su respuesta a distintos tipos de esfuerzos mecánicos, en especial esfuerzo biaxiales. El diseño y los cálculos respectivos para obtener el campo magnético serán algunos de los factores más relevantes, así como también la posibilidad de hacer uso de materiales especiales para distribuir el flujo magnético de la manera deseada y con alta eficiencia, lo que tendrá como beneficio la creación, mejora o especificaciones más puntuales de estos materiales magnetoactivos en distintas aplicaciones de la ingeniería.

1.2. Justificación

El análisis de los elastómeros magnetorreológicos es relevante en algunas áreas de la ingeniería, al ser uno de los materiales propuestos que puede hacer nuevas aportaciones en el campo de los materiales inteligentes. Se considera que el aprovechamiento de este tipo de materiales requiere la comprensión del mismo cuando está bajo el influjo de un campo magnético y fuerzas equiaxiales. El diseño, a diferencia de otros con enfoques similares, podrá comparar la simulación numérica obtenida mediante el método de elemento finito (tensión-deformación) contra curvas numéricas (esfuerzo-desplazamiento) obtenidas experimentalmente, lo que conllevará a una adecuada caracterización, al igual que una selección más exacta para su campo de aplicación. La obtención de datos y especificaciones de estos materiales será un gran aporte para los usos en los que estos se vean involucrados; en la actualidad se les ha dado una valiosa utilidad a estos materiales inteligentes, aplicándolos en **medicina, construcción, electrodomésticos y el sector automotriz.**

Una aportación en este campo sería muy importante, ya que al poder identificar nuevas propiedades en este material o mejorar sus cualidades, podría ser utilizado de forma más común en los sectores antes mencionados y su uso no sería tan complejo, lo que lleva a una reducción en el costo de aplicación.

No existe un equipo con las características antes mencionadas en las instalaciones del ITP y el tenerlo ayudará a poder realizar estudios futuros dentro de la institución. Para su desarrollo se cuenta con recursos económicos por parte del ITP y se cuenta con el apoyo de la infraestructura del ITESM Campus Monterrey.

1.3. Objetivo general

Diseñar un dispositivo que genere un campo magnético estacionario mediante los fundamentos de diseño de máquinas eléctricas de la mano con softwares como SolidWorks y ANSYS MAXWELL para generar el diseño y la simulación del dispositivo.

1.4. Objetivo específico

Diseñar un dispositivo que genere un campo magnético estacionario, mediante los fundamentos de diseño de máquinas eléctricas de la mano con softwares como SOLIDWORKS para generar una simulación del dispositivo y poder verificar y validar las ventajas y desventajas del diseño inicial sin una inversión económica, hasta llegar al equipo funcional que se adecúe a las necesidades del trabajo. Utilizar el software ANSYS MAXWELL para generar el diseño y simulación del dispositivo, verificar las condiciones de operación, tales como densidad de flujo magnético, densidad de corriente y diseño de conexiones eléctricas, pudiendo validar el diseño para su construcción.

1.5. Hipótesis

¿Es posible desarrollar de nuevas aplicaciones para los elastómeros magnetorreológicos?

Esto será posible mediante el diseño y construcción de un dispositivo que generará un campo magnético estacionario y será instalado en una plataforma experimental que aplicará esfuerzos biaxiales, permitiendo así su caracterización. Existe una investigación [5] en la cual se ha demostrado que utilizar esfuerzos equiaxiales es una mejor opción de estudio, ya que se puede realizar una comparación entre una simulación numérica y datos experimentales, haciendo un cotejo de curvas (esfuerzo-deformación), logrando una validación de resultados.

Capítulo 2

Antecedentes

Los artículos citados en esta tesis son fundamentales, ya que forman parte del trabajo desarrollo de elastómeros magnetorreológicos durante los últimos años.

N. Reuge y colaboradores en 2001 [5], demostraron que la hipótesis de tener una burbuja esférica, junto con el balance de volumen, no producía valores útiles para su caracterización. De igual manera, pudieron demostrar que el elastómero en comportamiento biaxial es muy similar al uniaxial y también indicaron que la comparación depende de si se considera la tensión y deformación verdaderas o la tensión y deformación uniaxial y circular.

S. Aloui y colaboradores en 2014 [6], demostraron que para mejorar la sensibilidad magnetoreológica de elastómeros compuestos, la vulcanización debía llevarse a cabo en la presencia de un campo magnético externo para obtener EMR anisotrópicos, dado que la viscosidad de la matriz polimérica se reduce drásticamente durante el curado a alta temperatura mientras que la movilidad aumenta en las partículas de relleno. Por tanto, las partículas pueden moverse fácilmente en presencia de un campo magnético, lo que influye en la distribución de las partículas de relleno magnético en la matriz de polímero. La investigación magnetoreológica de las muestras no reticuladas indicó que, debido a las fuertes interacciones magnéticas dipolo-dipolo entre las partículas de relleno del CIP de tamaño micro, las partículas se alinean en cuerdas. Esta microestructura especial resultan en muestras con una mayor rigidez en su módulo de elasticidad transversal y una red de relleno magnético conductivo de alta sensibilidad para aplicaciones magnetoreológicas. Los efectos de orientación del campo

magnético fueron significativos solo para las partículas CIP de tamaño micro con un alto punto de saturación magnética, lo que indicó que el momento magnético de las nanopartículas es demasiado pequeño para ofrecer suficiente atracción en un campo magnético externo. Una correlación entre la cantidad de CIP en la muestra y la magnitud del efecto de cambio, es decir, el aumento relativo del pequeño módulo G_0 de deformación al encender un campo magnético de 740 mT, se observó para muestras reticuladas y no reticuladas.

C. Bustos y colaboradores en 2016 [7], realizaron una prueba de inflado de referencia para poder evaluar el desempeño del modelado propuesto mediante dos enfoques diferentes: analítico y numérico.

La simulación que se realizó coincidió satisfactoriamente con los experimentos durante la etapa de carga, tanto en presión polar como en desplazamiento ecuatorial. En particular, el valor máximo de presión fue capturado adecuadamente para desplazamientos mayores a los correspondientes de presión máxima; la presión que se obtuvo como componente normal del tensor de la superficie interna del globo, exhibió una disminución en tendencia que coincide con las mediciones.

Las pendientes previstas de la etapa de descarga fueron más pronunciadas que las de las curvas experimentales a deformación excesiva. Se presume que esto obstaculizó el logro de una solución numérica convergente para mayores niveles de desplazamiento. Aunque el análisis numérico no fue capaz de describir la secuencia de inflado completa, permitió, a diferencia del enfoque analítico, la predicción de perfiles de tensión y espesor no uniformes durante el proceso de deformación.

H. Vatandoost y colaboradores en 2017 [8], revelaron que el comportamiento de histéresis de los EMR es asimétrico en tensión. En compresión, la asimetría se mejoró con el aumento de la densidad de flujo magnético, carga, frecuencia y amplitud de desplazamiento. Además, el área y la pendiente del eje mayor de los bucles de histéresis dependieron de la densidad de flujo magnético, la frecuencia de movimiento y el desplazamiento de amplitud.

Los resultados experimentales mostraron que el modelo propuesto puede capturar con precisión el comportamiento dinámico del material EMR bajo oscilación de tensión-compresión, en una amplia gama de densidad de flujo magnético, frecuencia de carga y deformación. Los resultados experimentales también ilustraron que la rigidez equivalente (módulo de almacenamiento dinámico) y amortiguamiento equivalente (alargamiento viscosidad) se incrementaron al aumentar la densidad de flujo magnética y la frecuencia de carga.

L. Palacios y colaboradores en 2017 [9], obtuvieron una geometría óptima cruciforme para la muestra, combinando algoritmos de optimización y simulaciones numéricas para realizar pruebas. Los hallazgos de este artículo sugieren que la incorporación de micro y nanopartículas de hierro en la matriz de elastómero no magnetizable es de interés práctico, ya que este material compuesto pudo variar la rigidez mecánica de la matriz cuando estaba bajo la influencia de campos magnéticos.

C. Soria-Hernández y colaboradores en 2019 [10], trabajaron en el diseño y fabricación de un dispositivo tipo solenoide para generar un flujo magnético uniforme, con el fin de producir con éxito muestras de EMR (Elastómero Magnetorreológicos) con diferentes concentraciones de micropartículas de carbonilo-hierro (CIP). Realizaron análisis numéricos para identificar la posición de la muestra dentro de la bobina en la que el dispositivo proporciona un flujo magnético uniforme. Sus mediciones de pruebas reológicas de tensión mostraron un cambio en los efectos (Magnetorreológicos) MR relativos para el EMR reforzado con 70 % en peso de CIP cuando se aplicó un flujo magnético de 52.2 mT.

Durante las pruebas experimentales uniaxiales, las muestras fueron estiradas hasta un valor máximo de 1,64 veces para someterlas a una densidad de flujo magnético uniforme dentro de la bobina. Los datos recopilados mostraron que para las muestras elaboradas con 63 % en peso de CIP, la rigidez del EMR alcanzó el mayor aumento en su valor de magnitud cuando fue sometido a diferentes valores de densidad de flujo magnético. Después cada muestra de material fue sometido a ciclos de carga-descarga bajo la acción de un flujo magnético longitudinal de intensidad creciente; los datos recopilados se utilizaron para evaluar la precisión del modelo de material constitutivo que fue desarrollado para predecir el ablandamiento y el conjunto permanente de EMR bajo la acción combinada de efectos elásticos y magnéticos,

una comparación de predicciones teóricas y datos experimentales mostraron que el modelo de material constitutivo magneto-elástico propuesto, con constantes de los materiales que deben ajustarse, predijeron bien el comportamiento cualitativo y cuantitativo de las muestras de EMR a pesar de descuidar los efectos viscoelásticos. Basado en predicciones teóricas, se encontró una relación lineal entre la permeabilidad magnética, ablandamiento por tensión, fraguado permanente y rigidez del material frente a la concentración de partículas de hierro carbonilo.

J. Y. Lee y colaboradores en 2019 [11], encontraron que tanto la orientación por un campo magnético como la presencia de uno, aumenta la rigidez y la capacidad de carga en un EMR. El módulo de compresión aumentó más de 10 veces con la alineación de partículas y 80 phr (partes por cien partes de resina) de partículas de hierro. A medida que disminuyó el tamaño de las partículas de polvo de hierro, se incrementó el módulo de compresión bajo un campo magnético. Se encontró que la muestra hecha con un campo magnético de 2 T, mostró un módulo de compresión menor que el de 1.5 T. La agregación de partículas de polvo de hierro condujo a una mala distribución con más agregación cuando se sometió a un campo magnético de 2 T.

Confirmaron que la caída del módulo de compresión con polvo de hierro (carbonilo) entre 1.5 y 2 T, fue mayor que con polvo de hierro grande (electrolítico). El módulo de compresión sin efectos magnéticos muestra que la forma irregular del polvo de hierro electrolítico tendió a aumentar el módulo de compresión al restringir el movimiento de las cadenas moleculares. La presencia de un campo magnético de 300 mT durante la carga de compresión aumentó el módulo de compresión en 15 % en todos los casos, mientras que si aplican un pre-esfuerzo antes de aplicar un campo magnético de 300 mT, los efectos del EMR disminuyeron después de aplicar más del 18 % de tensión.

S. Samal y colaboradores en 2020 [12], efectuaron una vulcanización de un EMR en presencia de un campo magnético externo para obtener EMR anisotrópico, y así mejorar el comportamiento magnetorreológico de los compuestos. Dado que la viscosidad de la matriz polimérica se reduce fuertemente durante el curado a alta temperatura, aumento la movilidad de las partículas utilizadas como relleno.

Las partículas pudieron moverse fácilmente en presencia de un campo magnético, lo que influyó en la distribución del relleno magnético en la matriz del polímero.

Las muestras no reticuladas se investigaron desde el punto de vista magnetorreológico y mostraron la alineación de las partículas en las cuerdas, lo que se atribuyó al fuerte dipolo-dipolo magnético.

Finalmente, estos antecedentes muestran las investigaciones más relevantes y estrechamente relacionadas con este trabajo, sustentando el camino para su desarrollo, ya que se tiene un panorama general sobre el avance en el ámbito científico de los elastómeros magnetorreológicos y se da continuidad a investigaciones previas, mencionadas anteriormente, generando nuevas aportaciones para el futuro uso de los materiales magnetoactivos.

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Polímeros

Los polímeros son cadenas enlazadas de unidades repetidas con enlaces covalentes de extremo a extremo. Los bloques de construcción que se repiten en la cadena se llaman monómeros. Conforme los monómeros empiezan a conectarse entre sí para formar cadenas, se convierten en oligómeros. Conforme más monómeros se agregan a la cadena oligómera, esta crece y al final se convierte en un polímero con la adición de una unidad más de monómero que no tendrá un efecto discernible en las propiedades de la cadena [1].

Polímeros: Cadenas de moléculas enlazadas covalentemente con unidades monoméricas pequeñas repetidas de extremo a extremo.

Monómeros: Bloques de construcción de bajo peso molecular repetidos en la cadena polimérica.

Oligómeros: Cadenas pequeñas de monómeros enlazados cuyas propiedades serán alteradas por la adición de una unidad más de monómero.

Un polímero puede tener 10 000 o 1 000 000 unidades monoméricas repetidas en una cadena, lo que hace impráctico dibujar la molécula completa del polímero. En su lugar, la cadena de polímeros se identifica por su unidad estructural (o unidad de repetición), que es la parte más pequeña de la cadena que se repite. Por ejemplo, **unidad estructural** del poliestireno se muestra en la Figura 3.1. La n representa el número de veces que la unidad estructural se repite en la cadena.

Por supuesto, los polímeros no se forman de una cadena a la vez. Grandes números de cadenas empiezan a formarse en forma simultánea, y diferentes cadenas crecen a diferentes longitudes. El número de unidades de repetición se llama grado de polimerización de la cadena polimérica y se representa por el símbolo \overline{DP}_n

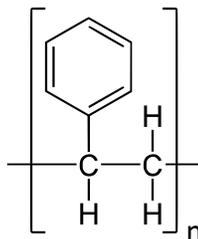


Figura 3.1: Unidad estructural del poliestireno [1].

Los átomos enlazados covalentemente (usualmente el carbono) incluyen el largo centro repetido de la cadena llamado **esqueleto del polímero**. Los átomos anexados al esqueleto se llaman **grupos laterales** o sustituyentes. El hidrógeno es el grupo lateral más común, pero los grupos metilo, los anillos de benceno, las moléculas de hidróxido, los heteroátomos, o incluso otras cadenas de polímeros, pueden fungir como grupos laterales de igual manera. Cuando se dibuja una cadena de polímeros, cualquier grupo lateral que no se muestra específicamente se asume como hidrógeno [1].

3.1.1. Tipos de polímeros

La nomenclatura de los polímeros es compleja y a veces confusa. Los polímeros que ocurren más naturalmente fueron nombrados por la fuente del polímero (celulosa a partir de células de plantas) o por la naturaleza del polímero (los ácidos nucleicos). Los primeros polímeros sintéticos se nombraron a partir de los monómeros que se usaron en su preparación. Un ejemplo de ello son las moléculas hechas de etileno, que fueron llamadas polietilenos. A veces se nombraron por elementos presentes en la cadena de polímeros, como los poliésteres. La International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ha desarrollado un sistema de nomenclatura que usa reglas estrictas para nombrar a los polímeros. Desafortunadamente, tanto los nombres de la IUPAC como los nombres comunes siguen en uso. Además, los polímeros comerciales suelen ser conocidos por sus nombres IUPAC, por una abreviación corta, (ya que los nombres IUPAC en general son largos y engorrosos), y por uno o más

nombres de marca comerciales.

Los **elastómeros** se definen ampliamente como polímeros que se pueden estirar hasta 200 % o más y luego regresar a su longitud original cuando la tensión se libera. Aunque hay muchos tipos de elastómeros, la clase se puede dividir en poliuretanos y plásticos termoestables alifáticos (o cauchos).

Los diversos polímeros existentes muestran una amplia variedad de propiedades; sin embargo, se puede lograr un rango incluso más grande al mezclar los polímeros [1].

3.2. Materiales compuestos

Muy parecido a las aleaciones de metal, los compuestos mezclan dos o más materiales juntos para formar un material con propiedades diferentes a las de cada uno de los materiales padres. Sin embargo, los compuestos difieren de las aleaciones en que cada material matriz continúa existiendo en una fase distinta. Los materiales compuestos se clasifican en tres categorías: reforzados con fibras, partículas y laminares. Los compuestos reforzados con fibras, mostrados en la Figura 3.2, rodean a las fibras fuertes con un material matriz típicamente amorfo que protege y orienta a las fibras [1].

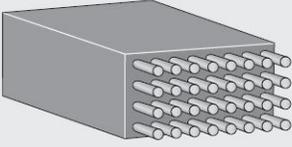
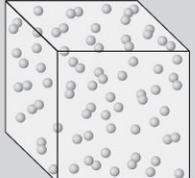
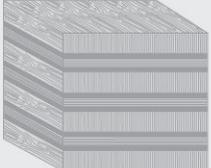
<i>Categoría del compuesto</i>	<i>Definición</i>	<i>Diagrama</i>	<i>Ejemplo</i>
Reforzado con fibras	Compuesto en el que un material se forma de la matriz externa y transfiere cualquier carga aplicada a las fibras más fuertes y débiles.		Compuestos epóxicos Kevlar
De partículas	Compuestos que contienen grandes números de partículas gruesas para reforzar la matriz.		Concreto
Laminares	Compuesto que se hace al alternar juntas con un adhesivo capas de distintos materiales.		Madera contrachapada
Híbrido	Compuesto hecho de otros materiales compuestos.		Concreto reforzado con barras de refuerzo

Figura 3.2: Clases de materiales compuestos [1].

3.2.1. Compuestos de fibras

Los compuestos reforzados con fibras consisten de dos fases: la fibra y la **matriz**. En la mayoría de los casos, fibras fuertes y rígidas, pero frágiles, son puestas en una matriz tenaz, pero más dúctil, resultando en un material con excelente proporción de resistencia-peso, rigidez y resistencia a la fatiga. El rol de la fibra es soportar cargas relevantes de tracción en la dirección longitudinal. Las fibras comunes utilizadas para el reforzamiento incluyen carbono, vidrio, polímeros de alto desempeño, poliéster, acero, titanio y tungsteno. El material matriz rodea a las fibras, las orienta para optimizar su desempeño colectivo, las protege de ataques ambientales y les transfiere la carga.

Propiedades de los compuestos reforzados con fibras

Debido a que las fibras fungen como el material de carga en el compuesto, se seleccionan preferentemente fibras fuertes, pero la relación entre la resistencia de la fibra y la resistencia del compuesto no es simple. La matriz debe ser capaz de transferir la carga mecánica a la fibra a través del enlace covalente entre la fibra y la matriz. Muchos factores (incluyendo el tamaño y la orientación de la fibra, la química de superficie de la fibra, la cantidad de cavidades presentes y el grado de curado) influyen en estos enlaces. Sin embargo, el grado y la calidad del enlace entre la fibra y la matriz es el factor más relevante en la resistencia del compuesto.

Cantidad y orientación de la fibra

La cantidad de fibra añadida a un compuesto impacta su costo y su desempeño. Debido a que las fibras son responsables del manejo de la carga aplicada, el uso de más fibra resulta en compuestos más fuertes. Sin embargo, cuando la fracción de fibra excede alrededor de 80 %, no existe material de matriz suficiente como para rodear y enlazarse completamente con la fibra y transferir con eficiencia la carga. En la mayoría de los casos, las fibras reforzantes son mucho más caras que el material que rodea a la matriz, haciendo deseable la reducción de la fracción de fibra en el compuesto. Aunque la fracción exacta de fibra varía según la clase de material y su aplicación, la mayoría de los compuestos reforzados con fibras contienen de 35 % a 50 % de fibras por volumen. La orientación de las fibras también juega un rol importante en las propiedades de las fibras. Como se muestra en la Figura 3.3, los compuestos se pueden hacer con fibras uniaxiales, fibras picadas orientadas aleatoriamente, o con complejas esteras tejidas bidimensionales o tridimensionales [1].

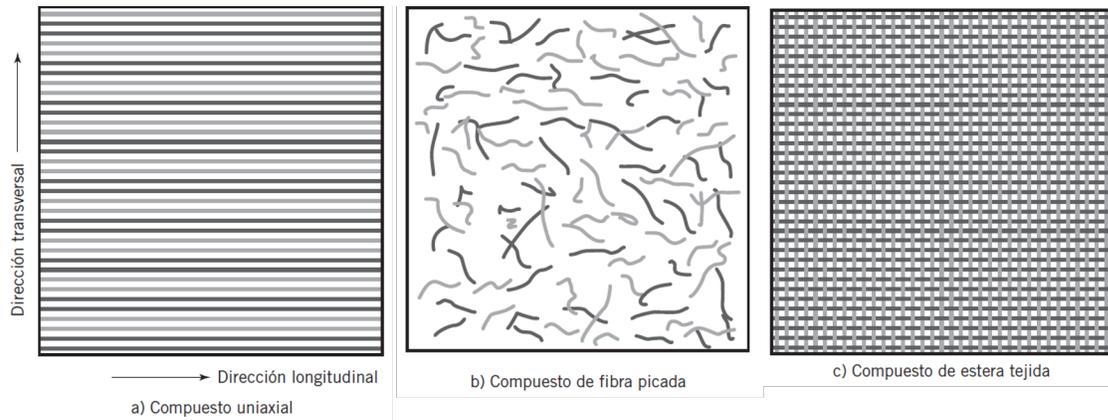


Figura 3.3: Posibles alineaciones de la fibra en los compuestos [1].

3.2.2. Compuestos con partículas

Los compuestos de partículas generalmente no pueden proporcionar la misma resistencia que los compuestos reforzados con fibras, pero son mucho más fáciles de fabricar y mucho menos caros. Los compuestos de partículas contienen un gran número de partículas aleatoriamente orientadas, llamados **agregados**, las cuales ayudan al compuesto a soportar cargas de compresión. Las propiedades finales de los compuestos de partículas son más fáciles de predecir debido a que están libres de las variaciones debidas a la de orientación experimentadas por los compuestos reforzados con fibras. Los compuestos de partículas son isotrópicos, teniendo las mismas propiedades en todas las direcciones. En general, los materiales agregados son más fuertes que los que rodean a la fase de matriz, pero las moléculas adyacentes agregadas no pueden ligarse entre sí. La fase de matriz liga a las partículas agregadas más duras a que se junten, pero también limita la resistencia del compuesto. Un compuesto hecho de agregados fuertes, pero con una matriz débil, fallará bajo cargas de tracción relativamente bajas. Las partículas de agregados incrementan el módulo del compuesto, pero reducen la ductilidad y la permeabilidad del material matriz. Las moléculas de agregados generalmente reducen las deformaciones dependientes del tiempo, incluyendo la fluencia lenta, y casi siempre son mucho menos caros que el material matriz. Las partículas de agregados de menos de 0.25 pulgadas de diámetro se clasifican como **agregados finos**, mientras que las partículas más grandes se clasifican como **agregados gruesos** [1].

3.3. Reología

El término reología fue inventado por el profesor Bingham Lafayette. Significa “el estudio de la deformación y el comportamiento de flujo de la materia” [13]. Otra de las definiciones dadas y una de las más completas es: “La reología es la ciencia que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación a través de expresiones matemáticas constitutivas reológicas de estado”. Así también se tiene la dada por el diccionario Webster: “Es el estudio de los cambios en forma y el flujo de la materia, abarcando la elasticidad, viscosidad y plasticidad” [13]. La reología, o ciencia de la deformación de la materia, se ocupa preferentemente de la deformación de los cuerpos aparentemente continuos y coherentes, pero con frecuencia trata también de la fricción entre sólidos, del flujo de polvos e incluso de la reducción a partículas [13].

3.4. Elastómeros magnetorreológicos

Los elastómeros magnetorreológicos (EMR) consisten en partículas magnéticamente permeables (como hierro u otras partículas ferromagnéticas) añadidas a una matriz polimérica viscoelástica. Los EMR contienen partículas ferromagnéticas que tienen un tamaño promedio de algunos micrómetros. El hierro puro tiene la mayor magnetización de saturación de los elementos conocidos y también tiene una alta permeabilidad y una baja magnetización remanente, lo que proporciona una alta atracción entre partículas a corta distancia. Se sabe por la bibliografía disponible que la cantidad y la forma de las partículas, así como el tipo de matriz polimérica, influyen en las propiedades de los EMR [2].

Existe una clasificación de EMR según su tipo:

1. Propiedades magnéticas de las partículas.
 - a) Partículas magnéticas blandas.
 - b) Partículas magnéticas duras.
 - c) Partículas magnetostrictivas.
 - d) Partículas magnéticas con memoria de forma.

2. Estructura de la matriz.
 - a) Matriz sólida.
 - b) Matriz porosa.
3. Propiedades eléctricas de la matriz.
 - a) Matriz aislante.
 - b) Matriz conductora.
4. Distribución de las partículas.
 - a) Isotrópica.
 - b) Anisotrópica.

Normalmente, se aplica un campo magnético a los compuestos poliméricos durante la reticulación de la matriz. Dicho tratamiento bloquea las estructuras columnares de la cadena de partículas durante el curado final, dando propiedades anisotrópicas especiales. La formación de estructuras de partículas columnares dentro de los elastómeros corresponde a un estado de baja energía dipolar. El cizallamiento del material compuesto curado bajo un campo magnético aplicado requiere energía adicional debido al desplazamiento de las partículas de este estado de baja energía. La cantidad de trabajo requerido y el módulo de corte dependiente del campo aumentan proporcionalmente con el campo magnético aplicado [2].

Los cambios de las propiedades en los EMR bajo la influencia del campo magnético dependen en gran medida de la microestructura formada durante el curado de la matriz de elastómero, también como resultado del campo magnético. Las interacciones entre las partículas en un campo magnético las acercan, lo que resulta en una mayor rigidez del material. Esto cambia las curvas de tensión-deformación. El campo magnético provoca un cambio hacia tensiones más altas. El mismo mecanismo es responsable del efecto de 'magnetoestricción', acortamiento de la longitud de la muestra cilíndrica en presencia de un campo magnético externo, como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.4 A, o su extensión, el EMR cuando las partículas se distribuyen isotrópicamente [2].

Bajo la influencia del campo, las partículas se mueven en la dirección del mismo, como se muestra en la Figura 3.4 B. Este efecto es posible cuando la adhesión entre las partículas y la matriz es lo suficientemente grande como para que el movimiento de las partículas conduzca a la deformación de la matriz elastomérica, que tiene una rigidez tan baja que pueden producirse tales deformaciones. Un fenómeno similar ocurre en los EMR cuando las partículas son esféricas y tienen una forma alargada. Luego, bajo la influencia del campo magnético, se convierten en dipolos, que giran en la dirección del vector del campo magnético, lo que también conduce a la deformación del elastómero y, por lo tanto, aumenta la longitud de la muestra como se muestra en la Figura 3.4 C. En todos los casos, estos cambios son rápidos y totalmente reversibles[2].

