



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIRCUITOS
MAGNÉTICOS CON SOFTWARE DE ELEMENTOS
FINITOS**

Autor:

López Rubio, Alicia

Tutor:

Serrano Sanz, José Andrés
Departamento de Ingeniería
Eléctrica

Valladolid, julio 2023.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, José Andrés Serrano Sanz, por su inestimable orientación y valiosos aportes durante todo el proceso de desarrollo de este TFG.

Deseo hacer una mención especial a mis padres, cuyo amor incondicional, apoyo constante y sacrificio han sido pilares fundamentales en mi trayectoria académica.

Además, agradezco profundamente a mi compañero de vida que ha estado a mi lado, brindándome apoyo incondicional y motivación continua.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



RESUMEN

Este trabajo de fin de grado se centra en el estudio, análisis y diseño de circuitos magnéticos, mediante la simulación de su comportamiento utilizando el software libre de elementos finitos FEMM 4.2.

Se ha pretendido crear un documento que introduzca de manera clara cómo usar el programa FEMM (Finite Element Method Magnetics).

Para ello se ha efectuado la simulación de diferentes geometrías, en orden de dificultad creciente, con el propósito de verificar conceptos teóricos y analizar el comportamiento de los circuitos magnéticos frente a diferentes materiales y configuraciones de la geometría.

Con el objetivo de acercar nuestro TFG a la industria, para emplear materiales magnéticos usuales en fabricación, se estableció contacto con un total de 5 empresas. Solo una de ellas respondió a la solicitud de información.

PALABRAS CLAVE

Circuito magnético, FEEM 4.2, simulación, bobina, imán permanente.



ABSTRACT

This final degree project focuses on the study, analysis, and design of magnetic circuits through the simulation of their behavior using the free finite element software FEMM 4.2.

The intention was to create a document that provides a clear introduction on how to use the FEMM (Finite Element Method Magnetics) program.

In order to achieve this, simulations of different geometries were performed, ranging from easy to more complex, in order to verify theoretical concepts and analyze the behavior of magnetic circuits under different materials and geometry configurations.

With the aim of bringing our final degree project closer to the industry, to use regular magnetic materials in manufacturing. As part of the project, contact was established with a total of 5 companies, although only one of them responded to the request for information.

KEYWORDS

Magnetic circuit, FEMM 4.2, simulation, coil, permanent magnet



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	3
PALABRAS CLAVE	3
ABSTRACT	4
KEYWORDS	4
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	13
1.1. INTRODUCCIÓN	13
1.2. OBJETIVOS	14
1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO	14
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	17
2.1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA.....	17
2.2. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO.....	18
2.3. ECUACIONES DE MAXWELL.....	19
2.3.1. 1º ECUACIÓN: LEY DE GAUSS DEL CAMPO ELÉCTRICO	20
2.3.2. 2º ECUACIÓN: LEY DE GAUSS DEL CAMPO MAGNÉTICO	21
2.3.3. 3º ECUACIÓN: LEY DE FARADAY	21
2.3.4. 4º ECUACIÓN: LEY DE AMPÈRE-MAXWELL	22
2.4. FUERZA DE LORENTZ	23
2.5. MATERIALES MAGNÉTICOS	23
2.5.1. MATERIALES DIAMAGNÉTICOS	25
2.5.2. MATERIALES PARAMAGNÉTICOS.....	26
2.5.3. MATERIALES FERROMAGNÉTICOS.....	27
2.6. CURVA DE IMANACIÓN	28
2.7. HISTÉRESIS MAGNÉTICA.....	29
2.8. CIRCUITOS MAGNÉTICOS	31
2.8.1. CORRIENTE CONTINUA.....	33
2.8.2. CORRIENTE ALTERNA.....	33
2.9. PÉRDIDAS MAGNÉTICAS	34
2.9.1. PÉRDIDA POR HISTÉRESIS	34



2.9.2. PÉRDIDAS POR CORRIENTE DE FOUCAULT	34
2.10. CIRCUITOS CON IMANES PERMANENTES.....	36
2.11. CONDICIONES DE CONTORNO.....	38
CAPÍTULO 3: PRESENTACIÓN DEL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS (FEMM 4.2)	39
3.1. INTRODUCCIÓN.....	39
3.2. PREPROCESADOR MAGNÉTICO	40
3.2.1. BARRA HERRAMIENTAS: CONSTRUCCIÓN.....	41
3.2.2. BARRA HERRAMIENTAS: MANIPULACIÓN DE VISTAS	45
3.2.3. BARRA HERRAMIENTAS: MANIPULACIÓN CONSTRUCCIÓN.....	46
3.2.4. BARRA HERRAMIENTAS: MANIPULACIÓN DE LA RED	50
3.2.5. BARRA HERRAMIENTAS TAREAS DE ANÁLISIS.....	51
3.2.6. CONDICIONES DE CONTORNO.....	53
3.2.7. FORMACIÓN DE CONTORNO ABIERTO AUTOMÁTICO	59
3.2.8. BIBLIOTECA DE MATERIALES.....	61
3.2.9. ASIGNACIÓN DE MATERIALES	68
3.2.10. PROPIEDADES DE CIRCUITO	70
3.3. POSTPROCESADOR MAGNÉTICO	71
3.3.1. MODOS POSTPROCESADOR	72
3.3.2. HERRAMIENTAS GRÁFICAS.....	74
3.3.3. HERRAMIENTAS RESULTADOS	76
3.3.4. RESULTADOS DE CIRCUITO	81
CAPÍTULO 4: MATERIALES UTILIZADOS	83
4.1. AIRE	83
4.2. HIERRO PURO RECOCIDO A 800 °C.....	83
4.3. “US Steel Type 2-S 0.018 inch thickness”	86
4.4. IMÁN N38.....	89
4.5. 18 AWG	90
4.6. ACERO ALTAVOZ.....	91
4.7. IMÁN CERÁMICA 5	92
4.8. 30 AWG	92
CAPÍTULO 5: ESTUDIOS REALIZADOS	95



5.1. GEOMETRÍA 1: Circuito magnético nº 1	95
5.1.1. CONSTRUCCIÓN	95
5.1.2. RESULTADOS USANDO IMÁN.....	97
5.1.3 RESULTADOS USANDO BOBINA	104
5.2. GEOMETRÍA 2: Circuito magnético nº 2	112
5.2.1. CONSTRUCCIÓN	112
5.2.2 RESULTADOS	114
5.3. GEOMETRÍA 3: Motor con imanes	116
5.3.1. CONSTRUCCIÓN	116
5.3.2. RESULTADOS	117
5.4. GEOMETRÍA 4: Altavoz Woofer.....	120
5.4.1. CONSTRUCCIÓN	120
5.4.2. RESULTADOS	124
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	129
BIBLIOGRAFÍA	131

ÍNDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1 Ensayo de Oersted.....	17
Ilustración 2 Representación campo magnético.....	19
Ilustración 3 Relación entre cargas y campo.....	19
Ilustración 4 Densidad de flujo en material diamagnético	26
Ilustración 5 Densidad de flujo en material paramagnético	26
Ilustración 6 Densidad de flujo en material ferromagnético	27
Ilustración 7 Gráfica temperatura Curie	28
Ilustración 8 Curvas de magnetización de un material amagnético (I) y un material ferromagnético (II)	28
Ilustración 9 Ciclo de histéresis de un material ferromagnético	29
Ilustración 10 Ciclos de histéresis de materiales blandos y duros	31
Ilustración 11 Flujo de dispersión en circuito magnético	32
Ilustración 12 Entrehierro en núcleo de un circuito magnético	32
Ilustración 13 Corrientes de Foucault en material macizo y material laminado	35

Ilustración 14 Curva de desmagnetización en ciclo de histéresis de material ferromagnético duro	36
Ilustración 15 Punto de funcionamiento del circuito magnético.....	37
Ilustración 16 Botón para crear nuevo trabajo en FEMM.....	40
Ilustración 17 Ventana para caracterizar el problema en FEMM	41
Ilustración 18 Barra de herramientas para crear geometría en FEMM	42
Ilustración 19 Barra de herramientas para crear geometría en FEMM: Punto	42
Ilustración 20 Ventana para introducir coordenadas del punto en FEMM	42
Ilustración 21 Barra de herramientas para crear geometría en FEMM: Segmento.....	43
Ilustración 22 Barra de herramientas para crear geometría en FEMM: Arco	43
Ilustración 23 Ventana para caracterizar los arcos en FEMM.....	43
Ilustración 24 Ejemplo de arco en distintas direcciones en FEMM	44
Ilustración 25 Barra de herramientas para crear geometría en FEMM: Bloque.....	44
Ilustración 26 Barra de herramientas para crear geometría en FEMM: Grupo.....	44
Ilustración 27 Barra herramientas manipulación vistas en FEMM	45
Ilustración 28 Barra herramientas manipulación vistas en FEMM: Zoom	45
Ilustración 29 Barra herramientas manipulación vistas en FEMM: Escalar.....	45
Ilustración 30 Barra herramientas manipulación vistas en FEMM: Zoom personalizado	46
Ilustración 31 Barra herramientas manipulación vistas en FEMM: Mover vista	46
Ilustración 32 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM.....	46
Ilustración 33 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Deshacer	46
Ilustración 34 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: selección.....	47
Ilustración 35 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Rotar.....	47
Ilustración 36 Ventana caracterizar movimiento figura en FEMM	47
Ilustración 37 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Rotar con copia	48
Ilustración 38 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Escalar	48
Ilustración 39 Ventana para caracterizar en escalado de la construcción en FEMM	48
Ilustración 40 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Espejo	49
Ilustración 41 Ventana para caracterizar el espejo de la construcción en FEMM	49
Ilustración 42 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Redondeo esquinas	49
Ilustración 43 Ventana para indicar el radio de redondeo en FEMM.....	49
Ilustración 44 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Eliminar geometría.	50
Ilustración 45 Barra herramientas manipulación red en FEMM.....	50
Ilustración 46 Barra herramientas manipulación red en FEMM: Cuadrícula.....	50
Ilustración 47 Barra herramientas manipulación red en FEMM: posicionar	50
Ilustración 48 Barra herramientas manipulación red en FEMM: tamaño	51
Ilustración 49 Ventana para caracterizar tamaño red	51
Ilustración 50 Barra herramientas tareas de análisis en FEMM	51
Ilustración 51 Barra herramientas tareas de análisis en FEMM: Generador malla	51
Ilustración 52 Ventana con información de los nodos creados en FEMM.....	52
Ilustración 53 Botón para eliminar malla de memoria en FEMM.....	52

Ilustración 54 Barra herramientas tareas de análisis en FEMM: Observar malla	52
Ilustración 55 Ventana en pantalla mientras realiza los cálculos FEMM	53
Ilustración 56 Barra herramientas tareas de análisis en FEMM: Mostrar resultados	53
Ilustración 57 Ejemplo construcción arco circunferencia en FEMM (1)	54
Ilustración 58 Ejemplo construcción arco circunferencia en FEMM (2)	55
Ilustración 59 Ventana para caracterizar la frontera en FEMM.....	55
Ilustración 60 Ejemplo aplicación condición contorno tipo Anti-periodic en FEMM	58
Ilustración 61 Botón para caracterizar geometrías en FEMM	59
Ilustración 62 Ventana para indicar frontera en FEMM	59
Ilustración 63 Botón para formación de contorno abierto automático en FEMM	60
Ilustración 64 Ventana para configurar contorno abierto automático en FEMM	60
Ilustración 65 Ejemplo de contorno abierto automático en FEMM	61
Ilustración 66 Ventana para seleccionar o añadir material en FEMM.....	62
Ilustración 67 Ventana para ver o modificar las propiedades de los materiales en FEMM	62
Ilustración 68 Ventana para insertar curva B-H en FEMM.....	63
Ilustración 69 Ejemplo formato archivo .txt	64
Ilustración 70 Ventana Caracterizar archivo .txt en FEMM	65
Ilustración 71 Ejemplo gráfica de curva B-H en FEMM.....	65
Ilustración 72 Ejemplo gráfica de curva B-H con coordenadas logarítmicas en FEMM.....	65
Ilustración 73 Posición laminación tipo: 'Laminated in-plane' en FEMM	67
Ilustración 74 Posición laminación tipo: 'Laminated parallel to y or z' en FEMM'	67
Ilustración 75 Posición laminación tipo: 'Laminated parallel to x or r' en FEMM'	68
Ilustración 76 Botón "Modo bloque"	69
Ilustración 77 Ejemplo de etiqueta en geometría en FEMM	69
Ilustración 78 Botón para caracterizar geometrías en FEMM	69
Ilustración 79 Ventana para asociar etiqueta con sus propiedades en FEMM.....	69
Ilustración 80 Ejemplo dirección de magnetización del imán a 180º en FEMM.....	70
Ilustración 81 Ventana para administrar circuitos en FEMM	70
Ilustración 82 Ventana para caracterizar circuitos en FEMM	71
Ilustración 83 Ventana con información de la geometría en postprocesador de FEMM	72
Ilustración 84 Barra modos postprocesador en FEMM: Punto.....	72
Ilustración 85 Ventana con valores del punto seleccionado en FEMM	73
Ilustración 86 Barra modos postprocesador en FEMM: Contorno	73
Ilustración 87 Barra modos postprocesador en FEMM: Bloque	73
Ilustración 88 Barra Herramientas gráficos en FEMM: Contorno.....	74
Ilustración 89 Ventana para personalizar las líneas de flujo en FEMM	74
Ilustración 90 Barra Herramientas gráficos en FEMM: Densidad	75
Ilustración 91 Ventana para personalizar los flujos de densidad en FEMM	75
Ilustración 92 Barra Herramientas gráficos en FEMM: Vectores.....	75
Ilustración 93 Ventana para personalizar los vectoriales en FEMM	76
Ilustración 94 Botón para construir gráficos en FEMM	76

Ilustración 95 Ventana para configurar los gráficos en FEMM	76
Ilustración 96 Botón para cálculo de integrales en FEMM	77
Ilustración 97 Botón " modo contorno"	78
Ilustración 98 Botón "modo bloque"	78
Ilustración 99 Ejemplo de límites de integración para el cálculo de la fuerza ejercida en FEMM	80
Ilustración 100 Botón para mostrar los resultados del circuito en FEMM	81
Ilustración 101 Ventana para seleccionar circuito deseado con sus resultados en FEMM	81
Ilustración 102 Curva B-H de diferentes materiales	84
Ilustración 103 Propiedades material M940-50A	87
Ilustración 104 Bobina usada en altavoces Woofer con calibre 30 AWG	93
Ilustración 105 Geometría 1.....	96
Ilustración 106 Geometría 1 acotada.....	96
Ilustración 107 Resultado Geometría 1 con imán N38	97
Ilustración 108 Gráfica densidad de flujo en el entrehierro con imán y bloques macizos	98
Ilustración 109 Gráfica densidad de flujo en bloque 2 con imán y bloques macizos	98
Ilustración 110 Resultado geometría 1 con laminación en 'Laminated in plane'	99
Ilustración 111 Gráfica densidad de flujo en bloque 2 con imán y bloques "laminated in-plane"	100
Ilustración 112 Resultado geometría 1 con laminación en 'Laminated parallel to y or z'	100
Ilustración 113 Gráfica densidad de flujo en bloque 2 con imán y bloques "laminated parallel to Y or Z"	101
Ilustración 114 Resultado geometría 1 con laminación en 'Laminated parallel to x or r'	101
Ilustración 115 Gráfica densidad de flujo en bloque 2 con imán y bloques "laminated parallel to X or R"	102
Ilustración 116 Resultado geometría 1 con laminación en diferentes direcciones	103
Ilustración 117 Resultando geometría 1 con laminación en diferentes direcciones aumentando factor de relleno	103
Ilustración 118 Ejemplo representación bobina en geometría 1 en FEMM	104
Ilustración 119 Ejemplo dirección de corriente en bobina	105
Ilustración 120 Resultado geometría 1 con corriente continua.....	106
Ilustración 121 Gráfica de densidad a través del bloque 4 de la geometría 1 para curva de imanación no lineal	106
Ilustración 122 Resultado geometría 1 en corriente continua con curva de imanación lineal	107
Ilustración 123 Gráfica de densidad a través del bloque 4 de la geometría 1 para curva de imanación lineal	107
Ilustración 124 Variación de la permeabilidad con el ángulo de las líneas de inducción respecto al eje de laminado	108
Ilustración 125 Resultado geometría 1 con material anisótropo siendo mayor la permeabilidad en el eje X.....	108

Ilustración 126 Resultado geometría 1 con material anisótropo siendo mayor la permeabilidad en el eje Y	109
Ilustración 127 Resultado geometría 1 con corriente alterna y núcleo macizo	110
Ilustración 128 Resultado geometría 1 con corriente alterna y núcleo laminado.....	110
Ilustración 129 Geometría 2.....	112
Ilustración 130 Geometría 2 acotada.....	113
Ilustración 131 Ejemplo representación bobina en geometría 2.....	113
Ilustración 132 Resultado geometría 2	114
Ilustración 133 Resultado geometría 2 variando distancia de los entrehierros (1).....	115
Ilustración 134 Resultado geometría 2 variando distancia de los entrehierros (2).....	115
Ilustración 135 Resultado geometría 2 sin entrehierros.....	115
Ilustración 136 Geometría 3.....	116
Ilustración 137 Geometría 3 acotada.....	117
Ilustración 138 Resultado geometría 3 con imanes en dirección radial	118
Ilustración 139 Ventana para introducir dirección magnetizante	119
Ilustración 140 Resultado geometría 3 con imanes en dirección tangencial.....	120
Ilustración 141 Geometría 4.....	121
Ilustración 142 Geometría 4 acotada.....	121
Ilustración 143 Partes de un altavoz tipo Woofer	122
Ilustración 144 Sección de la geometría 4 construida en FEMM.....	123
Ilustración 145 Geometría 4 con condición de contorno tipo Transformación de Kelvin en FEMM	124
Ilustración 146 Resultado geometría 4	125
Ilustración 147 Resultado geometría 4 indicada la recta sobre la que se desarrolla la gráfica de flujo	127
Ilustración 148 Gráfica de flujo a través de la bobina de geometría 4	127

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1 Valores de B-H del hierro recocido a 800 °C	85
Tabla 2 Valores de pérdidas del hierro recocido a 800 °C	85
Tabla 3 Datos curva B-H material US Steel Type 2-S 0.018 inch thickness en FEMM.....	87
Tabla 4 Calibres AWG y diámetros correspondientes.....	91
Tabla 5 Propiedades de Imán cerámico de grado 5	92



ÍNDICE DE FÓRMULAS

Ecuación 1 Ley de Gauss campo eléctrico.....	20
Ecuación 2 Flujo eléctrico.....	20
Ecuación 3 Ley de Gauss campo magnético.....	21
Ecuación 4 Flujo magnético.....	21
Ecuación 5 Ley de Faraday	21
Ecuación 6 Fuerza inducida	22
Ecuación 7 Ley de Ampère-Maxwell	22
Ecuación 8 Fuerza de Lorentz.....	23
Ecuación 9 Campo magnético	24
Ecuación 10 Campo magnético en medio material	24
Ecuación 11 Campo magnético en medio homogéneo	24
Ecuación 12 Permeabilidad magnética	25
Ecuación 13 Circuito magnético	31
Ecuación 14 Fuerza magnetomotriz.....	31
Ecuación 15 Flujo con corriente continua.....	33
Ecuación 16 Ley de Ohm	33
Ecuación 17 Flujo con corriente alterna.....	33
Ecuación 18 Pérdidas por Histéresis	34
Ecuación 19 Pérdidas por Foucault	35
Ecuación 20 Relación de B_m y H_m	36
Ecuación 21 Valor del potencial A para problemas planos.....	56
Ecuación 22 Valor del potencial A para problemas axisimétricos	56
Ecuación 23 Condición contorno tipo Robin	56
Ecuación 24 Profundidad superficial para una frecuencia determinada	57
Ecuación 25 Condición contorno tipo Robin cuando frecuencia es cero.....	57
Ecuación 26 Condición de contorno mixta.....	57
Ecuación 27 Ángulo de histéresis.....	66
Ecuación 28 Porcentaje de anisotropía.....	89
Ecuación 29 Conversión a mm del calibre estadounidense.....	90
Ecuación 30 Reluctancia en circuitos magnéticos.....	116

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se ampliará la información relativa al uso del software de elementos finitos FEMM 4.2. Con el citado software se llevará a cabo un análisis magnético de cuatro geometrías específicas.

El estudio comienza con una breve recopilación de la teoría relacionada con el ámbito magnético.

La primera geometría (Circuito magnético nº 1) se simula utilizando tanto una bobina como un imán, excitándola en ambos casos con corriente continua y con corriente alterna. Se prestará atención a la importancia de la orientación correcta de las láminas.

En la segunda geometría (Circuito magnético nº 2) se analiza el efecto del entrehierro, mientras que en la tercera (Motor con imanes) se estudia la dirección de magnetización.

Por último, en la cuarta geometría (Altavoz Woofer), se simula el funcionamiento de un altavoz obteniendo valores característicos del mismo, como son la ganancia de corriente y la resistencia.

Los materiales y las diferentes configuraciones se han elegido con el criterio de analizar el correcto, o incorrecto en su caso, funcionamiento de las diferentes geometrías.

Con el fin de obtener información sobre los materiales utilizados en la construcción de circuitos magnéticos, así como particularmente conocer el material usado en el yugo de los altavoces “Woofer” (Geometría nº 4) se ha contactado con las siguientes empresas:

- **Beyma:** Empresa Española (Valencia) que desde 1969 diseña y produce una amplia gama de soluciones en el campo de los altavoces. Actualmente se ha extendido a nivel mundial.
- **Kipus:** Sociedad dedicada a la importación y distribución de altavoces fundada en A Coruña en 2002.

- **MADRIDHIFI:** Tienda en Madrid que se especializa en la venta de equipos de sonido profesional y otros productos relacionados. Además de la venta, ofrecen servicios de asesoramiento técnico, instalación y reparación.
- **Goldium Steel, SLU:** Se encuentra en Logroño, se dedica a la fabricación de chapa magnética, trabajando tanto con acero de grano orientado como de grano no orientado.
- **ARSAN:** Empresa de Navarra. Concretamente la línea de negocio ARSAN ELECTRIC, están especializados en la fabricación de componentes mecánicos de máquinas rotativas.

De todas ellas solo se obtuvo respuesta de MADRIDHIFI

1.2. OBJETIVOS

En el presente trabajo de fin de grado, se pretenden los siguientes objetivos:

1. Ampliar la información del software libre FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics) para el análisis de circuitos magnéticos.
2. Realizar simulaciones de diferentes geometrías de circuitos magnéticos.

1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El trabajo se estructura en 6 capítulos, acompañados por un apartado adicional al final que contiene la bibliografía empleada durante su elaboración.

- **Capítulo 1. Introducción y objetivos:** Se presenta el trabajo, así como los objetivos que se pretenden alcanzar con su realización.



- **Capítulo 2. Marco teórico:** Se aborda la teoría relacionada con los campos magnéticos, considerada necesaria para comprender la construcción y la obtención de resultados en el trabajo.
- **Capítulo 3. Presentación del programa de elementos finitos (FEMM 4.2):** Se detalla el funcionamiento del software que se va a utilizar, tanto la parte del preprocesador, donde se construye la geometría, como la parte del postprocesador donde se visualizan los resultados.
- **Capítulo 4. Materiales utilizados:** Se proporciona una descripción detallada de los diferentes materiales que se utilizan en las simulaciones que se llevarán a cabo en el programa FEMM 4.2.
- **Capítulo 5. Estudios realizados:** Se presentan los resultados obtenidos al construir diferentes geometrías en el software FEMM 4.2 y analizar su comportamiento. Este capítulo proporciona detalles sobre los diseños llevados a cabo, los resultados y las conclusiones derivadas de ellos.
- **Capítulo 6. Conclusiones:** Se exponen las conclusiones obtenidas del proyecto.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

El concepto de magnetismo se tiene desde hace más de 2000 años en la época de los griegos, ya que estos observaban como algunos minerales podían atraer o repeler objetos de hierro.[1]

Fue de los griegos de donde procede el nombre de “magnetismo” haciendo referencia a la provincia griega Magnesia, donde se encuentran numerosos yacimientos de magnetita (Fe_3O_4), mineral con numerosas propiedades magnéticas.[1]

A pesar de que se tenían conocimientos del fenómeno, hasta el siglo XIX no se desarrolló la dependencia de los campos eléctricos con los magnéticos.

Hasta el año 1820, se pensaba que el único magnetismo existente era el producido por los imanes procedentes de minerales.

Hans Christian Oersted, profesor de ciencias en la Universidad de Copenhague, quien preparó un experimento para sus estudiantes, que consistía en la demostración del calentamiento de un hilo mediante una corriente eléctrica. Se montó una brújula en una peana de madera.

Mientras llevaba a cabo su demostración eléctrica, Oersted observó que cada vez que conectaba la corriente eléctrica, la aguja se movía.[2]

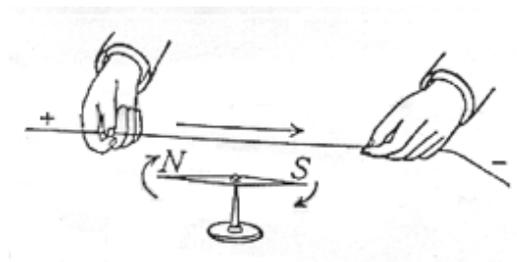


Ilustración 1 Ensayo de Oersted
(Fuente: [2])

Oersted silenció el descubrimiento y estuvo durante varios meses tratando de buscarle un sentido. Había demostrado la relación entre electricidad y magnetismo, pero no encontró ninguna explicación a sus hallazgos.

A partir del descubrimiento de Oersted, aparecieron varios físicos para darle un significado matemático al fenómeno:

André Marie Ampère: Físico Francés nacido el 20 de enero de 1775, quien descubrió matemáticamente la relación del campo magnético estático con la causa que lo produce: la corriente eléctrica.[3]

Michael Faraday: Científico británico nacido el 22 de septiembre de 1791, descubrió que, al hacer pasar una corriente por el devanado primario de un transformador eléctrico, la aguja de un galvanómetro conectado al devanado secundario se mueve, y vuelve a moverse en dirección opuesta al cortar el suministro de corriente.[4]

En 1821 trazó el campo magnético alrededor de un conductor por el que circulaba una corriente eléctrica.[4]

En 1831 introdujo el concepto de líneas de fuerza construyendo la primera dinamo que transforma el movimiento de un imán en una corriente eléctrica inducida en la bobina. [4]

Otro físico relevante en el ámbito del magnetismo fue el físico alemán Johann Carl Friedrich Gauss, nacido el 30 de abril de 1777. Quien en 1831 estableció una propiedad general del campo eléctrico, basándose en la ley de Coulomb, en la que señala que el flujo de campo eléctrico a través de una superficie cerrada es proporcional a la carga eléctrica encerrada por dichas superficies.[5]

Sin embargo, una de las aportaciones más importantes fue la del científico y matemático Jamen Clerk Maxwell, nacido el 13 de junio de 1831. Fue Maxwell el que partiendo de los descubrimientos de los científicos anteriores logró explicar el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos, explicando sus teorías en ecuaciones, resumidas en cuatro, que detallaremos más adelante.[6]

2.2. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

En todo espacio que nos rodea está presente un campo electromagnético. Este campo es imperceptible a simple vista para los seres humanos. Solo existen dos elementos que pueden percibir su existencia: las cargas y los imanes. Esto es debido a que es en el campo electromagnético donde tanto las cargas como los imanes interactúan entre sí.