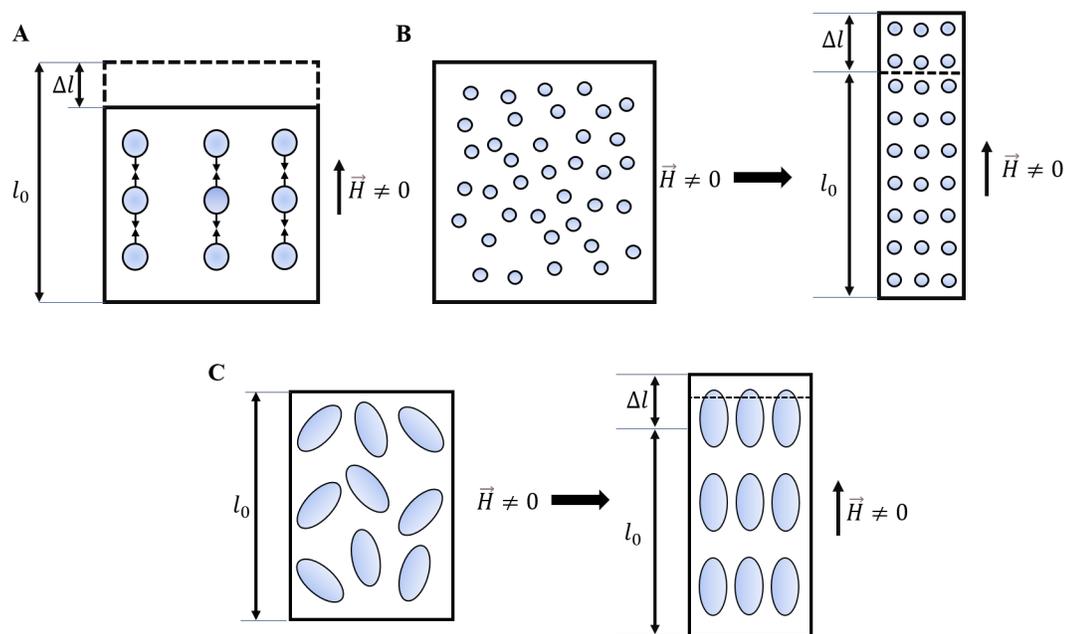


Figura 3.4: Magnetostricción en EMR bajo un campo magnético externo [2].

Bajo la influencia del campo magnético, las propiedades reológicas de los EMR cambian, principalmente el módulo de corte, pero también el módulo de elasticidad determinado en una prueba de compresión. Estas propiedades dependen en gran medida de la intensidad del campo magnético. El cizallamiento de EMR en presencia de un campo magnético desplaza las partículas de la posición de estado de energía mínima, lo que requiere un trabajo adicional que aumenta monótonamente al incrementarse la intensidad del campo magnético.

Por lo tanto, el módulo de corte depende del campo y es un rasgo característico de los EMR. Los cambios del módulo en el campo magnético también dependen del contenido de partículas ferromagnéticas en la matriz de elastómero [2].

La gran mayoría de los EMR descritos en la literatura contienen partículas magnéticas blandas, principalmente hierro, cobalto y sus óxidos. Existe un grupo de elastómeros magnetorreológicos con rellenos magnéticos duros como $BaFe_{12}O_{19}$ o $SrFe_{12}O_{19}$. Estos materiales, como los imanes permanentes, permanecen magnetizados después de retirar el campo magnético externo. Para la fabricación de EMR también se utilizan partículas magnetostrictivas, generalmente Terfenol D - un material con magnetostricción gigante y partículas con memoria de forma magnética (MSM), como Ni-Mn-Ga [2].

La distribución espacial de las partículas se determina durante el proceso de curado. En presencia de un campo magnético durante el curado, el elastómero obtenido tiene una estructura orientada anisotrópica, que consta de cadenas de partículas, como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.5 B). El elastómero magnetorreológico curado sin campo magnético produce una estructura isotrópica, como se muestra en el diagrama esquemático de la Figura 3.5 A) [2].

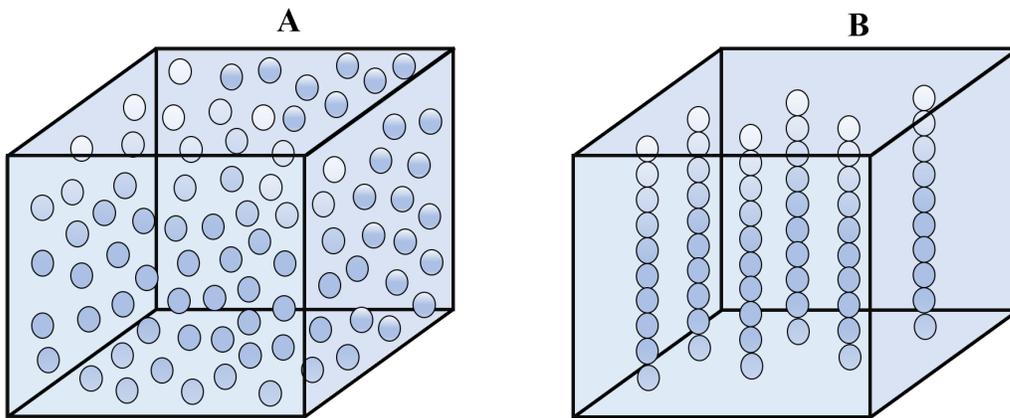


Figura 3.5: Microestructura esquemática de MRE: A) - isotrópico, B) - anisotrópico, distribución espacial de partículas [2].

3.5. Magnetostática

La magnetostática es el estudio de todos los fenómenos físicos en los que intervienen campos magnéticos constantes en el tiempo. Abarca desde la atracción que ejercen los imanes y los electroimanes sobre los metales ferromagnéticos, como el hierro, hasta los campos magnéticos creados por corrientes eléctricas estacionarias.

En las siguientes subsecciones se describirán los tipos de campos magnéticos y las fuentes que los producen.

3.5.1. Campo magnético

Los campos magnéticos se crean por: a) cualquier corriente eléctrica (electrones en movimiento) o b) momento magnético intrínseco de las partículas elementales asociado con una propiedad cuántica fundamental, su espín. [14].

El término campo magnético se usa para dos campos distintos, pero estrechamente relacionados, indicados por los símbolos \vec{B} y \vec{H} , donde, \vec{H} es la intensidad de campo magnético, mientras que \vec{B} es la densidad de flujo magnético. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), \vec{H} se mide en unidades de amperios por metro y \vec{B} se mide en Teslas.

En un vacío, $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, donde μ_0 es una constante conocida como permeabilidad magnética del vacío dada por $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-4}$. En un material con magnetización, $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ donde μ_0 es no lineal y tensorial, \vec{B} es solenoidal (no tiene divergencia) mientras que \vec{H} es irrotacional, excepto donde exista densidad de corriente eléctrica.

Para caracterizar \vec{H} y \vec{B} se ha recurrido a varias distinciones. Así, \vec{H} describe cuan intenso es el campo magnético en un punto, mientras que \vec{B} es la cantidad de flujo magnético por unidad de área que aparece al rededor de ese punto [15].

3.5.2. Magnetismo

La mayoría de los materiales son capaces de responder a un campo \vec{H} aplicado produciendo su propia magnetización \vec{M} y, por tanto, su propio campo \vec{B} . Normalmente, la respuesta es débil y solamente existe cuando se aplica el campo magnético [14]. El término magnetismo describe cómo los materiales responden a nivel microscópico a un campo magnético aplicado y se utiliza para categorizar la fase magnética de un material. Los materiales se clasifican, según su comportamiento magnético:

- Diamagnético
- Paramagnético
- Ferromagnéticos

3.5.3. Fuentes de campo magnético

Un campo magnético tiene dos fuentes que lo originan. Una de ellas es una corriente eléctrica de conducción, que da lugar a un campo magnético estático si la corriente es constante. Por otro lado, una corriente de desplazamiento origina un campo magnético variante en el tiempo, incluso aunque aquella sea estacionaria. La relación entre el campo magnético y una corriente eléctrica está dada por la ley de Ampère. El caso más general, que incluye a la corriente de desplazamiento, lo da la ley de Ampère-Maxwell [14].

3.6. Ley de Biot-Savart

3.6.1. Corriente estacionaria

Las cargas en reposo originan un campo eléctrico estático. Por otra parte, corrientes invariantes en el tiempo producen un campo magnético estático. La teoría del campo magnético producido por corrientes estacionarias se llama magnetostática.

1. Carga estacionaria

a) Campo eléctrico constante: Electrostática.

2. Corriente constante

a) Campo magnético constante: Magnetostática.

Cuando se habla de corrientes estacionarias, se hace referencia a un flujo continuo, sin cambios y sin acumulación de cargas en algún punto. En la realidad no existen corrientes completamente estables o estacionarias, viéndolo de esta manera la electrostática y la magnetostática son una descripción de un modelo ideal que genera una aproximación bastante adecuada siempre y cuando la magnitud de los cambios sea muy pequeña. Cuando una corriente constante fluye por un cable, la magnitud de esta siempre debe ser la misma en todo el trayecto, de lo contrario se acumularían cargas en algún punto y ya no sería continua. Esto se puede expresar matemáticamente mediante ecuación de continuidad:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (3.1)$$

donde \vec{J} es la densidad de corriente (A/m^2).

3.6.2. El campo magnético de una corriente constante

El campo magnético de una corriente constante está dado por la ley de Biot-Savart:

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{d\vec{l}' \times \hat{R}}{R^2} \quad (3.2)$$

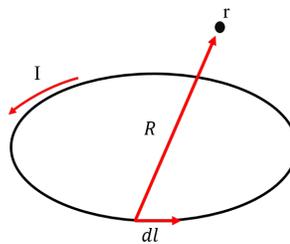


Figura 3.6: Corriente en lazo cerrado.

La integración es a lo largo de la trayectoria de la corriente, en la dirección de la misma; (dl') es un elemento de longitud a lo largo del conductor y (R), es el vector desde la fuente hasta el punto (\vec{r}), como se muestra en la Figura 3.6. La constante (μ_0) se llama permeabilidad magnética del vacío:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} N/A^2. \quad (3.3)$$

Estas unidades son tales que \vec{B} se expresa en newtons por Ampère-metro (como lo requiere la ley de fuerza de Lorentz), o Teslas (T):

$$1T = 1N/(A \cdot m) \quad (3.4)$$

Como punto de partida para la magnetostática, la ley de Biot-Savart juega un papel análogo a la ley de Coulomb en electrostática.

3.7. Ley de Ampère

Otra ecuación importante que describe el comportamiento del campo magnético es la Ley de Ampère:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (3.5)$$

A esta expresión se le conoce como Ley de Ampère en forma diferencial. Se puede convertir a forma integral mediante el recurso habitual de aplicar uno de los teoremas fundamentales, en este caso el teorema de Stokes:

$$\int (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \cdot da = \oint \vec{B} \cdot dl = \mu_0 \int \vec{J} \cdot da \quad (\text{Ecuación de Ampère - Maxwell en forma integral.}) \quad (3.6)$$

Ahora bien, ($\int \vec{J} \cdot da$) es la corriente total que pasa a través de una superficie, como la mostrada en la Figura 3.7. Si llamamos I_{enc} a la corriente encerrada por un lazo amperiano, podemos escribir:

$$\oint \vec{B} \cdot dl = \mu_0 I_{enc} \quad (3.7)$$

La Ecuación 3.7 es la versión integral de la ley de Ampère. Se debe resaltar que la Ecuación 3.7 tiene la ambigüedad de signo por el teorema de Stokes; para resolver esto, debemos utilizar la regla de la mano derecha.

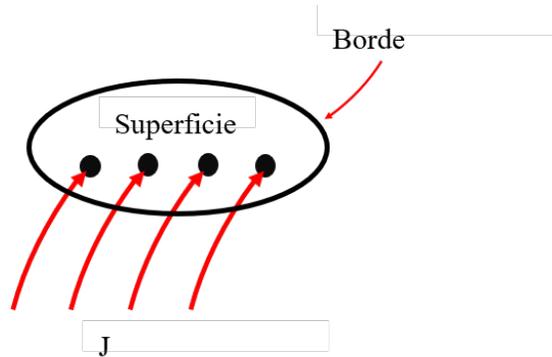


Figura 3.7: Corriente que atraviesa una superficie.

La ley de Ampère es el análogo a la ley de Gauss.

1. Electrostática: Ley de Coulomb - Ley de Gauss.
2. Magnetostática: Ley de Biot-Savart - Ley de Ampère.

En particular, para corrientes con simetría, la ley de Ampère en forma integral es muy útil para realizar el cálculo del campo magnético.

3.7.1. Circuitos magnéticos

Un circuito magnético está formado generalmente por una estructura de hierro, sobre la que se arrollan conductores formando bobinas por las que circulan corrientes que dan lugar a los flujos magnéticos que aparecen en el sistema; esto se muestra en la Figura 3.8.

El cálculo exacto de los flujos magnéticos producidos es generalmente muy difícil y para una determinación muy rigurosa sería necesario emplear correctamente las ecuaciones de Maxwell y la ayuda de un modelo numérico. El concepto de circuito magnético se puede emplear para calcular de manera aproximada los flujos magnéticos.

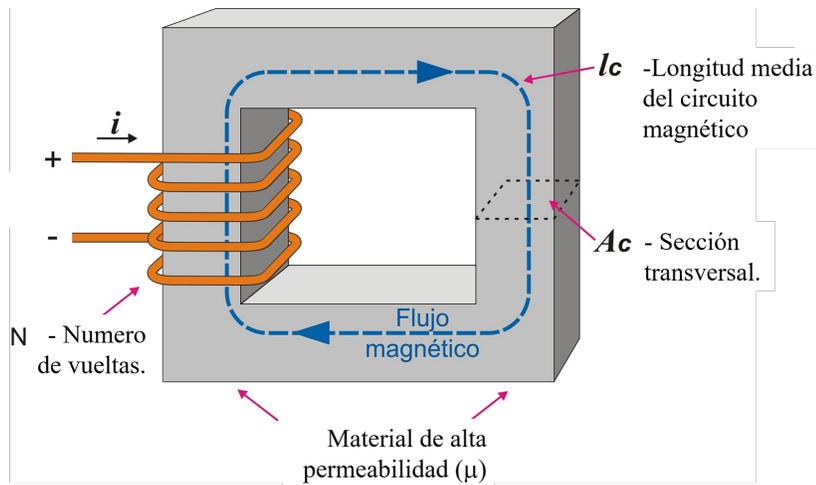


Figura 3.8: Circuito magnético.

El comportamiento de un circuito magnético viene determinado fundamentalmente por el comportamiento solenoidal de las líneas de inducción magnética $\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0$ (Figura 3.9) y por el hecho de que en los materiales ferromagnéticos la permeabilidad es elevada y muy superior a la del vacío.

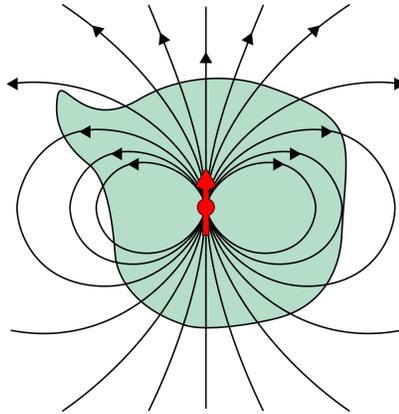


Figura 3.9: Comportamiento de las líneas de inducción.

En un circuito eléctrico sencillo como el de la Figura 3.10, la fuente de voltaje V genera una corriente I a lo largo de la resistencia R . La relación entre estas cantidades está dada por:

$$V = IR \quad (\text{Ley de Ohm}) \quad (3.8)$$

En el circuito eléctrico, el voltaje genera el flujo de corriente. Por analogía, la cantidad correspondiente en el circuito magnético (Figura 3.11) se denomina fuerza magnetomotriz (fmm). La fuerza magnetomotriz de un circuito magnético es igual al flujo efectivo de corriente aplicado al núcleo dado por:

$$\mathcal{F} = Ni \quad (3.9)$$

donde \mathcal{F} es el símbolo de la fuerza magnetomotriz (medida en Ampère-vueltas), I es la corriente aplicada y N el número de vueltas de la bobina.

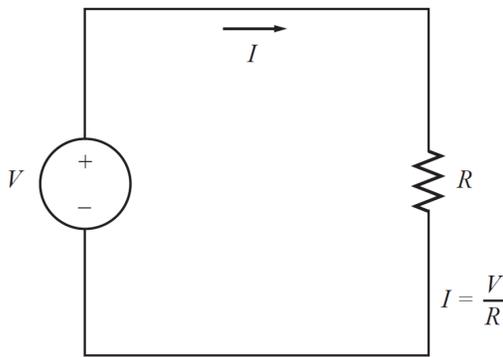


Figura 3.10: Circuito eléctrico.

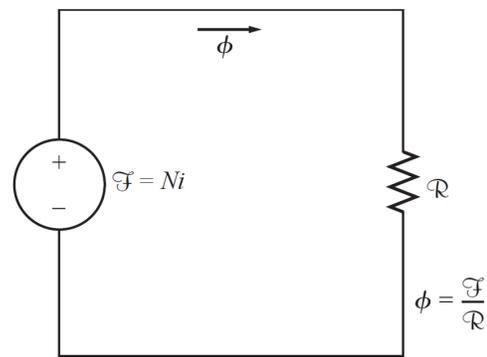


Figura 3.11: Circuito magnético.

En un circuito eléctrico (Figura 3.10), el voltaje aplicado ocasiona un flujo de corriente; en forma similar, en un circuito magnético (Figura 3.11), la fuerza magnetomotriz aplicada ocasiona un flujo ϕ .

La relación entre voltaje y corriente en un circuito eléctrico está dada por (3.8); en forma semejante, la relación entre la fuerza magnetomotriz y el flujo magnético está dado por:

$$\mathcal{F} = \phi \mathcal{R} \quad (3.10)$$

\mathcal{F} = Fuerza magnetomotriz del circuito

ϕ = Flujo magnético en el circuito

\mathcal{R} = Reluctancia magnética del circuito

La reluctancia de un circuito magnético es el homólogo de la resistencia del circuito eléctrico y se mide en Ampère-vueltas por weber.

3.8. Diseño de máquinas eléctricas

3.8.1. Principio de diseño

Las máquinas eléctricas son dispositivos electromecánicos que pueden poseer tanto partes fijas como móviles combinados para generar, transformar o utilizar energía mecánica / eléctrica. Todas las máquinas poseen partes, cada una de estas comprende la posibilidad de ser diseñada de forma independiente y en ensamblaje, cada parte puede ser una pieza completa o un ensamble de pequeñas piezas unidas por soldadura, remaches, etc.

La realización física de una máquina debe comprender algunas condiciones de rendimiento buscando una economía y eficiencia óptima, por lo cual el objetivo de un diseño es obtener dimensiones completas de todas las partes de la máquina. Esto se debe realizar para cumplir las especificaciones de materiales disponibles a un costo, tamaño y peso óptimo, sin comprometer el rendimiento y durabilidad [3].

3.8.2. Factores a considerar

Existen tres factores clave para obtener un buen diseño, los cuales son:

1. Economía.
2. Durabilidad.
3. Cumplimiento de las especificaciones y estándares.

Realizar un proceso de diseño implica muchos cálculos de ingeniería realizados de manera iterativa. Al diseñar una máquina, es imposible aplicar reglas rígidas para obtener el mejor diseño y el costo más bajo. De forma muy regular se deben tomar decisiones que involucran objetivos contradictorios.

Es importante mantener un compromiso entre la durabilidad y la economía dependiendo de la aplicación y cumpliendo con todas las especificaciones. Es de gran importancia tomar en cuenta la formulación de un diseño ideal y un diseño que sea completamente realizable en condiciones de fabricaciones reales, respetar condiciones ambientales, conveniencia de producción, transporte, mantenimiento, seguridad y confiabilidad para el usuario final.

De esta manera, la responsabilidad principal del diseñador es asignar un espacio adecuado para cada uno de los componentes de la máquina. También se debe realizar una elección adecuada de materiales aislantes, eléctricos y magnéticos, todos estos sujetos a disponibilidad, características y costos consistentes con las especificaciones.

3.8.3. Clasificación de problemas de diseño

Existen distintos grupos de máquinas eléctricas en los cuales se utilizan diversos tipos de materiales y piezas; por lo tanto, los componentes básicos de diseño se muestran en la Figura 3.12 [3].

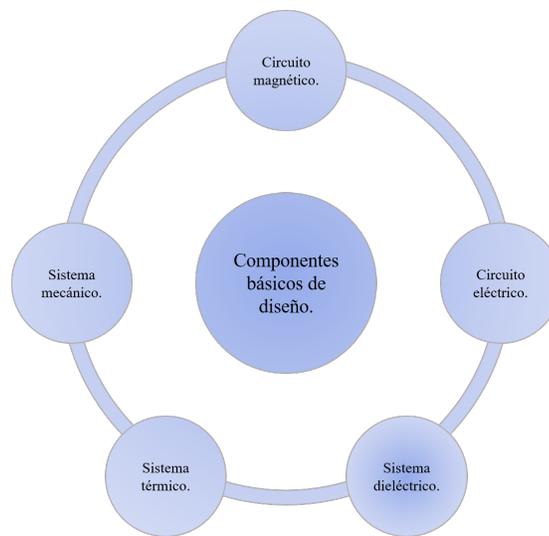


Figura 3.12: Componentes básicos del diseño básicos de máquinas eléctricas [3].

1. Circuito magnético.

El diseño del circuito magnético debe establecer el flujo requerido con un mínimo de Ampère - vueltas (fmm). También debería producir las mínimas pérdidas de núcleo.

2. Circuito eléctrico.

Se trata del diseño de bobinados de inducido y de campo con una disposición adecuada. La pérdida de cobre en estos devanados también debería ser la mínima.

3. Sistema dieléctrico.

Se trata del diseño del aislamiento necesario para aislar varias partes que operan a diferentes potenciales eléctricos, de modo que la corriente se limite a las rutas requeridas.

4. Sistema térmico.

El diseño del sistema térmico incluye el diseño del sistema de refrigeración, conductos de ventilación, etc., de modo que se disipe el calor generado en la máquina por pérdidas y se garantice el funcionamiento seguro de la máquina a la temperatura especificada.

5. Sistema mecánico.

Esto implica el diseño del bastidor, el eje y los cojinetes. El diseño debe ser robusto.

3.8.4. Diseño asistido por computadora

El proceso de diseño implica una serie de suposiciones y restricciones, por lo que la solución solo se puede obtener mediante métodos iterativos. El método de elemento finito (MEF) se puede utilizar para estudiar el efecto de un solo parámetro en el rendimiento de la máquina; además, algunas pruebas que no resultarían factibles en laboratorio, pueden realizarse virtualmente mediante MEF [3].

3.8.5. Especificaciones y estándares

La estandarización de las máquinas eléctricas fabricadas por varias plantas industriales facilita la racionalización de la línea de producción y la adquisición de reemplazos y repuestos por parte del consumidor. Estas especificaciones de referencia, generalmente reconocidas junto con su año de emisión, se modifican continuamente según los requisitos modernos.

Las normas internacionales estipuladas por la Organización Internacional de Normalización (ISO) especificar que la placa de identificación de cualquier máquina eléctrica debe contener los siguientes detalles:

- Valor nominal de potencia de la máquina (kW o KVA).
- Voltaje nominal de la máquina.
- Corriente a plena carga.
- Tipo de conexión (máquinas CA) o excitación de campo (máquinas CD).
- Clase de aislamiento.

3.8.6. Restricciones de diseño

Existen algunos tipos de restricciones para el diseño de máquinas, los cuales se muestran en la Figura 3.13. Dichas restricciones solo se aplican para la fiabilidad del rendimiento, no se incluye ningún tipo de limitación o restricción referente al tipo de material o instalación.

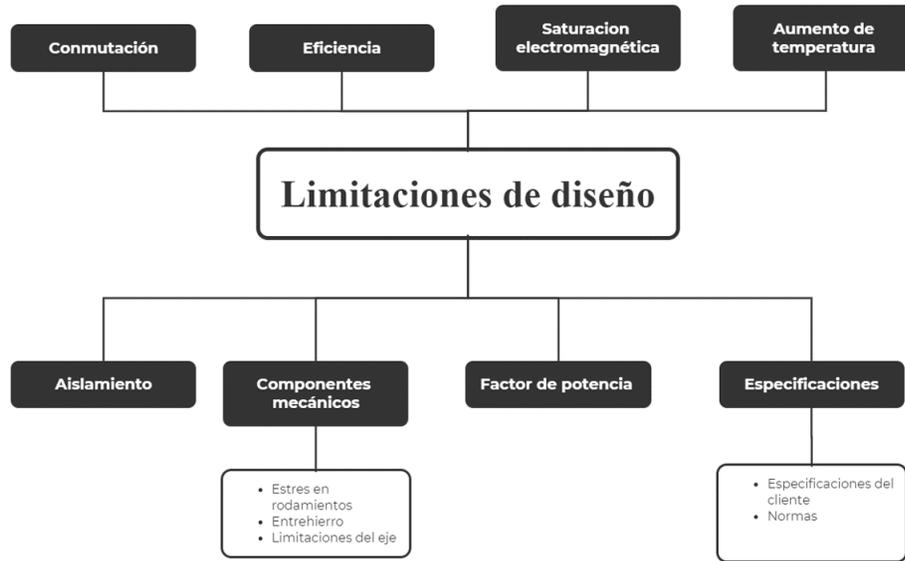


Figura 3.13: Limitaciones de diseño [3].

1. Eficiencia.

- a) La eficiencia total de una máquina influye indirectamente en sus costos de capital y funcionamiento.
- b) Cuando la eficiencia es alta, las pérdidas de energía son bajas y, por lo tanto, los costos de funcionamiento serán menores.
- c) Para limitar las pérdidas eléctricas y magnéticas, las cargas eléctricas y magnéticas específicas deben ser lo más bajas posibles.
- d) Máquinas con mayor eficiencia tendrán un costo de funcionamiento sustancialmente bajo a expensas de un mayor costo de capital.

2. Saturación magnética

- a) Dado que los materiales ferromagnéticos se utilizan como núcleos de estator/rotor, su nivel de saturación determina la densidad de flujo máxima permitida.
- b) Se logra un alto valor de densidad de flujo al reducir el entrehierro, pero esto da como resultado de la saturación del núcleo, lo que disminuye el factor de potencia y también requiere una mayor corriente de excitación que resulta en un mayor costo para el sistema.

3. Especificaciones

Pueden distinguirse en dos tipos de especificaciones:

- a) Especificaciones del consumidor: Diferentes aplicaciones y diferentes requisitos para las máquinas eléctricas que deben ser cumplidos por el fabricante.
- b) Especificaciones estándar: estas especificaciones de referencia, son relativas a medidas de seguridad, valores nominales de voltaje y par. Estarán estipulas por normas, por ejemplo, ISO, y deben ser cumplidas por el fabricante.

3.8.7. Materiales magnéticos

Los materiales magnéticos son una parte integral de cualquier máquina eléctrica utilizada en la conversión de energía electromagnética. Los materiales magnéticos se clasifican según la permeabilidad relativa (μ_0) o la susceptibilidad magnética (χ_m) en tres categorías amplias, como se muestra en la Figura 3.14.

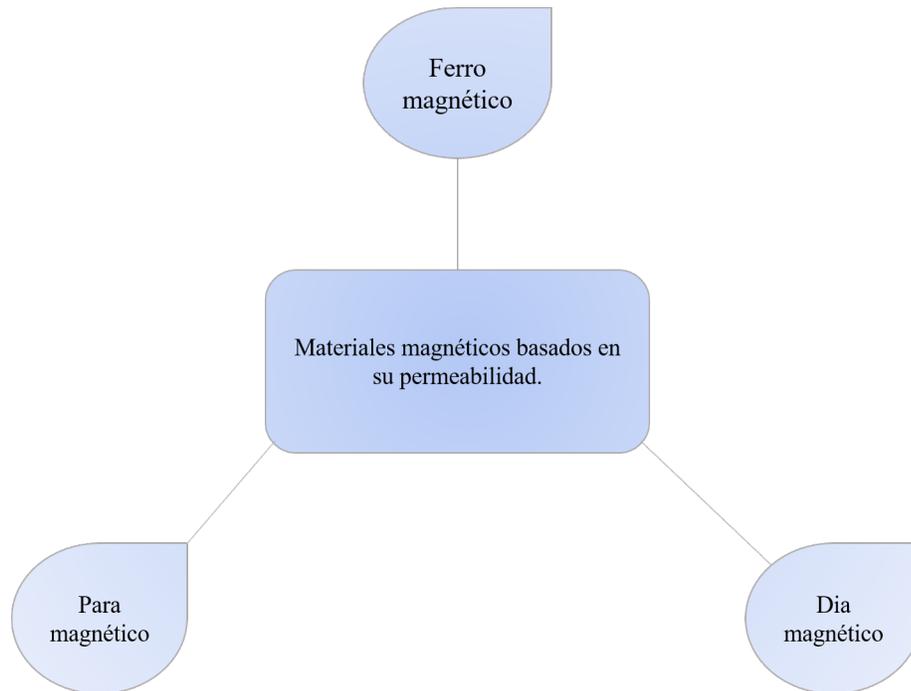


Figura 3.14: Clasificación de materiales magnéticos [3].

Materiales ferromagnéticos.

En estos materiales la permeabilidad relativa es mucho mayor que uno ($\mu_r \gg 1$), es decir, tienen una susceptibilidad positiva muy grande. Por ejemplo, algunos materiales de este tipo son: hierro, níquel, cobalto, alnico. La magnetización de estos materiales es fácil y retienen una cantidad considerable cuando se elimina el campo magnético. Se ven afectados por las altas temperaturas. Cuando se utilizan por encima de la temperatura de Curie, (la temperatura crítica por encima de la cual el material pierde propiedades magnéticas). Tienen una curva ($B - H$) no lineal. Los materiales ferromagnéticos son de gran importancia en la fabricación de máquinas eléctricas [3].

Materiales diamagnéticos.

Para este tipo de materiales la permeabilidad relativa es menor o igual a uno ($\mu_r \leq 1$), es decir, tiene susceptibilidad negativa muy pequeña. Ejemplos de esta clase de materiales son: cobre, plata, oro.

Materiales paramagnéticos.

En esta clase de materiales la permeabilidad relativa es ligeramente mayor o igual a uno ($\mu_r \geq 1$), es decir, tiene una susceptibilidad positiva muy pequeña. Ejemplos de estos materiales son: aire, platino, tungsteno. La permeabilidad de los materiales paramagnéticos dependen de la temperatura.

De igual manera existe una clasificación de estos materiales según su naturaleza del lazo de histéresis Figura 3.15.

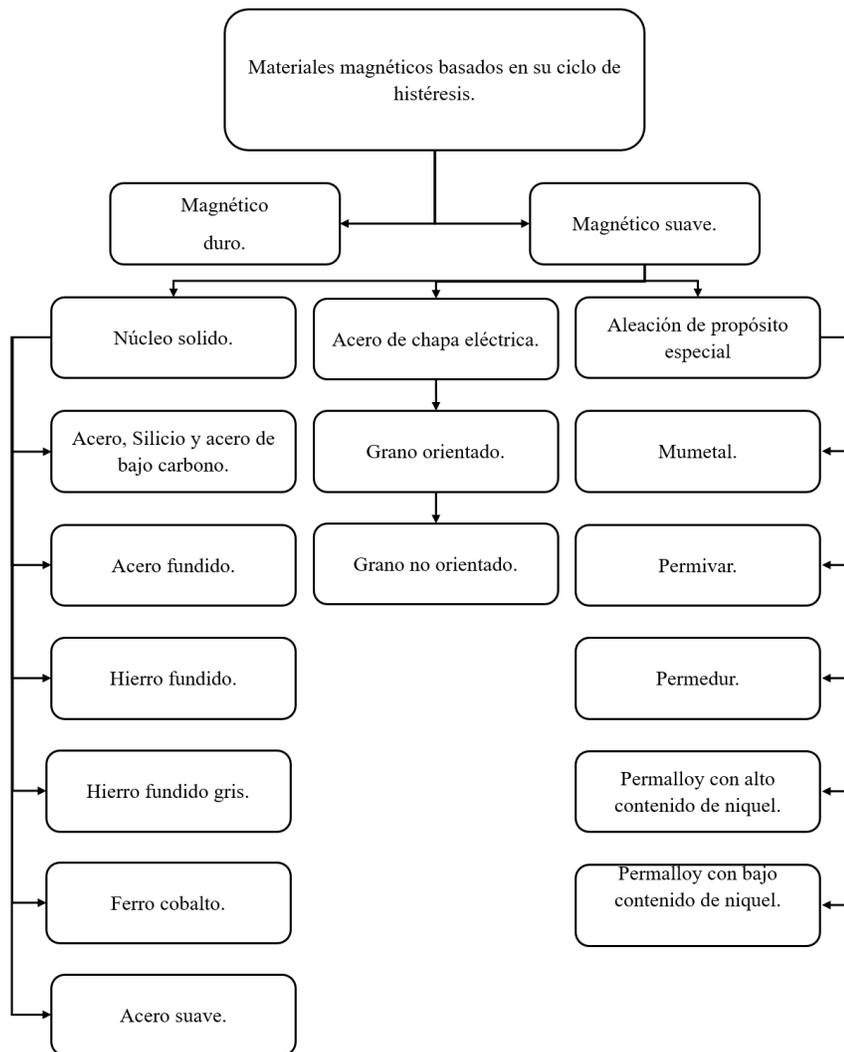


Figura 3.15: Tipos de materiales magnéticos y su ciclo de histeresis [3].

Materiales magnéticos duros:

Este tipo de materiales magnéticos tienen un lazo de histéresis dilatado.

Materiales magnéticos blandos:

Este tipo de materiales magnéticos tienen un lazo de histéresis estrecho, lo que indica facilidad de magnetización y desmagnetización.

Los lazos de histéresis de materiales magnéticos duros y blandos se representan en la Figura 3.16.

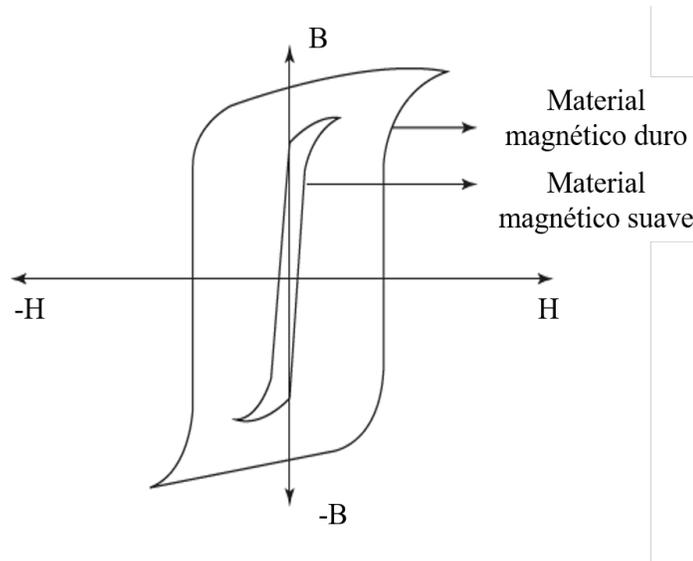


Figura 3.16: Curva de histéresis de materiales magnéticos, suaves y duros [3].

Máquinas con núcleo sólido:

Este tipo de núcleos magnéticos se fabrica con distintos materiales que pueden exhibir una alta permeabilidad con menores pérdidas que el hierro a baja densidad de flujo. Estos materiales encuentran sus aplicaciones en máquinas tales como relés, polos de campo de máquinas de CD y electroimanes de CD.

Máquinas con núcleo de chapa de acero eléctrico:

La chapa de acero eléctrico es un tipo especial de acero hecho a medida para poseer propiedades magnéticas específicas, como un área de lazo de histéresis pequeña (que da como resultado una baja pérdida por ciclo), baja pérdida de núcleo y alta permeabilidad [3].

Se fabrica añadiendo silicio (hasta un 5 %) al acero. Se utiliza en la fabricación de transformadores y máquinas eléctricas rotativas, debido a su capacidad para superar el problema del "envejecimiento". El envejecimiento es un proceso que deteriora el rendimiento magnético de una máquina eléctrica debido a la presencia de carbono y otras impurezas en el acero eléctrico convencional, que se utilizaba en años anteriores en la fabricación de máquinas eléctricas [3].

La presencia de silicio en la chapa de acero eléctrica conduce a:

- Disminución de pérdidas por histéresis.
- Aumento de la resistividad eléctrica del hierro, por lo que se reduce la pérdida de hierro debido a las corrientes parásitas.
- Alta densidad de flujo.
- Menor saturación magnética.

Capítulo 4

Prueba biaxial

4.1. Geometría óptima

El número de reportes de investigación de EMR en bancos de ensayos biaxiales es limitado. Algunos estudios publicados toman como enfoque principal solamente la respuesta al esfuerzo mecánico al que los EMR son sometidos. En la referencia [9] se presenta una geometría óptima para estudios equibiaxiales, mostrada en la Figura 4.1 (a). Dicho estudio discute las ventajas que presenta esta geometría como la de obtener un estado equibiaxial de esfuerzos en el centro de la probeta, validado mediante simulaciones numéricas y experimentos.

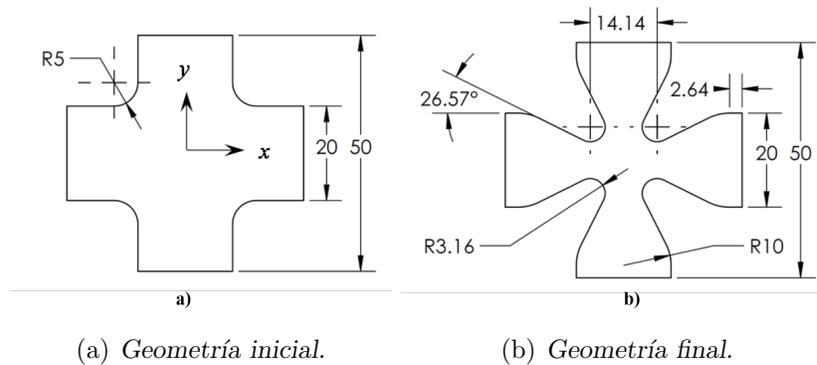


Figura 4.1: Evolución de la geometría sujeta al proceso de optimización.

La Figura 4.1 muestra una serie de formas geométricas que fueron sometidas a un algoritmo de optimización para obtener un espécimen con características únicas, logrando generar una zona de deformaciones unitarias homogéneas mientras la probeta está sometida a un estado biaxial de esfuerzos.

4.1.1. Ensayo biaxial

La geometría resultante del proceso de optimización mostrada en la Subsección 4.1 fue sometida a un amplio rango de deformaciones, logrando un campo de deformación unitaria homogéneo en la zona central del espécimen, lo cual permitió recolectar datos experimentales de gran relevancia.

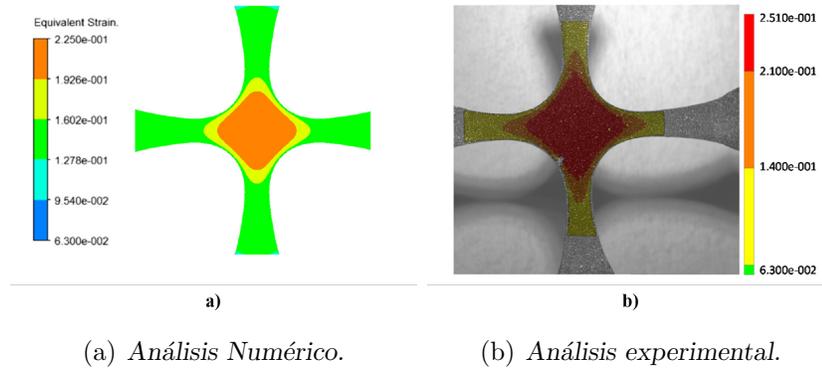


Figura 4.2: Probeta óptima bajo estudio.

La Figura 4.2 muestra la comparación numérica vs experimental de la geometría cruciforme. Es posible observar un comportamiento idéntico mientras ambas se encuentran bajo un estado biaxial de esfuerzos.

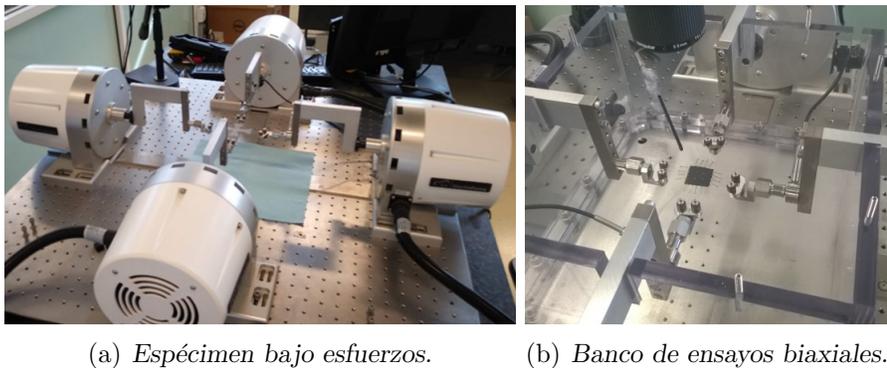


Figura 4.3: Prueba biaxial.

La geometría cruciforme mostrada en la Figura 4.2 (a) está reforzada con micropartículas de hierro carbonilo. Esta probeta también fue sometida a ciclos de carga y descarga utilizando el banco de ensayos equibiaxiales de la Figura 4.3 (b), logrando examinar el efecto Mullís y las deformaciones por efecto residual. Gracias a estos ensayos se concluyó que la adición de micropartículas aumentó el módulo de cizallamiento en el material [9].

4.1.2. Especificaciones técnicas del dispositivo magnetico

El dispositivo propuesto en esta tesis tiene como objetivo generar un campo magnético homogéneo sobre una probeta cruciforme. Deberá operar sobre un banco de ensayos biaxiales, por lo cual tendrá que ser geométricamente adecuado para poder ser instalado. También tendrá que cumplir con condiciones de operaciones específicas tales como la que se muestran en la Tabla 4.1. Su diseño debe ser adecuado para evitar algunos factores que podrían interferir en el estudio de la probeta, principalmente la inducción de calor hacia el espécimen bajo estudio. Este dispositivo se instalará en una banco de ensayos biaxiales, tal como la que se muestra en la Figura 4.4.

Tabla 4.1: Requerimientos técnicos.

Especificaciones	
Campo - Min	50 (mT)
Campo - Max	110 (mT)
Uniformidad - Min	90 %
Dimensiones	60 x 60 (mm)
Voltaje	35 (V)
Corriente	5 (A)
Resistencia	5 (Ω)

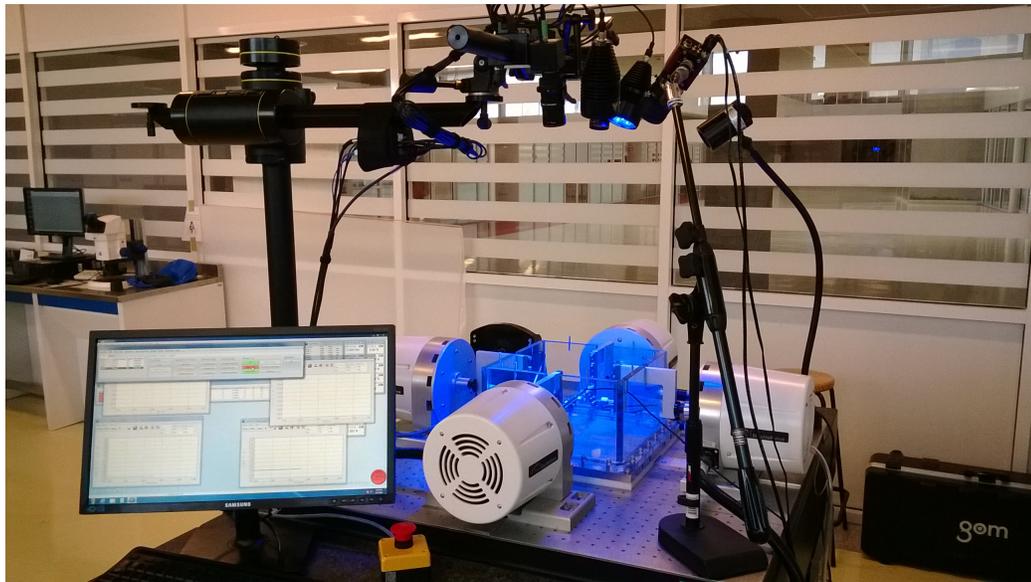


Figura 4.4: Banco de ensayos biaxiales.

Capítulo 5

Dispositivo electromagnético

5.1. Diseño 1

Para el diseño inicial del dispositivo se comenzó experimentando con el campo magnético generado por un solenoide con N vueltas, el cual está conformado por un núcleo de ferrita. La particularidad en este diseño es un núcleo con una longitud de aproximadamente 30 mm y posee un diámetro de 10 mm. Las líneas de campo magnético se distribuyen de manera uniforme por las propiedades del material, lo que genera una densidad de flujo magnético uniforme en la probeta. El diámetro que tiene el núcleo de este solenoide es adecuado para evitar la saturación magnética y así reducir el consumo de corriente eléctrica. Una vez analizado este caso, se comenzó a trabajar en un arreglo de cuatro solenoides, cada uno de estos con un núcleo de ferrita y N vueltas, en este caso el núcleo de ferrita funciona como circuito magnético. La configuración del dispositivo se muestra en la Figura 5.6.

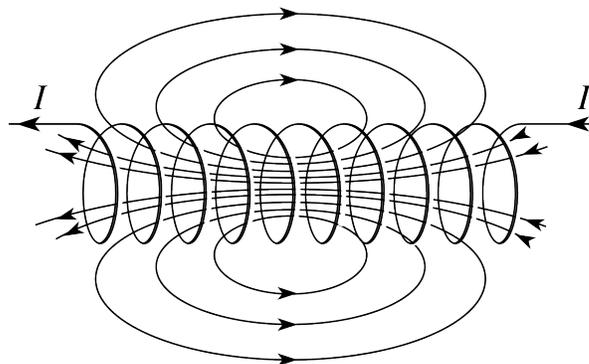


Figura 5.1: Solenoide.

5.1.1. Análisis de campo magnético.

El cálculo del campo magnético se realizó con la ayuda del software ANSYS MAXWELL, el cual utiliza las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial, empleando el método de elemento finito para resolverlas. En el caso de los problemas magnetostáticos en tres dimensiones, emplea las siguientes ecuaciones:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Ley de Gauss para el campo magnético.}) \quad (5.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Ley de Gauss para el campo eléctrico.}) \quad (5.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{Ley de Faraday.}) \quad (5.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{Ley de Ampère - Maxwell.}) \quad (5.4)$$

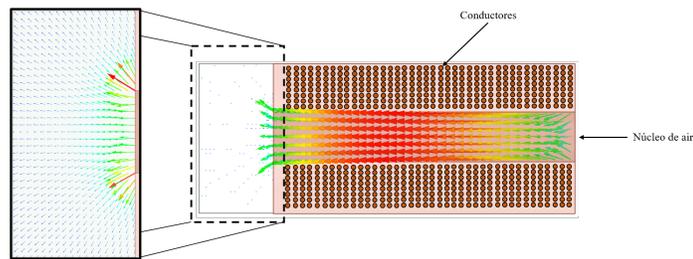


Figura 5.2: Ilustración de vectores de campo en vista de sección de un solenoide.

Cada solenoide estará seccionado en cuatro partes para disminuir la resistencia del conductor y la excitación asignada para cada una de estas es la misma. Se determinó la dirección en la que las líneas de campo salen de cada núcleo con relación a la dirección de la corriente aplicada, como se muestra en la Figura 5.2. Con base en el análisis realizado en la Figura 5.2, se generaron distintas configuraciones hasta conseguir la adecuada. Finalmente, se obtuvo la configuración que podrá generar un campo magnético homogéneo en la sección central de la probeta.

Al simular el dispositivo se observó que en un par de solenoides las líneas de campo son salientes y en los otros dos las líneas son entrantes; entonces, las líneas se suman entre sí. Al ocurrir esto podemos argumentar que cada par de solenoides se comportan como un dipolo magnético.

5.1.2. Diseño de la conexión

Para generar el diseño de la conexión eléctrica, se partió de las características de la fuente de alimentación de corriente directa disponible. Dicha fuente también delimitará el tamaño máximo de este dispositivo. La fuente es de 6-A y 34-V, por lo cual al aplicar la ley de Ohm 5.5, podemos obtener el límite de resistencia máxima del dispositivo.

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{Ley de Ohm}) \quad (5.5)$$

Así se determinó que la fuente de alimentación admite una resistencia máxima de 5.66 Ω . Esto generó una complicación en el diseño inicial, ya que la cantidad de conductor que se emplearía para generar el campo magnético, estaría entre de 1 y 2 km por solenoide. Es importante mencionar que inicialmente se propuso utilizar un conductor calibre 18, el cual posee una alta resistencia por su reducida sección transversal. Por lo tanto, la longitud de este conductor presentaría una resistencia elevada, que sobrepasaría el límite de la fuente.

En la Figura 5.3 se muestra el diseño inicial de la conexión eléctrica para el dispositivo. Como se puede observar, los cuatro solenoides están simplemente conectados en serie; por lo tanto, las resistencias de cada uno se suman, generando así un valor total muy alto. Como consecuencia, el voltaje requerido para conseguir la corriente de diseño supera por mucho el máximo voltaje de la fuente.

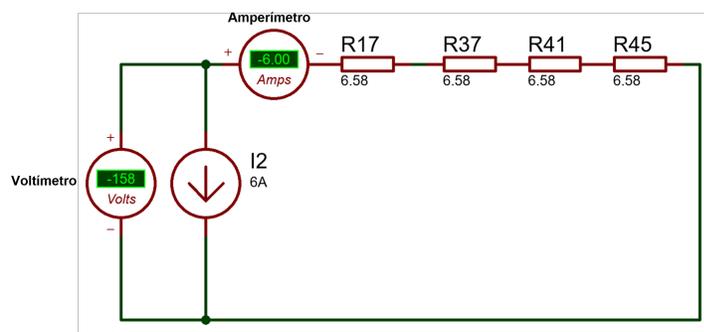


Figura 5.3: Conexión serie de solenoides.

Para solucionar esta situación se propuso un arreglo con conexión serie – paralelo. La ventaja de esta conexión reside en que la conexión en paralelo hace que la resistencia disminuya y la distribución de corriente sea la misma en cada una de las secciones, ya que la longitud total del conductor está dividida en partes iguales.

Después de aplicar este arreglo en la conexión, las secciones poseen una resistencia muy pequeña; para obtener el nuevo valor se aplicará (5.6) con la cual podremos obtener el valor de la nueva conexión.

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{Reducción paralelo.}) \quad (5.6)$$

Esta reducción permite realizar una conexión en serie de los solenoides. Con la nueva resistencia es posible suministrar una mayor cantidad de corriente en cada solenoide.

5.1.3. Selección de materiales

La selección del conductor de los solenoides se realizó tomando en cuenta las características de la fuente de alimentación. Con base a esto se decidió el uso de alambre magneto de calibre 13 La Tabla 5.1 muestra los datos del fabricante para este conductor. Este posee un diámetro de 1.829 mm y una resistencia de 6.562 Ω/km , con una corriente máxima de 26A.

Tabla 5.1: Datos del conductor eléctrico seleccionado.

Calibre	Diámetro (<i>mm</i>)	Sección (<i>mm</i> ²)	Peso (<i>kg/m</i>)	Resistencia (Ω/km)	I.max (<i>A</i>)
13	1.829	2.63	42.2	6.562	26

La elección de un núcleo para el solenoide se basó en un material ferromagnético que pueda aumentar y dirigir el campo. La Tabla 5.2 muestra las características del material empleado en el núcleo.

Tabla 5.2: Características del núcleo.

Longitud (<i>mm</i>)	Diámetro (<i>mm</i>)	μ_r	$\sigma(S/m)$
300	10	1000	0.01

Se realizó el cálculo de los Ampère-vuelta necesarios para generar la densidad del campo magnético con base a la longitud del núcleo; también se calculó el número de vueltas por capa, eligiendo 164 vueltas y un total de 30 capas. La Tabla 5.3 muestra las características de las bobinas.

Tabla 5.3: Características de la bobina.

Calibre	Diámetro exterior (<i>mm</i>)	Número de vueltas	Ampère - vuelta
13	119	4920	29520

La Tabla 5.4 muestra la longitud, resistencia y peso final del conductor, al igual que el número de vueltas por capa.

Tabla 5.4: Características físicas del solenoide.

Calibre	Vueltas por capa	Longitud (<i>m</i>)	Resistencia (Ω/km)	Peso c/u (kg)
13	164	1002	6.58	23.763

El diseño de la conexión eléctrica se basó en las especificaciones de la fuente de alimentación y la resistencia del conductor, la cual se muestra en la Tabla 5.4. Se utilizó una conexión, serie paralelo, la cual reduce de manera considerable la resistencia del conductor.

Para esto el conductor se seccionó en 4 partes iguales, generando 4 bobinas de igual resistencia con 1845 A-vta por cada sección. La Figura 5.4 muestra la conexión y la resistencia total obtenida.

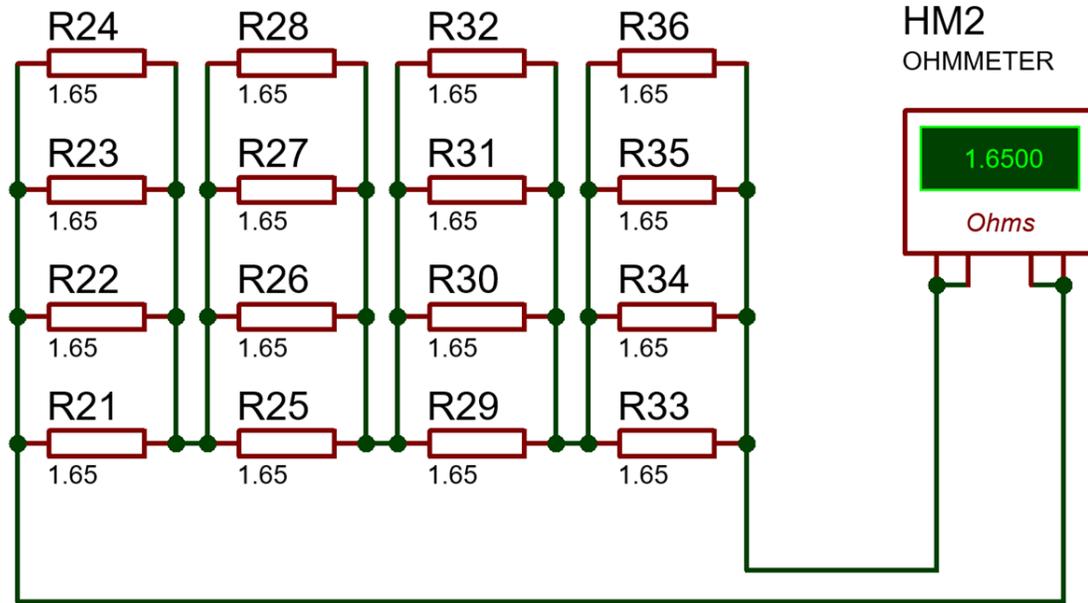


Figura 5.4: Conexión serie paralelo.

En la Figura 5.5 se muestra la conexión de los 4 solenoides y la distribución final de corriente y voltaje.