Un imán está formado por dos polos magnéticos, Polo Norte (N) y Polo Sur (S). Una de las características que los define, es que nunca se encuentran por separado,

siempre que se tenga un Polo Norte habrá un Polo Sur, este hecho se transforma en que las líneas de campo son siempre cerradas, saliendo del Polo Norte y entrando en el Polo Sur, como se aprecia en la ilustración 2.[7]

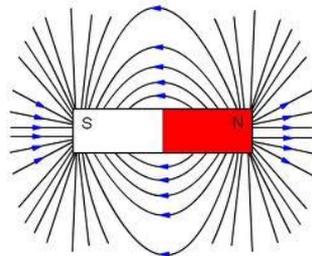


Ilustración 2 Representación campo magnético
(Fuente: [8])

La iteración de las cargas e imanes con el campo y viceversa quedan definidas por dos conceptos físicos: las ecuaciones de Maxwell y la fuerza de Lorentz. A continuación, se detallará cada una de ellas.



Ilustración 3 Relación entre cargas y campo
(Fuente: Elaboración propia)

2.3. ECUACIONES DE MAXWELL

Las ecuaciones de Maxwell recogen la forma sobre como las cargas e imanes perturban al campo, así como el campo se perturba a sí mismo, en definitiva, habla

de cómo es y la forma en la que el campo cambia, no habla del movimiento que ejercen las cargas e imanes.

Para realizar un estudio de las ecuaciones de Maxwell se debe dividir el campo electromagnético, en campo eléctrico y campo magnético.

El campo eléctrico también denominado Intensidad del campo eléctrico (\vec{E}), recoge la interacción entre dos cuerpos cargados eléctricamente, esta interacción puede ser de atracción o de repulsión, dependiendo si las cargas que poseen los cuerpos que interactúan son positivas o negativas. De tal forma que, si interactúan dos cargas de mismo signo se repelen, mientras que si las cargas son de distintos signos se atraen.[9]

El campo magnético es una perturbación en el espacio creada por cargas en movimiento y que sólo afecta a cargas que también estén en movimiento. La intensidad de campo magnético es el vector (\vec{H}). El vector (\vec{B}) es la densidad de flujo magnético, o bien, la inducción magnética. La unidad en el Sistema Internacional de \vec{B} es el el Tesla (T) y de \vec{H} es el (A/m).[10]

A continuación, se comentan brevemente las cuatro ecuaciones de Maxwell:

2.3.1. 1º ECUACIÓN: LEY DE GAUSS DEL CAMPO ELÉCTRICO

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Ecuación 1 Ley de Gauss campo eléctrico

La ley de Gauss relaciona la carga eléctrica con el campo eléctrico. Antes de definir la ecuación se va a explicar el concepto de flujo eléctrico, siendo este la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan una superficie definida.[11], [12]

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot dA$$

Ecuación 2 Flujo eléctrico

Esta primera ecuación de Gauss describe como las cargas afectan al campo eléctrico. Establece que la divergencia del campo eléctrico ($\vec{\nabla} \cdot \vec{E}$) es directamente proporcional a la densidad de la carga.

La divergencia será positiva si existen fuentes (cargas positivas) y negativa si hay presencia de sumideros (cargas negativas).

Por este motivo las cargas del mismo signo se repelen mientras que las de signo contrario se atraen.

Por otra parte, la ley de Gauss también define que el campo eléctrico decrece con la distancia en el orden $\left(\frac{1}{r^2}\right)$ [11], [12].

2.3.2. 2º ECUACIÓN: LEY DE GAUSS DEL CAMPO MAGNÉTICO

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Ecuación 3 Ley de Gauss campo magnético

Para comprender esta ley es preciso definir el concepto de flujo magnético que es la relación existente entre el número de líneas de campo magnético \vec{B} , que pasan a través de una superficie. [13]

$$\phi_m = \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

Ecuación 4 Flujo magnético

Al igual que con el flujo eléctrico, el flujo magnético total a través de una superficie definida sería proporcional a la carga magnética, pero hasta el presente no se sabe de la existencia de un monopolo magnético, tal como se ha explicado anteriormente en la definición de imán.

Concluyendo, la 2º ecuación indica que, en cualquier superficie, el flujo que entra es igual al flujo que sale.

2.3.3. 3º ECUACIÓN: LEY DE FARADAY

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Ecuación 5 Ley de Faraday

El descubrimiento de Faraday fue la capacidad que tienen los campos magnéticos de inducir una tensión al variar su valor con el tiempo, por el movimiento relativo de un imán, etc.

Esta fuerza electromotriz inducida se puede expresar como la variación del flujo a lo largo del tiempo. [7]

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

Ecuación 6 Fuerza inducida

Finalmente, la ley enuncia que, si un campo magnético varía en el tiempo, este genera un campo eléctrico. La orientación del campo eléctrico formado depende de si la variación del campo magnético es positiva o negativa. En el caso de que el cambio sea positivo, es decir, $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} > 0$, el campo eléctrico originado se orienta en sentido de las agujas del reloj.

Por el contrario, si el cambio es negativo, $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} < 0$, el campo eléctrico se orienta en sentido contrario al de las agujas del reloj. [11], [12]

2.3.4. 4º ECUACIÓN: LEY DE AMPÈRE-MAXWELL

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Ecuación 7 Ley de Ampère-Maxwell

Lo que viene a decir esta ecuación es que un campo eléctrico variando en el tiempo o cargas moviéndose activan el campo magnético.

Esta ecuación consta de dos partes:

La primera parte ($\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$) es obra del físico francés Ampère, donde J es la densidad de corriente eléctrica, por lo que la expresión demuestra que las fuentes primarias del campo magnético son las corrientes eléctricas demostrando la relación de los campos magnéticos con las corrientes eléctricas. [14]

La segunda parte de la ecuación la añadió el conocido matemático y científico Maxwell donde pone en manifiesto que un campo eléctrico variable produce un campo magnético. [14]

Es a este último científico a quien se debe el nombre de estas cuatro ecuaciones enunciadas, sin olvidar que el primer descubrimiento se lo debemos a Oersted.

2.4. FUERZA DE LORENTZ

La fuerza de Lorentz define la forma en la que el campo afecta a las cargas e imanes.

Su expresión en valor absoluto es la siguiente:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E})$$

Ecuación 8 Fuerza de Lorentz

Sirve para expresar la fuerza que el campo ejerce sobre las partículas cargadas en movimiento.

Solo se habla de esta fuerza cuando tenemos tanto el campo magnético como el campo eléctrico simultáneamente, es decir, si nos encontramos bajo un campo electromagnético. [13]

2.5. MATERIALES MAGNÉTICOS

Al concepto campo magnético viene asociado otro concepto muy reseñable en este ámbito, se trata de las líneas de inducción magnética. Son líneas que se cierran y permanecen tangentes a cada punto del vector de intensidad de campo magnético (\vec{B}). [7]

La expresión que define un campo magnético es la siguiente:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$$

Ecuación 9 Campo magnético

Donde el término \vec{H} representa la excitación magnética o intensidad de campo magnético, que expresa las causas que crean el campo magnético, sus unidades son (Amperios/metro).[15]

El término μ_0 recoge la permeabilidad magnética del vacío que es una constante de valor: [15]

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} (\text{Henrios/metro})$$

La expresión definida anteriormente tiene limitaciones dado que no siempre el medio en el que nos encontramos es el vacío, sino que podemos encontrarnos en un medio material, en ese caso se trabajaría con la siguiente expresión: [15]

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$$

Ecuación 10 Campo magnético en medio material

Donde el término \vec{M} representa la magnetización o imanación que se puede definir como la densidad de momentos dipolares magnéticos de un material, es decir cuando todos los momentos dipolares de un material se orientan hacia la misma dirección, se producirá la mayor imanación.[16]

Si el medio en el que nos encontramos es homogéneo, se puede simplificar a la siguiente expresión:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

Ecuación 11 Campo magnético en medio homogéneo

Donde μ es la permeabilidad magnética absoluta corresponde a la capacidad que poseen los materiales para atraer o ser atraído, así como permitir que los campos magnéticos los atraviesen. A diferencia de la excitación magnética del vacío esta no permanece constante sino dependiendo del medio donde se encuentre tendrá un valor u otro. [15]

Se puede relacionar con la permeabilidad magnética del vacío con la siguiente expresión: [15]

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = \mu_0 \cdot (1 + x_m)$$

Ecuación 12 Permeabilidad magnética

$\mu_r = 1 + x_m \equiv$ Permeabilidad magnética relativa, se utiliza para comparar entre sí diferentes materiales.

$x_m \equiv$ Susceptibilidad magnética, se le denomina a este término al grado de magnetización de un material bajo un campo magnético.

Dependiendo del valor que tomen los valores de μ, μ_r, x_m distinguimos tres grandes grupos de materiales magnéticos.

Antes de presentar los distintos tipos de materiales es preciso definir el concepto de momento magnético. Es aquel que recoge la intensidad de una fuente de campo magnético, así como la orientación de su dipolo magnético resultante. [15]

2.5.1. MATERIALES DIAMAGNÉTICOS

- $\mu < \mu_0$
- $\mu_r < 1$
- $x_m \sim$ orden de -10^{-5} (valor negativo)

Las moléculas que forman este material tienen todos sus electrones apareados y su último orbital está completo por lo que el momento magnético de los espines es nulo.

Cuando se aplica un campo magnético la alineación de los momentos magnéticos ocurre de forma débil y opuesta al campo aplicado. [17]

Si el campo externo es intenso, se produce una repulsión magnética.

Son materiales diamagnéticos el cobre, el mercurio y el agua.

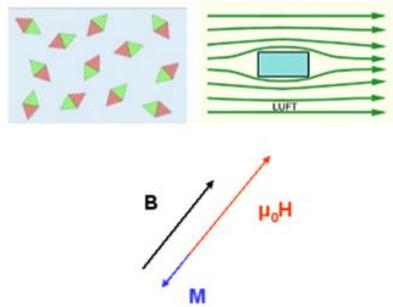


Ilustración 4 Densidad de flujo en material diamagnético
(Fuente: [18])

2.5.2. MATERIALES PARAMAGNÉTICOS

- $\mu > \mu_0$
- $\mu_r > 1$
- $x_m \sim \text{orden de } 10^{-3}$

Las moléculas que forman este material se distribuyen al azar y sus efectos magnéticos se anulan entre sí.

Cuando se aplica un campo magnético los momentos magnéticos se tienden a ordenar de forma paralela, orientándose los dipolos en la misma dirección y sentido que el campo aplicado. cuando se elimina el campo magnético esta ordenación desaparece.[17]

Es inversamente proporcional a la temperatura.

Son materiales diamagnéticos el aluminio, el titanio y el magnesio.

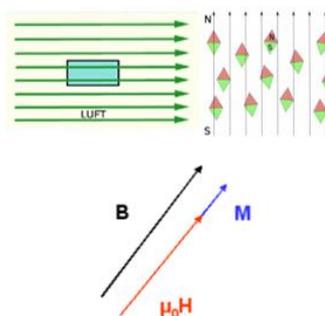


Ilustración 5 Densidad de flujo en material paramagnético
(Fuente: [18])

2.5.3. MATERIALES FERROMAGNÉTICOS

- $\mu \gg \mu_0$
- $\mu_r \gg 1$
- $x_m \sim \text{orden de entre } 10^3 \text{ y } 10^5$

Los átomos tienen efectos magnéticos alineados y forman un imán, que adquiere el nombre de dominio magnético. Sumándose este efecto en todos sus átomos, si no está bajo los efectos de un campo magnético, estos dominios se distribuyen al azar, permaneciendo neutro.

Al aplicar campo magnético externo, los dominios se alinean con el campo, originando un fuerte acoplamiento, en ocasiones el acoplamiento es tan fuerte que, aunque el campo magnético desaparezca la alineación continua, esto se denomina imán permanente. [17]

Son materiales ferromagnéticos el hierro, el cobalto y el níquel.

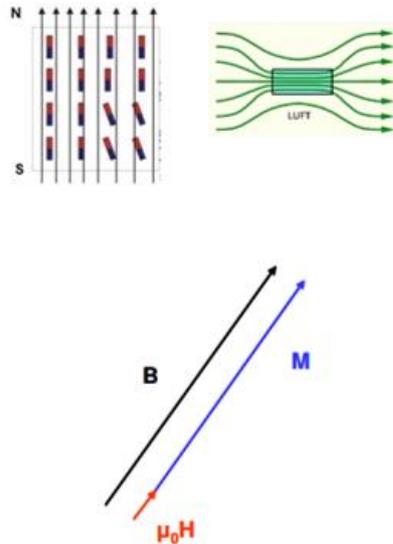


Ilustración 6 Densidad de flujo en material ferromagnético
(Fuente: [18])

Al igual que los materiales paramagnéticos también dependen de la temperatura, existiendo una temperatura máxima denominada, temperatura de Curie, por encima de esta temperatura el material pierde las propiedades de ferromagnetismo y pasa a denominarse paramagnético. [17]

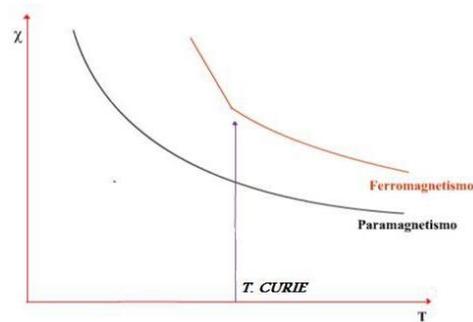


Ilustración 7 Gráfica temperatura Curie
(Fuente: [18])

2.6. CURVA DE IMANACIÓN

En este apartado se va a explicar en qué consiste la curva de imanación que sufre un material al someterle a un campo magnético.

La curva de imanación puede ser recta, si el material con el que estamos trabajando es amagnético, es decir, su permeabilidad magnética es constante.

Lo más común, en circuitos magnéticos es trabajar con materiales ferromagnéticos, por lo tanto, la curva de imanación tiene forma curva y está formada por diferentes tramos:[17]

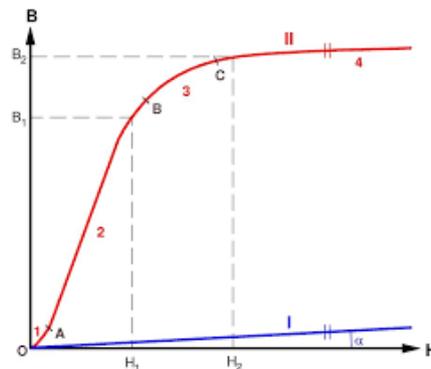


Ilustración 8 Curvas de magnetización de un material amagnético (I) y un material ferromagnético (II)
(Fuente:[17])

- ZONA PARABÓLICA (1): Zona entre el punto O y el punto A. esta zona se corresponde a los instantes iniciales de aplicar el campo magnético. Se experimenta un refuerzo del campo originado por la orientación favorable de

todos los dominios. El punto A limita la reversibilidad, es decir, en esta zona el movimiento de los dominios no es permanente.[17]

- ZONA LINEAL (2): Zona comprendida entre los puntos A y B. Los dominios siguen aumentando su tamaño, pero en esta ocasión el movimiento es irreversible, no volverán a su estado inicial. [17]
- ZONA CODO (3): Zona comprendida entre los puntos B y C. A parte del aumento de los dominios ya orientados, se producen movimientos bruscos e irreversibles de dominios con el fin de orientarse favorablemente al campo magnético en el que se encuentra sumergido. [17]
- ZONA SATURADA (4): Zona a partir del punto C. Este punto es característico y se denomina punto de saturación, donde el material ferromagnético ya ha alcanzado la máxima magnetización. Por lo tanto, este tramo tiene la misma pendiente que la curva de un material con permeabilidad magnética constante como se puede apreciar en la ilustración 8. [17]

2.7. HISTÉRESIS MAGNÉTICA

En el caso de que la corriente que crea el campo magnético varíe entre dos valores, es decir, sea variable con el tiempo, la excitación magnética (\vec{H}) va a variar entre su máximo positivo y su máximo negativo. Estos valores que va adquiriendo, dependiendo del valor de excitación suministrada se recogen en el ciclo de histéresis, cuya forma es la siguiente: [17]

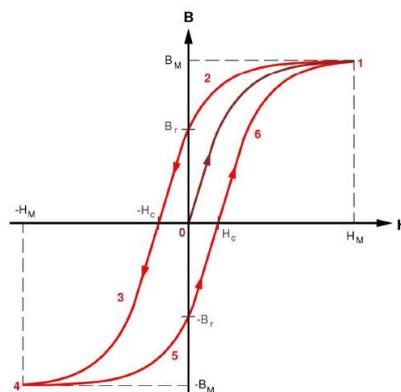


Ilustración 9 Ciclo de histéresis de un material ferromagnético
(Fuente:[17])

La curva de 0 a 1 se da cuando el material ferromagnético se somete por primera vez a la magnetización, siendo el punto 1 el valor máximo de magnetización que se puede alcanzar. [17]

Recordando la idea de la irreversibilidad de los dominios al alcanzar unos ciertos valores de magnetización que se expuso anteriormente, al disminuir la excitación la curva no sigue el mismo recorrido, sino que posee una inducción (B) mayor que en el caso inicial para esa misma excitación (H). Cuando el valor de la excitación se anula, es decir es igual a cero, la inducción no es nula, sino que tiene un valor que en la imagen anterior se ha denominado inducción remanente (B_r). Para conseguir que el valor de la inducción sea nulo, debemos excitar con un valor negativo denominado campo coercitivo (H_c). [17]

Al ir aumentando la excitación negativamente desde la (H_c), la curva corresponde al tramo 3, hasta llegar al punto 4 que es el correspondiente a la máxima excitación de signo negativo, simétrico al punto 1. [17]

Una vez llegado al punto máximo, se disminuye la excitación en sentido negativo, pero como los dominios no vuelven a su estado inicial, se origina otra nueva curva, la representada con el número 5. Al anularse la excitación existen dominios con inducción remanente (B_r) del mismo valor que en la curva 2 pero de signo negativo. Ocurriendo lo mismo, existe la necesidad de aplicar el campo coercitivo (H_c) para anular dicha inducción. [17]

Por último, al volver a aumentar el valor de la excitación, los dominios tienden a conservar su orientación negativa por lo que se alcanza el punto 1 con menores valores de inducción para la misma excitación correspondiente a la curva 6. [17]

Una vez en el punto 1, el material repite el proceso de las cuatro curvas respectivamente. [17]

Dependiendo del tipo de curva de histéresis podemos clasificar los materiales ferromagnéticos en duros y en blandos. [17]

Los materiales ferromagnéticos duros poseen un elevado B_r y H_c , son utilizados para la obtención de imanes permanentes. [17]

Los materiales ferromagnéticos blandos tienen mayor permeabilidad, y el área del ciclo de histéresis es menor, siendo esto una gran ventaja para su uso en circuitos magnéticos. [17]

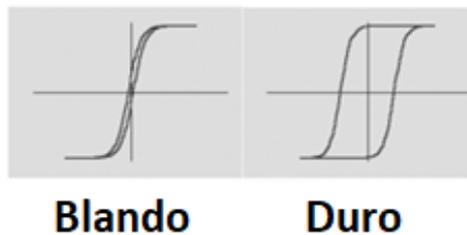


Ilustración 10 Ciclos de histéresis de materiales blandos y duros
(Fuente: [19])

2.8. CIRCUITOS MAGNÉTICOS

Un circuito magnético está formado por una estructura metálica, en la cual se puede bobinar un conductor por donde circule corriente que origine el flujo magnético o bien se puede colocar un imán.[17]

La estructura metálica suele ser de material ferromagnético dado que estos materiales tienen un valor elevado de permeabilidad, lo que facilita la canalización del flujo magnético a través de ellos.[17]

En este apartado nos centraremos en los circuitos magnéticos formados por bobinas.

En los circuitos magnéticos se cumple la siguiente fórmula:

$$\mathcal{F} = \mathfrak{R} \cdot \Phi$$

Ecuación 13 Circuito magnético

Donde \mathfrak{R} representa la reluctancia del circuito magnético.

Donde \mathcal{F} corresponde a la fuerza magnetomotriz (f.m.m) y esta fuerza se puede calcular a partir del número de espiras de la bobina y de la corriente que pase a través de la misma.[17]

$$\mathcal{F} = N \cdot i$$

Ecuación 14 Fuerza magnetomotriz

El flujo que origina la bobina recorre todo el circuito magnético, en el caso de que el flujo se encuentre disponible en su paso varios caminos para recorrer el circuito se dividirán entre ellos, teniendo preferencias aquellas zonas donde la reluctancia sea menor, pero siempre formando circuitos cerrados.[17]

A pesar de las favorables características de los materiales ferromagnéticos, es inevitable que una pequeña cantidad de flujo producido en la bobina se pierda hacia el exterior. Este flujo “perdido” se le denomina flujo de dispersión (Φ_d).[17]

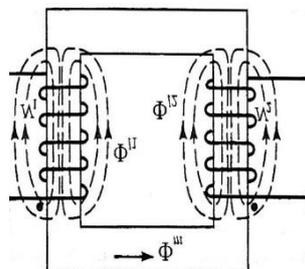


Ilustración 11 Flujo de dispersión en circuito magnético
(Fuente: [19])

Existe otro término muy reseñable en los circuitos magnéticos, y es conocido como entrehierro. Se define así a una pequeña parte que se quita de material ferromagnético, a pesar de la rotura de dicho material, como suele tener una anchura muy pequeña las líneas de flujo atraviesan este entrehierro con el fin de conseguir el recorrido cerrado.[17]

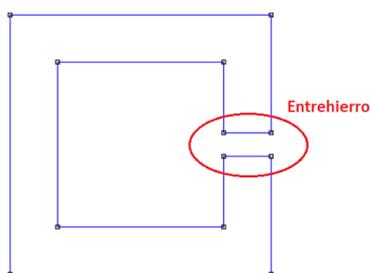


Ilustración 12 Entrehierro en núcleo de un circuito magnético
(Fuente: Elaboración propia)

El entrehierro en un circuito magnético posee la mayor parte de la reluctancia del circuito.

El entrehierro suele estar presente en máquinas eléctricas y se encuentra entre el estator y el rotor.

Las formas más usuales de alimentar la bobina que rodea el material ferromagnético son con corriente continua o con corriente alterna.

2.8.1. CORRIENTE CONTINUA

Cuando la bobina se alimenta con corriente continua, el flujo que circulará por el circuito magnético dependerá de la resistencia de la bobina y de las propiedades del núcleo.[17]

$$\Phi = \frac{N \cdot I}{\mathcal{R}}$$

Ecuación 15 Flujo con corriente continua

Sin embargo, la corriente de la bobina al ser constante es independiente de las propiedades del núcleo de material ferromagnético. [17]

$$I = \frac{V}{R}$$

Ecuación 16 Ley de Ohm

2.8.2. CORRIENTE ALTERNA

Cuando la bobina se alimenta con corriente alterna, el flujo que circulará por el circuito magnético dependerá de la tensión y de la frecuencia siendo independiente de las propiedades del núcleo (no influye apenas la reluctancia). [17]

$$\Phi(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V \cdot \text{sen}(w \cdot t)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot N}$$

Ecuación 17 Flujo con corriente alterna

Sin embargo, la corriente de la bobina depende de las propiedades del núcleo de material ferromagnético.

2.9. PÉRDIDAS MAGNÉTICAS

Las pérdidas magnéticas son la cantidad de energía que se suministra a la bobina y que no se aprovecha dado que se disipa en forma de calor.

Las pérdidas magnéticas solo tienen lugar cuando se alimenta a la bobina con una corriente variable en el tiempo.

Estas pérdidas son debidas a los siguientes fenómenos:

2.9.1. PÉRDIDA POR HISTÉRESIS

Originadas por los cambios de orientación de los dominios producidos por la excitación variable de los materiales ferromagnéticos.

El valor de las pérdidas por histéresis es proporcional al área que encierra el ciclo de histéresis visto anteriormente. Este es uno de los motivos por el cual para circuitos magnéticos es aconsejable trabajar con materiales ferromagnéticos blandos, dado que estos tienen un área menor. [17]

La expresión que recoge las pérdidas por histéresis es la siguiente:

$$P_h = V \cdot \text{Área del ciclo de histéresis} \cdot f$$

Ecuación 18 Pérdidas por Histéresis

Donde V es el volumen del material ferromagnético

f es la frecuencia, es decir la inversa del periodo con el que varía la excitación magnética.

2.9.2. PÉRDIDAS POR CORRIENTE DE FOUCAULT

Las corrientes de Foucault son unas corrientes que se originan en el material cuando a este le atraviesa un flujo variable, es decir, cuando la corriente que circula por las bobinas es alterna.

Estas corrientes son perjudiciales dado que originan calor en el núcleo produciendo pérdidas de potencia por efecto Joule ($P = R \cdot I^2$) [17]

Con el objetivo de reducir estas pérdidas cambiamos los núcleos de material ferromagnético macizos por una serie de chapas delgadas agrupadas entre sí siendo su orientación tal que su plano permanezca paralelo al campo magnético para favorecer la circulación del flujo.

La introducción de las chapas hace que el valor de la resistencia se incremente, originando así una disminución en el valor de las corrientes. [17]

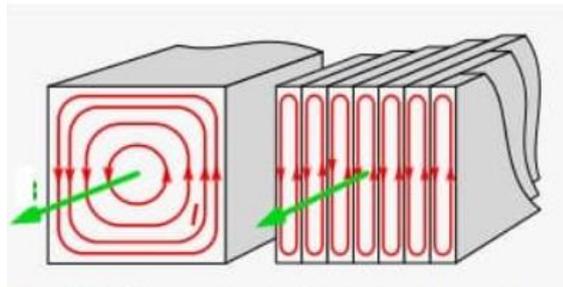


Ilustración 13 Corrientes de Foucault en material macizo y material laminado
(Fuente: [20])

La expresión que recoge las pérdidas por Foucault es la siguiente:

$$P_F = V \cdot k_F \cdot a^2 \cdot \sigma \cdot B_M^2 \cdot f^2$$

Ecuación 19 Pérdidas por Foucault

Donde:

"V" es el volumen del material ferromagnético

" k_F " es el coeficiente de frecuencia

"a" corresponde al espesor de las chapas del material ferromagnético

" σ " es el valor de conductividad eléctrica del material ferromagnético

" B_M " es el valor máximo de la inductancia magnética

"f" es la frecuencia con la que varía el valor de la inducción (B).

2.10. CIRCUITOS CON IMANES PERMANENTES

Cuando se construyen circuitos con imanes permanentes se utilizan materiales ferromagnéticos duros como se ha comentado anteriormente. Esto es debido a que este tipo de materiales tiene un mayor valor de inducción remanente (B_r) que físicamente quiere decir lo siguiente: cuando el valor de campo magnético externo (H) es nulo, el material sigue magnetizado. [17]

La existencia de entrehierro nos origina una excitación (H) de valor negativo por lo tanto nos encontramos en el segundo cuadrante del ciclo de histéresis explicado en un apartado anterior. Este tramo de la curva perteneciente al segundo cuadrante se denomina curva de desmagnetización. [17]

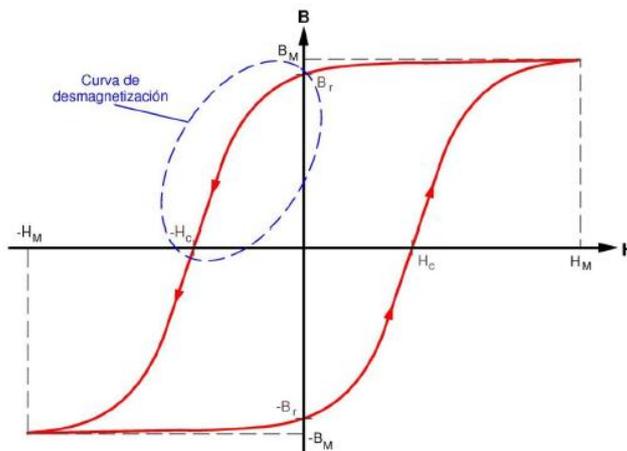


Ilustración 14 Curva de desmagnetización en ciclo de histéresis de material ferromagnético duro (Fuente: [17])

Los términos de B_M y H_M están relacionados linealmente con valores característicos del circuito magnético utilizado a través de la siguiente expresión:

$$B_m = - \left(v_m \cdot \frac{l_m}{S_m} \cdot \frac{1}{\mathcal{R}} \right) \cdot H_m$$

Ecuación 20 Relación de B_m y H_m

Donde:

" v_m " corresponde al coeficiente de Hopkinson, que representa la cantidad de flujo que se dispersa en el imán.