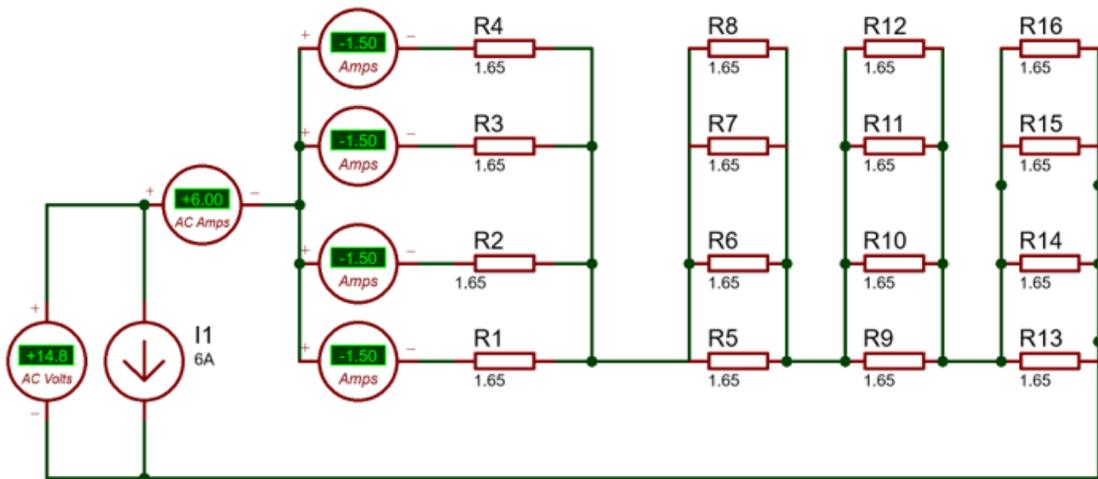


Figura 5.5: Distribución de voltaje y corriente.

5.1.4. Modelo de elemento finito

Para la simulación del dispositivo se utilizó el software ANSYS MAXWELL, en el cual se importó la geometría realizada en un software CAD externo, como se muestra en la Figura 5.6.

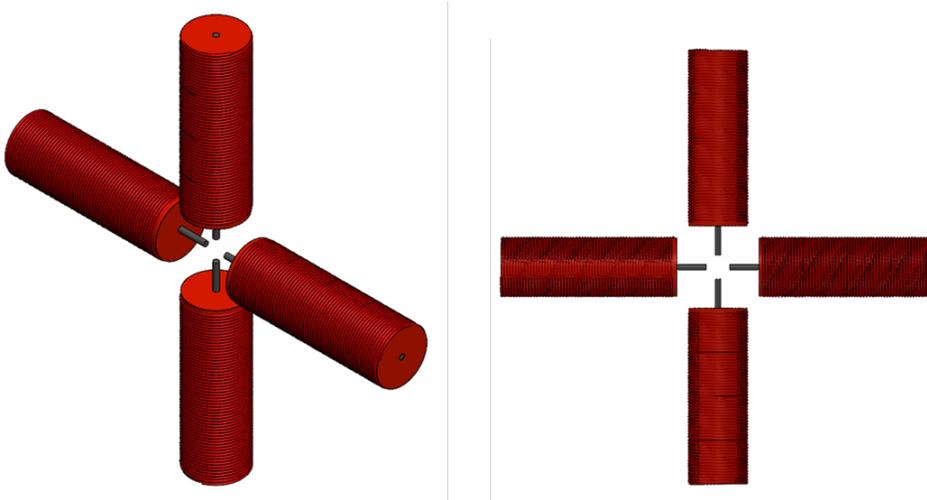


Figura 5.6: Geometría CAD del dispositivo electromagnético.

Se empleó el módulo magnetostático y los parámetros utilizados fueron obtenidos a partir de la selección de material. Uno de los parámetros más importante es la excitación de corriente aplicada, esta de 7380 A-vta para cada una de las bobinas. En la Figura 5.7 se muestra la dirección de la corriente en los solenoides.

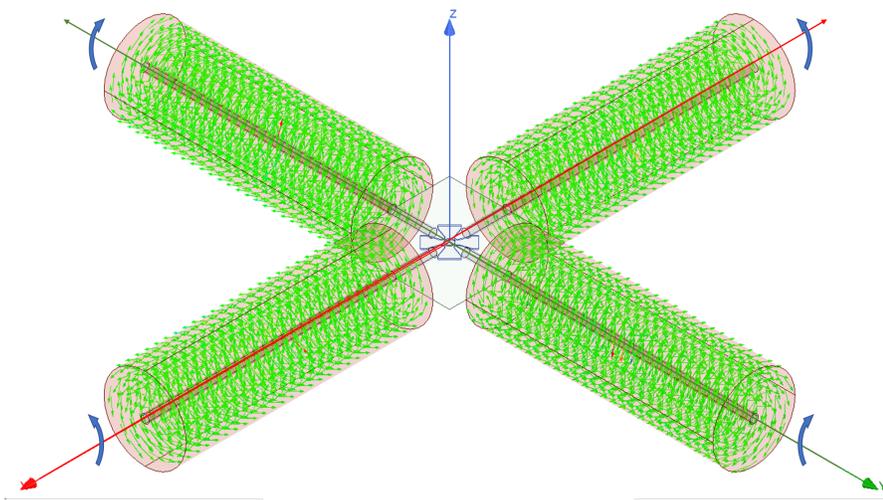


Figura 5.7: Dirección de corriente en los solenoides.

La dirección en la cual circula la corriente determina la orientación de las líneas de campo magnético (regla de la mano derecha). Se aplicó de tal manera que las líneas de campo fueran entrantes y salientes, como se puede observar en la Figura 5.8, con lo cual se logra un campo uniforme y homogéneo en la parte central de la probeta.

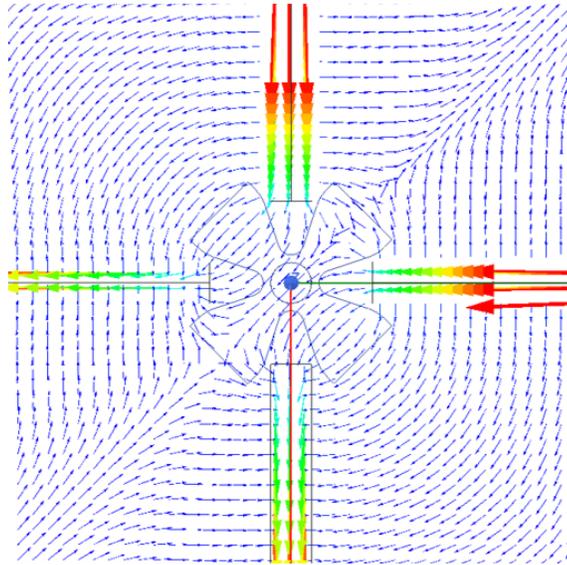


Figura 5.8: Dirección de líneas de campo magnético sobre la probeta.

El centro de la probeta es la zona más importante; en el modelo se muestra un círculo de 10 mm. Justo ahí se requiere el campo magnético homogéneo según los requerimientos del experimento.

La Figura 5.9 muestra la discretización en la parte central de la probeta. En esta zona el tamaño máximo de borde es de 0.5 mm para toda la región, lo que permitió obtener con mayor precisión la densidad de flujo magnético.

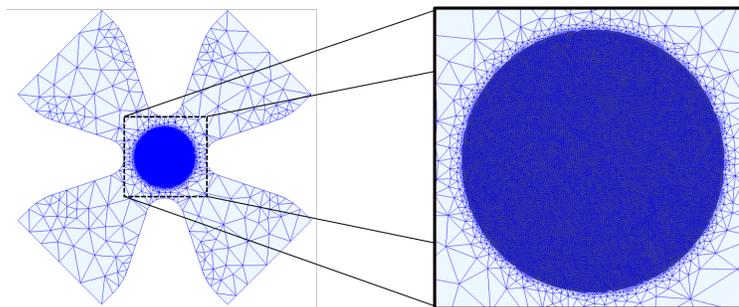


Figura 5.9: Discretización de la probeta.

Finalmente, para la aplicación de condiciones de frontera y región se utilizó el método automático que posee el software, en el cual se aplica una condición natural entre elementos y la condición de Neumann. Esta condición limita las paredes de la región establecida, como se aprecia en la Figura 5.10; para representar las fronteras abiertas se eligió una frontera artificial alejada a 150 veces el tamaño del dispositivo.

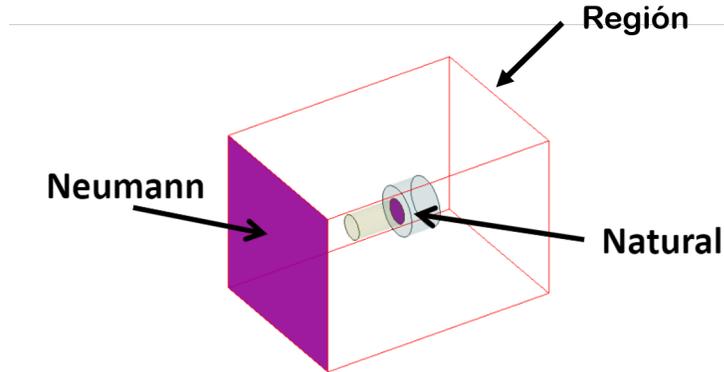


Figura 5.10: Condiciones de frontera.

5.1.5. Densidad de campo magnético

La Figura 5.11 muestra la probeta de EMR bajo la influencia de un campo magnético estático. Es posible observar que los niveles de densidad de flujo varían desde 9 mT hasta 336 mT en toda la superficie de la probeta. En el área central de la probeta se puede apreciar un campo magnético uniforme. La parte central de la probeta es la que estará sujeta a la condición biaxial de esfuerzos, por lo que es en esta zona donde nos interesa obtener un campo magnético uniforme.

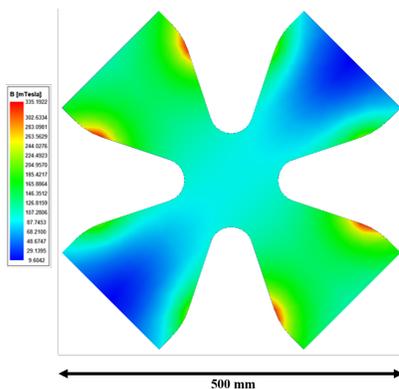


Figura 5.11: Distribución de campo \vec{B} .

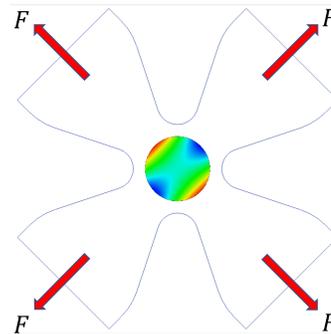
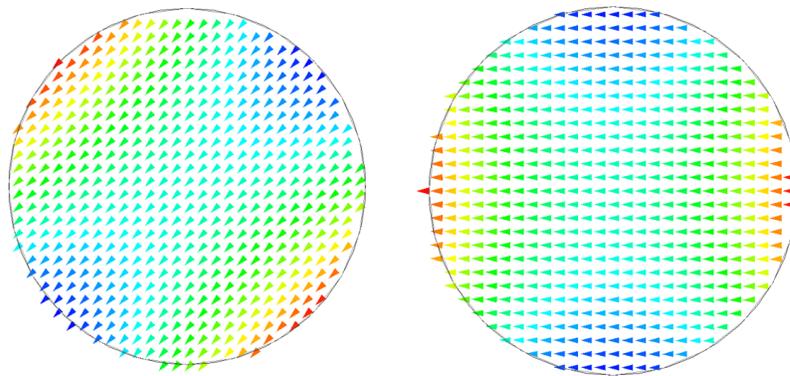


Figura 5.12: Distribución de esfuerzos.

En el modelo se analizó la parte central de la probeta. Esta zona tiene una dimensión de 10 mm de diámetro donde se gráfico el campo magnético, mismo que se presenta en la Figura 5.12. La densidad de flujo magnético va desde los 117.32 mT hasta los 130.070 mT.

Esta densidad de flujo es bastante adecuada, ya que el mínimo valor de densidad para realizar este estudio es de 60 mT. En esta sección existe una variación de campo de un 9.8%. En la Figura 5.12 también se muestran las cuatro fuerzas que serán aplicadas en la probeta, logrando así un estado biaxial de esfuerzos en la zona central.

La Figura 5.13 muestra una ampliación en la zona bajo estudio. En esta imagen podemos apreciar las líneas de campo magnético; todas ellas van en una misma dirección y están alineadas, lo cual nos asegura un campo magnético completamente homogéneo. Es importante mencionar la posibilidad de conseguir dos orientaciones para el campo magnético mediante un cambio en la conexión eléctrica.



(a) Líneas de campo a 45° grados. (b) Líneas de campo a 90° grados.

Figura 5.13: Análisis de campo en el centro de la probeta.

5.2. Cuadrupolo electromagnético

En la sección anterior se presentó un diseño inicial del dispositivo electromagnético (Diseño 1), el cual cubre algunos de los requerimientos necesarios para el experimento. El Diseño 1 requiere grandes cantidades de conductor para lograr un campo magnético adecuado; es debido a una alta dispersión de flujo magnético, lo que vuelve al diseño altamente costoso y poco eficiente. Surge así la necesidad de un nuevo diseño, el cual se presenta continuación.

Obtener un dispositivo capaz de generar un campo magnético homogéneo dirigido a una región específica en el espacio supone el desafío principal de este trabajo. Para lograr esto, es importante establecer los parámetros que guíen el desarrollo del diseño; algunos de los más importantes serán presentados a continuación, y está relacionado con: geometría, factibilidad y utilidad. Teniendo en cuenta estos factores, se decidió partir del arreglo presentado en la sección anterior. Este mostraba un conjunto de solenoides con un arreglo cruciforme. Desde un punto de vista geométrico, los campos magnéticos de este tipo se reportan en algunas referencias como un campo cuadrupolar.

Las propiedades de un cuadrupolo electromagnético son interesantes, ya que en estas predomina el uso de un núcleo con características magnéticas, las cuales ayudan a incrementar el campo magnético. Este tipo de electroimanes se reporta en la literatura como **Imanes Dominados por Hierro** [4]. Para generar nuestro propio diseño se partió de un diseño reportado en la literatura; este se dimensionó, simuló y construyó. En las siguientes subsecciones se presenta el desarrollo del cuadrupolo.

5.2.1. Diseño inicial

Para el desarrollo inicial se partió del diseño reportado en [4], donde se presenta una geometría ilustrativa de un imán dominado por hierro, la cual se puede ver en la Figura 5.14. Inicialmente, se generó un diseño CAD con características similares, tomando en cuenta las dimensiones del banco de ensayos, reportada en la sección anterior.

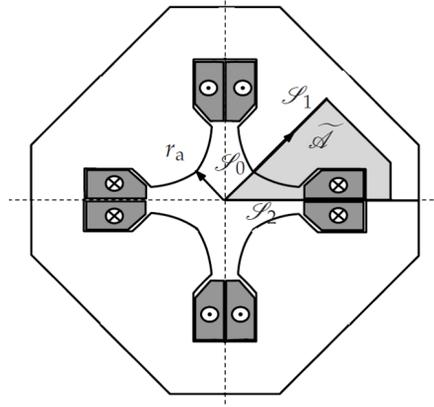


Figura 5.14: Cuadrupolo inicial [4].

La geometría generada parte de un cuadrado de dimensiones 600 mm por 600 mm. De manera inicial se pretende tener al centro del cuadrupolo un área libre de 250 mm^2 (50 mm por 50 mm) en la cual será colocada la probeta. También se tomó en cuenta el grosor de los brazos de los actuadores (11 mm), con los que se sujeta la probeta cuando está bajo estudio.

En la Figura 5.15 podemos observar el diseño. Inicialmente, se realizó un corte en cada esquina del cuadrado eliminando material, dejando un grosor de 116.22 mm en la base de cada poste; también se propuso una longitud de 150 mm para cada poste polar y un radio de 35 mm para la cara polar. Se plantearon bobinas cónicas pensando en la reducción de espacio, ya que aún no se sabía la cantidad de conductor necesario (A-vta) para generar el campo magnético deseado.

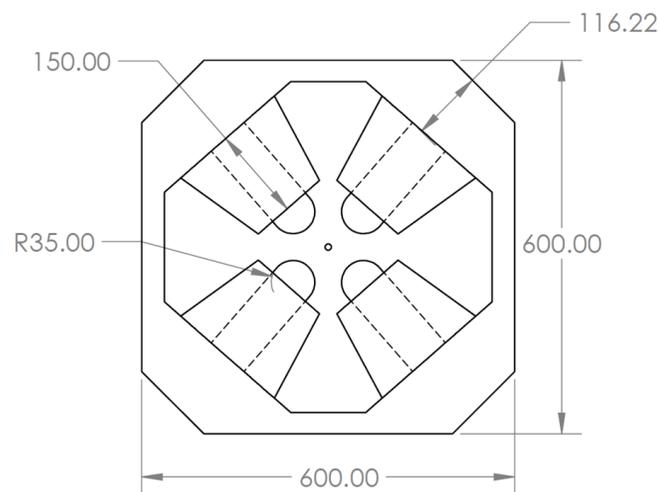


Figura 5.15: Propuesta inicial.

5.2.2. Modelado numérico

Una vez realizado el diseño inicial, se procedió a trabajar en una simulación en dos dimensiones para verificar el comportamiento del campo magnético. La simulación se realizó con el software ANSYS Maxwell.

Para este caso se seleccionó una solución magnetostática en 2 dimensiones. Se importó la geometría desde SolidWorks. En este análisis numérico, las bobinas cónicas fueron remplazadas por bobinas rectangulares con una área útil uniforme. Se utilizó acero 1008 para el núcleo; la curva B-H se muestra en la Figura 5.16. Este acero tiene un comportamiento altamente no lineal a partir de 1.5 teslas. La Figura 5.17 muestra el estado final de la selección de materiales en el modelo global.

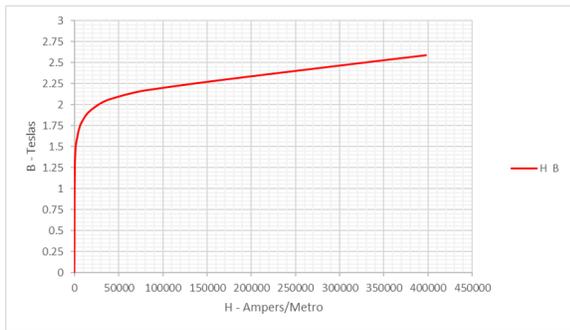


Figura 5.16: Curva B-H.

Design List: CDH - 2D - Maxwell2DDesign1

Model | Boundaries | Excitations | Parameters | Mesh Operations | Analysis Setup

Name	Color	Model	Display Wirefr...	Visible	Material	Type
NONE		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	copper	Sheet
NONE_1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	copper	Sheet
NONE_2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	copper	Sheet
NONE_3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	copper	Sheet
NONE_4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	copper	Sheet
NONE_5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	copper	Sheet
NONE_6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	copper	Sheet
NONE_7		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	copper	Sheet
NONE_8		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Sheet
Region		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	vacuum	Sheet
Circle1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	vacuum	Sheet

Figura 5.17: Selección de materiales.

Las condiciones de frontera aplicadas fueron de tipo **balloon**, las cuales modelan la región del espacio de dibujo como infinitamente grande y las líneas de flujo magnético no son tangenciales ni normales al límite. Esta condición se ilustra en la Figura 5.18

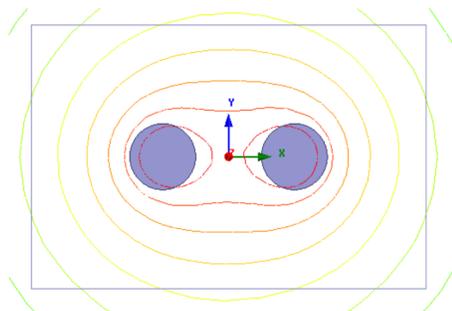


Figura 5.18: Condiciones de frontera tipo balloon.

Estas condiciones de frontera en el modelo se establecen como se muestra en la Figura 5.19.

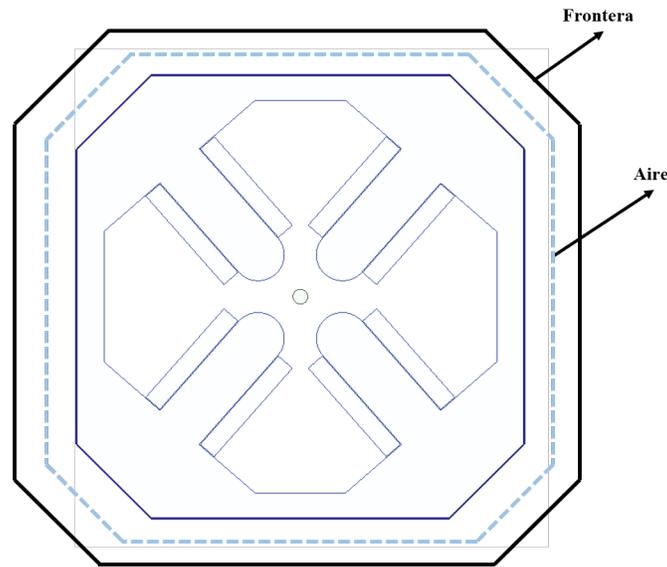


Figura 5.19: Condiciones de frontera tipo balloon.

Una vez definidas las condiciones de frontera, se aplicaron las excitaciones para cada bobina. En este caso se utilizaron 4000 A-vta de manera inicial, con la configuración de la Figura 5.20.

La región de análisis para el problema tiene una dimensión de 900 mm partiendo desde el origen para los ejes X y Y. Es importante mencionar que el centro del dispositivo también se encuentra en el origen; la Figura 5.20 muestra una representación de la región utilizada.

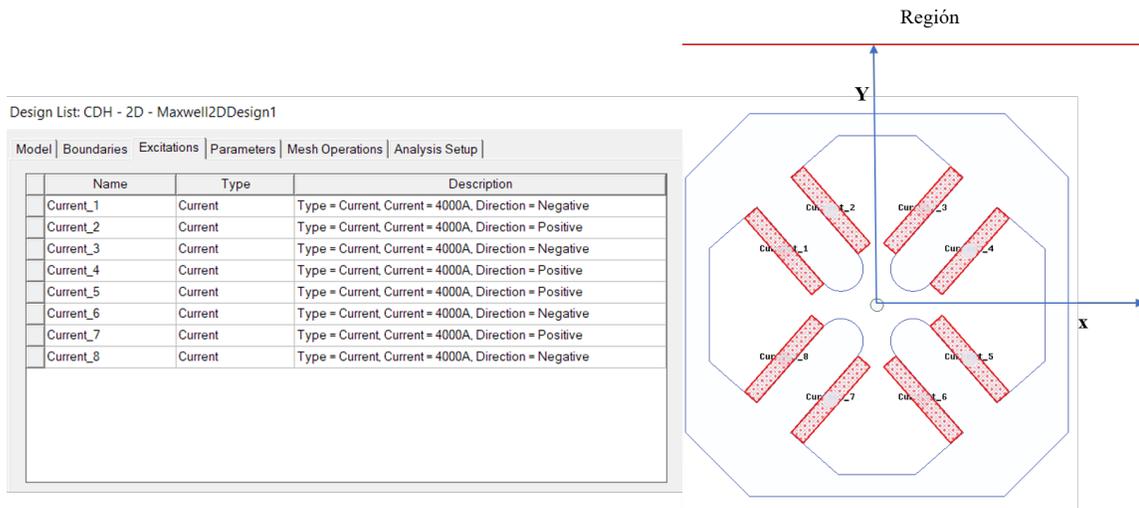


Figura 5.20: Excitación del dispositivo magnético.

Finalmente, se aplicó el **solucionador** de la siguiente manera (Figura 5.21). El porcentaje de error fue establecido en 1 y un número máximo de pasos de 10. La configuración predefinida por el programa permaneció sin más cambios.

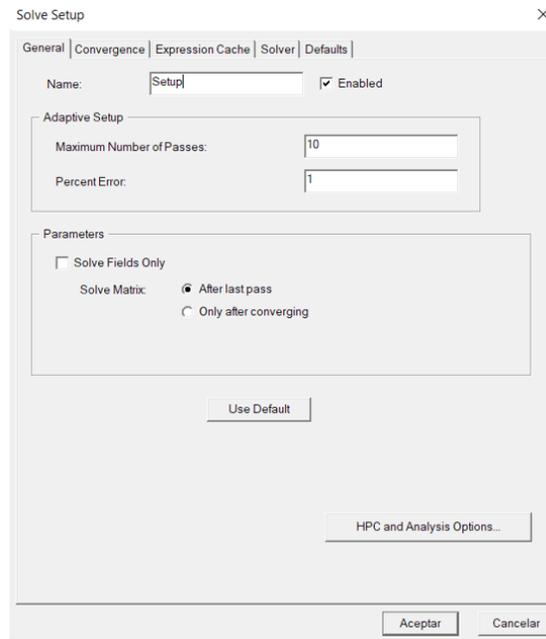


Figura 5.21: Configuración del solucionador.

Al solucionar este problema se obtuvieron los siguientes resultados. La Figura 5.22 muestra la densidad de Flujo magnético en todo el núcleo; podemos observar una configuración de 2 dipolos, y un campo magnético de 0 a 1058.1039 mT.

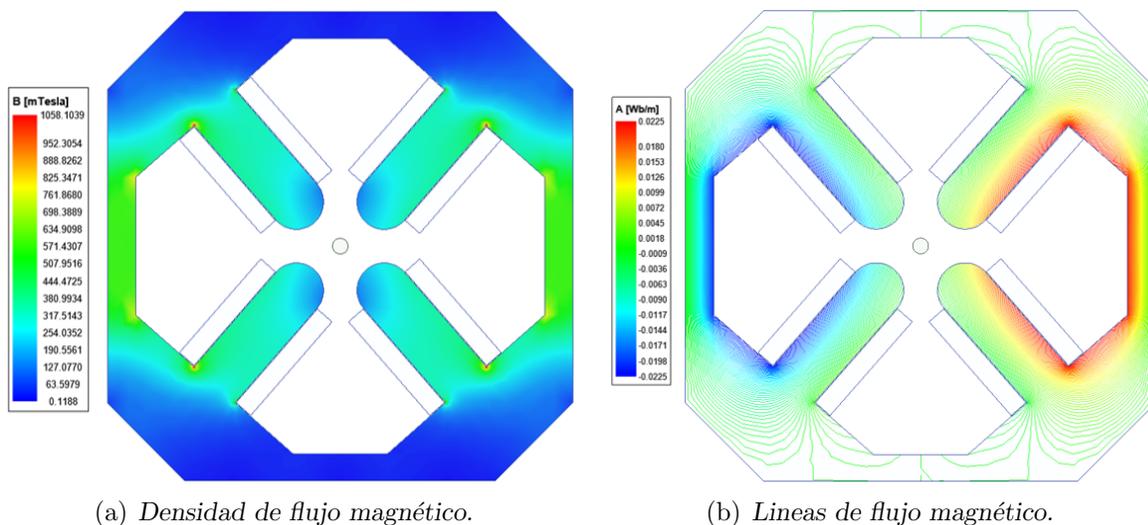


Figura 5.22: Análisis de campo.

Al centro del cuadrupolo podemos observar un círculo que posee un diámetro de 10 mm. En la Figura 5.23 es posible observar la magnitud y comportamiento de la densidad de flujo magnético.

Hasta este punto podemos determinar que la densidad de flujo magnético al centro de la probeta es bastante homogénea e isotrópica, lo cual es ideal para el estudio del elastómero magnetoreológico.