" l_m " es la longitud que tiene el imán utilizado.

" S_m " es la sección del imán.

" \mathcal{R} " corresponde a la reluctancia del entrehierro.

En el punto de funcionamiento también influye las características propias del imán, que obligan a que este se encuentre sobre la curva de desmagnetización.

Por lo tanto, donde se corte la curva de desmagnetización con la recta que relaciona linealmente los valores de H_m y B_m , se encontrará el punto de funcionamiento (M).

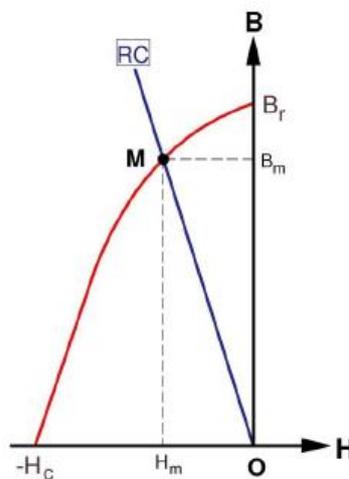


Ilustración 15 Punto de funcionamiento del circuito magnético
(Fuente: [17])

Teóricamente, un circuito magnético funcionando con un imán no debería de tener pérdidas dado que no existe variación del campo a lo largo del tiempo, pero esta afirmación es exclusivamente teórica, pues en la realidad los imanes van a estar influenciados con pequeñas oscilaciones en su campo magnético producidas por diversas causas. [17]

Estas pequeñas variaciones del campo originan de forma muy débil las ya conocidas corrientes de Foucault.

Las acciones para reducir estas corrientes perjudiciales son: reducir el tamaño de los imanes utilizados, usar imanes con una elevada resistividad, etc.

2.11. CONDICIONES DE CONTORNO

Antes de iniciar cualquier cálculo, debemos fijar un límite con el entorno para garantizar una solución. En los programas de elementos finitos que se utilizan habitualmente, se puede elegir una de las siguientes condiciones de contorno: [21]

- **DIRICHLET:** En este tipo de condición de frontera, el valor del vector potencial magnético (\vec{A}) se define en la propia frontera. Se da un valor constante al vector potencial magnético que en la mayoría de las veces es el cero.
- **NEUMANN:** En este caso se da un valor a la derivada normal del potencial a lo largo de la frontera.

En problemas magnéticos, la condición de frontera homogénea de Neuman es la siguiente:

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$$

Se define a lo largo de la frontera para obligar al flujo a pasar la frontera exactamente en un ángulo de 90 ° con respecto a esta.

- **ROBIN:** Este tipo es una mezcla entre el tipo Dirichlet y el tipo Neumann, establece una relación entre el valor del potencial A y su derivada normal en la frontera, es decir:

$$\frac{\partial A}{\partial n} + c \cdot A = 0$$

- **“PERIODIC”:** Una condición de frontera periódica une dos fronteras. Los valores límite en los puntos correspondientes de los dos límites se igualan entre sí.
- **“ANTIPERIODIC”:** También une dos fronteras. Los valores límites serán de igual magnitud, pero de signo opuesto.

CAPÍTULO 3: PRESENTACIÓN DEL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS (FEMM 4.2)

3.1. INTRODUCCIÓN

Para obtener los mejores resultados, es importante fabricar varios modelos y analizar en detalle cómo se comportan. A partir de ese estudio, se pueden hacer ajustes y mejorar los resultados. Sin embargo, esta práctica puede ser difícil de llevar a cabo debido a los altos costos asociados.

En la actualidad los diseñadores industriales cuentan con una herramienta fundamental para realizar su trabajo: los simuladores de elementos finitos. Estos “softwares” desempeñan un papel fundamental al permitir dividir las geometrías en partes muy pequeñas a través de un proceso de mallado, lo que a su vez facilita la subdivisión del problema en numerosos subproblemas más sencillos y de bajo coste computacional.

Los simuladores de elementos finitos son herramientas esenciales en el ámbito del diseño industrial, ya que brindan a los diseñadores la capacidad de analizar el comportamiento estructural y funcional de los productos antes de su fabricación. Estos programas permiten simular y evaluar el rendimiento de un producto en diversas condiciones de carga, temperatura, corriente, entre otros factores, lo que proporciona información valiosa para realizar ajustes y optimizaciones en el diseño.

Además, los simuladores de elementos finitos permiten reducir significativamente los costos asociados con la fabricación y pruebas físicas de múltiples prototipos, al brindar la posibilidad de realizar simulaciones virtuales en un entorno digital. Esto implica un ahorro de tiempo y recursos.

Dentro del amplio abanico de simuladores de elementos finitos disponibles, el usado en este trabajo es el software FEMM (Finite Element Method Magnetics) en su versión 4.2, el cual se caracteriza por ser una herramienta de código abierto y de libre acceso.

FEMM ofrece a los diseñadores una solución eficiente y económica para la simulación de problemas magnéticos y electromagnéticos. Su interfaz gráfica y su naturaleza de código abierto hacen de FEMM una herramienta versátil y accesible, que proporciona los recursos necesarios con el fin de realizar análisis detallados y obtener información valiosa para la optimización de diseños y la toma de decisiones.

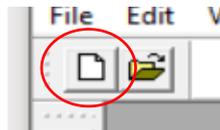
A continuación, detallaremos su funcionamiento:

3.2. PREPROCESADOR MAGNÉTICO

Cuando se habla de preprocesador se refiere a la etapa de preparación de datos y la configuración del modelo antes de la simulación. Las fases que engloba el preprocesador son: generación de geometría, creación de la malla, definición de las propiedades del material, aplicación de las condiciones de contorno y especificación de la simulación.

Una vez iniciado el programa tenemos dos opciones: crear un nuevo problema o abrir un problema ya existente.

Para la creación de un nuevo trabajo, se pulsa en el botón que se indica en la ilustración 16.



*Ilustración 16 Botón para crear nuevo trabajo en FEMM
(Fuente: [22])*

Lo siguiente, es indicar el tipo de problema que se quiere resolver, nos muestra las siguientes opciones:[22]

- “Magnetics Problem”
- “Electrostatics Problem”
- “Heat Flow Problem”
- “Current Flow Problem”

Para el diseño y estudio de circuitos magnéticos, que es el propósito de este trabajo, se selecciona la opción “Magnetics Problem”.

Una vez especificado el tipo de problema, el programa nos abre el entorno de dibujo, donde se procede a dibujar la geometría.

En primer lugar, se acude a la pestaña “Problem” y se añade las características del problema:

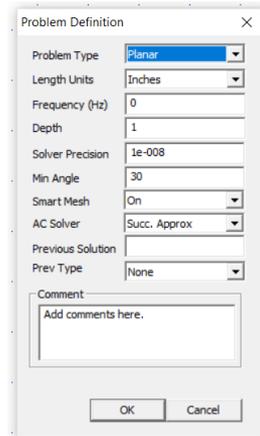


Ilustración 17 Ventana para caracterizar el problema en FEMM
(Fuente: [22])

- “Problem Type”: Da la opción de elegir entre un problema planar (2D) o uno axisimétrico.[21]
- “Length Units”: Se especifica las unidades en las que se va a trabajar. [21]
- “Frequency (Hz)”: En este desplegable, se indica a la frecuencia que se trabaja. [21]
Si se quiere trabajar con corriente continua, la frecuencia será igual a cero; sin embargo, si se desea trabajar en corriente alterna, se debe especificar una frecuencia. [21]
- “Depth”: Si se trabaja con un problema en 2D, en esta casilla se especifica la profundidad de la geometría, es decir la distancia que sobresale la geometría perpendicularmente a la pantalla del ordenador. [21]
- “Solver Precision”: Especifica el número máximo permitido de iteraciones. [21]
- “Min Angle”: Esta entrada indica una restricción a la hora de realizar el mallado de triángulos; el ángulo que se indica es el ángulo mínimo, para asegurar que no se produzcan ángulos menores al indicado, y así poder garantizar que no se produzca un bucle sin salida. [21]

Una vez caracterizado el problema, se procede a dibujar la geometría.

3.2.1. BARRA HERRAMIENTAS: CONSTRUCCIÓN

El preprocesador tiene cinco modos de dibujo, estando siempre uno de estos modos activados, por lo tanto, las operaciones de edición solo se llevarán a cabo sobre el tipo de entidad seleccionado.



Ilustración 18 Barra de herramientas para crear geometría en FEMM
(Fuente: [22])

➤ PUNTO

Para añadir los puntos tenemos varias opciones:

- Tener seleccionada la casilla del punto en la barra de herramientas del programa que se muestra en la ilustración 19 y posteriormente con el ratón posicionar el puntero en el lugar donde se quiera añadir el nodo y hacer clic con el botón izquierdo.



Ilustración 19 Barra de herramientas para crear geometría en FEMM: Punto
(Fuente: [22])

- Teniendo seleccionada la casilla anterior, se pulsa en la tecla tabulador del teclado y en la pantalla nos aparecerá una pestaña para indicar la coordenada “x” y la coordenada “y” donde queremos que se ubique nuestro punto. Esta opción es la más utilizada ya que posiciona los puntos en posiciones concretas y precisas.

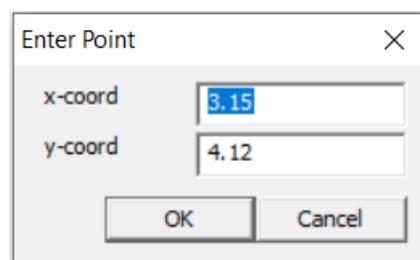


Ilustración 20 Ventana para introducir coordenadas del punto en FEMM
(Fuente: [22])

➤ MODO SEGMENTO

Usado para la unión de los puntos en línea recta.

Para ello se selecciona la casilla en la que aparecen dos puntos unidos por una recta:



Ilustración 21 Barra de herramientas para crear geometría en FEMM: Segmento
(Fuente: [22])

Se selecciona un nodo haciendo clic con el botón izquierdo del ratón sobre él, observando que cambia su color al rojo, y a continuación se repite el mismo procedimiento con el nodo al que queremos unir el primero.

➤ MODO SEGMENTO DE ARCO



Ilustración 22 Barra de herramientas para crear geometría en FEMM: Arco
(Fuente: [22])

Nos permite la unión de dos puntos por mediación de un arco de circunferencia, en donde se especifica el ángulo que se desea para el arco, así como el número de arcos que pueden formar la unión.

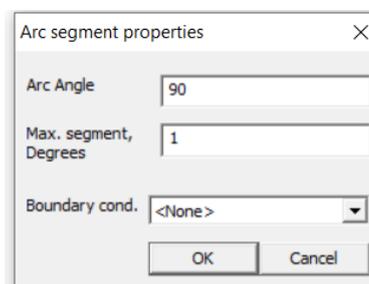


Ilustración 23 Ventana para caracterizar los arcos en FEMM
(Fuente: [22])

Esta unión se puede realizar dejando el centro de la circunferencia originaria del arco o de los arcos hacia la izquierda o hacia la derecha de la línea recta imaginaria que uno los dos puntos.

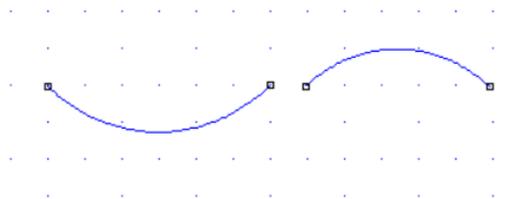


Ilustración 24 Ejemplo de arco en distintas direcciones en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

El sentido de la orientación depende del punto que se seleccione primero, posteriormente se pondrá un ejemplo.

➤ MODO BLOQUE



Ilustración 25 Barra de herramientas para crear geometría en FEMM: Bloque
(Fuente: [22])

Nos permite añadir una etiqueta a cada geometría cerrada. Estas etiquetas pueden ser caracterizadas posteriormente con las propiedades específicas de cada geometría, tales como el material. De esta manera, podemos asociar de manera eficiente las características correspondientes a cada forma geométrica, lo que facilita el análisis y el procesamiento de los datos.

Un error muy común que puede ocasionar problemas a la hora de ejecutar la simulación es la falta de unión de todos los puntos correctamente, quedando contornos sin cerrar.

➤ MODO GRUPO



Ilustración 26 Barra de herramientas para crear geometría en FEMM: Grupo
(Fuente: [22])

Este comando permite seleccionar toda la construcción conjunta, es decir, selecciona a la vez tanto los puntos como los segmentos, del grupo creado previamente.

3.2.2. BARRA HERRAMIENTAS: MANIPULACIÓN DE VISTAS



Ilustración 27 Barra herramientas manipulación vistas en FEMM
(Fuente: [22])

En esta barra se puede modificar la vista de nuestro problema.

- Acercar y alejar la vista se realiza respectivamente con los siguientes comandos:



Ilustración 28 Barra herramientas manipulación vistas en FEMM: Zoom
(Fuente: [22])

- Escalar la pantalla de forma que aparezca por pantalla toda la geometría construida.



Ilustración 29 Barra herramientas manipulación vistas en FEMM: Escalar
(Fuente: [22])

- Zoom personalizado, se especifica la parte de la geometría que queremos aplicarle el zoom. Para ello se selecciona el botón especificado en la ilustración 30 y se mueve el puntero hacia una de las esquinas del rectángulo donde se quiere centrar la nueva vista y sin dejar de presionar el botón izquierdo del ratón se dirige a la esquina diagonal opuesta.



Ilustración 30 Barra herramientas manipulación vistas en FEMM: Zoom personalizado
(Fuente: [22])

- Las flechas sirven para mover la vista en la dirección de la flecha aproximadamente un medio del ancho actual de la pantalla.



Ilustración 31 Barra herramientas manipulación vistas en FEMM: Mover vista
(Fuente: [22])

3.2.3. BARRA HERRAMIENTAS: MANIPULACIÓN CONSTRUCCIÓN



Ilustración 32 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM
(Fuente: [22])

- Deshacer el último movimiento realizado. El inconveniente es que únicamente se puede deshacer el último movimiento, sin opción de deshacer los movimientos anteriores.



Ilustración 33 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Deshacer
(Fuente: [22])

- Seleccionar los elementos de construcción que queden dentro del área elegida (rectángulo o círculo) construida.

Cabe destacar que únicamente se seleccionarán aquellos elementos que estén activados. Es decir, si en la barra de herramientas de construcción está activado el punto, solo se seleccionarán los puntos del área construida, ocurriendo lo mismo para los segmentos. Si se

quiere elegir completamente todos los elementos debemos de tener seleccionado el botón de “Modo Grupo”.



Ilustración 34 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: selección
(Fuente: [22])

- La siguiente pestaña nos permite rotar una construcción o un elemento de esta. Para ello basta con seleccionar la parte que se quiera mover, y a continuación seleccionar el siguiente botón:



Ilustración 35 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Rotar
(Fuente: [22])

Una vez presionado este botón se abrirá la siguiente pestaña:

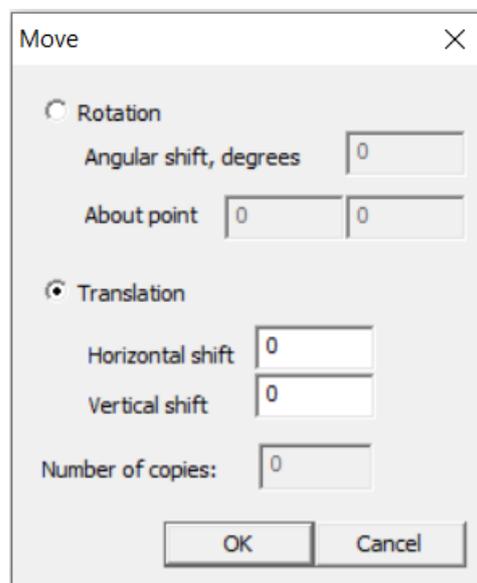


Ilustración 36 Ventana caracterizar movimiento figura en FEMM
(Fuente: [22])

Donde se seleccionará si se desea rotar o trasladar la geometría. Para rotar basta con indicar el ángulo que se desea rotar y el punto que servirá como referencia para realizar la rotación. Por el contrario, para trasladar, simplemente se indicará las unidades que se desea trasladar tanto en el eje vertical como en el horizontal.

- El siguiente comando es idéntico al anterior. La diferencia en este caso es que, en vez de modificar la geometría existente, crea una copia con las características seleccionadas ya sea de rotación o translación.



Ilustración 37 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Rotar con copia
(Fuente: [22])

- El botón que tenemos a continuación sirve para escalar. Se selecciona la geometría o parte de esta, y se presiona sobre el siguiente comando:



Ilustración 38 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Escalar
(Fuente: [22])

A continuación, aparecerá la siguiente ventana, donde se indicará la escala que se desea aplicar.

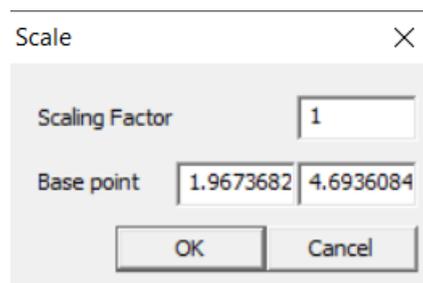


Ilustración 39 Ventana para caracterizar en escalado de la construcción en FEMM
(Fuente: [22])

- En este botón se puede aplicar un espejo a la geometría.



Ilustración 40 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Espejo
(Fuente: [22])

Solo se deberá indicar los dos puntos de la recta, sobre la cual se aplica el efecto espejo.

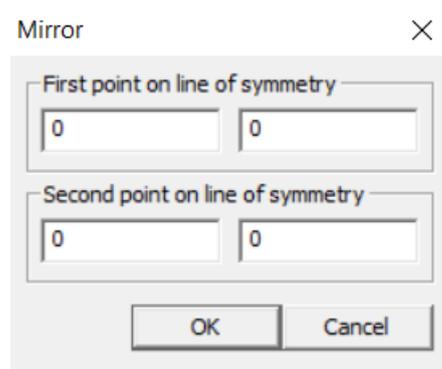


Ilustración 41 Ventana para caracterizar el espejo de la construcción en FEMM
(Fuente: [22])

- Este penúltimo comando se utiliza para aplicar un redondeo a las esquinas de la geometría, permitiendo insertar el radio de redondeo deseado. El redondeo de las esquinas implica suavizar los ángulos de las esquinas de la geometría.



Ilustración 42 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Redondeo esquinas
(Fuente: [22])

Se debe indicar el radio deseado en la siguiente ventana que se abrirá automáticamente:



Ilustración 43 Ventana para indicar el radio de redondeo en FEMM
(Fuente: [22])

Si no se indica un radio geoméricamente posible se mostrará un mensaje de error.

- En último lugar se encuentra el botón que elimina las geometrías seleccionadas.



*Ilustración 44 Barra herramientas manipulación construcción en FEMM: Eliminar geometría
(Fuente: [22])*

Se debe recordar que solo se podrán seleccionar aquellos elementos que se tengan seleccionados en la barra de herramientas de construcción.

3.2.4. BARRA HERRAMIENTAS: MANIPULACIÓN DE LA RED



*Ilustración 45 Barra herramientas manipulación red en FEMM
(Fuente: [22])*

- El primer botón permite activar o desactivar la cuadrícula de píxeles



*Ilustración 46 Barra herramientas manipulación red en FEMM: Cuadrícula
(Fuente: [22])*

- El siguiente comando al permanecer activado solo permite posicionar geometría en los píxeles de la cuadrícula.



*Ilustración 47 Barra herramientas manipulación red en FEMM: posicionar
(Fuente: [22])*

- Por último, se puede especificar el tamaño de cuadrícula que se desee.



Ilustración 48 Barra herramientas manipulación red en FEMM: tamaño
(Fuente: [22])

En el siguiente diálogo de propiedades:

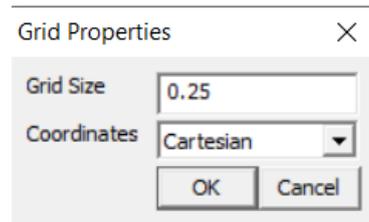


Ilustración 49 Ventana para caracterizar tamaño red
(Fuente: [22])

Se indicará si se quiere coordenadas cartesianas o polares.

Si se elige Cartesiano, los puntos se especifican por sus coordenadas (x,y) para los problemas planos, mientras para los problemas axisimétrico sus coordenadas serán (r,z).

Por otra parte, si se seleccionan coordenadas polares, los puntos se especifican mediante un ángulo y una distancia radial desde el origen.

3.2.5. BARRA HERRAMIENTAS TAREAS DE ANÁLISIS



Ilustración 50 Barra herramientas tareas de análisis en FEMM
(Fuente: [22])

- El primer botón ejecuta el generador de malla.



Ilustración 51 Barra herramientas tareas de análisis en FEMM: Generador malla
(Fuente: [22])

A pesar de que el programa a la hora de realizar los cálculos llama automáticamente al generador de mallas para asegurarse que la malla está actualizada, es conveniente pulsar este botón con el fin de observar la malla y comprobar que tiene buena apariencia. Una vez formada la malla aparecerá por pantalla un mensaje donde se indican el número de nodos que contiene la malla.

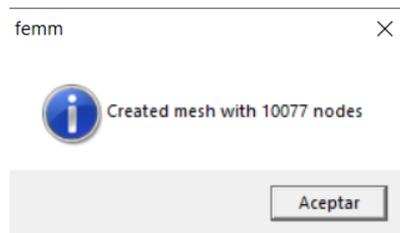


Ilustración 52 Ventana con información de los nodos creados en FEMM
(Fuente: [22])

La malla de elementos finitos originada se carga en la memoria.

Cuando se trabaja con modelos y geometrías muy grandes, la malla puede consumir una cantidad importante de memoria, por lo tanto, es conveniente eliminar la malla de memoria. Para ello se selecciona la siguiente opción dentro del desplegable de la malla:[21]

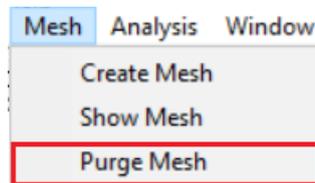


Ilustración 53 Botón para eliminar malla de memoria en FEMM
(Fuente: [22])

- Después de observar la malla generada se selecciona el siguiente botón:



Ilustración 54 Barra herramientas tareas de análisis en FEMM: Observar malla
(Fuente: [22])

Este botón se encarga de realizar los cálculos necesarios para solucionar el problema planteado. Este comando llama automáticamente a la malla, mientras se está ejecutando aparece por pantalla la siguiente ventana:[21]

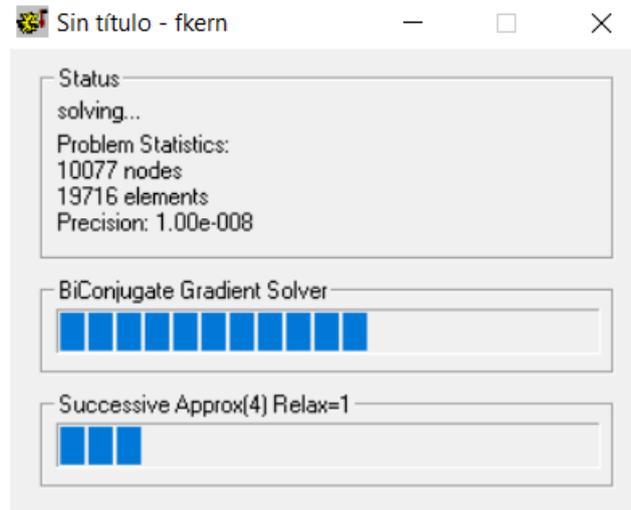


Ilustración 55 Ventana en pantalla mientras realiza los cálculos FEMM
(Fuente: [22])

Cuando esta ventana desaparezca, indica que ya ha terminado de realizar los cálculos.

- Posteriormente se presiona el último botón, que permite mostrar los resultados abriendo la ventana del postprocesador, el cual se detallará más adelante.



Ilustración 56 Barra herramientas tareas de análisis en FEMM: Mostrar resultados
(Fuente:[22])

3.2.6. CONDICIONES DE CONTORNO

Antes de realizar cualquier simulación se debe especificar una condición de contorno con el fin de establecer un límite del dominio de la solución.

La condición de contorno se puede definir en una geometría auxiliar que rodee la geometría de estudio, o bien definirla en el contorno de la geometría que se quiera estudiar. En este último caso, se ahorra trabajo computacional, pero se desconoce la interacción de la pieza con el medio, algo que en ocasiones puede resultar útil.[21]

La geometría auxiliar que recubre la geometría que se desea simular suele ser una circunferencia centrada en el punto medio de la geometría. Una de las desventajas del FEMM 4.2 es la inexistencia de un comando para construir circunferencias directamente, por lo tanto, para su construcción se procederá de la siguiente manera:[21]

- En primer lugar, se crearán dos puntos, de manera que la recta imaginaria que los une forme el diámetro de la circunferencia.
- En segundo lugar, se unirán los dos puntos mediante el modo segmento de arco, explicado anteriormente, asignando el valor del ángulo igual a 180° . Esto creará media circunferencia como se aprecia en la imagen:

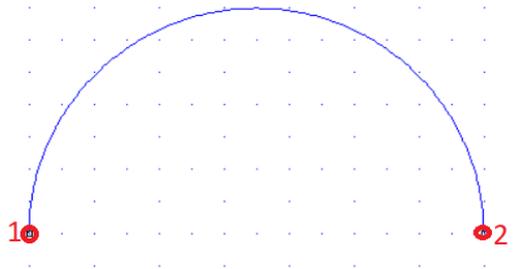


Ilustración 57 Ejemplo construcción arco circunferencia en FEMM (1)
(Fuente: Elaboración propia)

Para formar el arco en esta dirección primero se ha seleccionado el punto 2 y luego el punto 1.

- Por último, se cerrará la circunferencia. Para ello, se seleccionará primero el punto 1 y luego el punto 2. Y se volverá a asignar el ángulo de 180° .

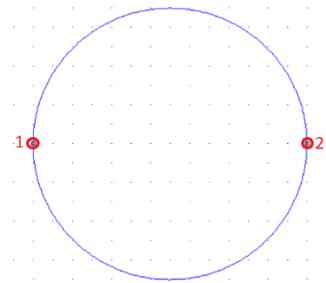


Ilustración 58 Ejemplo construcción arco circunferencia en FEMM (2)
(Fuente: Elaboración propia)

Una vez construida la circunferencia, se define el límite o frontera. Para ello, dentro del desplegable “Properties” se selecciona la opción “Boundary” pulsando en “Add Property” se abre la siguiente ventana:

Ilustración 59 Ventana para caracterizar la frontera en FEMM
(Fuente: [22])

En esta ventana se asignará un nombre a la frontera, y se seleccionará el tipo de frontera que podemos aplicar. Para los problemas magnéticos se dan las siguientes opciones:

- “Prescribed A”: Este tipo de frontera se utiliza para problemas simples con límites circulares. Se corresponde con el tipo Dirichlet, donde el vector potencial magnético (\vec{A}) se define a lo largo de la frontera. Se puede utilizar para definir el flujo que pasa normal a una frontera, ya que el flujo normal es igual a la derivada tangencial de \vec{A} a lo largo de la frontera. [21]

Para problemas planos se usa la siguiente expresión:

$$\vec{A} = (A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot y) \cdot e^{j \cdot \phi}$$

Ecuación 21 Valor del potencial A para problemas planos

Para problemas axisimétricos:

$$\vec{A} = (A_0 + A_1 \cdot r + A_2 \cdot z) \cdot e^{j \cdot \phi}$$

Ecuación 22 Valor del potencial A para problemas axisimétricos

Siendo A_0, A_1, A_2 y ϕ parámetros para definir la forma de \vec{A} sobre la frontera. Tomando el valor de cero en la mayoría de los casos para definir la orientación del flujo paralelo al límite.

También puede servir un valor de A constante, por lo que solo se daría un valor distinto de cero al coeficiente A_0 . [21]

- “Small Skin Depth”: Este tipo denota una interfaz con un material sujeto a corrientes de Foucault a frecuencias altas como para que la penetración en el material sea muy pequeña. [21]

Es una condición de contorno tipo Robin:

$$\frac{\partial A}{\partial n} + \left(\frac{1+j}{\delta} \right) \cdot A = 0$$

Ecuación 23 Condición contorno tipo Robin

$$j = \sqrt{-1}$$

n indica la dirección de la normal hacia afuera del límite.

δ representa la profundidad superficial del material en la frecuencia en la que se trabaje. [21]

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}$$

Ecuación 24 Profundidad superficial para una frecuencia determinada

μ_r y σ son la permeabilidad relativa y a la conductividad del material. Se calculan al especificar en la ventana de diálogo μ y σ . [21]

Si la frecuencia es igual a cero:

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$$

Ecuación 25 Condición contorno tipo Robin cuando frecuencia es cero

- “Mixed”: Puede ser tipo Robin o tipo Neumann. [21]

$$\left(\frac{1}{\mu_r \cdot \mu_0}\right) \cdot \frac{\partial A}{\partial n} + C_0 \cdot A + C_1 = 0$$

Ecuación 26 Condición de contorno mixta

Este tipo de frontera simula un espacio abierto.

- “Strategic Dual Image”: Esta condición imita un límite abierto resolviendo el problema dos veces, una con condición de contorno de Dirichlet y otra con condición de contorno de Neumann. Posteriormente los resultados de cada ejecución se promedian y se obtiene el resultado final. [21]

Este tipo de límite solo se puede aplicar a problemas planos.

- “Periodic”: Se aplica a dos segmentos para forzar que el vector potencial magnético sea idéntico a lo largo de cada límite. [21]

- “Antiperiodic”: Similar a la “Periodic”, pero en este caso obliga a las dos fronteras a ser de signo contrario una respecto a la otra. [21]

Estos dos últimos límites se emplean especialmente para geometrías rotativas donde existe una simetría. De tal forma que con el fin de ahorrar trabajo computacional se dibuja y simula una porción de la geometría completa.

La condición de contorno se debe definir únicamente en dos segmentos de línea o de arco coincidentes, es decir, si la máquina que se desea simular está formada por diferentes arcos se crearán diferentes condiciones de contorno.

El uso de “Periodic” o “Antiperiodic” depende del número de polos del que este formada la máquina eléctrica. Si el número de polos es par, se empleará una condición de contorno de tipo “Periodic”. En el caso contrario, se empleará la condición de tipo “Antiperiodic”.

A continuación, se muestra un ejemplo:[23]

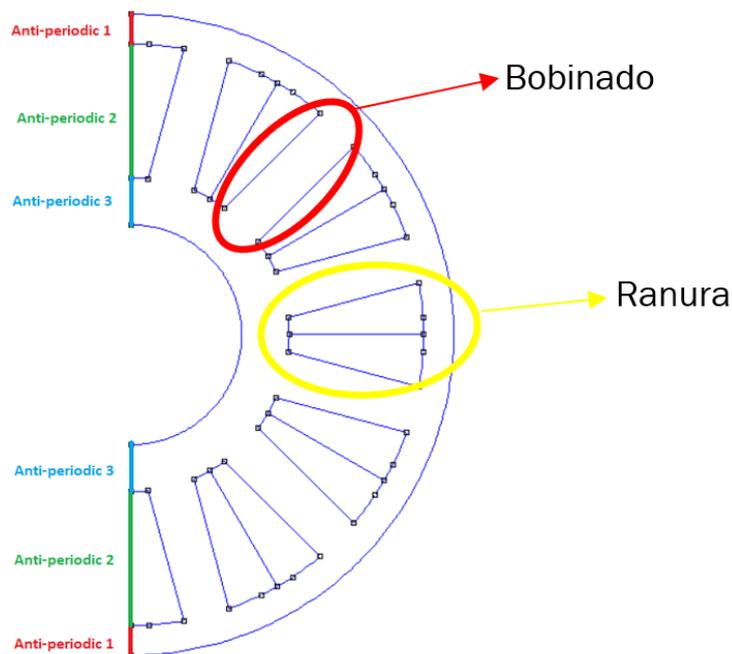


Ilustración 60 Ejemplo aplicación condición contorno tipo Anti-periodic en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

Dependiendo del límite que se selecciona se activarán unas casillas u otras para añadir los datos que necesita cada frontera para realizar los cálculos necesarios.

En último lugar, una vez creada la frontera, se asociará a la circunferencia creada anteriormente.

Para ello se selecciona la circunferencia haciendo clic con el botón derecho del ratón en cada arco construido.

NOTA: Tener seleccionado el modo arco de circunferencia en la barra de herramientas de construcción.

Una vez seleccionada se presiona el siguiente botón:



Ilustración 61 Botón para caracterizar geometrías en FEMM
(Fuente: [22])

Se abre la siguiente ventana:

La imagen muestra una ventana de diálogo titulada "Arc segment properties" con un botón de cerrar "X" en la esquina superior derecha. Dentro de la ventana, hay cuatro campos de configuración:

- "Max. segment, Degrees": un campo de texto con el valor "1".
- "Boundary cond.": un menú desplegable con el valor "limite".
- "Hide arc in postprocessor": un cuadro de verificación desactivado.
- "In Group": un campo de texto con el valor "0".

En la parte inferior de la ventana hay dos botones: "OK" y "Cancel".

Ilustración 62 Ventana para indicar frontera en FEMM
(Fuente: [22])

En "Boundary cond." se seleccionará la frontera que se haya creado.

3.2.7. FORMACIÓN DE CONTORNO ABIERTO AUTOMÁTICO

Existe otra forma para formar el límite sin necesidad de realizar todos los pasos descritos anteriormente.

Para ello, una vez se tenga la geometría que se desea estudiar presionar el siguiente botón:



Ilustración 63 Botón para formación de contorno abierto automático en FEMM
(Fuente: [22])

Automáticamente se abrirá el siguiente cuadro de diálogo:

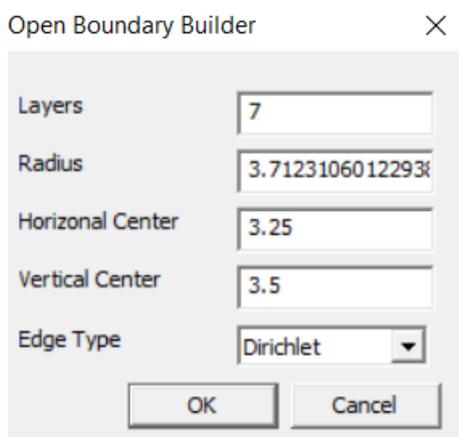


Ilustración 64 Ventana para configurar contorno abierto automático en FEMM
(Fuente: [22])

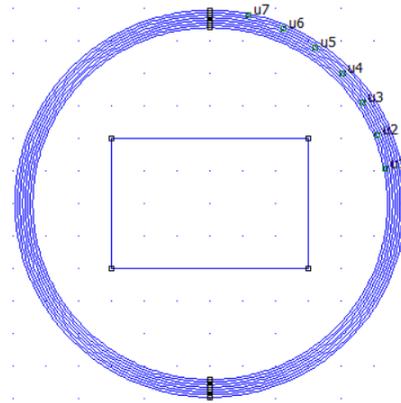
- “Layers”: Representa el número de capas, se puede poner un número entero entre 1 y 10. Cuantas más capas se pongan, más precisa será la condición de contorno. Viene predeterminado el valor 7.[21]
- “Radius, Horizontal Center, Vertical Center”: Estos tres datos representan la circunferencia límite que se formará, indicando el centro de esta (mediante sus coordenadas en el eje horizontal y vertical) y el radio de esta.[21]

Cuando se abre la ventana, aparecen unos valores ya fijados. Dado que el programa calcula automáticamente el centro del cuadro limitador de toda la geometría construida, y la longitud del radio la toma como 3/4 de la longitud de la diagonal del cuadro limitador de la geometría.[21]

Estos valores se pueden cambiar.

- “Edge Type”: En este desplegable se selecciona el tipo de frontera con el que se quiera trabajar, puede ser Dirichlet o Neumann.[21]

Una vez formado el contorno queda así:



*Ilustración 65 Ejemplo de contorno abierto automático en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)*

3.2.8. BIBLIOTECA DE MATERIALES

El programa FEMM tiene integrada una biblioteca de materiales donde se seleccionan los materiales con lo que se desea trabajar.

Para acceder a ella, en la barra de tareas se pulsa en “Properties”, se abrirá un desplegable y se selecciona “Materials Library”.

A continuación, aparecerá la siguiente ventana emergente:

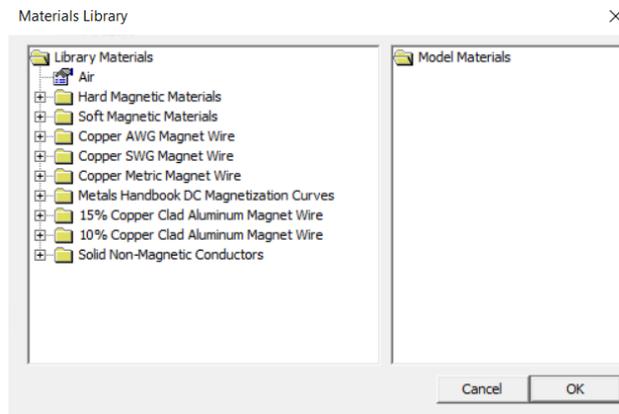


Ilustración 66 Ventana para seleccionar o añadir material en FEMM
(Fuente: [22])

En ella se pueden ir abriendo los desplegables por tipo de material. Para añadirlo a la lista de materiales que se usarán en el modelo que se está construyendo, basta con hacer clic con el botón izquierdo sobre un material y sin levantar el dedo del ratón arrastrarle sobre la columna “Model Materials”.

Si se quieren conocer las propiedades de cada material, basta con hacer dos clics sobre él con el botón izquierdo y aparecerá la siguiente ventana:

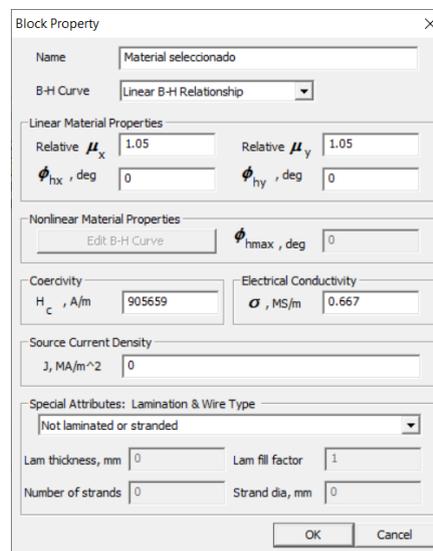


Ilustración 67 Ventana para ver o modificar las propiedades de los materiales en FEMM
(Fuente: [22])

En esta ventana se pueden observar las propiedades del material seleccionado, así como también se pueden modificar sus propiedades originando un nuevo material.

En primer lugar, se indica si la curva de imanación es una recta o una curva.

En el caso de que se considere que tiene forma lineal se indicará el valor de las permeabilidades relativas en la dirección vertical (μ_y) y horizontal (μ_x), así como el ángulo de retraso de la histéresis correspondiente a la dirección x (ϕ_{hx}) y dirección y (ϕ_{hy}) en grados.[21]

Si se trata de un material isótropo, los valores para la dirección x e y serán los mismos.

Este ángulo está estrechamente relacionado con las pérdidas por histéresis; su obtención no es directa dado que en los catálogos de materiales es difícil encontrar este valor. Sin embargo, a la hora de adquirir un material se facilita el valor de la potencia perdida por kilogramo de material, trabajando a una frecuencia determinada y para un valor concreto de inducción (B).[23]

Teniendo cuenta lo anterior, resulta comprensible que, dado un material homogéneo donde ϕ_{hx} toma el mismo valor que ϕ_{hy} , el valor del ángulo de retraso de histéresis se determinará mediante un proceso de ensayo y error.

Se configurará la frecuencia correspondiente y para la inducción en la que el fabricante facilite las pérdidas, se va variando el ángulo hasta obtener el mismo valor de pérdidas que el indicado en el catálogo del fabricante.[23]

Por otro lado, si se considera la no linealidad de la curva de magnetización, se podrá visualizar la curva BH, así como añadir más puntos o modificarla.

Para ello, se selecciona “Edit B-H Curve” y se abrirá la siguiente ventana:

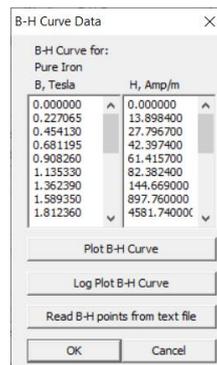


Ilustración 68 Ventana para insertar curva B-H en FEMM
(Fuente: [22])

En esta ventana se pueden modificar los puntos existentes o añadir otros nuevos. Se puede hacer directamente sobre el listado que aparece o también se pueden leer de un archivo con extensión (.txt).

El programa exige un mínimo de 3 puntos para poder definir la curva, y considera que un buen ajuste se realiza con 10 o 15 puntos.[21]

Si se desea introducir los puntos por medio de un archivo (.txt), para una correcta lectura, el archivo deberá tener dos columnas, separadas por un espacio, donde una columna representará el valor de B y la otra el valor de H.

Por ejemplo, tenemos el siguiente archivo (.txt):