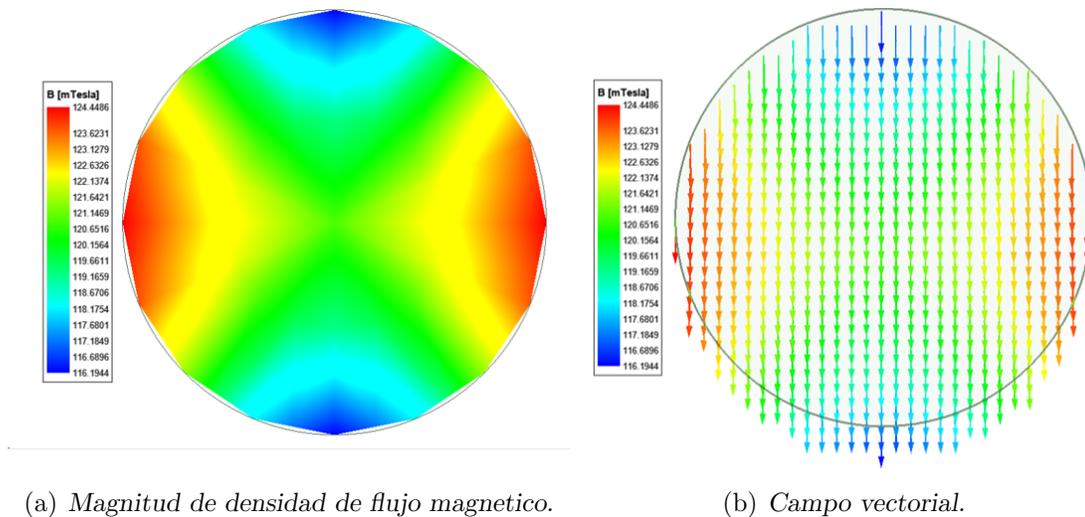


Figura 5.23: Densidad de flujo magnético al centro de la probeta.

5.3. Mejoras

Una vez realizado el análisis para evaluar el diseño inicial, podremos generar algunas mejoras. Inicialmente, se comenzó retirando secciones de material en regiones donde no existía paso de flujo magnético importante; también se realizaron algunos redondeos en la geometría, ya que estos ayudan a una mejor distribución de la densidad de flujo. La Figura 5.24 muestra la comparación entre la geometría inicial y este nuevo diseño; en la Figura 5.24 (b) se puede ver una disminución de tamaño bastante considerable en la sección superior. Esta reducción tan importante se llevó a cabo considerando la distribución mostrada en la Figura 5.22, donde el campo \vec{B} tiende a cero en esa área para ese arreglo.

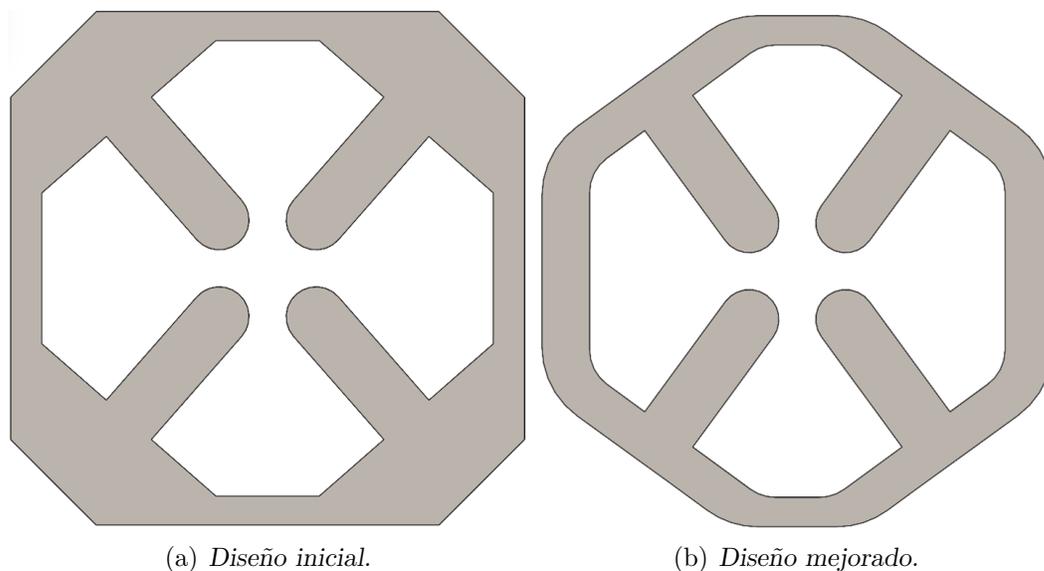


Figura 5.24: Comparación de geometrías.

Con la geometría que se muestra en la Figura 5.24 (b), se realizó un análisis magnetostático en 2D. El resultado se muestra en la Figura 5.25.

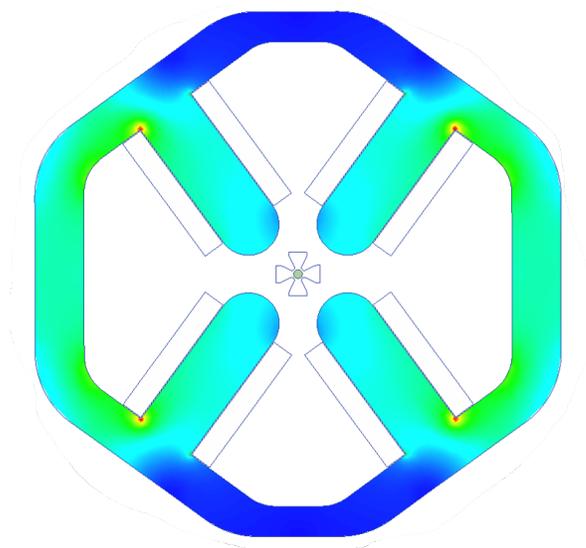


Figura 5.25: Densidad de flujo magnético sobre la nueva geometría.

Después de analizar este diseño se planteó la posibilidad de obtener distintos arreglos de campo que pudieran influir sobre el elastómero. Esto solo sería posible con una geometría completamente simétrica. Mediante distintas conexiones eléctricas es posible crear un campo tangencial, radial y normal al centro del espécimen.

5.3.1. Geometría simétrica

Durante el proceso de diseño, se planteó obtener una geometría simétrica con la finalidad de generar un campo normal, tangencial o radial sobre la probeta, pudiendo así obtener distintos resultados con el mismo dispositivo.

La Figura 5.26 muestra la geometría del dispositivo.

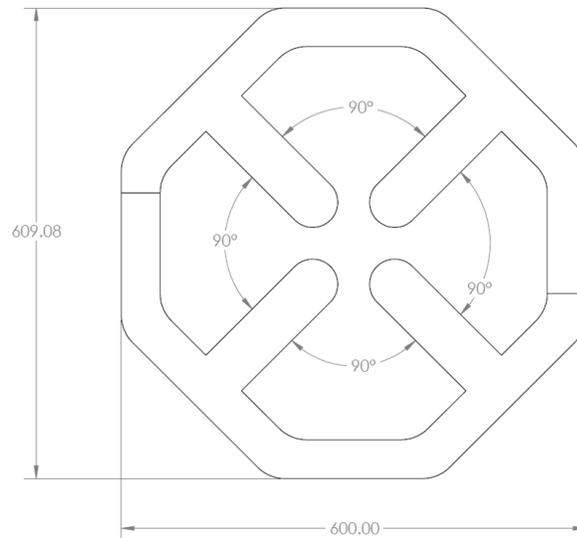


Figura 5.26: Cuadrupolo simétrico.

Una vez establecida la geometría, se realizó un análisis MEF en 3 dimensiones para analizar el comportamiento del campo. El estudio de elemento finito en 3D tiene distintos parámetros al 2D mostrado anteriormente, por lo cual se realizará una breve descripción de dicho análisis.

5.3.2. Modelado numérico 3D

Para este caso se seleccionó una solución magnetostática en 3D. Se importó la geometría con extensión (.STEP14) mostrada en la Figura 5.27.

En este análisis, las bobinas rectangulares cuentan con un área útil muy similar a la que se prevé sea el área final. Se utilizó acero 1008 para el núcleo, el cual tiene una curva B-H como la que se muestra en la Figura 5.16. La Figura 5.28 muestra el estado final de la selección de materiales en el modelo global.

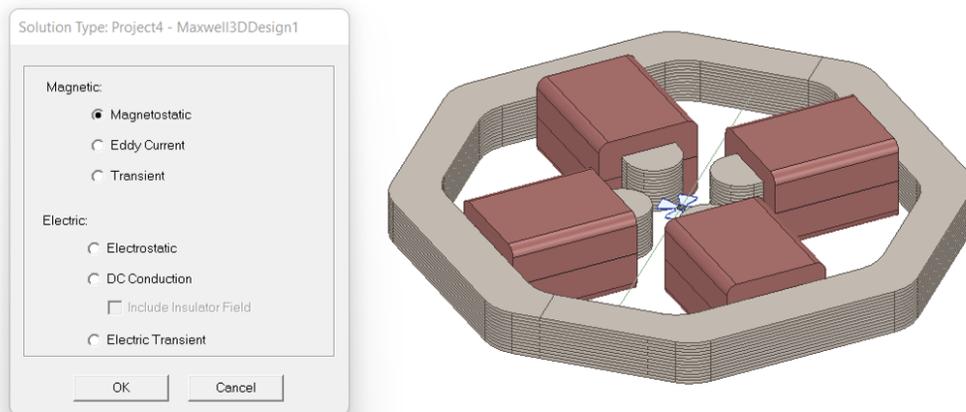


Figura 5.27: Geometría del dispositivo magnético.

Design List: Project4 - Maxwell3DDesign1

Model | Boundaries | Excitations | Parameters | Mesh Operations | Analysis Setup

Name	Color	Model	Display Wirefr...	Visible	Material	Type
CDHmitad		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_7		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_8		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_9		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_10		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_11		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_12		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_13		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_14		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_15		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_16		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_17		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_18		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_19		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_20		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_21		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_22		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_23		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_24		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
CDHmitad_25		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	steel_1008	Solid
Probeta		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	vacuum	Solid
Probetacentro		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	vacuum	Solid
bobinasolida		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	copper	Solid
bobinasolida_1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	copper	Solid
bobinasolida_2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	copper	Solid
bobinasolida_3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	copper	Solid
bobinasolida_1_Se...		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Sheet
bobinasolida_2_Se...		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Sheet
bobinasolida_3_Se...		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Sheet

Delete | Properties | Select | Done

Figura 5.28: Selección de materiales.

Para el caso del análisis en 3D se deben emplear 2 condiciones de frontera. La primera es la condición de AISLAMIENTO (insulation), mostrada en la Figura 5.29, la cual crea un aislamiento entre el conductor y el núcleo. La segunda es una condición que se divide en 2; estas condiciones son aplicadas por omisión en el software. La primera de ellas es:

NATURAL:

Se aplica a los límites de la interfaz entre los objetos; describe la variación natural de un material al siguiente, según lo definido por las propiedades del material, como se muestra en la Figura 5.30.

NEUMANN:

Para los límites exteriores del dominio de la solución, \vec{H} es el campo tangencial al límite y el flujo no lo puede cruzar, Figura 5.30.

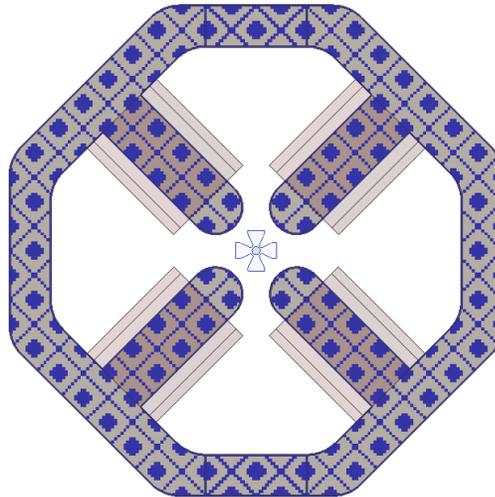
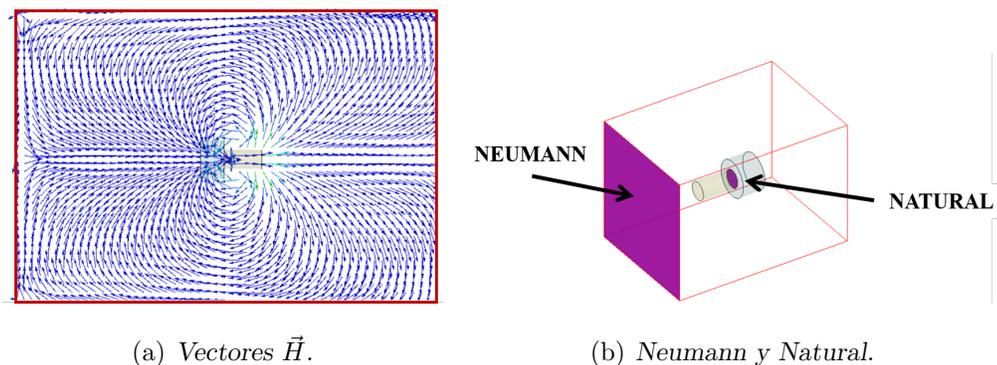


Figura 5.29: Condición de aislamiento.



(a) Vectores \vec{H} .

(b) Neumann y Natural.

Figura 5.30: Condiciones de frontera.

Una vez definidas las condiciones de frontera, se aplicaron las excitaciones para cada bobina. En este caso se utilizaron 4000 A-vta de manera inicial, con la configuración de la Figura 5.31.

La región de análisis para el problema tiene una dimensión de 900 mm partiendo desde el origen para los ejes X, Y y Z, formando así un cubo. Es importante mencionar que el centro del dispositivo también se encuentra en el origen.

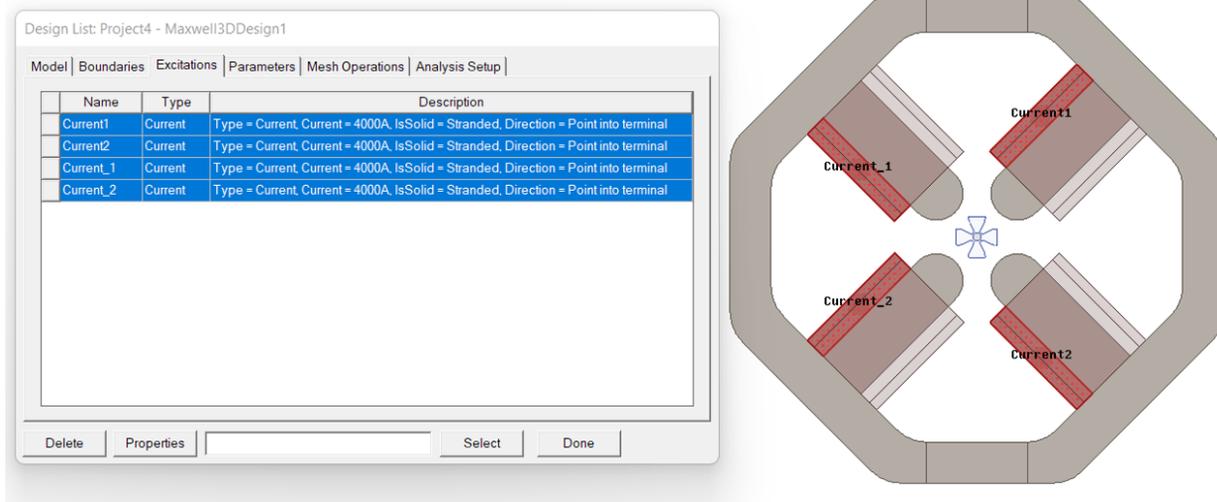
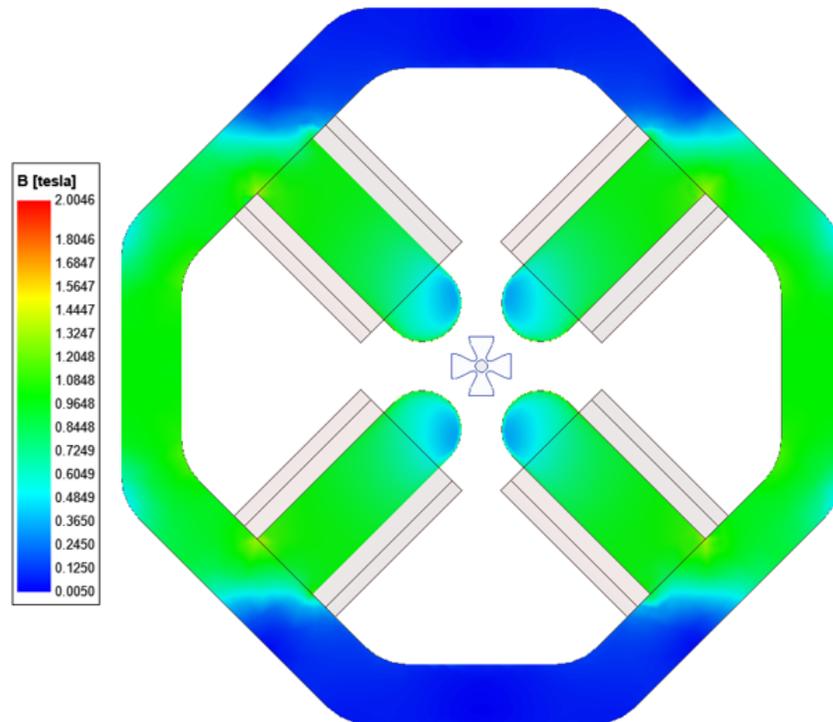


Figura 5.31: Excitación.

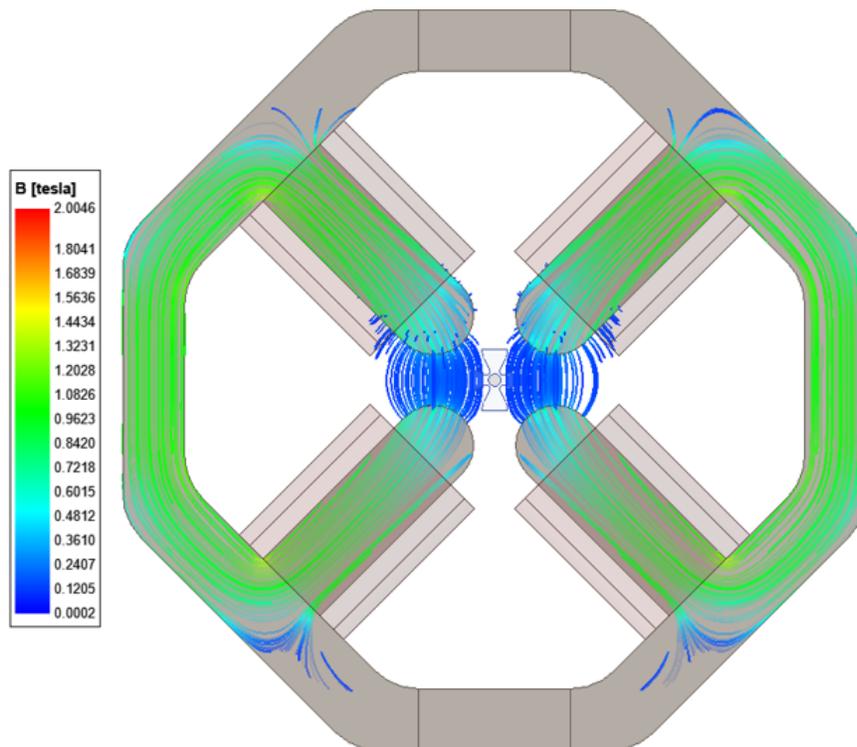
Finalmente, se aplicó el **solucionador**. Los parámetros establecidos son exactamente los mismos que se utilizaron en el análisis en 2D (Figura 5.21). El porcentaje de error fue establecido en 1, con un número máximo de 10 iteraciones, La configuración predeterminada por el programa permaneció sin más cambios.

5.3.3. Análisis de resultados

Al solucionar este problema se obtuvieron los siguientes resultados. La Figura 5.32 muestra la magnitud de la densidad de flujo magnético en todo el núcleo; podemos observar una configuración de 2 dipolos, y un campo magnético de 0 a 2.0046 T.

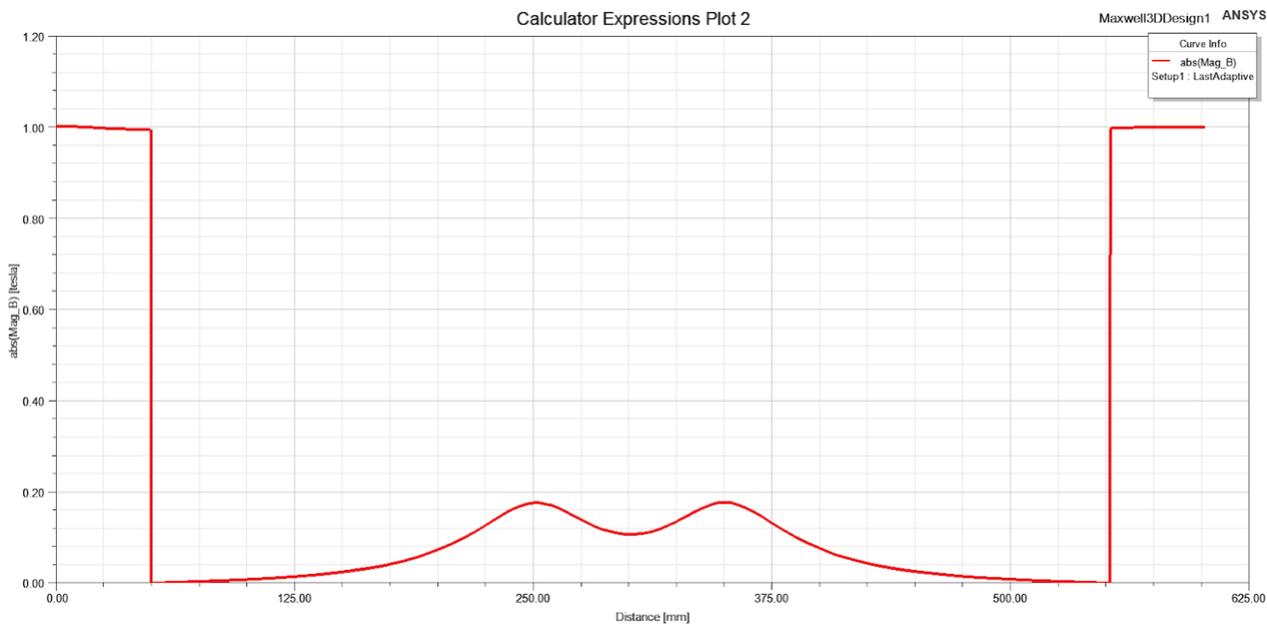


(a) Densidad (magnitud) de flujo magnético.

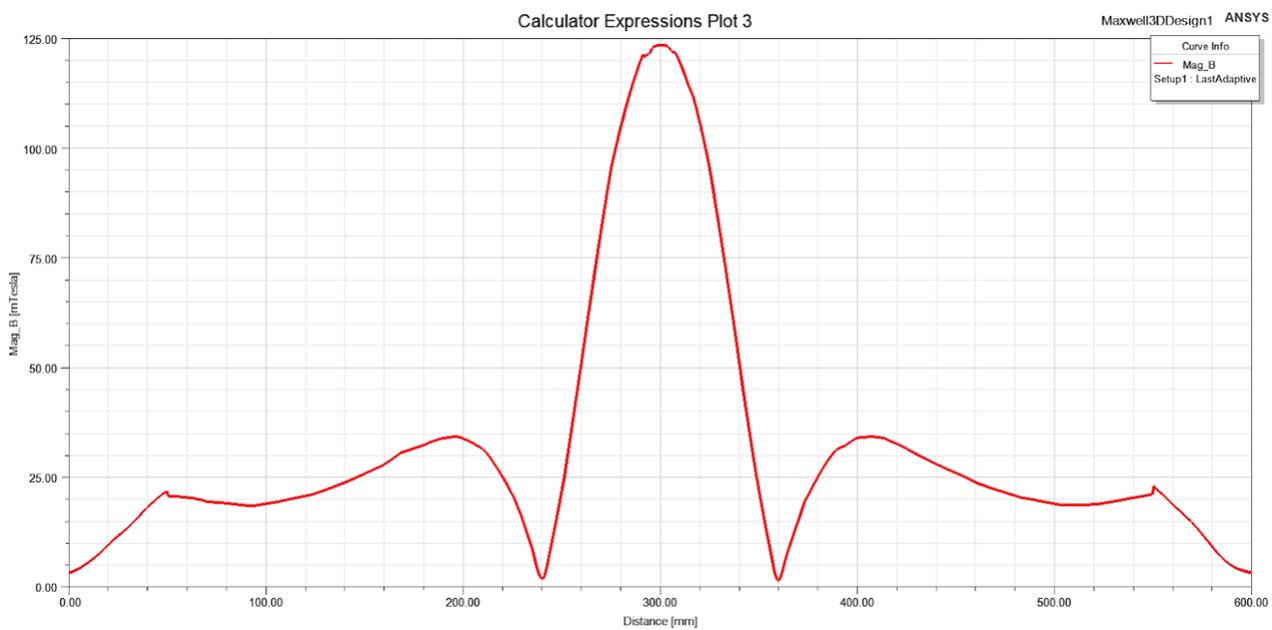


(b) Líneas de flujo magnético.

Figura 5.32: Análisis de campo.



(a) Gráfica de campo horizontal.



(b) Gráfica de campo vertical.

Figura 5.33: Análisis de campo.

Una vez realizado el análisis general sobre el campo magnético en el dispositivo, se consideraron los tipos de conexiones eléctricas. Con base a esto se procedió a generar un estudio más detallado del comportamiento del campo sobre el área donde se pretende instalar la probeta. Se encontró la posibilidad de obtener distintas direcciones del campo magnético, de las cuales las más importantes son las siguientes:

1. Normal.
2. Tangencial.
3. Radial.

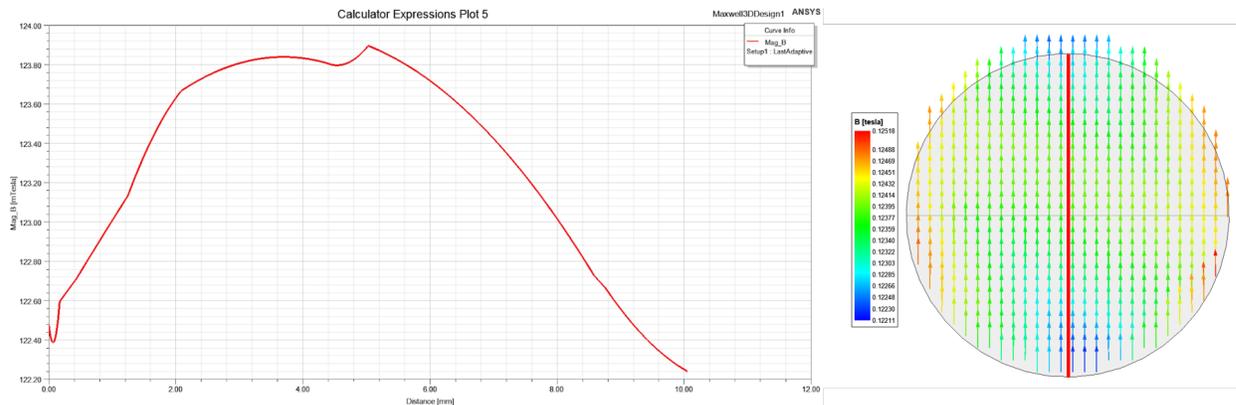


Figura 5.34: Campo normal a la fuerza.

La Figura 5.34 muestra la parte central de la probeta. esta zona de la probeta se delimitó con una circunferencia de 10 mm. La selección específica de este lugar surge por la geometría utilizada para este análisis. Se sabe que en esa sección existen deformaciones unitarias homogéneas, por ello la importancia de analizar el campo en dicha ubicación.

En el campo magnético mostrado en la Figura 5.34 es posible observar la orientación que este posee. Esta es normal a una de las fuerzas que se aplicará en la probeta, con una magnitud de 122.11 mT a 125.18 mT. Esto representa un 2.5 % de variación en la magnitud del campo. También es posible analizarlo mediante una gráfica que muestra la densidad de flujo (mT) contra la distancia (mm).