*definitivo.txt: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
0 0
0.227065 13.8684
0.45413 27.7967
0.681195 42.3974
0.90826 61.4157
1.13533 82.3824
1.36239 144.669
1.589350 897.76
1.81236 4581.74
2.01004 17736.2
2.13316 41339.3
2.19999 68321.8
2.25479 95685.5
2.29993 123355
2.34251 151083
2.37876 178954
2.415010 206825
2.45126 234696
2.4875 262568
2.52375 290439
2.56 318310
```

*Ilustración 69 Ejemplo formato archivo .txt
(Fuente: Elaboración propia)*

Si se pulsa en “Read B-H points from text file” y se selecciona el archivo, aparece la siguiente ventana, donde se debe especificar que columna pertenece a B y cual a H. Así como las unidades tanto de B como de H.

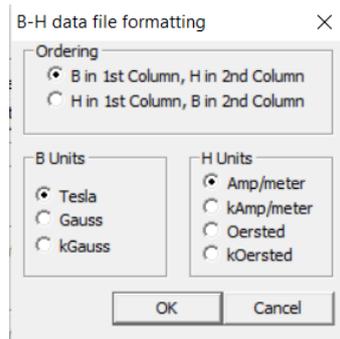


Ilustración 70 Ventana Caracterizar archivo .txt en FEMM
(Fuente: [22])

Al pulsar en “Plot B-H Curve” se puede visualizar la curva. Algo que se debe hacer para comprobar que tiene una forma coherente, lo que indica que se han introducido los puntos correctamente.

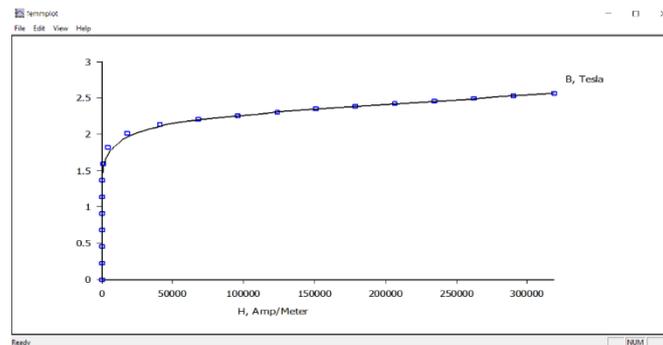


Ilustración 71 Ejemplo gráfica de curva B-H en FEMM
(Fuente: [22])

También se puede visualizar la curva con coordenadas logarítmicas, eligiendo la opción: “Log Plot B-H Curve”:

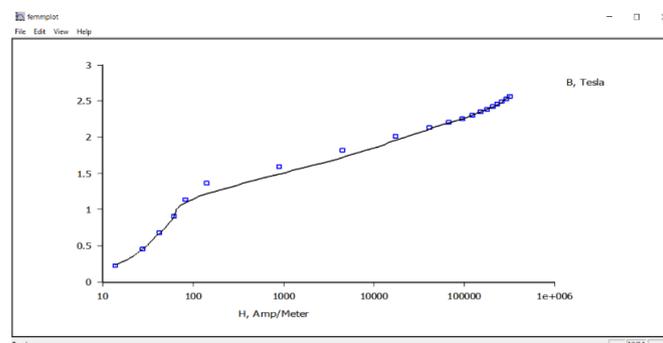


Ilustración 72 Ejemplo gráfica de curva B-H con coordenadas logarítmicas en FEMM
(Fuente: [22])

En materiales con curva no lineal se supone que el retraso de la histéresis es proporcional a la permeabilidad efectiva, por consiguiente, en la permeabilidad efectiva más alta, se considera que el ángulo de histéresis alcanza su valor máximo (ϕ_{hmax}). Así como recoge la siguiente fórmula:[21]

$$\phi_h(B) = \left(\frac{\mu_{eff}(B)}{\mu_{eff,max}} \right) \cdot \phi_{hmax}$$

Ecuación 27 Ángulo de histéresis

La permeabilidad efectiva es una propiedad que describe cómo los materiales responden al campo magnético. Indica la facilidad con la que un material se magnetiza en presencia de un campo magnético externo.

Debemos indicar ese valor máximo del ángulo de histéresis, ϕ_{hmax} . Este ángulo se obtiene de igual forma que para el caso lineal explicado anteriormente.

Otros valores que también se deben especificar, son los siguientes:

- En el caso de que el material represente un imán permanente, se deberá indicar el valor de la coercitividad (H_c), en unidades de amperios partido metro.[21]
- Conductividad eléctrica del material (σ).[21]
- La densidad de corriente en el bloque de corriente continua (J), indica la cantidad de corriente eléctrica que fluye a través de la superficie del material magnético. [17]

Por último, se especifica si el material está laminado o es de tipo cable.

En el caso de estar laminado, se indica la dirección en la que se lamina, por lo que se tienen cuatro opciones:

- “Laminated in-plane”

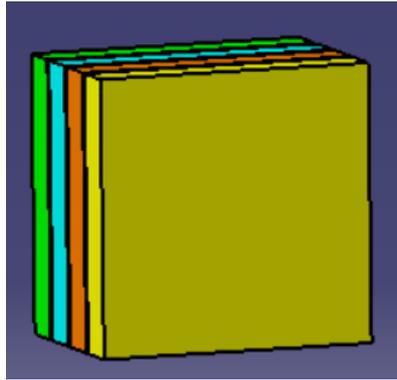


Ilustración 73 Posición laminación tipo: 'Laminated in-plane' en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

- “Laminated parallel to y (planar) or z (axisymmetric)”

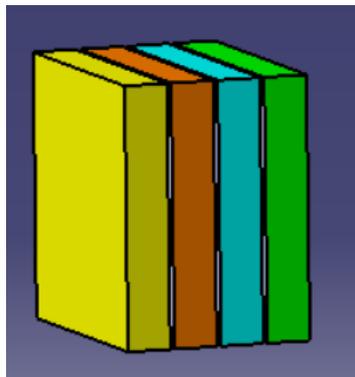


Ilustración 74 Posición laminación tipo: 'Laminated parallel to y or z' en FEMM'
(Fuente: Elaboración propia)

- “Laminated parallel to x (planar) or r (axisymmetric)”

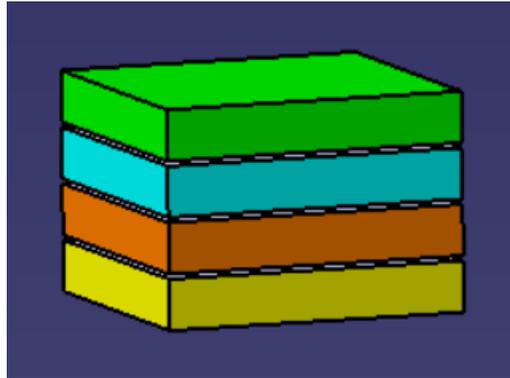


Ilustración 75 Posición laminación tipo: 'Laminated parallel to x or r' en FEMM'
(Fuente: Elaboración propia)

Para cada opción se debe indicar el valor de espesor de laminación (“Lam thickness” en mm), que representa el grosor que tendrá cada capa, y el factor de relleno (“Lam fill factor”).[24]

Este factor de relleno se define como el cociente entre el área de la sección transversal de hierro y el área de la sección transversal de hierro con las chapas apiladas. El valor del área de la sección transversal con las chapas apiladas será menor que el área de la sección transversal sin las chapas. Esto viene dado a la existencia de un aislante existente entre las chapas con el fin de reducir las pérdidas de Foucault. [20]

Este factor toma valores comprendidos entre 0.95 y 0.9 cuando trabaja con láminas de espesores entre 0.63 mm y 0.35 mm. Sin embargo, si el espesor de las láminas está comprendido entre valores de 0.025 mm y 0.12 mm el factor de apilamiento podría ser entre 0.4 y 0.75. [24]

En el caso de que el material represente un cable, se deberá seleccionar el tipo de cable, así como el número de hebras que formará el cable (“Number of strands”) y el diámetro de cada hebra (“Strand dia” en mm).[21]

3.2.9. ASIGNACIÓN DE MATERIALES

Una vez caracterizados los materiales y añadidos al modelo, se debe asociar a cada geometría cerrada una etiqueta. Para ello se selecciona en la barra de herramientas de construcción el comando “MODO BLOQUE”.



Ilustración 76 Botón "Modo bloque"
(Fuente: [22])

Se va añadiendo un bloque a cada geometría, formándose un pequeño cuadrado de color verde, como se aprecia en la siguiente imagen:

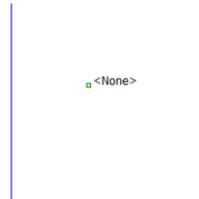


Ilustración 77 Ejemplo de etiqueta en geometría en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

Una vez formado, se selecciona el cuadrado verde haciendo clic sobre él con el botón derecho del ratón; una vez seleccionado cambiará de color, y el rectángulo será de color rojo.

Posteriormente se presionará el siguiente botón:



Ilustración 78 Botón para caracterizar geometrías en FEMM
(Fuente: [22])

Donde se abrirá la siguiente ventana emergente:

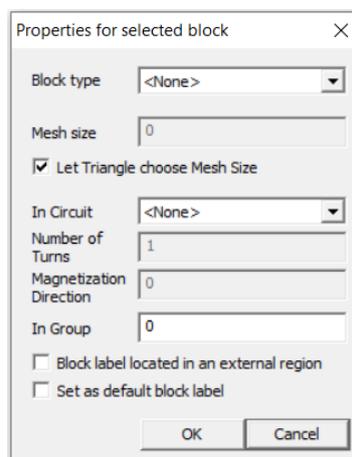


Ilustración 79 Ventana para asociar etiqueta con sus propiedades en FEMM
(Fuente: [22])

En el desplegable “Block type” se seleccionará el material que corresponda a la región seleccionada.

En la sección “In circuit”, en el caso de que la geometría seleccionada forme un circuito, se especificará el nombre del mismo.

Si se ha asignado un circuito existente, automáticamente la casilla “Number of Turns” se habilitará y en ella se indicará el número de vueltas que forman la bobina.

Por otro lado, si el material que se desea añadir posee un valor de coercitividad (H_c) diferente de cero, el apartado “Magnetization Direction” se desbloquea y permite introducir la dirección en la que el imán está orientado. Apareciendo junto al nombre del material una flecha indicando esta dirección.[21]

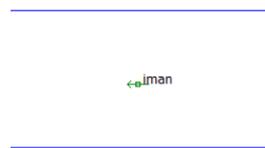


Ilustración 80 Ejemplo dirección de magnetización del imán a 180º en FEMM
(Fuente: [22])

3.2.10. PROPIEDADES DE CIRCUITO

Para asignar a una región la propiedad de circuito, se deben realizar los siguientes pasos.

Previamente se debe añadir a la lista de materiales que se van a emplear el material del cable seleccionado.

Posteriormente se debe crear el circuito en el programa. Para ello se pulsa en el botón “Properties” de la barra de herramientas. Luego se selecciona la opción “Circuits”, donde se abrirá la siguiente ventana emergente:

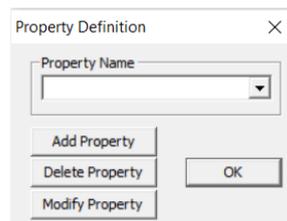
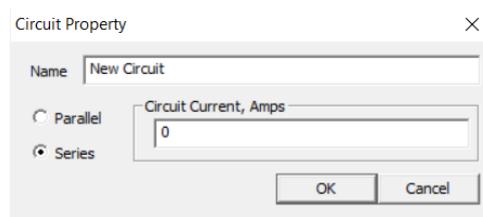


Ilustración 81 Ventana para administrar circuitos en FEMM
(Fuente: [22])

Para crear el circuito se presionará en “Add Property” y aparecerá la siguiente ventana:



*Ilustración 82 Ventana para caracterizar circuitos en FEMM
(Fuente: [22])*

Donde se dará un nombre al circuito en el apartado “Name”.

Se indicará si el circuito está conectado en serie o en paralelo.

En el caso de seleccionar la opción de “paralelo”, la corriente se divide de modo que la caída de voltaje sea la misma en todas las secciones marcadas como “paralelo”. [21]

Si por el contrario se elige la opción de “serie”, la región se trata como un conductor trenzado en el que la corriente total es la corriente del circuito multiplicada por el número de vueltas especificadas en la región. [21]

También se deberá añadir el valor de la corriente que circulará por el circuito en las unidades de Amperios.

Por último, al asignar el material, aparte de indicar el material, se deberá especificar el circuito; así como el número de vueltas en el desplegable del apartado anterior 3.2.9.

Se debe tener en cuenta que el número de vueltas puede ser positivo o negativo; el signo indicará en qué sentido circulará la corriente. Por lo tanto, para representar una bobina siempre encontraremos dos geometrías simétricas, donde en una de ellas se encuentra el número de vuelta en positivo y en su simetría el mismo número de vueltas en negativo.

3.3. POSTPROCESADOR MAGNÉTICO

Una vez formalizado y configurado el problema que se pretende resolver, el postprocesador se encarga de extraer los resultados.

A continuación, se detallará las herramientas y los resultados que se tienen disponibles en esta parte.

Nada más abrirse el postprocesador, aparece la siguiente imagen aportando información del nombre del programa, las unidades en las que se trabaja, la frecuencia, el número de nodos y de elementos.

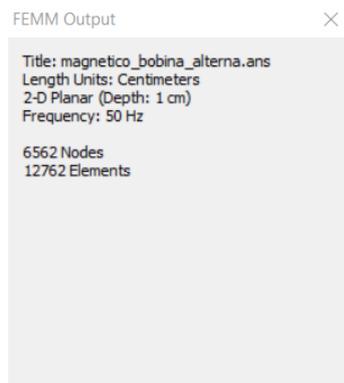


Ilustración 83 Ventana con información de la geometría en postprocesador de FEMM
(Fuente: [22])

Si se hace clic con el botón izquierdo en cualquier punto de la geometría, la ventana anterior mostrará los valores de la intensidad de campo magnético (B) como la excitación magnética (H); tanto en valor absoluto como en las direcciones de x e y.

3.3.1. MODOS POSTPROCESADOR

Al igual que en el preprocesador, el postprocesador siempre va a estar en uno de los siguientes modos. Dependiendo en el modo en el que se encuentre, se tendrán disponibles unos resultados u otros.

➤ MODO PUNTO



Ilustración 84 Barra modos postprocesador en FEMM: Punto
(Fuente: [22])

Permite conocer los valores de los campos haciendo clic en cualquier punto de la región. Para ello se debe tener abierta la ventana de salida, misma ventana que aparece cuando se inicializa el postprocesador.

Para acceder a la ventana se presiona “View” y a continuación “Output Windows”.

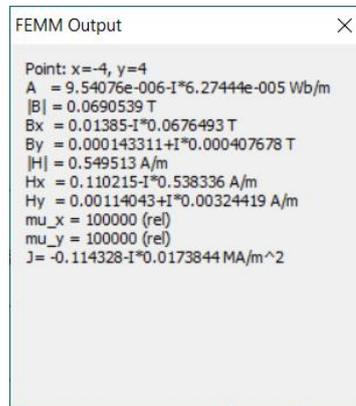


Ilustración 85 Ventana con valores del punto seleccionado en FEMM
(Fuente: [22])

➤ MODO CONTORNO



Ilustración 86 Barra modos postprocesador en FEMM: Contorno
(Fuente: [22])

Este modo permite seleccionar rectas del contorno. Para ello se seleccionan los puntos que formarán la recta, y una vez seleccionada una o varias rectas se tienen disponibles varios resultados que se detallarán posteriormente.

También existe la opción de crear nuevas rectas. Para ello se presiona la tecla tabuladora del teclado y se abrirá una ventana para introducir un punto, se repite el proceso y se añade el segundo punto que formará la recta.

➤ MODO BLOQUE



Ilustración 87 Barra modos postprocesador en FEMM: Bloque
(Fuente: [22])

Permite seleccionar el área de una región completa. Una vez seleccionado el área sobre el que se desea obtener resultados, al igual que el modo contorno, se tienen accesibles numerosos resultados detallados más adelante.

3.3.2. HERRAMIENTAS GRÁFICAS

➤ GRÁFICO DE CONTORNO



Ilustración 88 Barra Herramientas gráficas en FEMM: Contorno
(Fuente: [22])

Al seleccionar esta opción aparecerá la siguiente ventana:

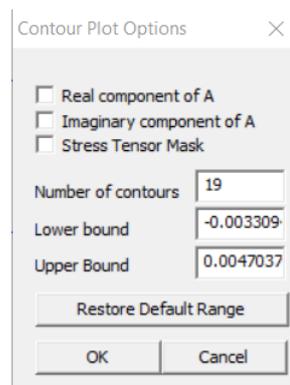


Ilustración 89 Ventana para personalizar las líneas de flujo en FEMM
(Fuente: [22])

En la representación gráfica, es posible observar las líneas de fuerza generadas tanto por la componente real del vector potencial magnético (\vec{A}) en color negro, como por la componente imaginaria en color gris en caso de trabajar con frecuencias diferentes de cero.

El número de líneas de fuerza que aparecen como predeterminado son 19. Este valor se puede modificar, poniendo un valor comprendido entre 4 y 999.[21]

También se puede cambiar el valor máximo y mínimo que influirá en la escala con la que se visualizan las líneas de fuerza.

➤ GRÁFICO DE DENSIDAD



Ilustración 90 Barra Herramientas gráficas en FEMM: Densidad
(Fuente: [22])

En esta opción se puede visualizar en la geometría a través de una escala gráfica, la densidad de flujo, la intensidad de campo o la densidad de corriente.

Si la frecuencia del problema es distinta de cero, se podrá diferenciar la parte real de la parte imaginaria.[21]

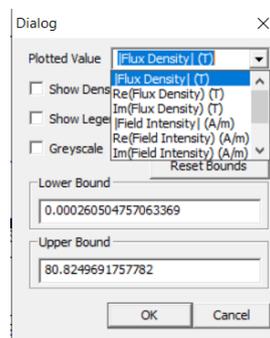


Ilustración 91 Ventana para personalizar los flujos de densidad en FEMM
(Fuente: [22])

La escala gráfica está dividida en veinte contornos, los cuales se podrá definir el valor máximo y mínimo en la ventana flotante (“Lower Bound” / “Upper Bound”).

➤ GRÁFICOS VECTORIALES



Ilustración 92 Barra Herramientas gráficas en FEMM: Vectores
(Fuente: [22])

Herramienta que permite visualizar la dirección y magnitud de los vectores del campo de inducción (\vec{B}) o los vectores de excitación magnética (\vec{H}). [21]

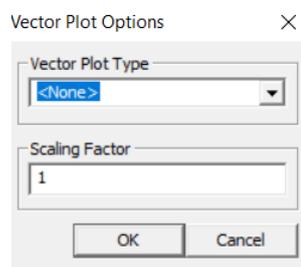


Ilustración 93 Ventana para personalizar los vectoriales en FEMM (Fuente: [22])

Se puede cambiar el valor de la escala.

3.3.3. HERRAMIENTAS RESULTADOS

➤ GRÁFICOS



Ilustración 94 Botón para construir gráficos en FEMM (Fuente: [22])

El resultado gráfico solo estará disponible si se trabaja en modo contorno.

Una vez seleccionado el botón, aparecerá una ventana flotante en la cual aparece un desplegable con los distintos gráficos que se pueden visualizar.

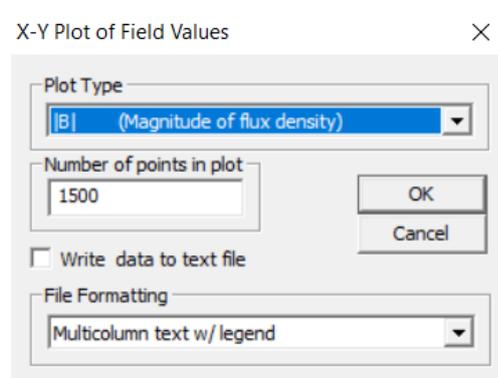


Ilustración 95 Ventana para configurar los gráficos en FEMM (Fuente: [22])

Se puede guardar la gráfica en un archivo (.txt), marcando la casilla “Write data to text file”. Los datos se guardarán en forma de columna siendo una columna el valor solicitado y la otra la longitud.

Al guardar los datos, se tienen tres opciones disponibles para el formato. Una de ellas es guardar los datos sin leyenda, lo que significa que no se incluirá información adicional sobre el contenido de cada columna. Las otras dos formas guardan los datos con leyenda, lo cual implica que se incluirá información descriptiva para cada columna, indicando qué representa y en qué unidades se encuentra. Lo que diferencia estas dos formas con leyenda es que una guarda los datos en forma de vector.

Se indicará el número de puntos que formará el gráfico, estando comprendido entre 10 y 100000.[21]

Los diferentes diagramas que tenemos disponibles son los siguientes:

- Vector potencial magnético (\vec{A})
- Densidad de flujo (\vec{B})
- Densidad de flujo normal
- Densidad de flujo tangencial
- Intensidad de campo (\vec{H})
- Intensidad de campo normal
- Intensidad de campo tangencial

➤ INTEGRALES



*Ilustración 96 Botón para cálculo de integrales en FEMM
(Fuente: [22])*

Se puede calcular integrales tanto para el modo contorno como para el modo bloque.

Se detallará cada caso:

- INTEGRALES DE LÍNEA

Se deberá tener seleccionado el “modo contorno” y haber seleccionado el contorno donde se desea realizar la integración.



Ilustración 97 Botón "modo contorno"
(Fuente: [22])

El desplegable nos permitirá conocer el valor de las integrales de los siguientes valores:[21]

- “(B.n)”: Flujo que atraviesa normal al contorno.
- “(H.t)”: Caída de tensión magnética.
- “Contour length”: Longitud del contorno en metros.
- “Force from Stress Tensor”: Fuerza ejercida sobre el contorno, resultante de derivar el tensor de Maxwell.
- “Torque from Stress Tensor”: Momento sobre el punto (0,0).
- “(B.n)^2”: Cuadrado del flujo que atraviesa normal al contorno.

- INTEGRALES DE BLOQUE

Previamente se selecciona a través del “modo bloque” la superficie sobre la que se realizara la integral.



Ilustración 98 Botón "modo bloque"
(Fuente: [22])

Se tienen disponibles las siguientes integrales:[21]

- “(A.J)”: Sirve para calcular la inductancia en una bobina, ya que la fórmula de autoinducción es la siguiente:

$$L_{\text{autoinducción}} = \frac{\int (\vec{A} \cdot \vec{J}) dV}{i^2}$$

Donde:

i representa la corriente.

J es la densidad de corriente.

\vec{A} es el vector potencial magnético

- “A”: Se usa para el cálculo de las inductancias mutuas entre varias bobinas.

$$L_{mutua} = \frac{\int (A_1 \cdot J_2) dV_2}{i_1 \cdot i_2}$$

Donde:

A_1 es la componente del vector potencial magnético producido por la primera bobina.

J_2 es la densidad de corriente en la segunda bobina.

i_1 y i_2 corresponde a las corrientes en la primera y segunda bobina respectivamente.

V_2 volumen de la segunda bobina.

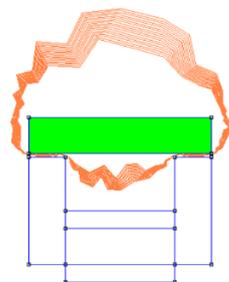
- “Magnetic field energy”: Devuelve el valor de la energía en el campo magnético.
- “Hysteresis, Laminated Eddy, or Proximity effect”: Proporciona el valor de las pérdidas en el área seleccionada en el caso de que el área este laminada o se trabaje con frecuencias distintas de cero.
- “Resistive losses”: Devuelve la integral de las pérdidas producidas por la corriente que circula en la dirección “z”.

$$\int (i^2 \cdot R) dV$$

- “Block cross-section area”: Calcula el área del bloque que se visualiza por pantalla.

- “Total losses”: Entrega el valor de todas las pérdidas posibles sobre el bloque seleccionado.
- “Total current”: Transmite el total de todas las corrientes que atraviesan el bloque seleccionado.
- “Integral of B over block”: Calcula la integral de B, que puede ser útil para realizar otros cálculos.
- “Block volume”: Muestra el volumen total del bloque seleccionado.
- “Lorentz force ($J \times B$)”: Devuelve la fuerza denominada “Fuerza de Lorentz”, la cual se detallará en un ejemplo del capítulo 5.
- “Lorentz torque ($r \times J \times B$)”: Calcula el par de las fuerzas de Lorentz sobre el punto (0,0).
- “Magnetic field coenergy”: Devuelve el valor de la coenergía, término útil para el cálculo de las fuerzas magnéticas y el momento en máquinas eléctricas giratorias.
- “Force via Weighted Stress Tensor”: Proporciona el valor de la fuerza, realizando previamente el cálculo de una función la cual servirá de límites para la integración de dicha fuerza.

Los límites que calcula el programa pueden ser visualizados en el botón de gráficos de contorno activando la casilla “Show stress tensor mask”. Se mostrarán sobre la geometría con unas líneas de color naranja.



*Ilustración 99 Ejemplo de límites de integración para el cálculo de la fuerza ejercida en FEMM
(Fuente: [22])*

- “Torque via Weighted Stress Tensor”: Calcula el momento de la fuerza anterior sobre el punto (0,0).
- “R²(i.e. Moment of Inertia / Density)”: Sirve para calcular los momentos de inercia al multiplicarlo por la densidad.

3.3.4. RESULTADOS DE CIRCUITO



Ilustración 100 Botón para mostrar los resultados del circuito en FEMM
(Fuente: [22])

Sin necesidad de seleccionar ninguna parte de la geometría. Si se presiona en el botón “circuito” mostrado anteriormente aparecerá la siguiente ventana:

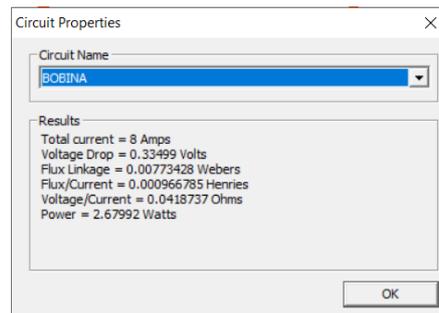


Ilustración 101 Ventana para seleccionar circuito deseado con sus resultados en FEMM
(Fuente: [22])

En ella se selecciona el circuito sobre el que se quiere conocer las propiedades.

Por pantalla aparecen los valores de corriente total (“Total current”), caída de voltaje (“Voltage Drop”), flujo (“Flux Linkage”), inductancia eléctrica (“Flux/Current”), Resistencia (“Voltage/Current”) y potencia (“Power”).[21]



CAPÍTULO 4: MATERIALES UTILIZADOS

Una parte crucial en cualquier simulación es la definición adecuada de los materiales en las geometrías. Estos materiales tienen propiedades electromagnéticas únicas que determinan cómo interactúan con los campos eléctricos y magnéticos. Por lo tanto, la selección y caracterización precisa de los materiales es esencial para lograr resultados confiables y representativos en las simulaciones.

El objetivo de este capítulo es presentar en detalle los diferentes materiales utilizados en las simulaciones que se realizarán a continuación en el programa FEMM 4.2.

4.1. AIRE

Todo el entorno de la geometría construida tanto con bobina como con imán está recubierto de aire, siendo este el material del entrehierro.

La permeabilidad relativa del aire es aproximadamente la unidad.

4.2. HIERRO PURO RECOCIDO A 800 °C

Para el núcleo tanto para los circuitos de las geometrías con bobina como con imán se ha empleado como material hierro puro.

Este tipo de material no se encuentra en la naturaleza de forma pura, sino que lleva asociado consigo una serie de procesos.

El proceso para llevar a cabo la pureza del mineral ha sido la electrolisis, aun así, después del proceso, el mineral sigue con presencia de impurezas. Con el fin de aumentar su pureza se lleva a cabo un proceso de recocido a una temperatura de 800 °C. [25]

De la referencia [25] se ha obtenido el siguiente gráfico:

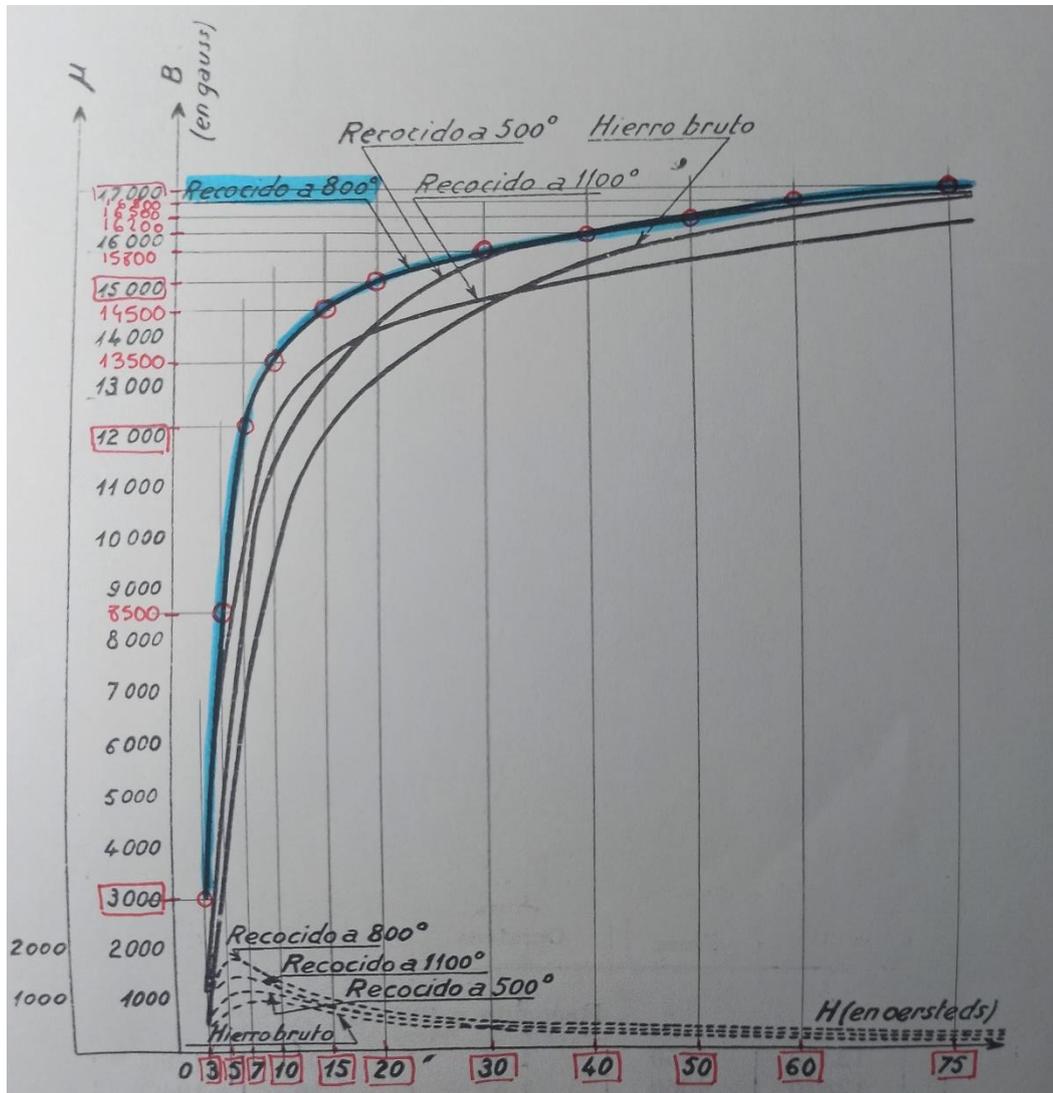


Ilustración 102 Curva B-H de diferentes materiales
(Fuente: [25])

De la ilustración 102 se han sacado los valores correspondientes de la inducción y de la excitación para la curva correspondiente a hierro recocido a 800 °C.

Las unidades de la gráfica son diferentes que las utilizadas en el programa FEMM 4.2 por lo tanto se realizará una conversión de unidades, teniendo en cuenta lo siguiente:

$$1 \text{ oersted} = 79.5775 \text{ A/m}$$

1 gauss = 0.0001 T

Se obtienen los siguientes valores:

H (Amp/m)	B (T)
238.73	0.3
397.89	0.85
557.04	1.2
795.78	1.35
1193.66	1.45
1591.55	1.5
2387.33	1.58
3183.10	1.62
3978.88	1.65
4774.65	1.68
5968.31	1.7

Tabla 1 Valores de B-H del hierro recocido a 800 °C

Estos valores se introducirán en el programa FEMM 4.2 para la caracterización de nuestro material, con un valor de conductividad eléctrica igual a 9.93 MS/m.

Este tipo de hierro presenta las siguientes pérdidas a una frecuencia de 50 Hz: [25]

B (T)	Pérdidas por Histéresis (W/Kg)	Pérdidas por corrientes de Foucault (W/Kg)	Pérdidas totales (W/Kg)
1	4.57	0.58	5.15
1.4	8.16	1.32	9.48

Tabla 2 Valores de pérdidas del hierro recocido a 800 °C

El valor de las pérdidas servirá para el cálculo del ángulo de retraso de la histéresis, mediante un proceso de prueba y error utilizando el programa, con base en el conocimiento de las pérdidas para un valor de inducción. Tal como se explicó en el capítulo 3 de este mismo documento.

Dentro de la librería del programa FEMM, encontramos un material denominado "pure iron". Al obtener la curva característica de este material, notamos que se

asemeja a la obtenida previamente, pero presenta pequeñas discrepancias. Ante esta situación, se ha decidido utilizar el material previamente caracterizado, ya que tenemos pleno conocimiento de sus propiedades y la temperatura a la que ha sido recocido.

4.3. “US Steel Type 2-S 0.018 inch thickness”

Este material viene recogido en la librería del programa; a continuación, se expone con qué material de la Asociación Española de Normalización (UNE) se corresponde.

Por una parte, la designación type 2, según la normativa de Estados Unidos, SAE/AISI, nos indica que se trata de un acero laminado en frío. [26]

Una vez obtenida esta información, nos dirigimos a la norma UNE-EN 10106 – Chapas y bandas magnéticas, laminadas en frío, de grano no orientado en estado final de suministro-, ya que dicha norma está orientada a materiales destinados a la construcción de circuitos magnéticos.[27]

Dentro de la norma, se encuentran diferentes tipos de acero con distintos grosores de espesor. Cada tipo de acero tiene sus propias características magnéticas, y una de ellas es la polarización magnética, que se representa por el símbolo (\vec{B}). En la norma, se especifica la polarización magnética mínima para diferentes valores de la intensidad de campo magnético, representada por (\vec{H}). Para los valores de \vec{H} igual a 2500 A/m, 5000 A/m y 10000 A/m, la norma establece un valor correspondiente de \vec{B} , lo cual indica la respuesta magnética del acero ante el campo magnético aplicado.[27]

Extraemos los datos de la curva B-H del material que nos facilita el programa:

B (tesla)	H (Amp/m)		
0	0	1.5372	752.333643
0.004445	9.510307	1.5474	886.572927
0.005819	11.21247	1.5576	1044.773
0.007193	13.219414	1.5679	1231.22308
0.008568	15.585253	1.584	1450.53867
0.012898	18.371262	1.5972	1709.16555
0.017228	21.656221	1.6104	2013.86779
0.02747	25.5213	1.6266	2372.52359
		1.6427	2795.15969

0.046579	30.061992	1.6589	3292.99653
0.092289	35.364241	1.678	3878.92566
0.22076	41.430434	1.6971	4569.10132
0.4113	48.386303	1.7162	5382.06506
0.60185	56.51037	1.7353	6339.70069
0.7717	66.066036	1.7604	7465.56316
0.91495	77.340576	1.7854	8791.7222
1.0464	90.591026	1.8104	10352.237
1.1601	106.212089	1.8384	12188.8857
1.2619	124.594492	1.8723	14347.8233
1.3431	146.311191	1.9061	16887.9371
1.3947	172.06247	1.9459	19872.0933
1.4286	202.524737	1.9887	23380.6653
1.4507	238.525598	2.0344	27504.3713
1.4668	281.012026	2.0742	32364.965
1.483	331.058315	2.1081	38095.3408
1.4932	390.144609	2.139	44847.4917
1.5064	459.695344	2.1611	52819.5656
1.5167	541.731789	2.1772	62227.2177
1.5269	638.410494	2.1904	73321.117

Tabla 3 Datos curva B-H material US Steel Type 2-S 0.018 inch thickness en FEMM

Nuestro material tiene 0.018 pulgadas de espesor, que equivale a 0.4572 mm, que podría aproximarse a una chapa de 0.5 mm que nos aparece en la norma.

Observando la norma UNE-EN 10106:

Tipo de acero		Espesor nominal mm	Pérdida total máxima específica a 50 Hz y a 1,5 T W/kg	Polarización magnética mínima ^a T en una intensidad de campo magnético alterno (A/m)			Anisotropía máxima de las pérdidas a 50 Hz y 1,5 T %	Factor de apilamiento mínimo ^b	Número mínimo de doblados	Masa específica ^c kg/dm ³
Designación simbólica	Designación numérica			2 500	5 000	10 000				
M800-50A	1.0816		8,00	1,60	1,70	1,78	± 10	10	7,80	
M940-50A	1.0817	0.50	9,40	1,62	1,72	1,81	± 8	10	7,85	
M310-65A	1.0892		3,10	1,49	1,60	1,70	± 15	2	7,60	
M330-65A	1.0819		3,30	1,49	1,60	1,70	± 15	2	7,60	

Ilustración 103 Propiedades material M940-50A
(Fuente: [27])

Mediante interpolación vamos a calcular el valor de la inducción para los valores $H = 2500$, $H = 5000$ y $H = 10000$ A/m de excitación de la tabla extraída del material “US Steel Type 2-S 0.018 inch thickness” del programa.

Trabajaremos únicamente con dos decimales.

- Para $H = 2500$ A/m

$$B_{H=2500} = 1,63 + (2500 - 2372.52) \cdot \left(\frac{1.64 - 1.63}{2795.16 - 2372.52} \right) = \mathbf{1.63}$$

- Para $H = 5000$ A/m

$$B_{H=5000} = 1,70 + (5000 - 4569.10) \cdot \left(\frac{1.72 - 1.70}{5382.07 - 4569.10} \right) = \mathbf{1.71}$$

- Para $H = 10000$ A/m

$$B_{H=10000} = 1,79 + (10000 - 8791.72) \cdot \left(\frac{1.81 - 1.79}{10352.24 - 8791.72} \right) = \mathbf{1.81}$$

Estos valores de inducción para cada excitación se aproximan bastante al material: **M940-50A**, considerando que las diferencias son debidas a la diferencia del espesor.

El material del M940-50A es acero, por lo tanto, es buena elección para los circuitos magnéticos con bobinas ya que se trata de un material ferromagnético blando y estos poseen números pequeños de pérdidas. [27]

La norma nos indica:[27]

- La letra M corresponde a un acero magnético.
- El número 940 es cien veces el valor especificado de las pérdidas totales específicas máximas a 50 Hz, expresado en vatios por kilogramo, correspondientes al espesor nominal del producto, a 1,5 T, es decir, para este material las pérdidas son 9,4 W/kg.
- El número 50 es cien veces el espesor nominal en milímetros.
- La letra “A” indica que se trata de chapa o bandas magnéticas de grano no orientado.

En el proceso de laminación en frío, los cristales del material se alinean siguiendo la dirección de laminación sin recibir tratamiento térmico posterior. Esta alineación resulta en una estructura conocida como laminación en frío de grano orientado. Este tipo de laminación presenta características mejoradas en términos de permeabilidad en la dirección en la que se ha realizado la laminación. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este material es anisotrópico, lo que significa que sus propiedades pueden variar según la dirección.

En algunos casos, se puede optar por someter la misma chapa laminada en frío a un proceso adicional llamado recocido. El recocido implica someter la chapa a un tratamiento térmico controlado en el que los cristales deformados se reorganizan en una estructura más desordenada y alcanzan un estado de isotropía. Esto da lugar a una chapa laminada en frío de grano no orientado, donde las propiedades magnéticas y mecánicas se distribuyen de manera más uniforme en todas las direcciones.[28]

Existe una fórmula que calcula el nivel de anisotropía:

$$T = \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} \cdot 100\%$$

Ecuación 28 Porcentaje de anisotropía

Donde:

W_1 : Pérdidas en la dirección perpendicular a la laminación

W_2 : Pérdidas en la dirección de la laminación

Para considerar un material como anisótropo el porcentaje debe de ser menor al 17%.[28]

La laminación en frío de grano orientado se utiliza para la fabricación de transformadores de gran tamaño, por el contrario, la laminación en frío de grano no orientado se emplea para la fabricación de generadores y pequeños motores eléctricos.[29]

4.4. IMÁN N38

El material para el imán deberá ser de tipo ferromagnético duro dado que se necesitan valores elevados del campo coercitivo (H_c).

Se ha elegido de la biblioteca de materiales del programa un imán de Neodimio (N38).

Estos tipos de imanes se caracterizan principalmente por su elevada resistencia a la desmagnetización; su uso en el ámbito industrial es muy elevado.[7]

El neodimio de grado 38 tiene las siguientes características: [22]

- Permeabilidad relativa (μ) = 1.05
- Coercitividad (H_c) = 944771 A/m
- Conductividad eléctrica (σ) = 0.667 MS/m

4.5. 18 AWG

Esa denominación pertenece al Calibre de alambre estadounidense empleado en este país desde el año 1857.[30]

Esta denominación recoge un número de calibre que está asociado con las sucesivas etapas en el proceso de estirado, esto quiere decir que, a mayor calibre, menor diámetro del conductor.[30]

Existe un calibre base, 36 AWG, sobre el que se relaciona cada tipo de AWG para conocer su diámetro.

A partir del número de calibre, existe una fórmula matemática para poder obtener el diámetro del conductor:

$$D(mm) = 0.005 \cdot \left(\sqrt[39]{92}\right)^n \cdot 25.4$$

Ecuación 29 Conversión a mm del calibre estadounidense

Siendo n la diferencia entre 36 AWG y el calibre que se desea calcular.

En este caso para un 18 AWG:

$$n = 36 - 18 = 18$$

$$D(mm) = 0.005 \cdot \left(\sqrt[39]{92}\right)^{18} \cdot 25.4 = \mathbf{1.024\ mm}$$

En la referencia [30] se puede encontrar la demostración y desarrollo de esta fórmula.

A continuación, se muestra una tabla con los calibres del 1 al 30 y su respectivo diámetro correspondiente. [31]

AWG	Diámetro (mm)	AWG	Diámetro (mm)
1	7.35	16	1.29
2	6.54	17	1.15
3	5.86	18	1.02
4	5.19	19	0.91
5	4.62	20	0.81
6	4.11	21	0.72
7	3.67	22	0.64
8	3.26	23	0.57
9	2.91	24	0.51
10	2.59	25	0.46
11	2.30	26	0.41
12	2.05	27	0.36
13	1.83	28	0.32
14	1.63	29	0.29
15	1.45	30	0.26

Tabla 4 Calibres AWG y diámetros correspondientes

4.6. ACERO ALTAVOZ

El yugo de los altavoces para la geometría 4 que se verá a continuación, tiene que estar formado de un material de alta permeabilidad para evitar así las pérdidas del campo magnético del imán.

Se ha realizado la consulta sobre el tipo de material que emplean varias empresas dedicadas a la fabricación de altavoces, pero no se ha obtenido respuesta. Por este motivo se ha decidido usar para la simulación un acero, simplificando su curva de imanación a la de una recta, con un valor de la permeabilidad relativa igual en ambos ejes. Propiedades: [32]

- Permeabilidad relativa (μ) = 1000
- Conductividad eléctrica (σ) = 5 MS/m

4.7. IMÁN CERÁMICA 5

Uno de los imanes con mejor sonoridad es el imán de ferrita, siendo este el utilizado en altavoces o grandes amplificadores. [33]

Para la simulación del altavoz “Woofers” de la geometría 4, se va a usar un imán de tipo cerámico de grado 5 que se puede encontrar en la librería de materiales del programa FEMM 4.2.

A continuación, se presentan las propiedades de este material: [34]

Densidad (g/cm)	BH (max) (MGO)	B _r (Gauss)	H _c (Oersted)	Temperatura máxima de operación (C°)	Temperatura Curie (C°)
4.9	3.4	3800	2400	450	450

Tabla 5 Propiedades de Imán cerámico de grado 5

4.8. 30 AWG

La bobina utilizada en la simulación del altavoz “Woofers” de la geometría 4 es de calibre 30 AWG.

Se ha llegado a esta conclusión realizando el siguiente estudio:

En la referencia [35] se ha encontrado repuesto para este tipo de altavoces. Las medidas presentadas son las que se muestran en la ilustración 104:

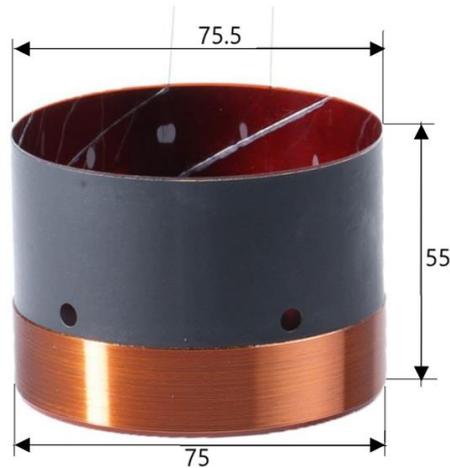


Ilustración 104 Bobina usada en altavoces Woofer con calibre 30 AWG
(Fuente: [36])

Según las cotas que se muestran en la imagen, obtenemos la siguiente relación con el diámetro del bobinado:

$$2 \cdot D = 75.5 - 75 \rightarrow D = 0.25$$

Al acudir a la fórmula de conversión de diámetro al calibre estadounidense que emplea nuestro programa: [30]

$$0.25 = 0.005 \cdot \left(\sqrt[39]{92} \right)^n \cdot 25.4 \rightarrow n = 6$$

Este calibre equivale a:

$$n = 6 = 36 - X \rightarrow X = \mathbf{30 \text{ (AWG)}}$$



CAPÍTULO 5: ESTUDIOS REALIZADOS

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos a partir de la construcción de diferentes geometrías en el software FEMM y el análisis correspondiente. Estos ensayos proporcionan una valiosa oportunidad para examinar el comportamiento de distintas configuraciones geométricas en relación con los fenómenos estudiados. Mediante la ejecución de una serie de experimentos, se evalúan y comparan los resultados obtenidos, con el objetivo de obtener una comprensión más profunda de los efectos de las variaciones en la geometría sobre los resultados obtenidos en el análisis. Este capítulo presenta los detalles de los ensayos realizados, así como los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas de ellos, con el fin de proporcionar una visión integral de la influencia de la geometría en el fenómeno de estudio.

Todas las geometrías se construyen en el programa de elementos finitos (FEMM 4.2), bajo la elección de problema de tipo “Magnetics Problem” y siguiendo los pasos que se han explicado anteriormente en el capítulo 3 de este documento.

5.1. GEOMETRÍA 1: Circuito magnético nº 1

5.1.1. CONSTRUCCIÓN

Esta geometría de tipo planar está formada por 4 bloques que experimentarán diversas modificaciones en su composición. Inicialmente, los bloques estarán constituidos por materiales macizos y luego se formarán con diferentes tipos de laminaciones de chapas (algunos de los bloques).

Uno de estos bloques (el bloque 4, ubicado en la base inferior) será la fuente del flujo magnético. Inicialmente, será un imán y posteriormente se suprimirá el imán y se rodeará de una bobina alimentada en primer lugar por corriente continua y posteriormente por corriente alterna.

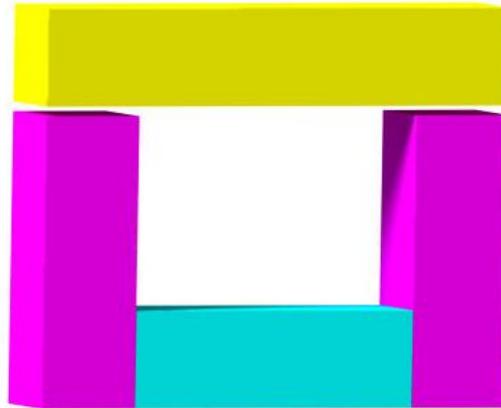


Ilustración 105 Geometría 1
(Fuente: Elaboración propia)



Ilustración 106 Geometría 1 acotada
(Fuente: Elaboración propia)