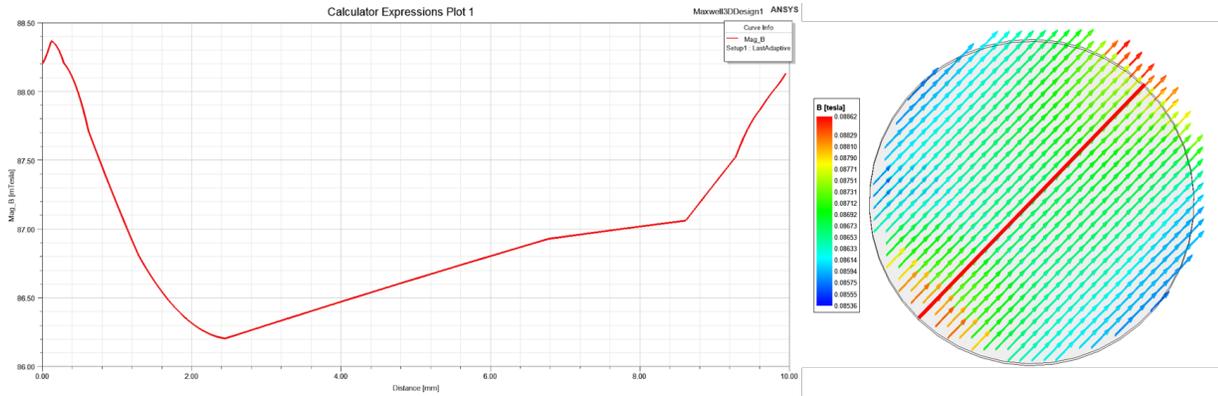


Figura 5.35: Campo tangencial a la fuerza.

En la Figura 5.35 se muestra el segundo arreglo de los tres mencionados anteriormente. Este adquiere una orientación tangencial a la fuerza que será aplicada, con un ángulo de 45° respecto a la base horizontal de la probeta. El campo \vec{B} varía de 85.36 mT hasta 88.62 mT, lo cual representa una variación de 3.81 % en su magnitud, y una disminución respecto al arreglo principal (Normal) de aproximadamente el 42.13 % o 36.65 mT. De igual manera, su comportamiento se muestra en una gráfica que indica la densidad de flujo (mT) contra la distancia (mm).

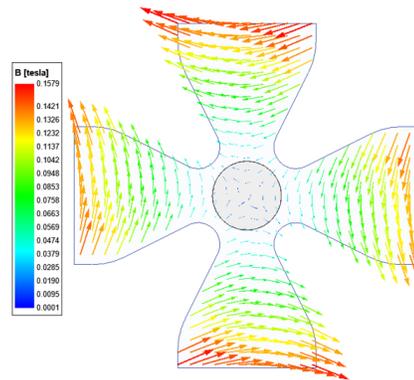


Figura 5.36: Campo radial.

Por último, la Figura 5.36 muestra el tercer arreglo. El comportamiento de este campo es radial y se presenta en las regiones externas de la probeta. La magnitud posee un comportamiento muy variante, pues los valores del campo van de 0 T en la parte central de la probeta hasta 157.9 mT.

Capítulo 6

Construcción del cuadrupolo

Durante el diseño y construcción de este dispositivo se realizó una selección de materiales para su fabricación. El núcleo fue construido con acero 1008 formando un circuito magnético capaz de ayudar a la distribución de la densidad de flujo \vec{B} en zonas específicas; la selección de este acero se describe detalladamente en este capítulo. De igual manera, se establecen los factores tomados en cuenta para la selección del conductor utilizado en la fabricación de los devanados. Por último, se presentará una descripción del diseño de los carretes individuales que conforman los devanados polares.

6.1. Selección del acero

La selección del acero utilizado en este trabajo inicialmente partió de las siguientes opciones:

- Acero 1008
- Acero 1010
- Acero 1020
- Acero M-19

La Figura 6.1 muestra una gráfica con distintos tipos de aceros magnéticos, desde aceros con excelentes propiedades hasta aceros con deficientes propiedades magnéticas. Por ejemplo, el acero M-19 posee un excelente comportamiento, logrando un rápido aumento de densidad de flujo \vec{B} , con una baja excitación magnética \vec{H} , en contraste con el acero 1020, que requiere una intensidad de campo \vec{H} alta para lograr la saturación o la densidad de flujo deseada. Se debe de explorar entre estos aceros la opción más adecuada y económica para nuestro dispositivo

El acero M-19 es un acero especial de grano orientado, para uso en transformadores, por lo que es complicado adquirirlo en pequeñas cantidades. Por ello se planteó la exploración de 3 diferentes aceros, realizando una prueba numérica entre los aceros 1008, 1015 y M-19 para un dispositivo sin entrehierro y otro con un entrehierro similar al de nuestro dispositivo.

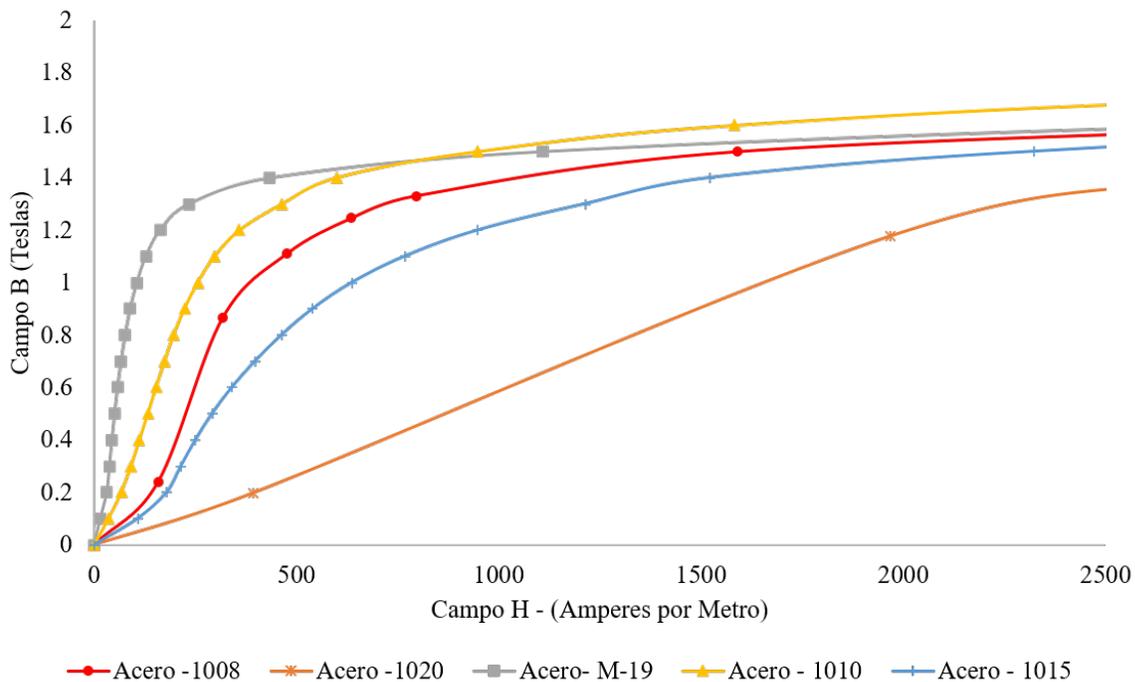


Figura 6.1: Curvas B-H.

La Figura 6.2 muestra una gráfica con el comportamiento de la densidad de flujo \vec{B} el circuito magnético cerrado de la Figura 6.3. Se utilizan los aceros 1008, 1015 y M-19. Podemos observar que el acero 1020 posee un comportamiento uniforme, pero su densidad de flujo es inferior a los 700 mT en la sección examinada; en cambio, el acero 1008 muestra un comportamiento significativamente más uniforme y simétrico, con una densidad de flujo mucho más cercana al M-19, tan solo existiendo una diferencia de 300 mT . Finalmente, el acero M-19 posee un buen comportamiento destacando una alta densidad de flujo magnético que ronda los 1400 mT .

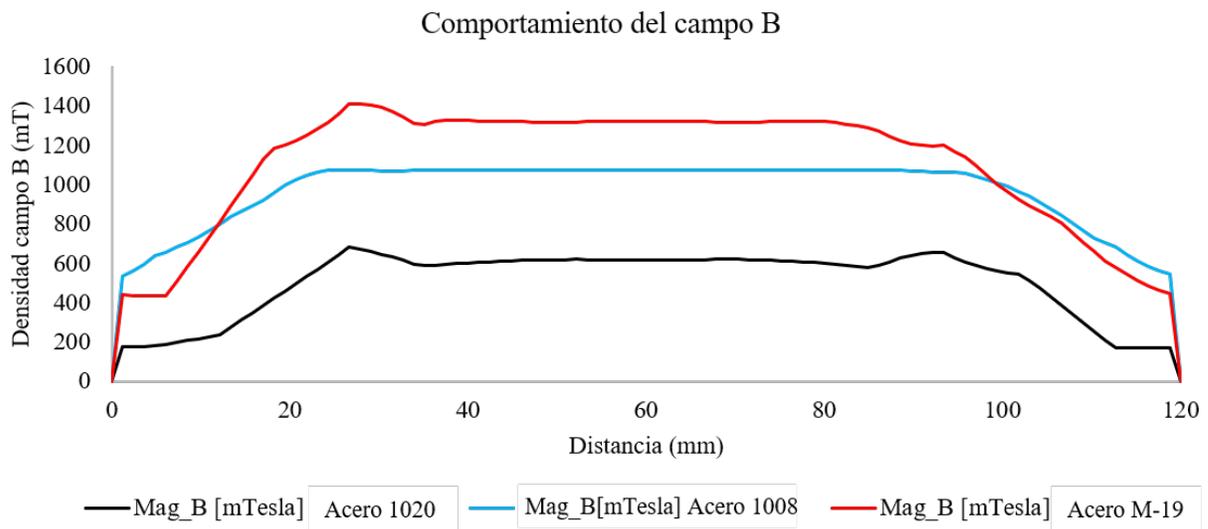


Figura 6.2: Densidad de flujo \vec{B} en núcleo sin entrehierro .

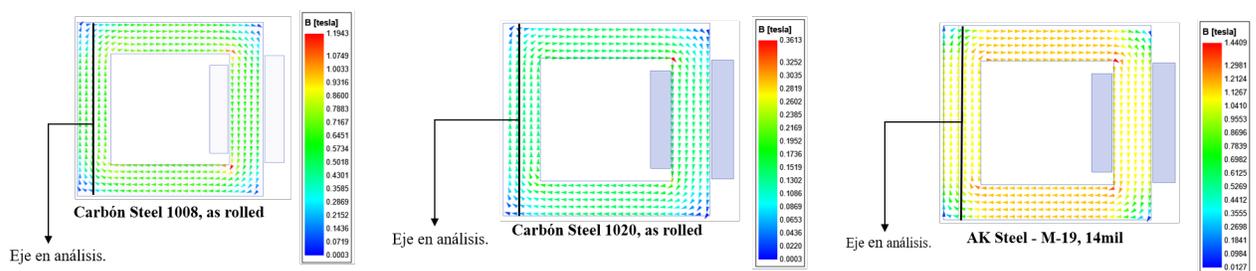


Figura 6.3: Núcleos sin entrehierro.

La Figura 6.4 muestra una gráfica que presenta el comportamiento del circuito magnético bajo estudio, cuando este circuito posee un entrehierro de gran tamaño. La densidad de flujo se vuelve prácticamente la misma para los 3 aceros; esto debido a la ley de Hopkinson [3].

La ley de Hopkinson establece que:

$$\mathcal{F} = \phi \mathcal{R} \quad (\text{Ley de Hopkinson.}) \quad (6.1)$$

Siendo así, mientras más grande sea la reluctancia presente en el circuito magnético (en este caso el entrehierro) menor será la densidad de flujo presente en él.

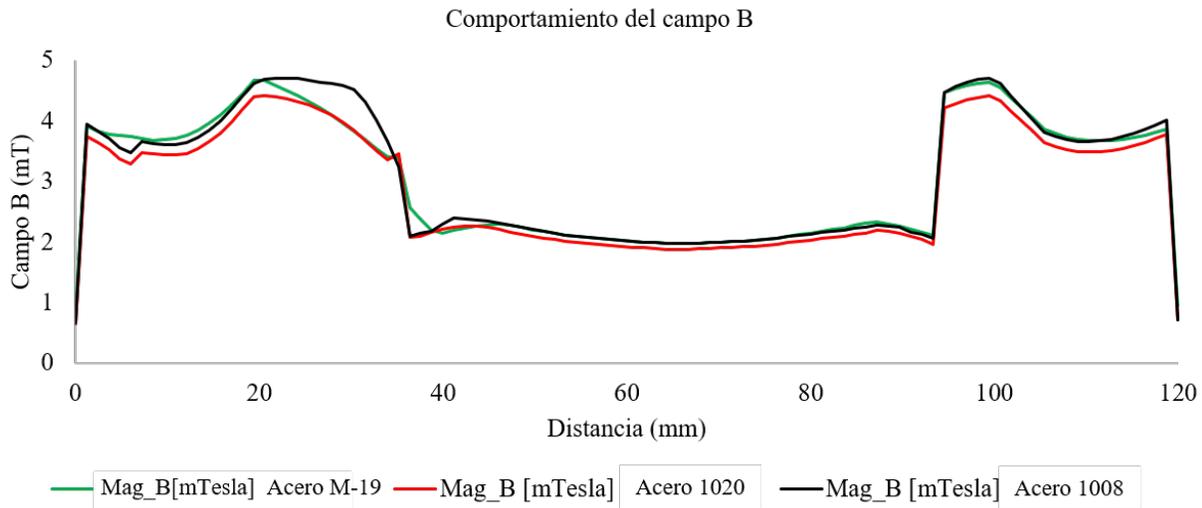


Figura 6.4: Densidad de flujo \vec{B} en núcleo con entrehierro.

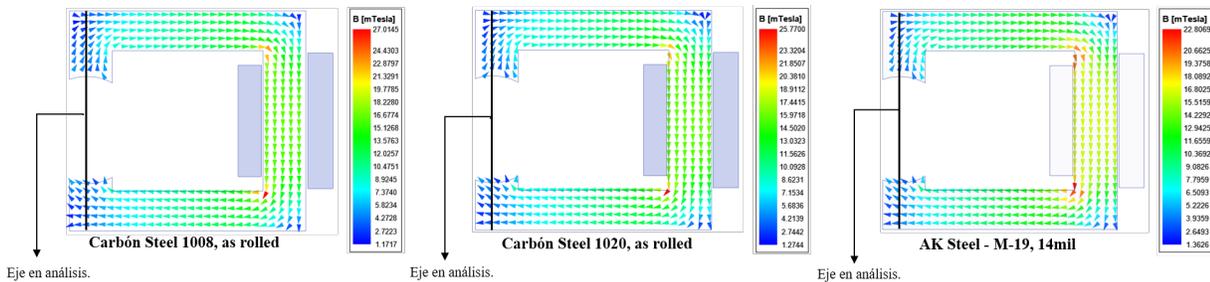


Figura 6.5: Núcleo con entrehierro.

Finalmente, con ayuda de los resultados previamente expuestos, fue posible seleccionar el material con el cual se construyó el circuito magnético del dispositivo. El acero 1008 fue una de las mejores opciones para esta aplicación, ya que el comportamiento magnético que presenta es bastante bueno, destacando de que este material es un acero comercial y económico en comparación con el acero M-19.

6.2. Selección de conductor

Para la selección del conductor se utilizaron los parámetros de operación de la fuente de alimentación que suministrara energía al dispositivo; estos se presentan en la Tabla 6.1. La corriente máxima suministrada por la fuente es de 5 Amperes; por lo tanto, se seleccionó un conductor calibre #16. Los datos de este conductor se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.1: Datos técnicos.

Fuente de alimentación		
Voltaje	35	V
Corriente	5	A
Resistencia	7	Ohms

Tabla 6.2: Tabla de datos para alambre magneto.

Calibre	Alambre desnudo			Capa doble		R. Max DC a 20°C	I. Max (A)
	D. Nominal	P. Total	Mín. Incremento	Máx. Diámetro	Longitud aprox.		
AWG	mm	kg/km	mm	mm	m/kg	Ohm/km	155°C
16	1.29	11.62	0.074	1.31	84.4	13.19	8.6
17	1.151	9.25	0.071	1.24	105.9	16.57	6.8
18	1.024	7.32	0.066	1.11	133.7	20.93	5.4

Una vez seleccionado el conductor se realizó el cálculo de longitud requerida para la construcción de cada devanado con ayuda de un software CAD. El conductor seleccionado tiene un diámetro exterior de 1.31 mm, mientras que el número total de vueltas del devanado es 1020.

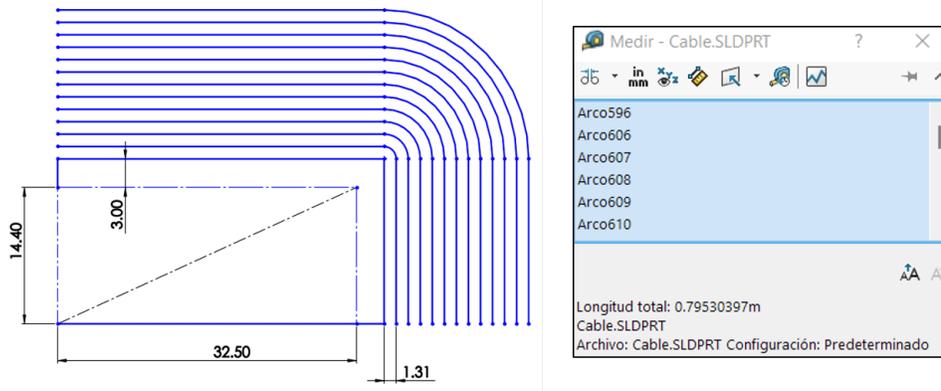


Figura 6.6: Devanado de cuarto de vuelta.

La Figura 6.6 muestra un croquis 2D realizado en SolidWorks, el cual representa una cuarta parte del núcleo, esto con el fin de calcular la longitud total del conductor requerido. Al trazar los conductores con sus respectivos diámetros y separaciones entre sí, es posible obtener una estimación bastante precisa de la longitud total requerida.

Podemos observar que la longitud del conductor para un cuarto de vuelta y doce capas es aproximadamente 0.80 metros, teniendo entonces una longitud total para cada devanado de 272 metros o aproximadamente 3.3 kg de alambre magneto #16. Esto nos permite conocer la resistencia total que tendrá cada devanado, siendo esta de 3.56Ω , confirmando la viabilidad del uso de este conductor, ya que la resistencia máxima soportada por la fuente de alimentación es de 6Ω .

Tabla 6.3: Cálculo de longitud del conductor.

12	Capas por carrete		
17	Vueltas por carrete		
5	Carretes por devanado		
1/4	De vuelta de 12 capas	0.8	Metros
1	Vuelta de 12 capas	3.2	Metros
17	Vuelta de 12 capas	54.4	Metros
1	Devanado con 5 carretes	272	Metros

6.3. Devanados

La construcción de los devanados se diseñó con base en la geometría del núcleo, mostrada en la Figura 6.7 (a). Realizar un devanado de una sola pieza para cada una de las columnas era inviable, por lo cual se optó por seccionarlo y diseñar carretes impresos en material polimérico para conseguir 5 bobinados individuales, tal como se muestra en la Figura 6.7 (b).

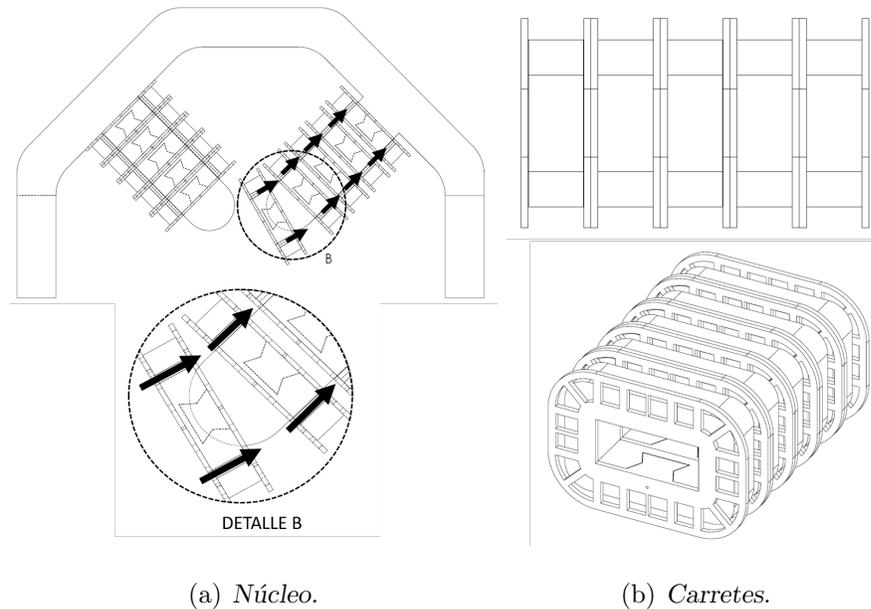


Figura 6.7: Geometría del núcleo.

El embobinado de estos carretes se realizó manualmente. Para esto se construyó el dispositivo de la Figura 6.8 (bobinadora manual) con la cual se efectuó esta tarea resultando ser más eficiente, cómodo y rápido. Finalmente, se tiene en cada uno de estos carretes un total de 204 vueltas (17 vueltas y 12 capas), sumando así para el devanado compuesto por 5 carretes un total de 1020 vueltas.

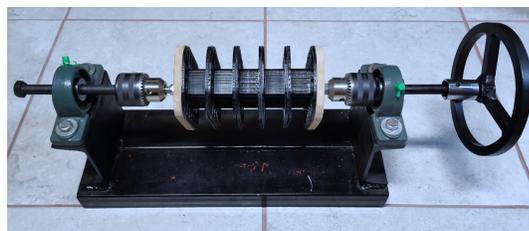
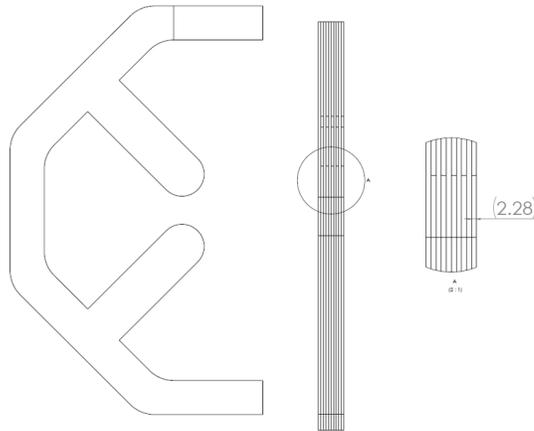


Figura 6.8: Bobinadora.

6.3.1. Circuito magnético

Para la construcción del núcleo se utilizó acero 1008. La selección de este acero fue discutida a profundidad en la Sección 6.1. La geometría y diseño del núcleo se realizó con ayuda de un software CAD. Este proceso se presentó en la Sección 5.2. El circuito magnético final se muestra en la Figura 6.9.



(a) Sección de núcleo. (b) Laminación del núcleo.

Figura 6.9: Geometría del núcleo.

Cada una de las laminaciones que compone al circuito magnético fue cortada con láser para evitar alterar las propiedades del material. El núcleo posee dos secciones, las cuales se ensamblan entre sí para obtener el circuito magnético final de la Figura 6.10. Cada una de estas secciones a su vez dispone de 10 láminas de acero 1008 de 2.28 mm de grosor, como se muestra en la Figura 6.9 (b).

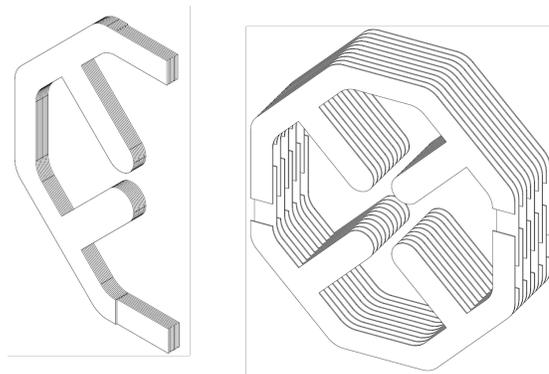
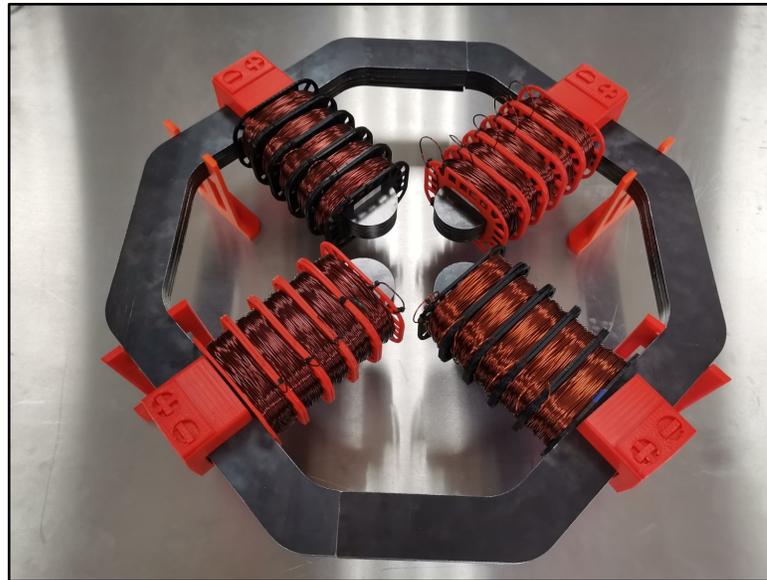


Figura 6.10: Circuito magnético desensamblado.

6.3.2. Dispositivo final

La Figura 6.11 muestra el dispositivo completamente construido, el cual está constituido por 4 devanados de cobre, 4 cajas de conexión, un circuito magnético laminado y 4 soportes.



(a) Cuadrupolo final.



(b) Cuadrupolo final.

Figura 6.11: Dispositivo final.

Capítulo 7

Caracterización del dispositivo

En este capítulo se presentan todas las mediciones experimentales realizadas para la adecuada caracterización del dispositivo, iniciando desde sus dimensiones físicas, algunos parámetros de operación (V, Ω), llegando hasta las mediciones de densidad de flujo magnético \vec{B} , siendo estas las más relevantes en el desarrollo de este trabajo:

- Dimensiones físicas.
- Parámetros de operación.
- Medición de campo magnético.



Figura 7.1: Cuadrupolo electromagnético.

7.1. Dimensiones físicas

El cuadrupolo tiene de dimensiones mostradas en la Figura 7.2. Está compuesto por un núcleo con 10 láminas apiladas, cada una de 2.28 mm de espesor, teniendo así un circuito magnético con un peso de 34 kg. El dispositivo utiliza 4 devanados para su operación, cada uno de ellos construido con alambre de cobre con un peso aproximado de 3.5 kg. El peso total para este dispositivo es de 50 kg.