Las cotas que aparecen en la imagen están en milímetros.

Entre los bloques 1,2 y 3 existe un entrehierro.

En cuanto a las condiciones de contorno, se ha implementado en FEMM la condición de tipo “Prescribed A” especificando el valor de cero al contorno de una circunferencia que engloba toda la geometría. Esta circunferencia se encuentra lo suficientemente alejada de la geometría para no alterar los resultados.

5.1.2. RESULTADOS USANDO IMÁN

Para este ensayo se ha colocado el imán en el bloque 4 de la configuración.

Para el imán, se ha utilizado el material N38 de la biblioteca FEMM 4.2, conocido por sus propiedades magnéticas favorables y su alta retención de magnetismo. Por otro lado, el resto de los bloques del circuito se han simulado utilizando hierro puro recocido a una temperatura de 800°C. Este tipo de hierro recocido proporciona una alta permeabilidad magnética y una menor resistencia eléctrica, lo que lo convierte en un material ideal para completar el circuito magnético.

➤ NÚCLEO MACIZO

Los bloques 1, 2 y 3 se han formado utilizando una estructura de hierro puro macizo. Al llevar a cabo la simulación de la geometría, se ha obtenido el siguiente resultado:

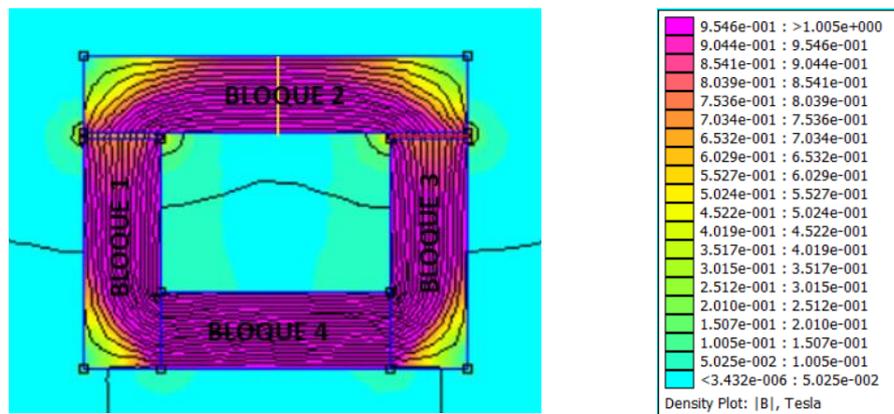


Ilustración 107 Resultado Geometría 1 con imán N38
(Fuente: Elaboración propia)

Se observa como las líneas de flujo concurren perfectamente por el material macizo sin apenas distorsión.

Se ha obtenido una gráfica con el valor de la densidad de flujo ($|\vec{B}|$) en uno de los entrehierros. La recta donde se ha obtenido la gráfica viene identificada en la ilustración 107 por una línea de color rojo.

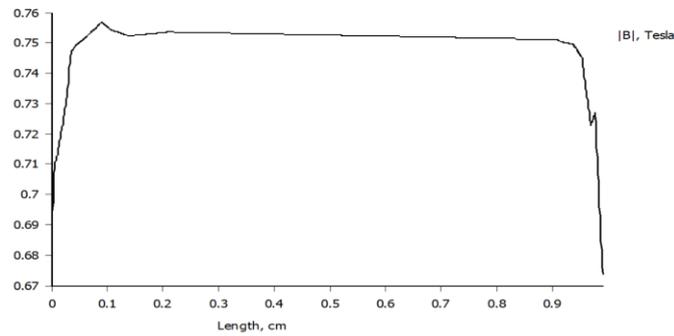


Ilustración 108 Gráfica densidad de flujo en el entrehierro con imán y bloques macizos
(Fuente: Elaboración propia)

Se puede observar que la densidad de flujo en la región central del entrehierro se mantiene relativamente constante, mientras que en los vértices de la línea se va reduciendo gradualmente. En caso de extender los extremos de la línea, se alcanzaría un flujo nulo en los vértices correspondientes.

En otro análisis, obtenemos la gráfica de densidad de flujo (\vec{B}) atravesando la parte central del bloque 2, línea amarilla en la ilustración 107, obteniendo el siguiente resultado:

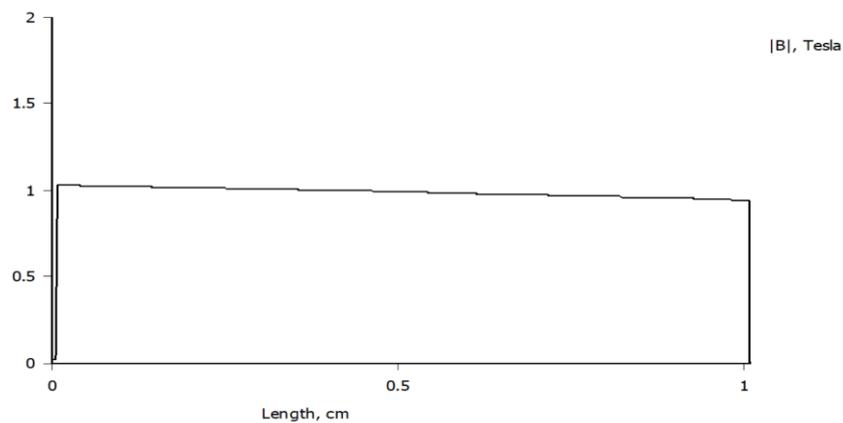


Ilustración 109 Gráfica densidad de flujo en bloque 2 con imán y bloques macizos
(Fuente: Elaboración propia)

En este caso se observa una densidad de flujo constante a lo largo de la sección transversal del bloque con un valor aproximado de 1 Tesla.

Por otra parte, se observa como por los vértices exteriores de los bloques apenas concurre flujo magnético por lo que, de cara a un posible diseño, esa

sección se podría eliminar con el fin de ahorrar material, aunque por otro lado podría suponer un aumento del coste de fabricación.

➤ NÚCLEO LAMINADO

A continuación, se aplicará una laminación al hierro puro, es decir, a los bloques 1,2 y 3, con un espesor de las láminas de 0.025 mm y un factor de apilamiento igual a 0.4.

Se estudia un caso tan extremo con el objetivo de facilitar el estudio del comportamiento del flujo al atravesar un material con dichas características.

- “LAMINATED IN-PLANE”

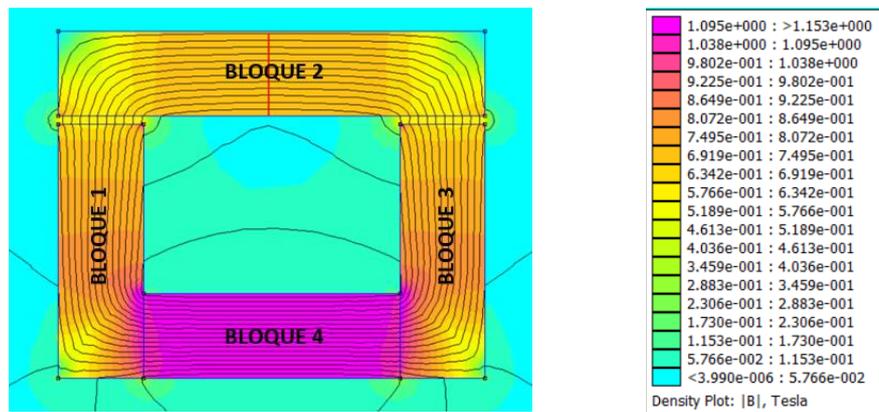


Ilustración 110 Resultado geometría 1 con laminación en 'Laminated in plane'
(Fuente: Elaboración propia)

En este caso se observa un correcto trayecto de la densidad de flujo a través del material. Es decir, sigue el recorrido correcto para cerrar el circuito, pero se percibe una mayor separación entre las líneas. Esto es debido a que la cantidad de aislante entre las láminas es elevada dado que sólo el 40% del núcleo es de hierro.

Con el fin de observar las diferencias con el caso anterior, se obtendrá el valor del flujo a lo largo de la línea transversal del bloque 2, representado por la línea roja.

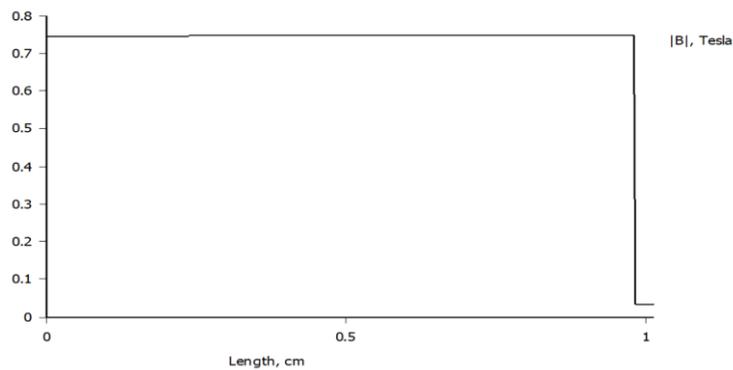


Ilustración 111 Gráfica densidad de flujo en bloque 2 con imán y bloques "laminated in-plane"
(Fuente: Elaboración propia)

En este caso, se puede apreciar que el valor de la densidad de flujo se mantiene constante a lo largo de la sección transversal, pero ha experimentado una disminución hasta alcanzar un valor de 0.75 Teslas. En otras palabras, se ha reducido en 0.25 Teslas en comparación con la configuración que incluía bloques macizos.

- “LAMINATED PARALLEL TO Y (PLANAR) OR Z (AXISYMMETRIC)”

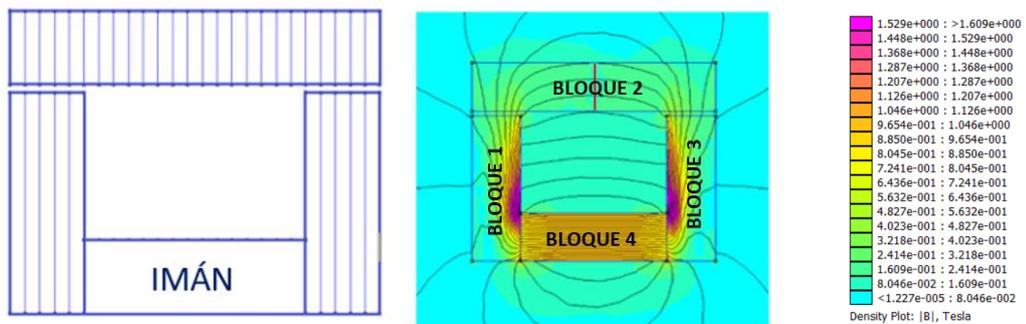


Ilustración 112 Resultado geometría 1 con laminación en 'Laminated parallel to y or z'
(Fuente: Elaboración propia)

Al realizar el registro gráfico del valor del flujo a lo largo de la línea roja señalada en la ilustración 112, se obtiene el siguiente resultado:

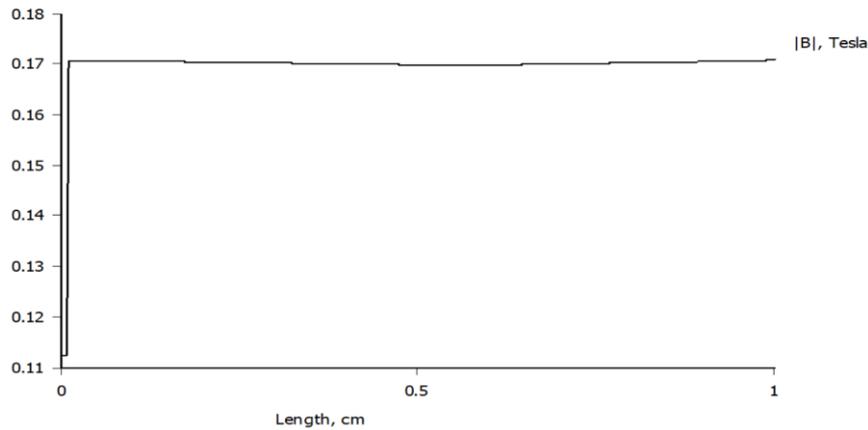


Ilustración 113 Gráfica densidad de flujo en bloque 2 con imán y bloques "laminated parallel to Y or Z"
(Fuente: Elaboración propia)

Observando la gráfica de la ilustración 113, se puede apreciar una notable disminución en el valor de la densidad de flujo, alcanzando los 0.17 Teslas. Esta reducción es considerable en comparación con los casos anteriores.

- "LAMINATED PARALLEL TO X (PLANAR) OR R (AXISYMETRIC)"

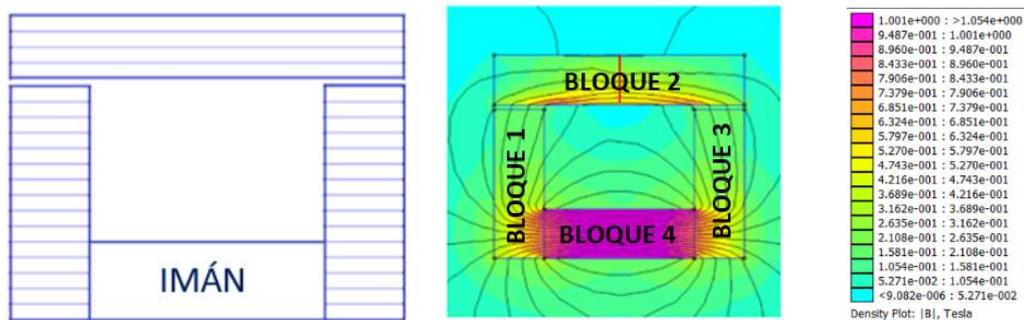


Ilustración 114 Resultado geometría 1 con laminación en 'Laminated parallel to x or r'
(Fuente: Elaboración propia)

Realizamos la misma simulación que en los casos anteriores:

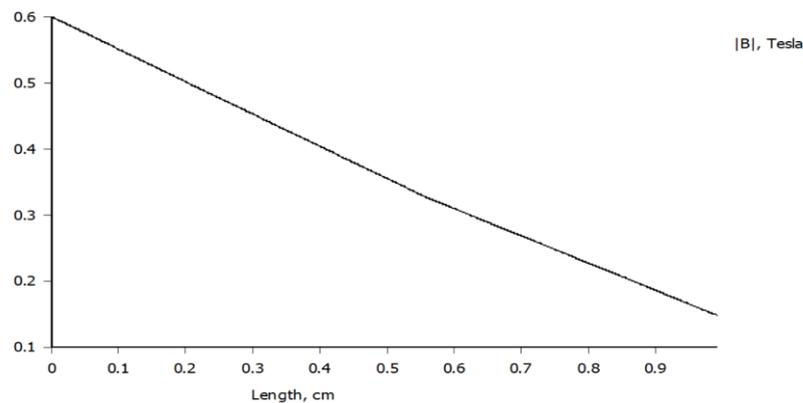


Ilustración 115 Gráfica densidad de flujo en bloque 2 con imán y bloques "laminated parallel to X or R"
(Fuente: Elaboración propia)

En la gráfica de la ilustración 115, se puede apreciar una disminución gradual del flujo a medida que nos acercamos a la parte superior del bloque 2. Este fenómeno se debe a que el flujo enfrenta una mayor resistencia al ascender hacia la zona superior. La disposición horizontal de las placas implica la necesidad de atravesar una mayor cantidad de aislante, lo cual dificulta su paso y resulta en una disminución de la densidad de flujo en esa región.

En estos dos ejemplos de laminaciones se puede observar cómo según la configuración de las chapas verticales u horizontales la reluctancia del circuito magnético varía y el establecimiento del flujo magnético se ve facilitado o perjudicado. La orientación incorrecta de las láminas es una cuestión que se aprecia alguna vez en el análisis de circuitos magnéticos.

En este tipo de circuitos, resulta más ventajoso llevar a cabo una laminación en el plano, como se puede apreciar en la ilustración 111. Si se desea trabajar con una laminación paralela al eje x o al eje y, es recomendable laminar cada bloque en la dirección que beneficie mejor a la circulación del flujo. Un ejemplo ilustrativo se muestra a continuación:

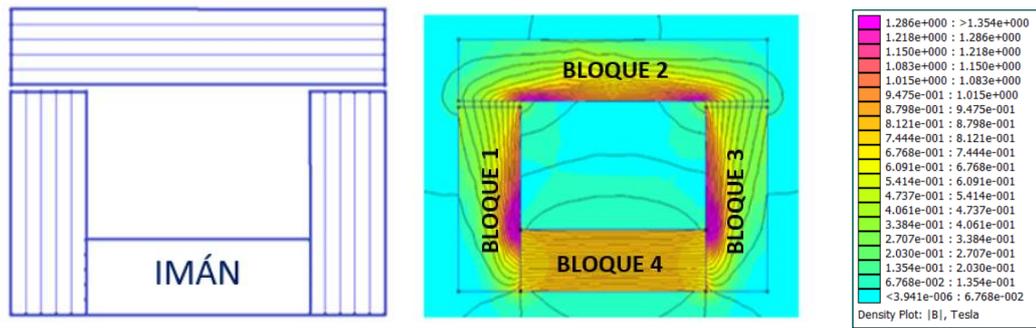


Ilustración 116 Resultado geometría 1 con laminación en diferentes direcciones
(Fuente: Elaboración propia)

En esta ocasión, se puede observar el recorrido del flujo, notando cómo las líneas de inducción se concentran en el borde interno del bloque. Esto se debe a que el flujo tiende a circular por el camino de menor reluctancia. Teniendo en cuenta que se dispone de una capa gruesa de aislante entre las láminas, el flujo encuentra una resistencia considerable al pasar hacia las láminas más externas. Al reducir la cantidad de aislante, es decir, al trabajar con un factor de relleno igual a 0.9, se puede apreciar en la ilustración 117 cómo el flujo se acerca más a los bordes exteriores.

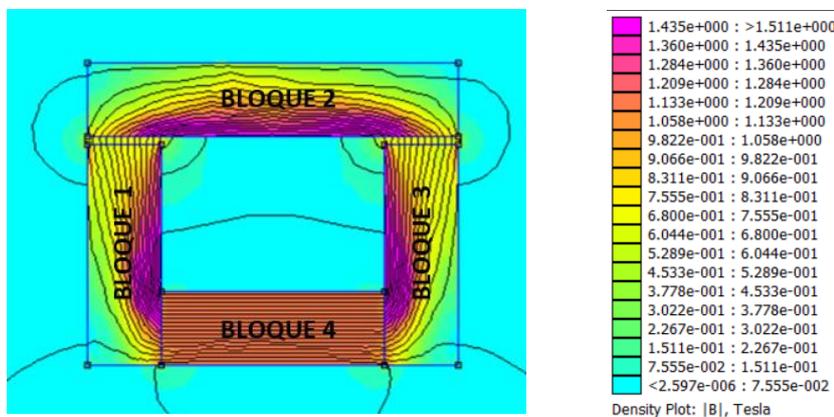


Ilustración 117 Resultando geometría 1 con laminación en diferentes direcciones aumentando factor de relleno
(Fuente: Elaboración propia)

La simulación del circuito con imán se ha llevado a cabo únicamente para corriente continua. Esto se debe a que no tiene sentido físico simularlo en corriente alterna, ya que estamos conectando un imán que se ha caracterizado previamente con un valor de coercitividad, expresado en A/m.

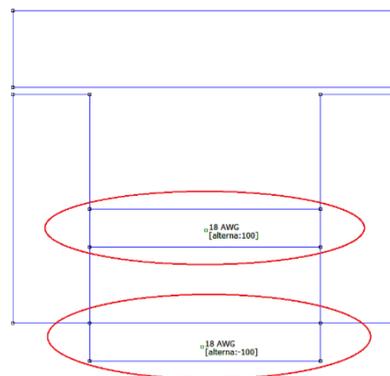
Si se hace la prueba y se configura la frecuencia del problema en un valor distinto de cero y se ejecuta, el programa no aporta ningún resultado, dado que entra en un bucle infinito.

5.1.3 RESULTADOS USANDO BOBINA

Para la formación del circuito magnético, se ha enrollado una bobina al bloque 4 de la configuración.

En primer lugar, se debe crear un circuito. Se ha conectado en serie y tiene 8 amperios de corriente, esa corriente será la que atravesará la bobina.

En este caso es necesario la representación de la bobina en la geometría. Para ello es necesario dibujar en los dos lados paralelos de la geometría, donde se encuentra enrollada la bobina, dos rectángulos como los que se muestra en la ilustración 118.



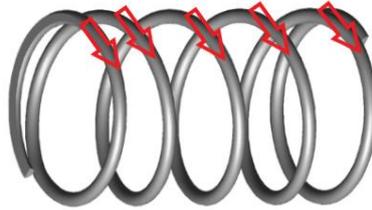
*Ilustración 118 Ejemplo representación bobina en geometría 1 en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)*

Al caracterizar esta geometría se ha añadido el material que se encuentra en la librería de materiales del programa con el nombre: 18 AWG.

Se crean dos rectángulos porque en cada uno de ellos se especifica el número de vueltas que posee la bobina, pero con el signo cambiado. De esta manera estamos indicando al programa en qué dirección circula la corriente a través de la bobina.

Se ha utilizado una bobina con un número de vueltas igual a 100.

La bobina de la ilustración 119 muestra el sentido de circulación de la corriente del ejemplo representado en la ilustración 118.



*Ilustración 119 Ejemplo dirección de corriente en bobina
(Fuente: Elaboración propia)*

Para el núcleo del circuito magnético se han hecho pruebas con dos materiales distintos, uno laminado y otro macizo:

- Para el laminado se ha usado el perteneciente a la biblioteca del programa bajo el nombre “US Steel Type 2-S 0.018 inch thickness”.
- Para el macizo se ha empleado hierro puro recocido a 800 °C

Se han hecho pruebas conectando la bobina a corriente continua y a corriente alterna, utilizando para la corriente alterna una frecuencia igual a 50 Hz.

➤ CORRIENTE CONTINUA

Al simular el circuito en corriente continua se aprecia el mismo comportamiento tanto para un núcleo macizo como para un núcleo laminado. Este comportamiento es el esperado dado que a frecuencia igual a cero no se producen pérdidas de Foucault. Es decir, no es necesario laminar el material para favorecer el flujo. Por lo tanto, para trabajar con corriente continua, se puede elegir indistintamente un núcleo macizo o laminado optando por la opción más económica.

El valor de las pérdidas cuando se trabaja con corriente continua es igual a 0 W. [22]

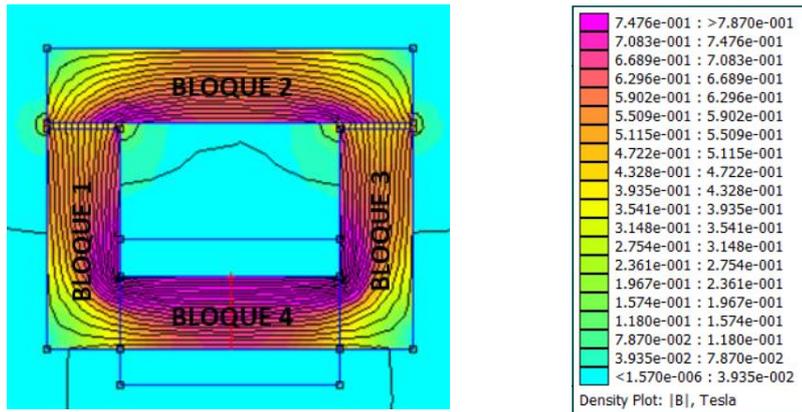


Ilustración 120 Resultado geometría 1 con corriente continua
(Fuente: Elaboración propia)

El valor medio de la densidad de flujo que atraviesa el bloque 4 en su distancia media, es decir, el flujo que atraviesa la línea roja que se observa en la ilustración 120, es igual a 0.747303 T.[22]

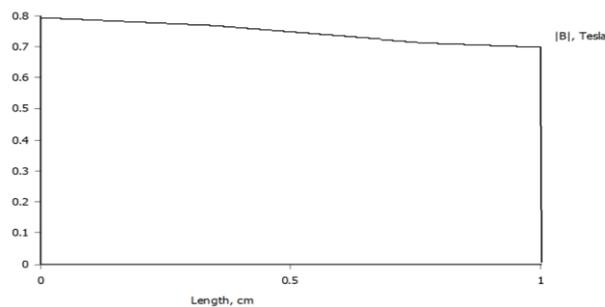


Ilustración 121 Gráfica de densidad a través del bloque 4 de la geometría 1 para curva de imanación no lineal
(Fuente: Elaboración propia)

En la gráfica se observa como el valor de la densidad de flujo es mayor en la arista interna y según va avanzando a la arista externa la densidad de flujo va disminuyendo su valor.

A continuación, vamos a ejecutar el circuito con un núcleo de hierro con una curva de imanación lineal cuyo valor de permeabilidad relativa en ambos ejes es de 5000, por el simple hecho que el Hierro es un material isotrópico, es decir, sus propiedades no dependen de la dirección en la que son examinadas.

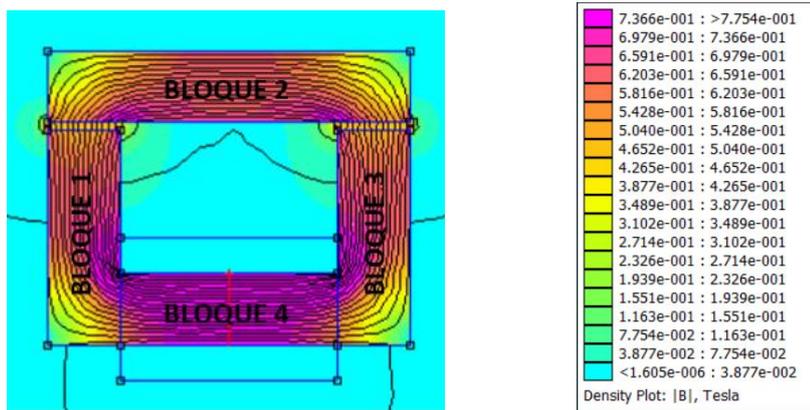


Ilustración 122 Resultado geometría 1 en corriente continua con curva de imanación lineal (Fuente: Elaboración propia)

En este caso el valor medio de la densidad de flujo medida en la misma recta que en el caso anterior tiene un valor de 0.77507 T como se puede apreciar en la ilustración 123. [22]

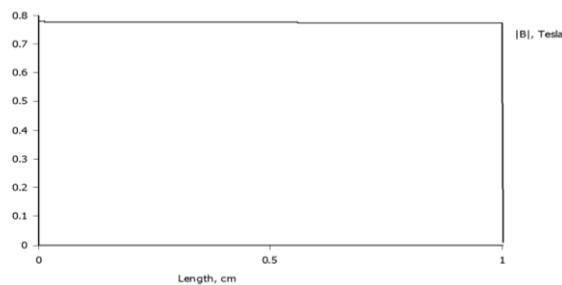


Ilustración 123 Gráfica de densidad a través del bloque 4 de la geometría 1 para curva de imanación lineal (Fuente: Elaboración propia)

En esta ocasión, por el contrario, se observa como la densidad de flujo se conserva constante durante toda la anchura del bloque.

A continuación, se va a realizar la prueba de que el núcleo fuera de acero laminado en frío de grano orientado, es decir, un material anisótropo. Por lo tanto, tendrá valores de reluctancia diferentes en la dirección X y en dirección Y.

El material tendrá un mayor valor de permeabilidad en la dirección en la que haya sido laminado, existiendo una relación entre el porcentaje de permeabilidad respecto la permeabilidad en la dirección de laminación con el ángulo del flujo respecto el eje de laminación.[24]

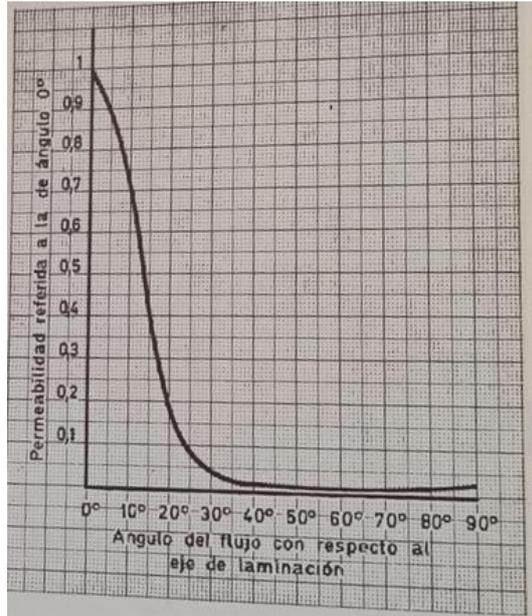


Ilustración 124 Variación de la permeabilidad con el ángulo de las líneas de inducción respecto al eje de laminado
(Fuente: [24])

Para la realización del ejemplo se van a considerar unos valores de permeabilidad en la dirección X igual a 5000 y en la dirección Y igual a 100.

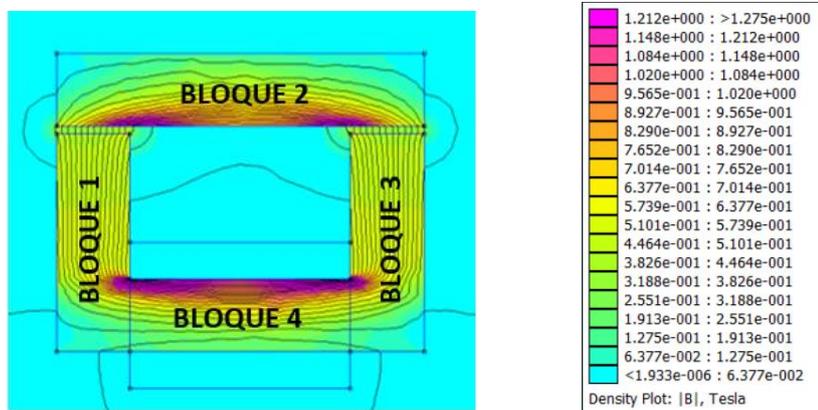


Ilustración 125 Resultado geometría 1 con material anisótropo siendo mayor la permeabilidad en el eje X
(Fuente: Elaboración propia)

En la ilustración 125 se puede apreciar que debido a una mayor permeabilidad en la dirección X, a partir del bloque 4 el flujo es capaz de distribuirse uniformemente a lo largo de los bloques 1 y 3. Sin embargo, al llegar al bloque 2, sucede lo contrario. El flujo no se distribuye de manera uniforme, ya que tiene una mayor facilidad para moverse en el eje horizontal,

lo que resulta en un desplazamiento preferente por la parte inferior del bloque.

Procedemos ahora a examinar el caso opuesto, en el cual se presenta un valor de permeabilidad de 100 en la dirección X y de 5000 en la dirección Y.

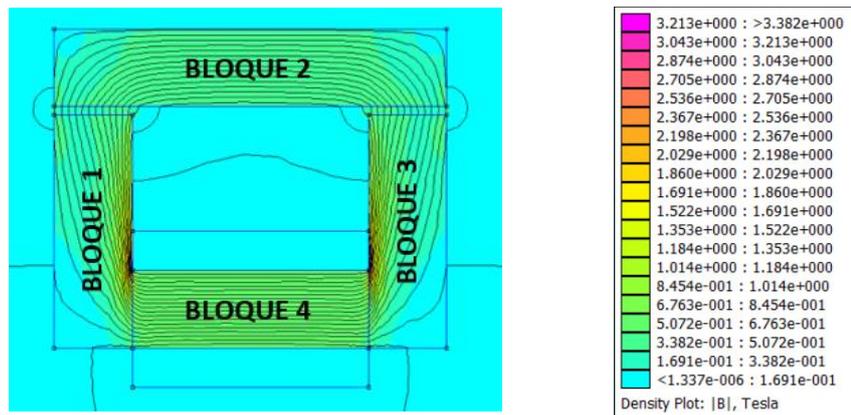


Ilustración 126 Resultado geometría 1 con material anisótropo siendo mayor la permeabilidad en el eje Y (Fuente: Elaboración propia)

Los resultados obtenidos son coherentes y concuerdan con las expectativas. Desde el bloque 4, se observa que el flujo no se distribuye de manera uniforme entre los bloques 1 y 3 debido a su mayor valor de permeabilidad en el eje Y, lo que lo direcciona preferentemente en sentido vertical. Sin embargo, al llegar al bloque 2, se puede apreciar una distribución uniforme a lo largo de toda su sección transversal, generando un flujo homogéneo en el bloque.

➤ CORRIENTE ALTERNA

Al trabajar con corriente alterna, si los bloques del núcleo no están laminados y en su lugar son macizos, se presenta el fenómeno ilustrado en la ilustración 127.

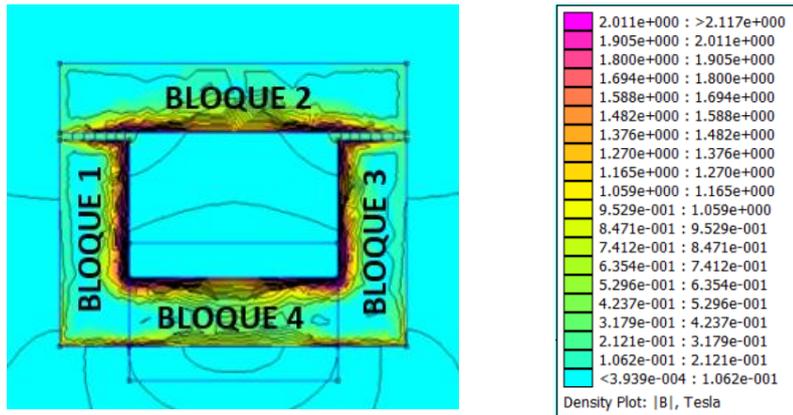


Ilustración 127 Resultado geometría 1 con corriente alterna y núcleo macizo
(Fuente: Elaboración propia)

Se puede comprobar que resulta inviable utilizar un núcleo compuesto por un material macizo al trabajar con corriente alterna. Esto se debe a la aparición de corrientes de Foucault, tal como se describe en la teoría. Por lo tanto, es necesario emplear materiales laminados, como es el caso de “US Steel Type 2-S 0.018 inch thickness”. La simulación se llevará a cabo de acuerdo a la siguiente configuración:

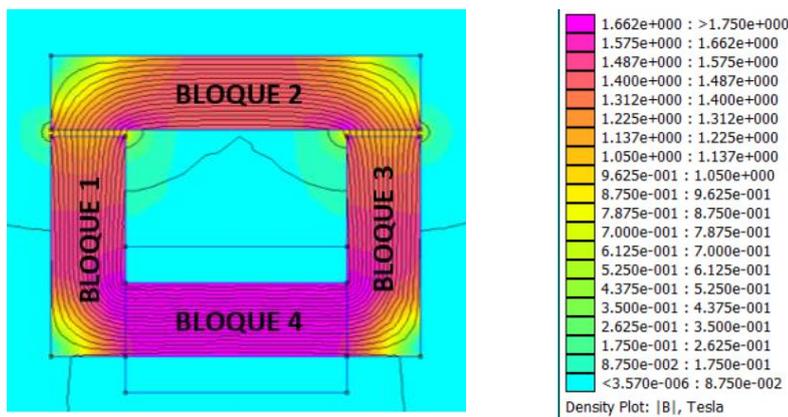


Ilustración 128 Resultado geometría 1 con corriente alterna y núcleo laminado
(Fuente: Elaboración propia)

Se pueden observar que las diferencias son considerables.

- CÁLCULO ÁNGULO DE RETRASO DE HISTÉRESIS

Para corriente alterna, se determinará el ángulo de retraso de histéresis. Este parámetro, se emplea para modelar la pérdida de energía debida a las corrientes de Foucault en un material conductor.

El ángulo de retraso de histéresis representa el desfase entre el campo magnético externo y la densidad de corriente inducida en el material conductor.

Se procederá a determinar el ángulo de retraso únicamente para el hierro puro, ya que el material “US Steel Type 2-S 0.018 inch thickness” de la biblioteca FEMM 4.2 se ha aproximado al M940-50 A según norma UNE-EN 10106 . La información normativa disponible se refiere al último mencionado, y debido a que no son exactamente iguales, pueden existir variaciones en el valor de las pérdidas.

Para proceder al cálculo se debe ir a las especificaciones del material. Esta información se encuentra en el capítulo anterior.

Para una frecuencia igual a 50 Hz, con un valor de $B = 1$ T las pérdidas deben de ser igual a 5.15 W/kg. [25]

Para proceder al cálculo se ha laminado el material con un espesor de chapa igual a 0.63 mm y un factor de laminación igual a 0.95.

Procedimiento: [23]

1. Se ejecuta la simulación con una frecuencia igual a 50 Hz.
2. Se mide el valor de B en el centro del núcleo magnético del bloque número 3 (se puede elegir cualquier bloque, se ha elegido ese arbitrariamente).
Nos da un valor de $B = 0.63$ T.
3. Se cambia el valor de la corriente de la espira hasta que el valor de B en el centro del bloque 3 sea de 1 T. ($I=14$ A)
4. Cuando ya tenemos el circuito con las condiciones de la normativa, es decir, bajo una frecuencia de 50 Hz y con una densidad de flujo igual a 1 T medimos la densidad de pérdidas del bloque número 3.

El valor que adquirimos es igual a 15474.6 W/m³. [22]