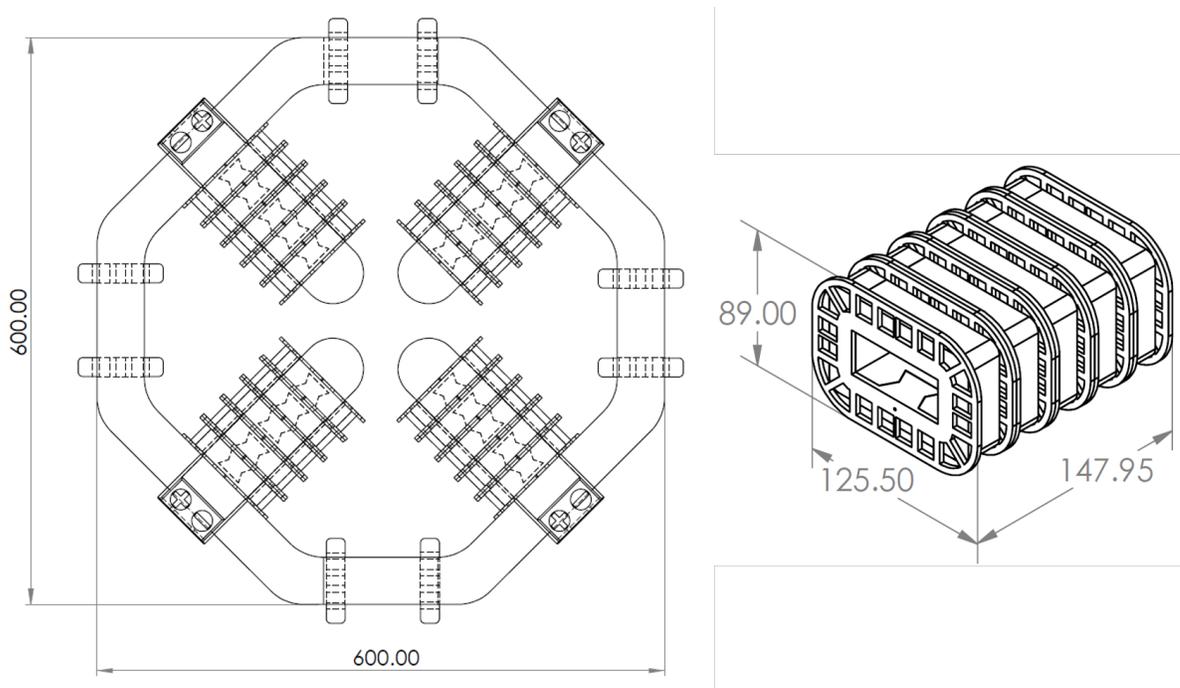


Figura 7.2: Dimensiones del dispositivo.

7.2. Parámetros de operación

Una vez construido el dispositivo, es posible realizar mediciones que nos ayuden a establecer ciertos valores máximos de operación, tal como una medición de resistencia (Figura 7.3), la cual nos ayudará a conocer la resistencia real existente en cada uno de los devanados, pudiendo así también conocer el voltaje máximo al cual operará. También podremos determinar la fuente de alimentación requerida para su operación. Los principales parámetros eléctricos se muestran en la Tabla 7.1

Tabla 7.1: Datos técnicos reales.

Parámetros de operación		
Voltaje Máximo	25	V
Corriente Máxima	6	A
Resistencia Total	3.4	Ω

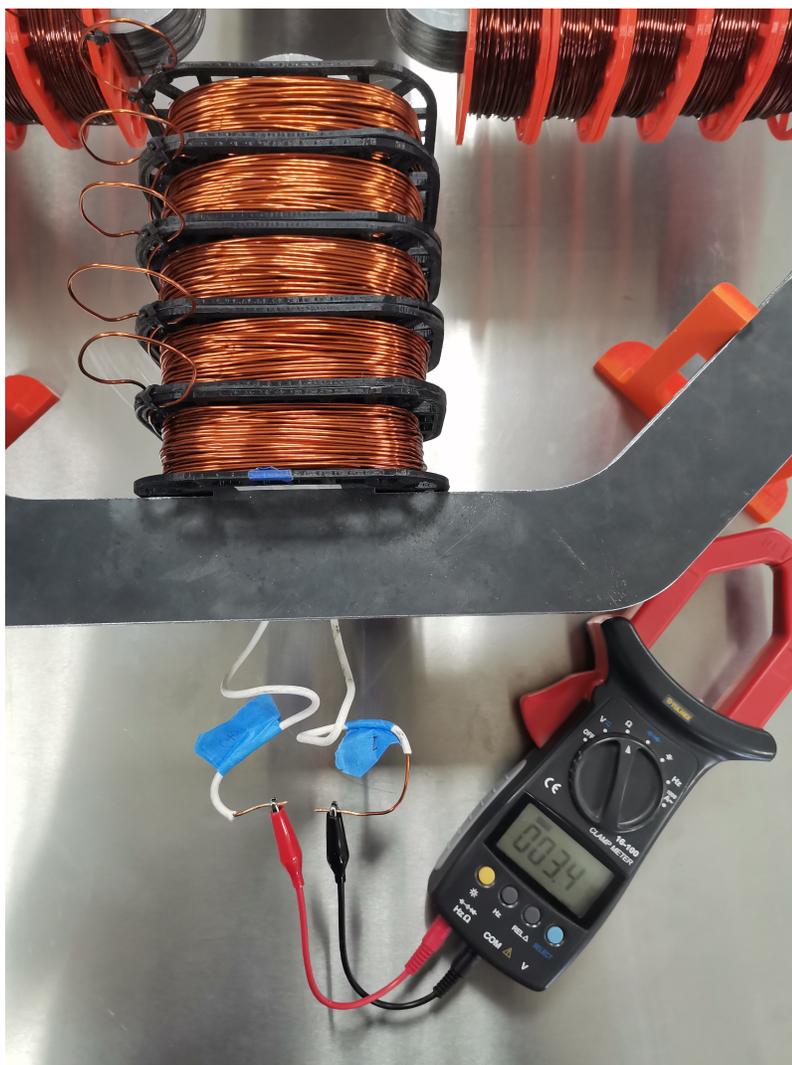


Figura 7.3: Medición de resistencia.

7.3. Medición del campo magnético

La medición de la densidad de flujo magnético \vec{B} es el factor más importante en el desarrollo de este trabajo, ya que este será el campo aplicado en la zona central de la probeta, donde también se encuentra el estado biaxial de esfuerzos. A continuación se muestran todas las mediciones realizadas para corroborar el campo magnético proyectado mediante la simulación numérica. Se expondrá brevemente el equipo utilizado para realizar dichas mediciones, al igual que las zonas en las que estas fueron realizadas; finalmente, se presentará la comparación de Simulaciones numéricas vs mediciones experimentales.

7.3.1. Instrumentos de medición

Para realizar la medición del campo \vec{B} se utilizó un gaussímetro SP-5180, marca F.W. BELL, mostrado en la Figura 7.4. Las especificaciones técnicas de este gaussímetro se muestran en la Tabla 7.2.

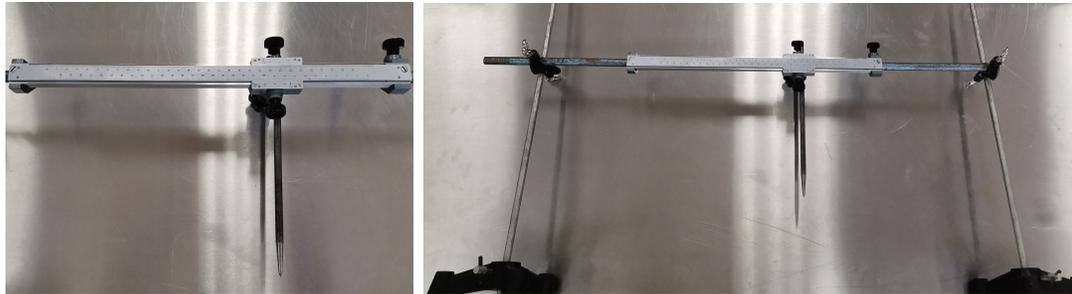


Figura 7.4: Gaussímetro.

Tabla 7.2: Datos técnicos del gaussímetro 5180.

Modelo	5180
Exactitud Básica	1 %
Lecturas	Gauss, Tesla, Amps/metro
Salida Análoga	$\pm 3V$ FS
Puerto de Comunicación	USB (1 muestras/seg.)
RANGOS	
Extremadamente bajo (campo bajo sonda)	1 G
Bajo	300 G
Medio	3 kG
Alto	30 kG
RESOLUCIÓN	
Extremadamente baja (campo bajo sonda)	1mG (0.1 μ T)
Baja	0.1 G (10 μ T)
Media	1.0 G (100 μ T)
Alta	10 G (1 mT)

Parte del equipo para medición del campo está conformado por el montaje de un calibrador de altura en el cual se monta la sonda (Figura 7.5 a); además, se utilizan un par de soportes verticales para sujetar el calibrador (Figura 7.5 b).



(a) Calibrador de altura.

(b) Soportes verticales y calibrador de altura.

Figura 7.5: Equipo de medición.



(a) Gaussímetro 5180.

(b) Sonda plana.

Figura 7.6: Equipo de medición del campo magnético.

Una vez seleccionado el equipo, el siguiente paso fue plantear la zona y tipo de conexión a medir. La primera medición se realizó con la conexión eléctrica principal utilizando los 4 devanados, generando un campo orientado a 90° con la configuración de la Figura 7.7.

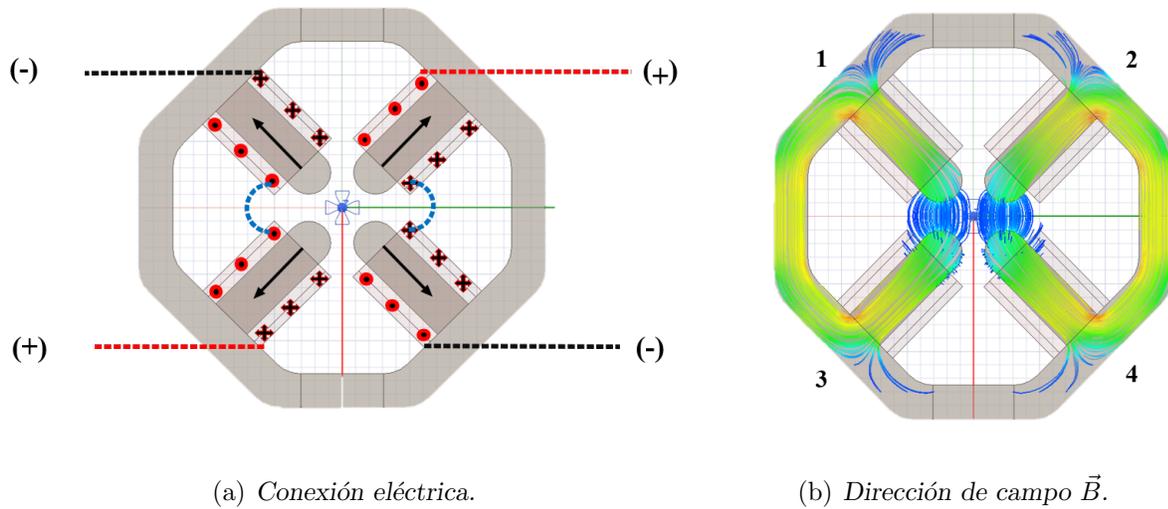


Figura 7.7: Campo principal para configuración 1.

La Figura 7.8 muestra la segunda conexión, en la cual solamente se utilizan 2 devanados, generando un campo orientado a 45° .

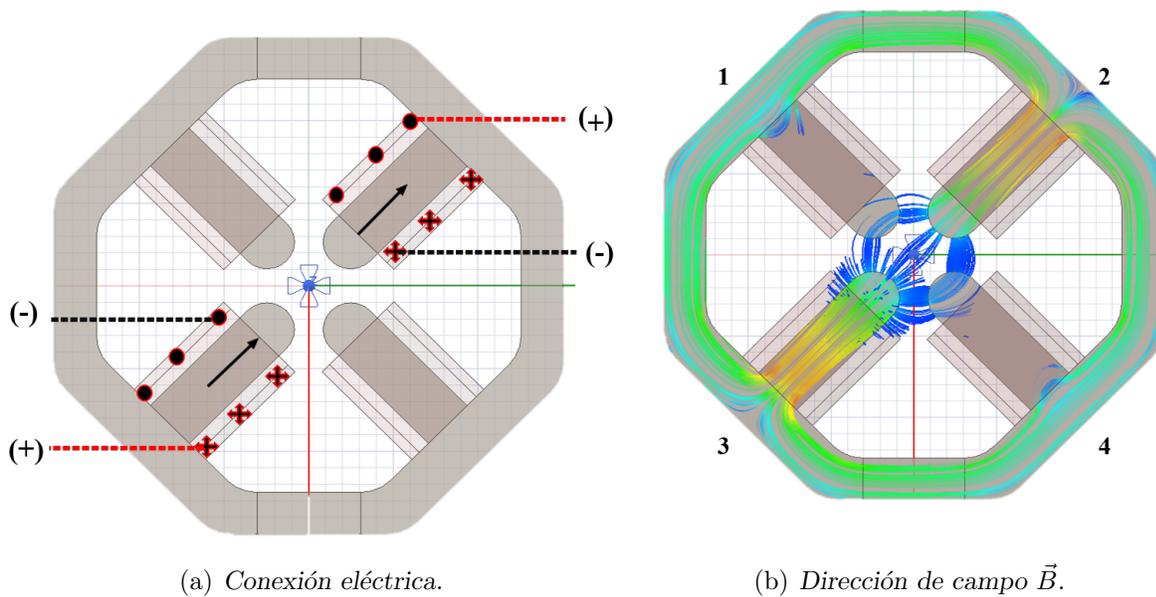


Figura 7.8: Campo para la configuración 2.

La Figura 7.9 muestra un diagrama de contorno producido por la configuración 1, en el cual se indica el eje sometido a medición. Este eje se encuentra justo al centro del dispositivo. La medición parte desde +15 cm, avanzando en pasos de 0.5 cm hasta llegar a -15 cm, pasando justo por el punto 0 cm, el cual posee la menor variación de campo en dicha zona con tan solo un 2.5 % aproximadamente. En total, el número de datos recolectados para esta medición fue de 60.

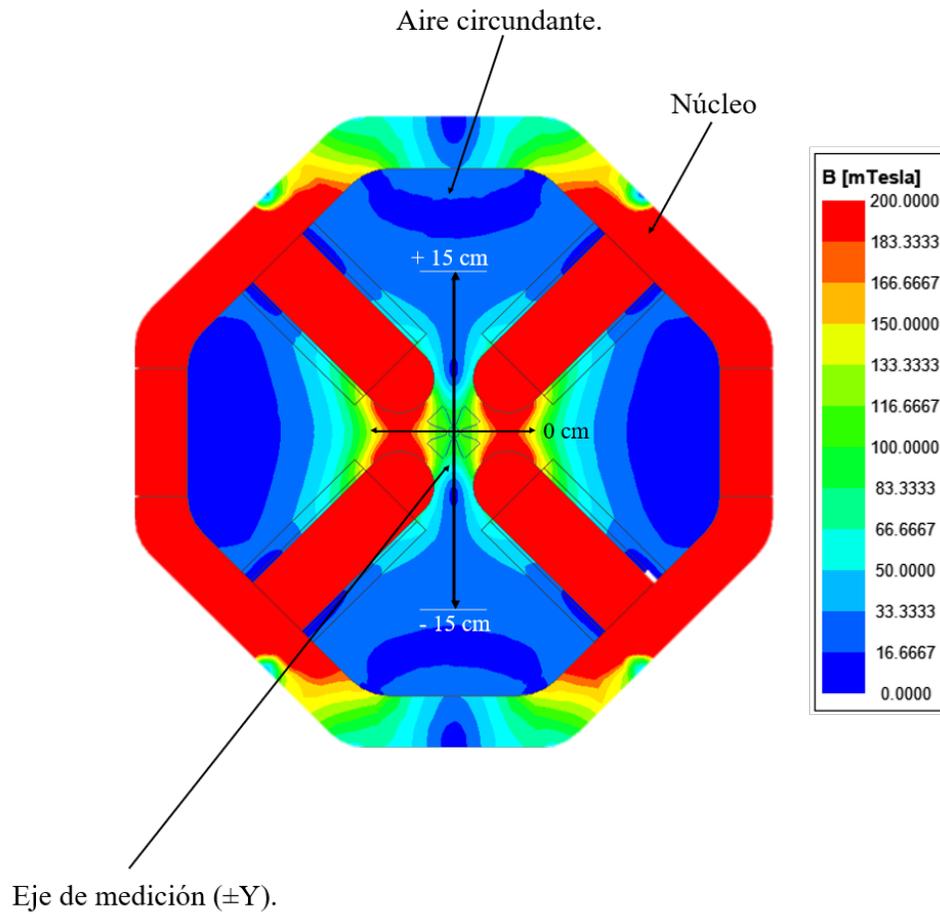


Figura 7.9: Diagrama de contorno para conexión 1.

La Figura 7.10 muestra la comparación entre valores de la simulación y valores experimentales para la conexión 1. Esta comparación cuenta con 4 medidas principales, para corrientes desde 0.5 Amperes hasta 3.5 Amperes, graficando aquí un total de 240 datos recolectados para la caracterización de esta conexión. El cotejo muestra una similitud bastante buena con tan solo un 0,5% de variación para la medición de 3.5 Amperes y hasta un 10% para la medición con 0.5 Amperes.

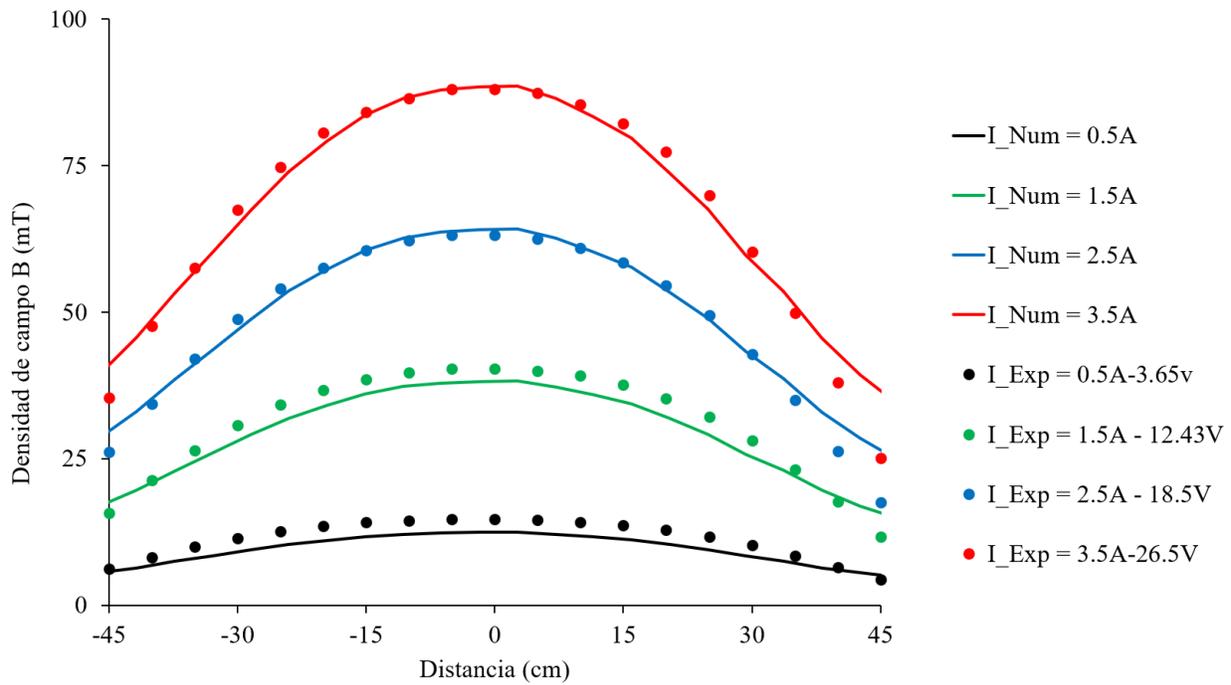


Figura 7.10: Comparación de datos numéricos vs experimentales.

La Figura 7.11 muestra un diagrama de contorno producido por la conexión 2, en el cual se indica el eje sometido a medición. Este eje se encuentra entre dos caras polares con una orientación de 45° . La medición parte desde +8.5 cm realizando pasos de 0.5 cm hasta llegar a -8.5 cm pasando justo por el punto 0 cm, el cual posee la menor variación de campo con un 2.5% aproximadamente. En total, el número de datos recolectados para esta medición fue de 17.

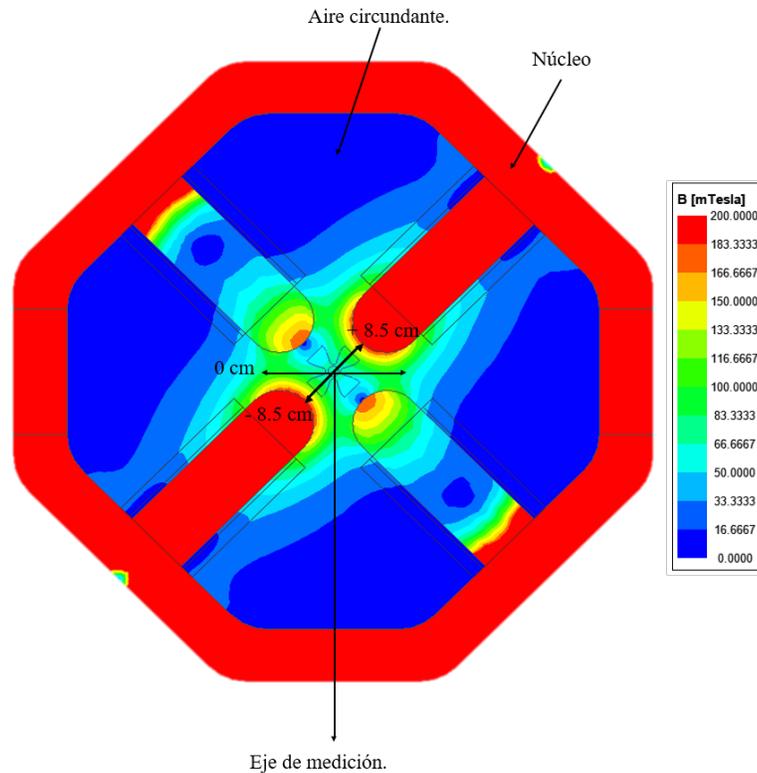


Figura 7.11: Diagrama de contorno para conexión 2.

La Figura 7.12 muestra la comparación entre datos numéricos y experimentales para la conexión 2. Esta comparación cuenta con 4 medidas principales para corrientes desde 0.5 Amperes hasta 3.5 Amperes, graficando aquí un total de 68 datos recolectados para la caracterización de esta conexión. El cotejo muestra una similitud bastante buena, con tan solo un 10% de variación para la medición de 3.5 Amperes y hasta un 0,5% para la medición con 0.5 Amperes.

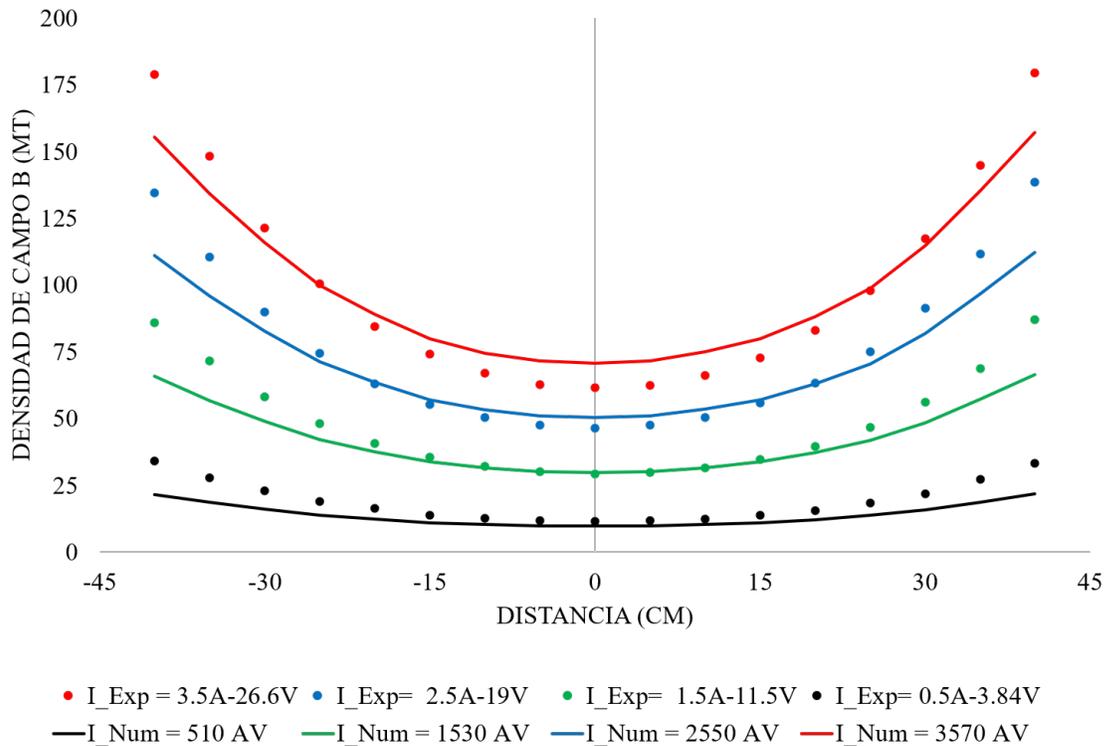


Figura 7.12: Comparación de datos numéricos vs experimentales.

Como conclusión de este capítulo se destaca la similitud entre los datos numéricos y los datos experimentales, los cuales son bastante cercanos entre sí, teniendo variaciones mínimas en rangos de operación significativos. Es importante destacar que la variación existente es debida probablemente a la medición experimental, ya que esta se vuelve compleja por el tipo de sonda, geometría y los campos dispersos incidentes sobre ella.

El dispositivo también es capaz de operar en un rango superior a 100 mT debido a la geometría y materiales empleados en su fabricación; sin embargo, esta caracterización solo se limitó a un rango de operación de 3.5 Amperes , o bien 88 mT para la conexión principal, debido a la fuente de alimentación utilizada durante este proceso.

Lograr de un campo magnético homogéneo en la zona central de la probeta cruciforme es crucial. Esta característica fue tomada en cuenta durante el diseño del dispositivo y corroborado durante las mediciones experimentales. El área útil ronda aproximadamente 10 mm de diámetro, donde la medición real presenta una variación aproximada del $0,18\%$ en dicha zona.

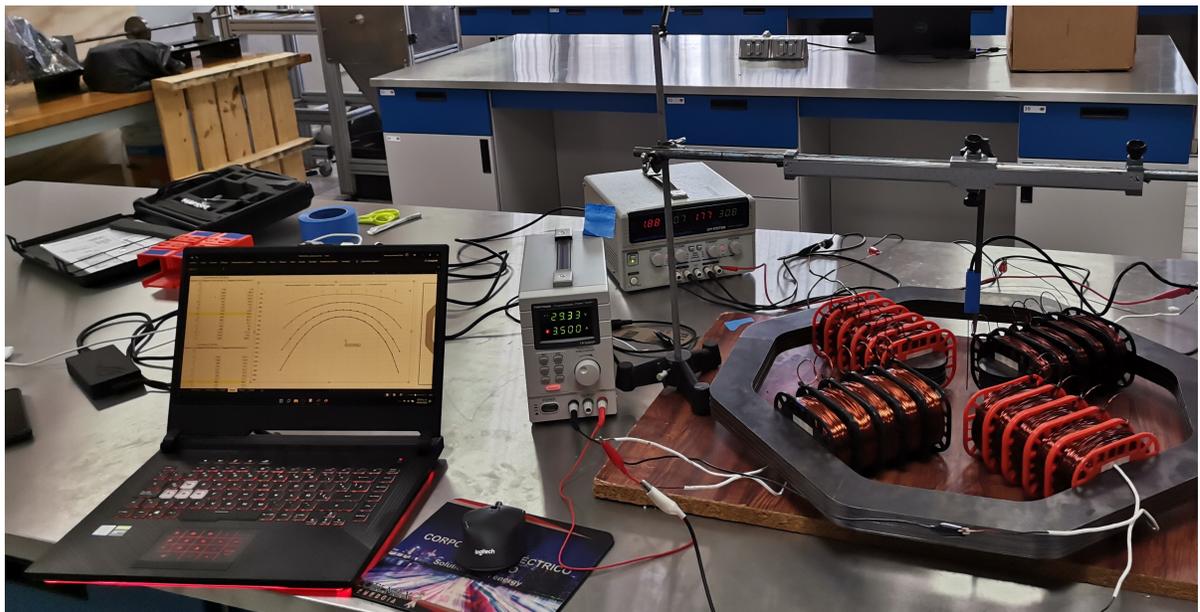


Figura 7.13: Caracterización de campo magnético.

Capítulo 8

Banco de ensayos biaxiales

El objetivo principal del desarrollo de este dispositivo es su instalación y operación sobre un banco de ensayos biaxiales, para ayudar a caracterizar elastómeros magnetorreológicos de geometría cruciforme bajo la influencia de un campo magnético homogéneo, mientras el material se encuentra en un estado biaxial de esfuerzos. Otra aplicación importante de este dispositivo es ayudar a la fabricación de los mismos; durante el curado de la probeta es posible obtener distintas configuraciones del material, tales como una orientación anisotrópica general de todas las partículas en el material, o bien un material isotrópico con partículas alineadas a 90° o 45° con respecto de la horizontal. En este capítulo se presentará la operación del cuadrupolo en conjunto con el banco de ensayos biaxiales.

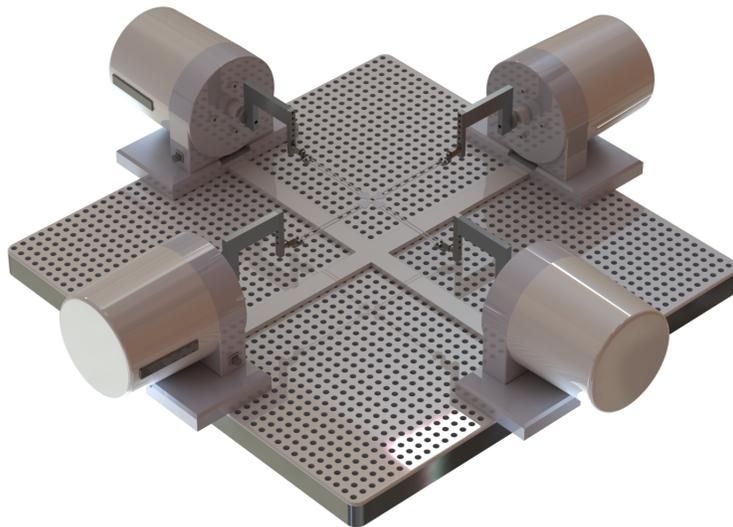


Figura 8.1: Banco de ensayos.

8.1. Instalación del cuadrupolo

La Figura 8.2 muestra el montaje del cuadrupolo sobre el banco de ensayos. Los componentes resaltados en color amarillo comprenden las partes más importantes del banco. El número 1 señala la cámara utilizada para grabar un vídeo de la probeta mientras es sometida a esfuerzos, esto para poder obtener las deformaciones unitarias mediante procesamiento de imágenes con ayuda de un software especializado. El número 2 muestra el sensor del equipo; este sensor detecta la fuerza requerida al aplicar determinado desplazamiento en la probeta. El número 3 es el actuador encargado de aplicar el desplazamiento en la probeta.

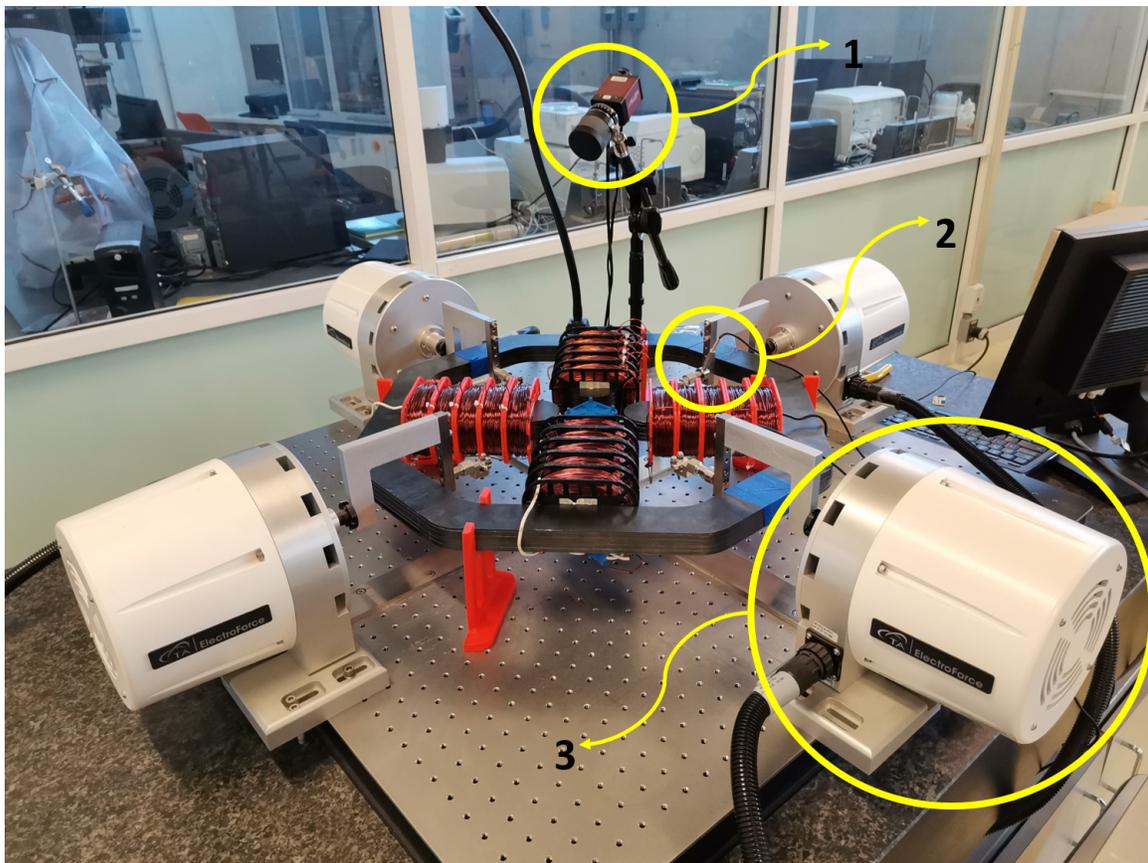
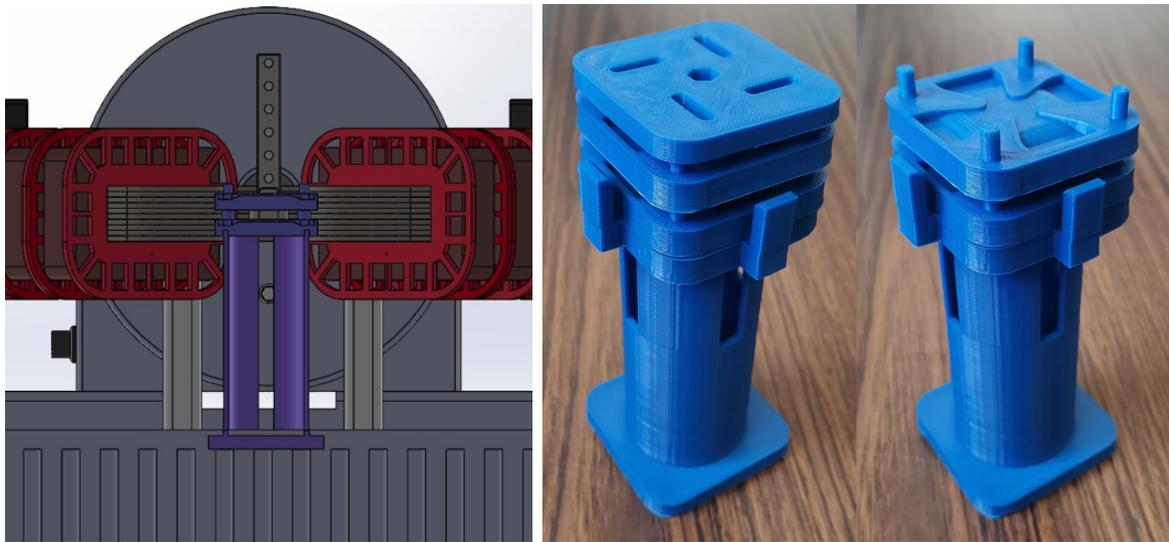


Figura 8.2: Banco de ensayos biaxiales y cuadrupolo electromagnético.

8.2. Alineación de micro partículas

Para la fabricación de las probetas sometidas a estudio, fue necesario construir un molde, el cual posea la geometría requerida. Para esto se diseñó un molde impreso en material polimérico con geometría cruciforme; esta geometría fue expuesta por Luis Palacios y colaboradores en [9]. El molde mostrado en la Figura se adecuó para poder ser utilizado en el cuadrupolo mientras este está en funcionamiento, lo cual ayudará a obtener probetas anisotrópicas con alineación de 90° o 45° con respecto a la horizontal en las partículas, dependiendo el campo aplicado durante el curado.



(a) Vista de corte del molde instalado.

(b) Molde impreso.

Figura 8.3: Molde para probeta.

8.2.1. Aplicación de campo magnético en las probetas

Durante la fabricación de las probetas, se aplicó un campo magnético de 55 mT con orientación de 90° y 45° con respecto de la horizontal durante 30 minutos, como se muestra en la Figura 8.4, logrando que las partículas se alinearan como se muestra en la Figura 8.5.

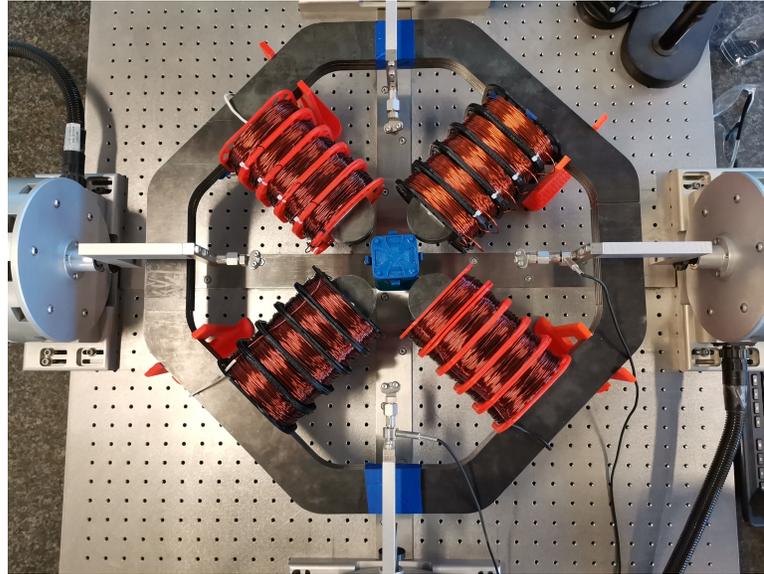
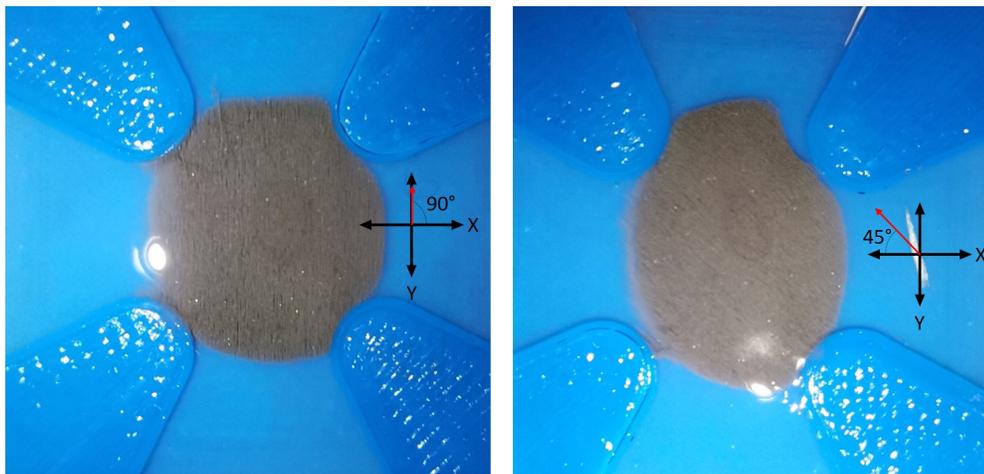


Figura 8.4: Aplicación de campo magnético durante curado de probetas.



(a) Anisotrópica a 90° .

(b) Anisotrópica a 45° .

Figura 8.5: Alineación de micropartículas.

8.2.2. Alineación de micropartículas a 90°

La Figura 8.6 (a) presenta las imágenes obtenidas mediante microscopía óptica, donde se puede apreciar la alineación a 90°, con respecto al eje X, de las micropartículas de carbonilo de hierro. En esta probeta se aplicaron 55 mT durante un tiempo de 30 minutos para lograr dicha orientación. La Figura 8.6 (b) muestra cómo las partículas alineadas a 90° se comportan como cadenas de partículas que componen la matriz.

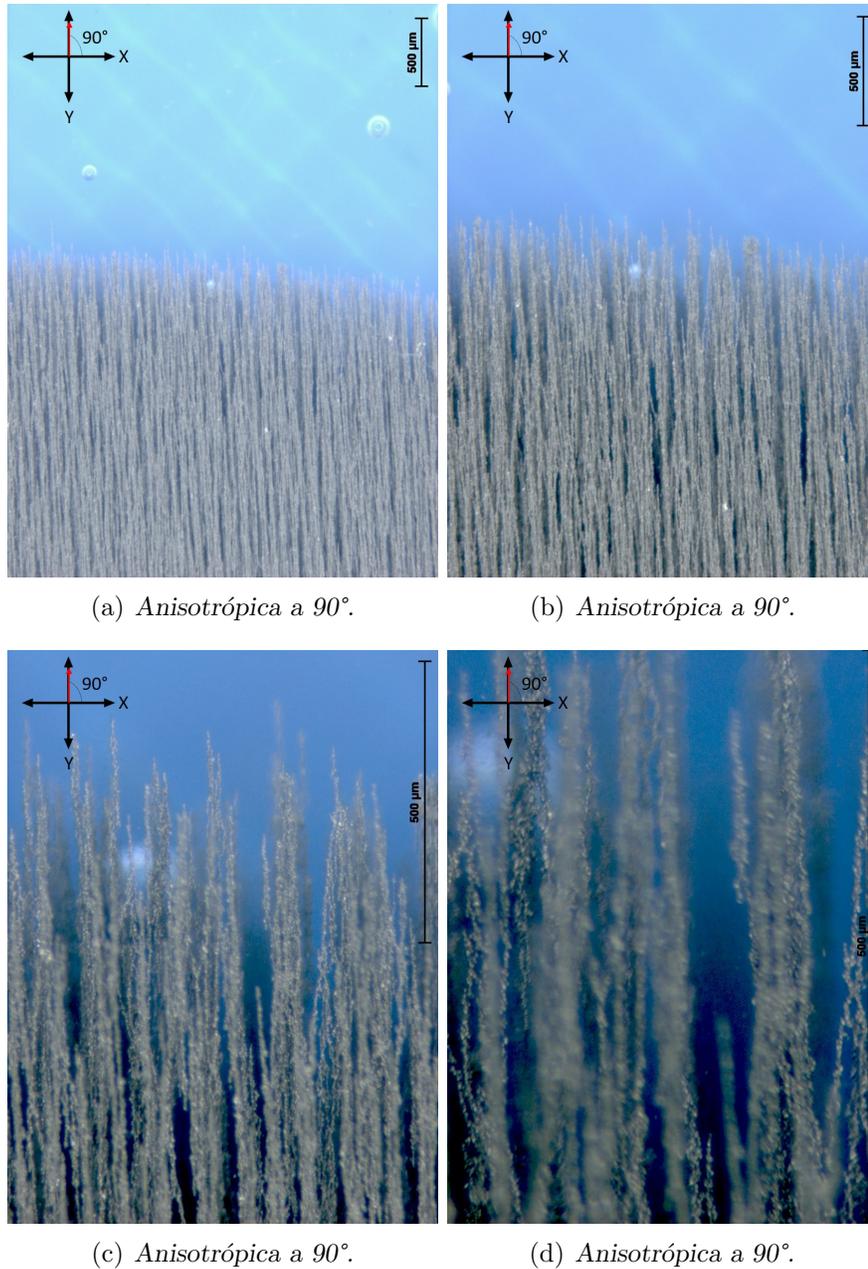


Figura 8.6: Alineación de micropartículas a 90°.

8.2.3. Alineación de micropartículas a 45°

La Figura 8.7 (a) presenta las imágenes obtenidas mediante microscopía óptica, donde se puede apreciar la alineación a 45°, con respecto al eje X, de las micropartículas de carbonilo de hierro. Se aplicaron 55 mT durante un tiempo de 30 minutos para lograr dicha orientación. La Figura 8.7 (b) muestra cómo las partículas alineadas a 45° se comportan como cadenas de partículas que componen la matriz. En la Figura 8.7 (d) se puede observar un conjunto sólido de partículas alineadas con las demás; este conjunto es posiblemente un defecto de fábrica debido a partículas unidas entre sí, lo que podría representar un problema para la probeta cuando se encuentre bajo análisis. Será un particular caso de estudio durante el procesamiento de datos de este espécimen y se determinará si esto es relevante o puede ser despreciado.

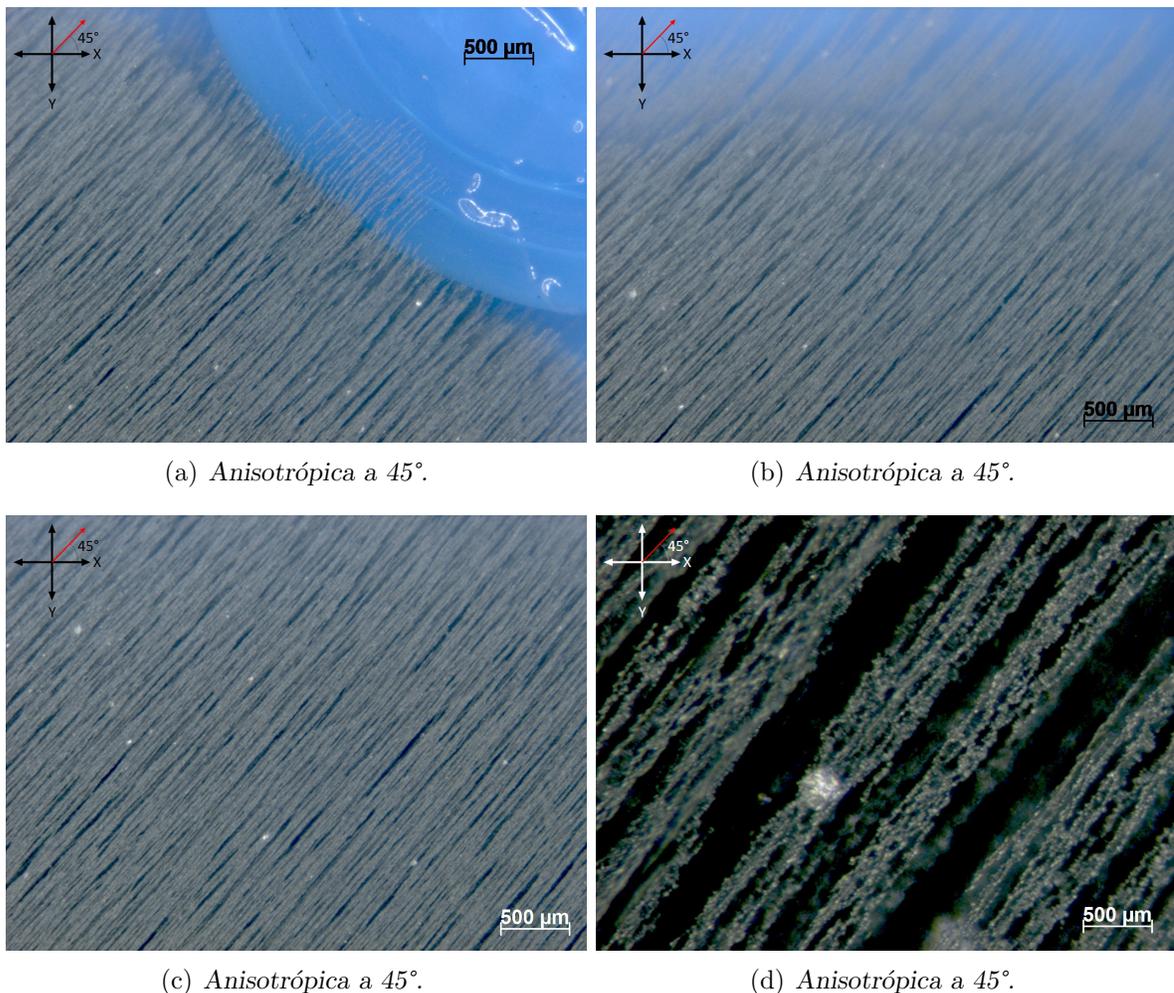


Figura 8.7: Alineación de micropartículas a 45°.

8.2.4. Conclusión

Es posible observar que el cuadrupolo electromagnético cumple con su función alineando las partículas en las probetas, obteniendo una excelente orientación tanto a 90° como a 45° , posibilitando la experimentación con distintas configuraciones de campo para futuros estudios, que pueden ser:

- Isotrópicas bajo un campo externo a 90° .
- Isotrópicas bajo un campo externo a 45° .
- Anisotrópicas a 90° sin campo externo.
- Anisotrópicas a 90° con campo externo a 90° .
- Anisotrópicas a 90° con campo externo a 45° .
- Anisotrópicas a 45° sin campo externo.
- Anisotrópicas a 45° con campo externo a 90° .
- Anisotrópicas a 45° con campo externo a 45° .

Todo este conjunto de experimentos podrá ayudar a una amplia caracterización de los elastómeros magnetorreológicos. Es importante destacar que estas pruebas pueden realizarse con un amplio rango en el campo magnético, yendo desde los 50 mT hasta un máximo de 120 mT.

Un punto importante a destacar cuando se utiliza el mínimo rango de campo (50 mT) es la temperatura emitida por los devanados, ya que la duración de la prueba en promedio es menos de 1 minuto. Durante el ensayo se aplican 2.5 A en cada devanado; en este tiempo, la corriente aplicada no es capaz de lograr una transferencia de calor significativa de los devanados hacia la probeta, ya que una vez finalizada la prueba, el dispositivo es desenergizado, dando tiempo suficiente para que se produzca una reducción de temperatura antes que inicie la siguiente prueba, por lo cual la temperatura no representa un factor a tomar en cuenta bajo estas circunstancias.

La Figura 8.8 muestra una probeta cruciforme montada en los actuadores del banco de ensayos mientras el dispositivo está aplicando un campo magnético sobre ella, demostrando que estos pueden trabajar en conjunto y no existe ningún problema de operación entre ambos.

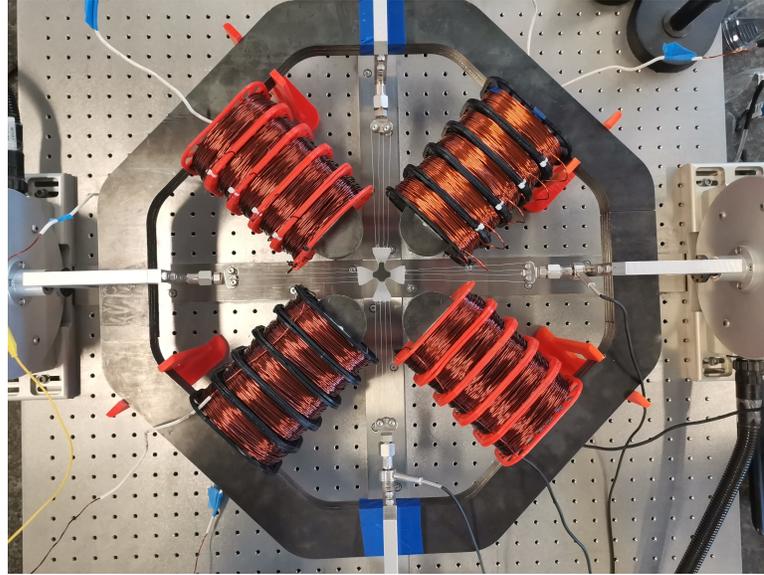


Figura 8.8: Probeta isotrópica cruciforme bajo un estado biaxial de esfuerzos y un campo magnético homogéneo con orientación de 90°.

Es importante destacar que el dispositivo puede adaptarse para realizar pruebas aplicando un campo magnético variable en el tiempo. También puede ser utilizado para pruebas de fatiga en las probetas, logrando así ampliar aún más el tipo de análisis en los que este puede ser empleado. En futuras pruebas se podrían explorar distintas configuraciones en las conexiones eléctricas dependiendo del tipo de análisis que se realice en la probeta. También se puede explorar la posibilidad de implementar un control que aplique automáticamente un cambio de orientación al campo mientras la probeta se está estudiando.

Bibliografía

- [1] Newell J., *Ciencia de materiales. Aplicaciones en Ingeniería*. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México, 2010.
- [2] A. Boczkowska S. A., “Microstructure and properties of magnetorheological elastomers,” *IntechOpens*, 2012.
- [3] Rajini V. and Nagarajan V., *Electrical Machine Design*. Pearson Education India, 2018.
- [4] Wiley J. and Sons L., *Iron-Dominated Magnets*. John Wiley and Sons, Ltd, 20 January 2011, ch. 7, pp. 269–291.
- [5] Reuge N., Schmidt F. M., Le Maout Y., Rachik M., and Abbé F., “Elastomer biaxial characterization using bubble inflation technique. i: Experimental investigations,” *Polymer Engineering & Science*, vol. 41, no. 3, pp. 522–531, 2001.
- [6] Aloui S. and Klueppel M., “Magneto-rheological response of elastomer composites with hybrid-magnetic fillers,” *Smart Materials and Structures*, vol. 24, 01 2015.
- [7] C. Bustos, C. García Herrera, D. C., “Numerical simulation and experimental validation of the inflation test of latex balloons,” *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 13, no. 14, pp. 2657–2678, 2016.
- [8] Vatandoost, H. Norouzi, M. A., “A novel phenomenological model for dynamic behavior of magnetorheological elastomers in tension-compression mode,” *Smart Materials and Structures*, vol. 26, no. 065011, 2017.
- [9] Palacios-Pineda L. M., Perales-Martínez I. A., Moreno-Guerra M. R., and Elías-Zúñiga A., “An optimum specimen geometry for equibiaxial experimental tests of reinfor-

- ced magnetorheological elastomers with iron micro- and nanoparticles,” *Nanomaterials*, vol. 7, no. 9, 2017.
- [10] Soria-Hernández C. G., Palacios-Pineda L. M., Elías-Zúñiga A., Perales-Martínez I. A., and Martínez-Romero O., “Investigation of the effect of carbonyl iron micro-particles on the mechanical and rheological properties of isotropic and anisotropic mres: Constitutive magneto-mechanical material model,” *Polymers*, vol. 11, no. 10, 2019.
- [11] Lee J. Y., Kumar V., and Lee D.-J., “Compressive properties of magnetorheological elastomer with different magnetic fields and types of filler,” *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 30, no. 4, pp. 1106–1115, 2019.
- [12] Samal S., Škodová M., Abate L., and Blanco I., “Magneto-rheological elastomer composites. a review,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 14, 2020.
- [13] Maria del carmen N., Guadalupe del carmen N, J. S. F., *Introducción a la reología*. Instituto Politécnico Nacional, 2001.
- [14] Feynman R. P., “The feynman lectures on physics,” *California Institute of Technology*, 1963.
- [15] Karapetoff V., “The magnetic circuit,” *Hardpress publishing*, 1911.