Según la normativa, el valor de pérdidas debe ser igual a 5.15 W/kg. Para poder comparar los resultados, es necesario convertir esta unidad a kg/m³. Para ello, utilizaremos la densidad del hierro, la cual es igual a 7874 kg/m³. [25]

$$5.15 \left(\frac{W}{Kg} \right) \cdot \frac{7874(Kg)}{1(m^3)} = 40551.1 \frac{W}{m^3}$$

Se observa que el valor de pérdidas que da el programa es menor a las pérdidas que debería tener según la normativa, por lo tanto, se va aumentando el ángulo de pérdida de histéresis hasta que las pérdidas en el bloque sean de $40551.1 \frac{W}{m^3}$.

El ángulo de histéresis que se ha obtenido ha sido de **20.5 grados** con un valor de densidad de pérdidas igual a **40855.6 $\frac{W}{m^3}$** . [22]

5.2. GEOMETRÍA 2: Circuito magnético nº 2

5.2.1. CONSTRUCCIÓN

Esta geometría de tipo planar consta de tres bloques. En ella se han incorporado dos entrehierros que se encuentran ubicados entre los bloques 2 y 3 en su parte vertical. El bloque 1, por su parte, se utilizará para enrollar la bobina.

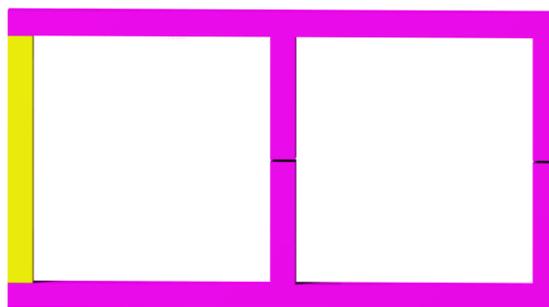


Ilustración 129 Geometría 2
(Fuente: Elaboración propia)

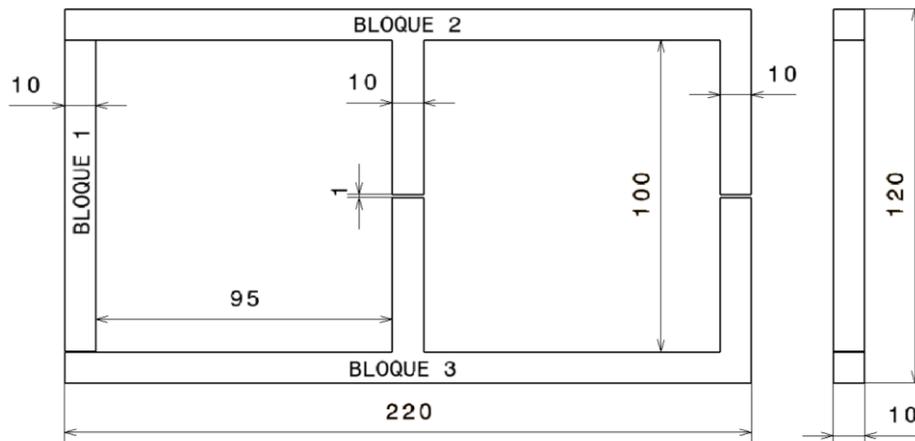


Ilustración 130 Geometría 2 acotada
(Fuente: Elaboración propia)

Las medidas de la geometría son las que se aprecian en la ilustración 130, representadas en milímetros.

En cuanto a las condiciones de contorno, se ha implementado en FEMM la condición de tipo “Prescribed A”. Especificando el valor de cero al contorno de una circunferencia que engloba toda la geometría. Esta circunferencia se encuentra lo suficientemente alejada de la geometría para no alterar los resultados.

Se ha creado un circuito en el que se ha establecido una conexión en serie con una corriente de 8 amperios. Esta corriente será la que atraviese la bobina en el sistema. En la imagen adjunta, denominada ilustración 131, se han representado visualmente los rectángulos que simbolizan la presencia de la bobina en la geometría.

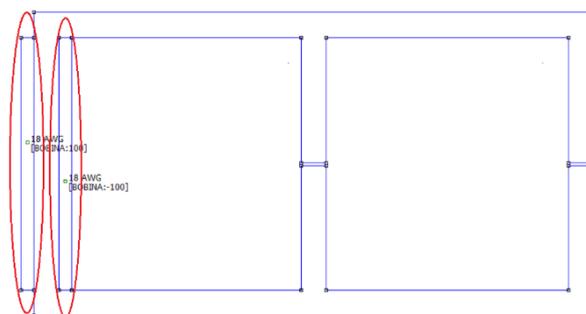


Ilustración 131 Ejemplo representación bobina en geometría 2
(Fuente: Elaboración propia)

La bobina tiene un número de vueltas igual a 100.

El material utilizado para las bobinas es el que se encuentra en la librería de materiales del programa y se denomina “18 AWG”. En cuanto al núcleo del circuito magnético, se ha utilizado Hierro Puro recocido a una temperatura de 800°C. No se ha requerido el uso de un material laminado, ya que las pruebas se han realizado con corriente continua.

5.2.2 RESULTADOS

En la siguiente geometría se va a estudiar la respuesta del circuito al variar la distancia del entrehierro. Si se conecta una bobina y los entrehierros del circuito son los del diseño ideal, el resultado de la simulación es el siguiente:

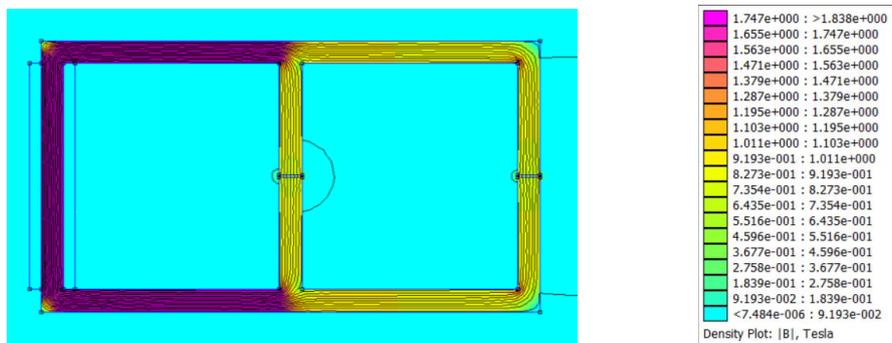


Ilustración 132 Resultado geometría 2
(Fuente: Elaboración propia)

Se observa como el flujo sale de la vertical desde donde se enrolla la bobina y fluye por el núcleo hasta encontrarse con la primera división. Al tener ambas divisiones el mismo entrehierro y por lo tanto la misma reluctancia el flujo se divide en partes iguales hasta cerrar el circuito.

A continuación, se va a observar lo que ocurre al aumentar cada uno de los entrehierros por separado:

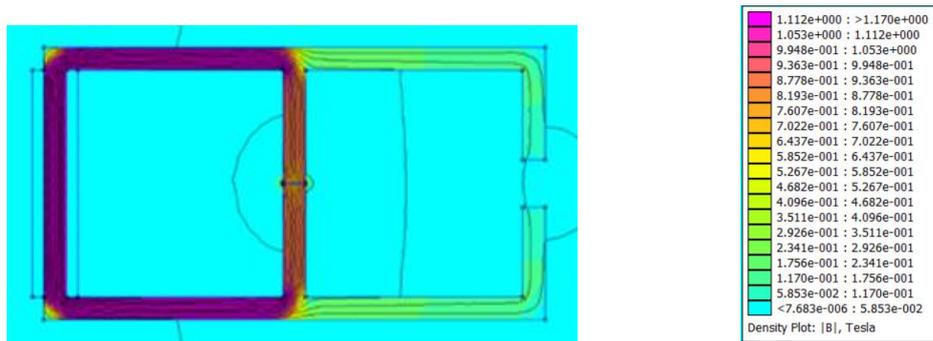


Ilustración 133 Resultado geometría 2 variando distancia de los entrehierros (1)
(Fuente: Elaboración propia)

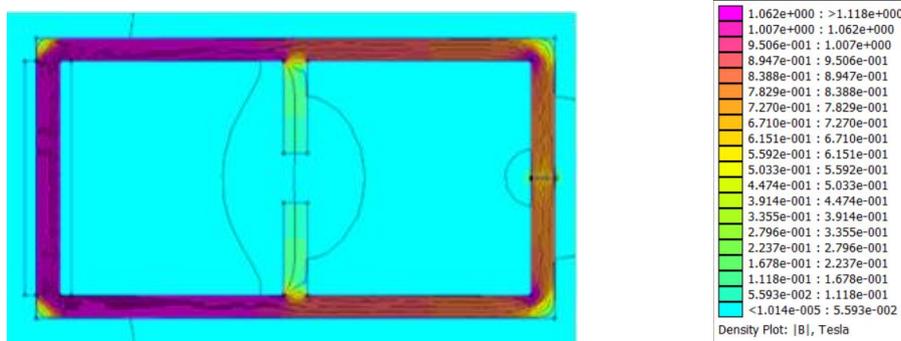


Ilustración 134 Resultado geometría 2 variando distancia de los entrehierros (2)
(Fuente: Elaboración propia)

En ambas imágenes se observa como el flujo toma el camino con un entrehierro menor dado que es el camino donde la reluctancia es menor.

En el siguiente caso se presenta la geometría sin entrehierro:

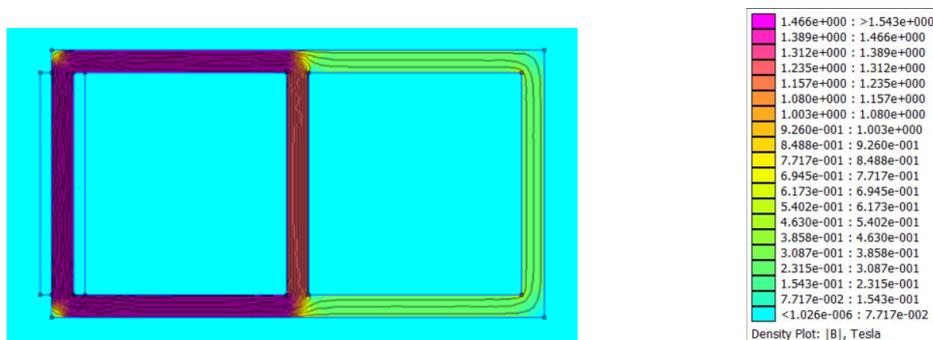


Ilustración 135 Resultado geometría 2 sin entrehierros
(Fuente: Elaboración propia)

A pesar de no disponer de entrehierro en ninguna de las verticales el flujo no se divide en dos por ambos caminos, sino que la mayoría de este se dirige por el camino más corto dado que posee menos reluctancia que el otro ya que su longitud es menor, tal como recoge la fórmula de reluctancia en circuitos magnéticos: [13]

$$R = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

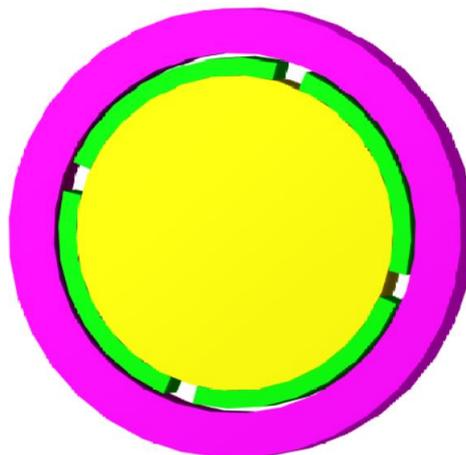
Ecuación 30 Reluctancia en circuitos magnéticos

5.3. GEOMETRÍA 3: Motor con imanes

5.3.1. CONSTRUCCIÓN

La geometría que se presenta a continuación es un problema planar y representa un motor de imanes permanentes. [23]

Está formada por un rotor, de color amarillo, un estator, de color morado y cuatro imanes permanentes, de color verde, con un ángulo de 80°.



*Ilustración 136 Geometría 3
(Fuente: Elaboración propia)*

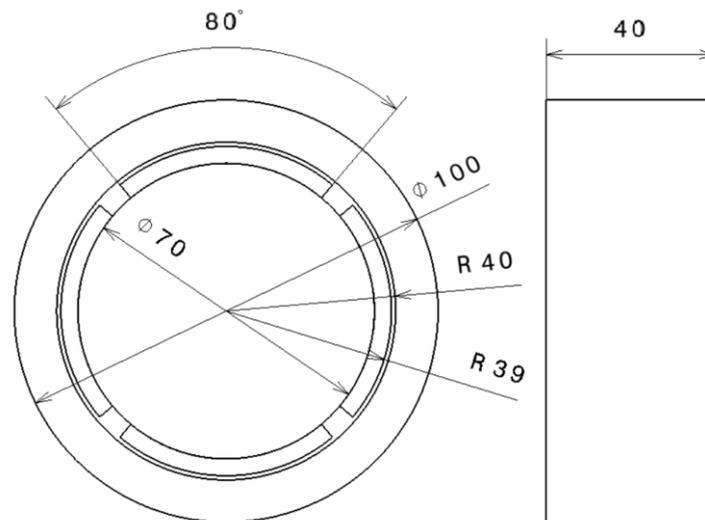


Ilustración 137 Geometría 3 acotada
(Fuente: Elaboración propia)

Las medidas que se muestran en la ilustración 137 están representadas en milímetros.

Se ha empleado una condición de contorno de tipo “Prescribed A” con un valor del vector potencial magnético A igual a cero, asignado a la circunferencia del contorno exterior del estator.

Tanto el estator como para el rotor del motor se han construido usando Hierro Puro recocido a una temperatura de 800°C. Este material se ha seleccionado por sus propiedades magnéticas adecuadas y su capacidad para soportar las condiciones de funcionamiento del motor.

En cuanto a los imanes que generan el campo magnético en este motor, se han utilizado cuatro imanes del tipo N38 de la biblioteca de FEMM 4.2. Estos imanes son conocidos por su resistencia superior a la desmagnetización. Su elección se basa en su capacidad para proporcionar un campo magnético estable y potente, que es esencial para el correcto funcionamiento del motor.

5.3.2. RESULTADOS

En la presente geometría se va a llevar a cabo un estudio de la dirección de magnetización en los imanes.

En esta simulación, nos centraremos en dos configuraciones diferentes para la imanación de un imán. En el primer caso, consideramos una imanación

constante, lo que implica que el campo magnético, en el interior del imán, se mantiene con la misma orientación y magnitud en todo momento y en todas las ubicaciones del imán.

En segundo caso, nos adentraremos en una configuración más precisa al utilizar una imanación que se ajusta automáticamente para que siempre permanezca perpendicular a la superficie del imán. Esta configuración resulta especialmente relevante debido a que muchas de las máquinas eléctricas presentes en el mercado incorporan imanes en su superficie dispuestos en forma de arco.[37]

La simulación se va a realizar sobre una máquina permanente que dispone de cuatro imanes permanentes en su superficie en forma de arco de unos 80° , es decir con dos pares de polos.

Al realizar la imanación constante, se seguirá la dirección mostrada en la ilustración 138, donde la magnetización se mantendrá siempre apuntando hacia el polo norte del imán.

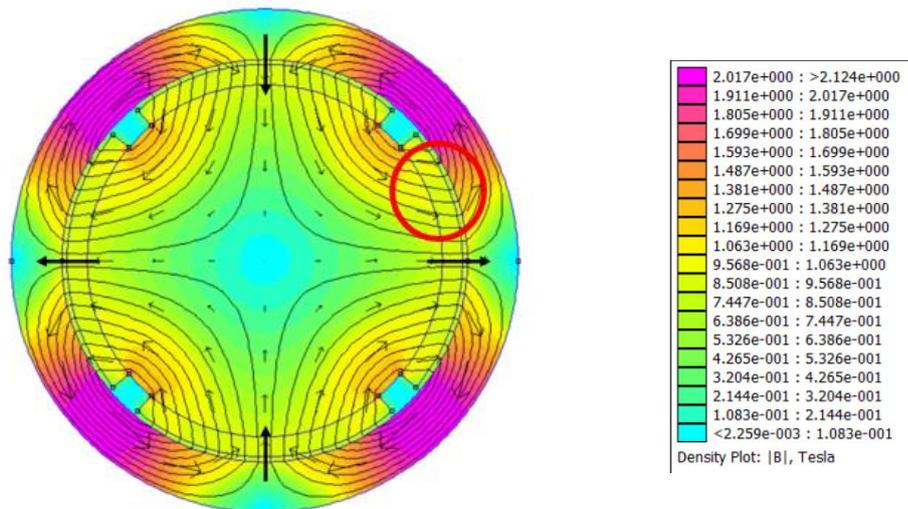


Ilustración 138 Resultado geometría 3 con imanes en dirección radial
(Fuente: Elaboración propia)

Se observa que el flujo de magnetización atraviesa el material de forma transversal, lo que implica que la dirección del flujo no es completamente perpendicular en todas las partes del imán. Esta distribución diagonal del flujo de magnetización sugiere que hay componentes tanto tangenciales como radiales en el campo magnético alrededor del imán. A medida que nos alejamos del centro del imán, la componente tangencial del flujo de

magnetización se hace más evidente, lo que indica que el campo magnético adquiere una dirección más paralela a la superficie del imán.

Sin embargo, en el centro del imán, la componente tangencial se minimiza y el flujo de magnetización se vuelve predominantemente perpendicular al material.

En un segundo lugar, se va a simular una dirección de imanación que se ajusta automáticamente para que siempre permanezca perpendicular a la superficie del imán.

Para indicar la dirección variante en el programa de elementos finitos FEMM 4.2, es necesario distinguir dos casos:

En el primer caso, cuando la dirección magnetizante es hacia afuera de la máquina, se utiliza el término “theta” en la casilla correspondiente de la ventana que se aprecia en la ilustración 139, donde se añade la dirección magnetizante (detallado en el apartado 3.2.9).[21]

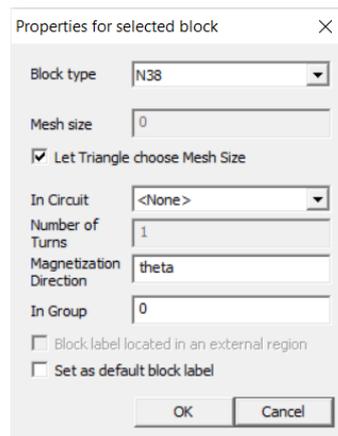


Ilustración 139 Ventana para introducir dirección magnetizante
(Fuente:[22])

Por otro lado, en el caso en el que la dirección vaya hacia dentro, es decir, hacia el rotor de la máquina eléctrica, se le suma 180 grados al término anterior, es decir, “theta + 180”. [21]

En consecuencia, en los imanes ubicados a la derecha e izquierda, el flujo magnético va hacia afuera, por lo tanto, se debe introducir el valor “theta”. Mientras que, en los imanes inferior y superior, se deba añadir el valor “theta + 180” ya que el flujo magnético va hacia dentro.

Una vez cambiada la dirección de magnetización como se acaba de detallar en la ventana de la ilustración 139, se obtiene el siguiente resultado:

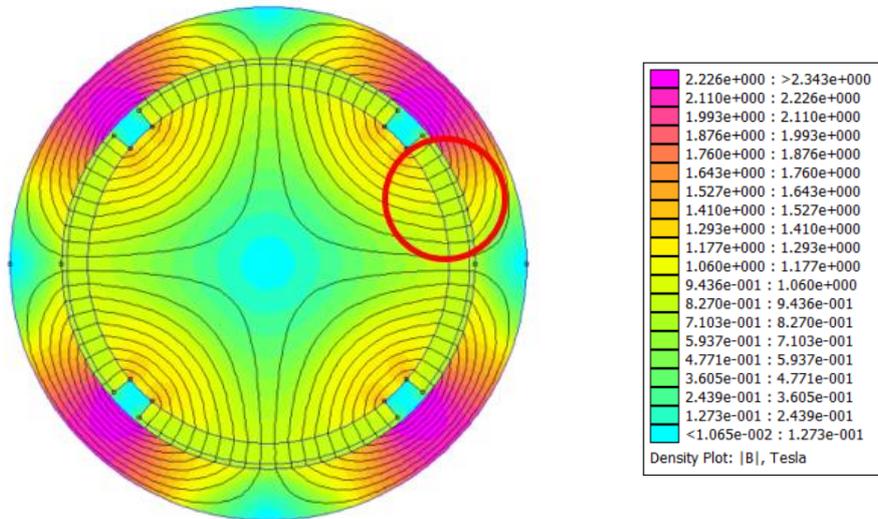


Ilustración 140 Resultado geometría 3 con imanes en dirección tangencial
(Fuente: Elaboración propia)

Se observa que la dirección magnetizante se encuentra en una orientación tangencial a lo largo de las secciones de los imanes.

5.4. GEOMETRÍA 4: Altavoz Woofer

5.4.1. CONSTRUCCIÓN

Esta cuarta geometría que se presenta a continuación es un problema axisimétrico que representa el motor de un altavoz de tipo Woofer inspirado en un ejemplo del tutorial de FEMM 4.2.[38]

Está formado por un núcleo de acero, de color azul, un imán permanente, de color amarillo y una bobina representada de color morado.

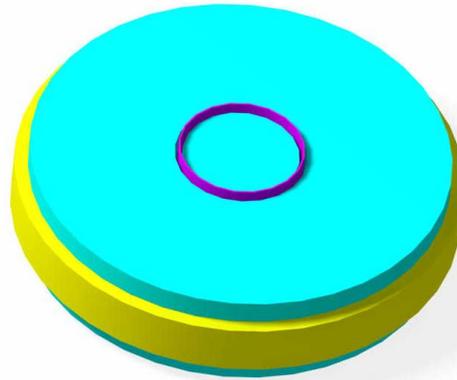


Ilustración 141 Geometría 4
(Fuente: Elaboración propia)

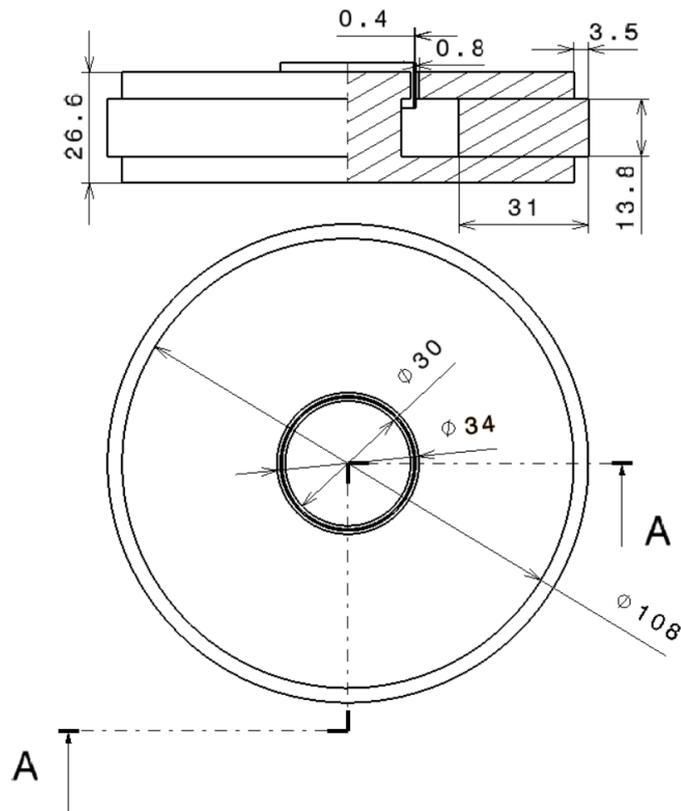


Ilustración 142 Geometría 4 acotada
(Fuente: Elaboración propia)

Las medidas que se muestra en la ilustración 142 están representadas en milímetros.

A continuación, se va a detallar el funcionamiento de un altavoz de este tipo.

El funcionamiento de un altavoz consta de dos etapas fundamentales. En la primera etapa, conocida como etapa de excitación, se utiliza un imán y un núcleo de hierro para crear un campo magnético. La corriente eléctrica circula a través de una bobina ubicada en el entrehierro dentro de este campo magnético, lo que provoca el movimiento de la bobina.

En la segunda etapa, conocida como etapa de reproducción del sonido, el movimiento de la bobina se transmite al cono o diafragma del altavoz. El cono, que está conectado a la bobina, se mueve hacia adelante y hacia atrás en respuesta a dicho movimiento. Este movimiento del cono genera cambios de presión en el aire circulante y produce las ondas sonoras que escuchamos como sonido.

La etapa de reproducción del sonido es esencial para lograr una reproducción precisa y fiel de las frecuencias y detalles sonoros presentes en la señal de audio original. La calidad del altavoz, incluyendo el diseño del cono y la suspensión, influye en la calidad del sonido resultante en esta etapa.[39]

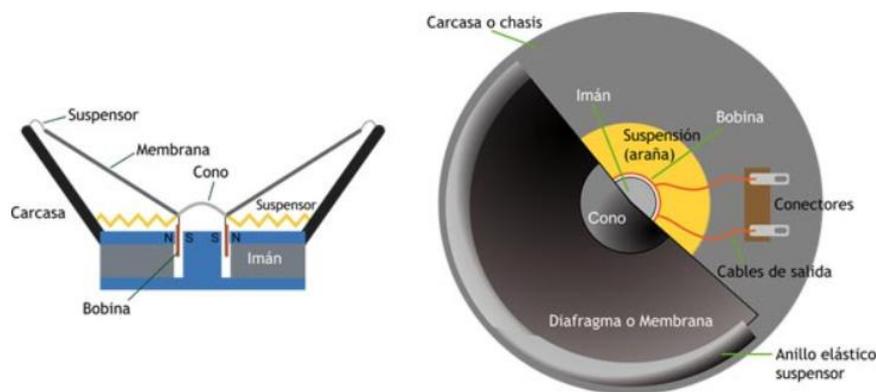


Ilustración 143 Partes de un altavoz tipo Woofer
(Fuente: [40])

Esta geometría es de tipo axisimétrico. En el programa FEMM 4.2 se debe representar únicamente la porción plana que, al ser girada, formará el toroide. (ilustración 144).

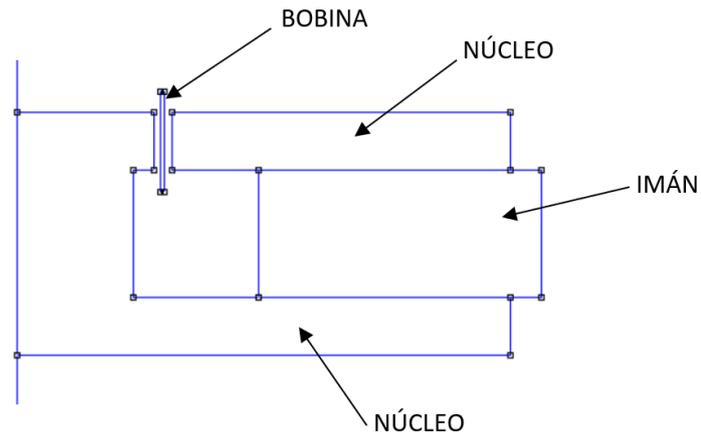


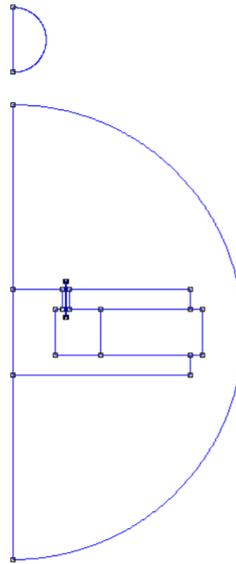
Ilustración 144 Sección de la geometría 4 construida en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

La condición de contorno se ha definido a través de la Transformación de Kelvin que permite realizar la simulación imitando un espacio infinito alrededor de la geometría de estudio.[21]

Cuando se otorga una condición de contorno para realizar la simulación, se define una circunferencia alrededor de la geometría de estudio lo suficientemente alejada, es decir, se trabaja en una región finita del espacio.

Para ello se debe realizar una semicircunferencia alrededor de la geometría y lo suficientemente alejada de ella, y otra semicircunferencia adicional de menores dimensiones encargada de representar la continuidad del campo.[21]

En ambos arcos de las dos semicircunferencias se asigna una condición de contorno tipo “Periodic”. [39]



*Ilustración 145 Geometría 4 con condición de contorno tipo Transformación de Kelvin en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)*

En la construcción de la geometría, se ha utilizado un imán cerámico de grado 5 de la biblioteca de FEMM 4.2. Este tipo de imán se seleccionó por sus propiedades magnéticas adecuadas.

El núcleo utilizado en la construcción es de acero, el cual proporciona una base sólida y resistente para el sistema. El acero es un material comúnmente empleado en aplicaciones magnéticas debido a su alta permeabilidad magnética.

Asimismo, se ha utilizado un alambre de calibre 30 AWG para la bobina. Esta elección se basa en las dimensiones y características requeridas para el funcionamiento.

Estos materiales han sido seleccionados con el propósito de garantizar un diseño adecuado y una funcionalidad óptima de la geometría.

5.4.2. RESULTADOS

En esta última geometría se va a proceder al estudio de un altavoz “Woofers”.

Tras la simulación se observa el siguiente resultado:

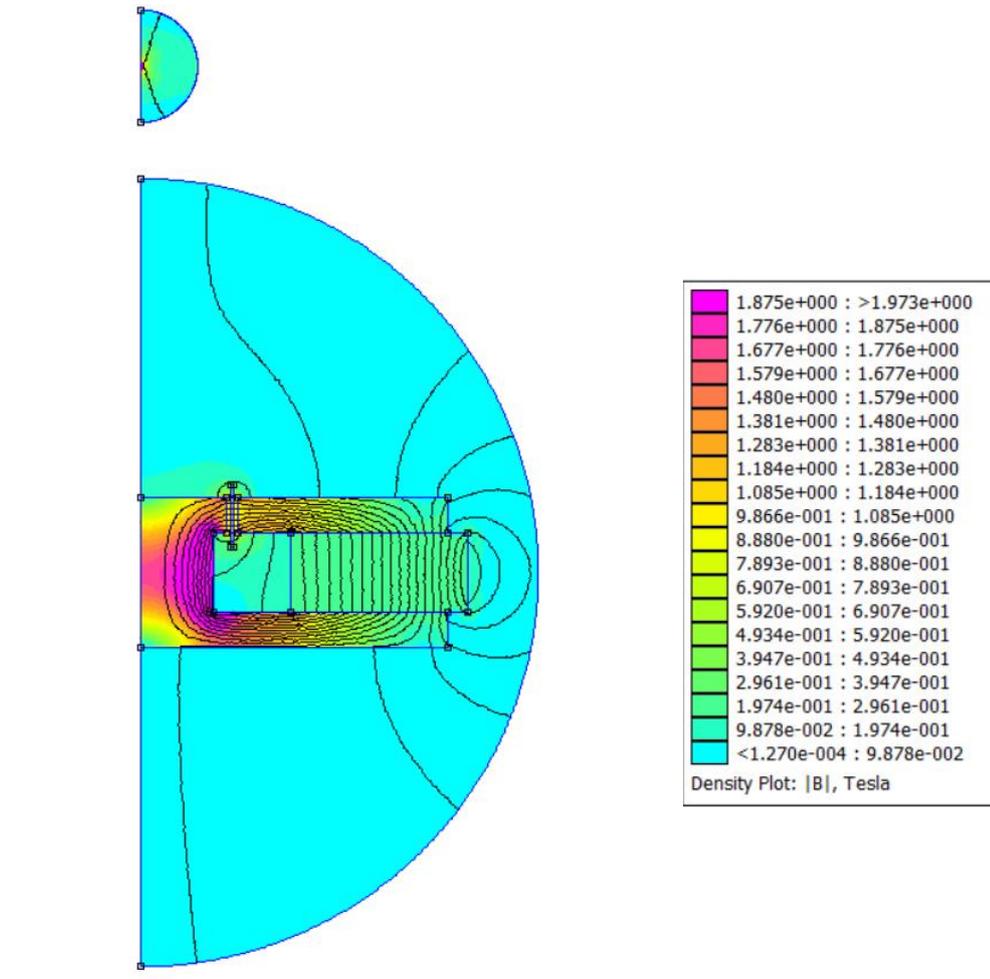


Ilustración 146 Resultado geometría 4
(Fuente: Elaboración propia)

A través de la simulación se van a obtener diferentes resultados:

➤ **CÁLCULO DE GANANCIA ENTRE CORRIENTE APLICADA A LA BOBINA Y FUERZA RESULTANTE SOBRE LA BOBINA**

Esta fuerza se la conoce como la Fuerza de Lorentz sobre un cable portador de corriente. Esta fuerza es la que experimenta la bobina al introducirse en un campo magnético mientras por ella pasa una corriente. Esta fuerza es la que produce el movimiento de la membrana que formará el sonido del altavoz. [38]

Para el cálculo de esta fuerza, en primer lugar, se debe configurar la corriente que pasa por la bobina igual a 1 A. Una vez en el postprocesador debemos

seleccionar la región que comprende la bobina. Y mediante la integral de bloque, se elige en el desplegable la opción “Lorentz force”

La solución que se obtiene es la siguiente: [22]

- r-component: 0 N
- z-component: 7.45254 N

Se comprueba que la fuerza radial es cero al tratarse de un problema axisimétrico.

Se ajustó la corriente de la bobina igual a 1 A para poder determinar la fuerza en función de la corriente que la atraviese.

$$F = 7.45254 \text{ N (para 1 A)}$$

➤ CÁLCULO DE LA RESISTENCIA

La resistencia que tiene la bobina para 1 A de corriente la facilita el postprocesador siendo: [22]

$$R = 3.40127 \Omega$$

➤ FLUJO A TRAVÉS DE LA BOBINA

En este apartado se va a mostrar la gráfica que representa la densidad de flujo a lo largo de toda la bobina. Para ello se realizará la gráfica sobre una recta que atraviese a la bobina por su centro sobresaliendo por ambos lados, en la ilustración 147 se observa la recta sobre la que se ha sacado la gráfica que se mostrará a continuación.

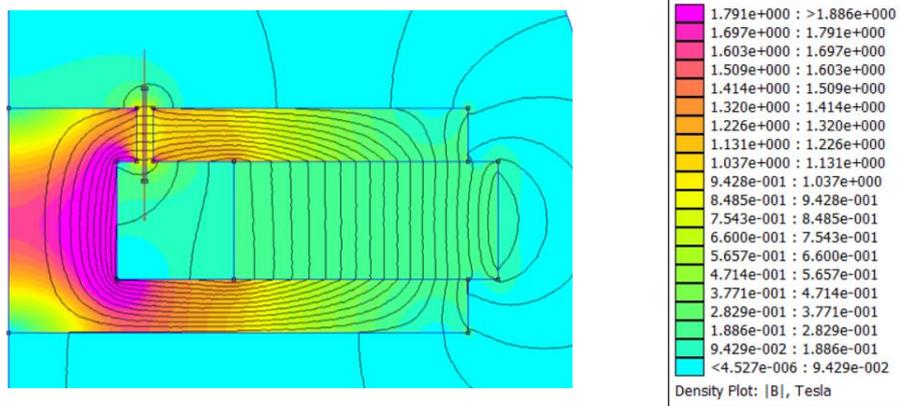


Ilustración 147 Resultado geometría 4 indicada la recta sobre la que se desarrolla la gráfica de flujo
(Fuente: Elaboración propia)

La recta esta trazada de abajo arriba, por lo que la trayectoria de la gráfica es desde la parte inferior de la bobina a la superior.

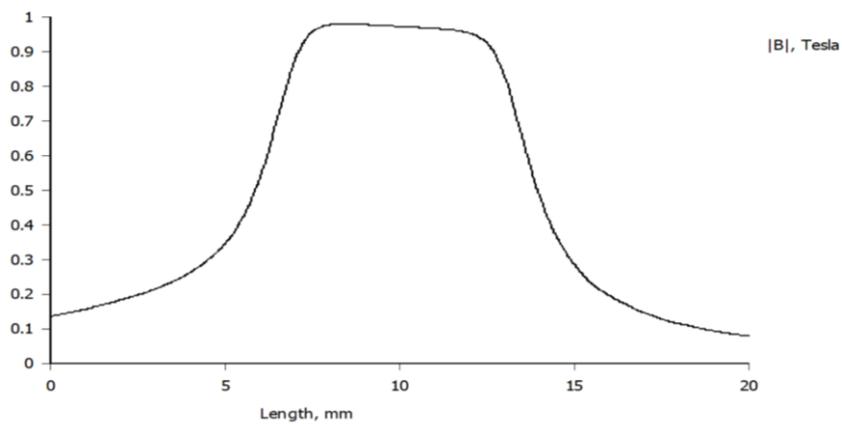


Ilustración 148 Gráfica de flujo a través de la bobina de geometría 4
(Fuente: [22])

Se puede observar que la densidad de flujo es ligeramente más elevada en la parte inferior, por otra parte, la densidad de flujo sigue presente una vez atravesada la bobina.





CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

El uso del software libre FEMM 4.2 de elementos finitos ha demostrado ser conveniente para llevar a cabo estudios magnéticos de manera eficiente.

Los diferentes estudios que se han llevado a cabo, como son la influencia de la geometría del núcleo magnético en el comportamiento del flujo magnético, así como el uso de distintos materiales, su impacto en la eficiencia del circuito y la influencia del tipo de excitación (CC y CA), creemos que son aplicables al ámbito profesional y a la enseñanza

Estos diseños proporcionan una visión más completa y detallada de los circuitos magnéticos y sus características.

Esperamos que este trabajo pueda ser útil como guía introductoria para aquellos interesados en adentrarse en el campo de los circuitos magnéticos, haciendo uso del software FEMM 4.2 como herramienta y análisis.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hernando A, *Introducción a la historia del magnetismo*. 1981.
- [2] Candey R, Young A, y Kovalick T, *NASA's Polar, Wind and Geotail Missions*. Accedido: 19 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://pwg.gsfc.nasa.gov/>
- [3] Williams Pearce L, «André-Marie Ampère», *Sci Am*, vol. 260, n.º 1, pp. 90-97, ene. 1989, doi: 10.1038/SCIENTIFICAMERICAN0189-90.
- [4] Jones B y Faraday M, «The Life and Letters of Faraday - Google Libros». <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=IipWAAAAMAAJ&oi=fnd&pg=PA34&dq=Michael+Faraday&ots=grNNa31WID&sig=78Rz7vTNpoFWwgDNYGfHRgT49cc#v=onepage&q=Michael%20Faraday&f=false> (accedido 7 de abril de 2023).
- [5] Edel A y Pontes S, «A Brief Historical Overview Of the Gaussian Curve: From Abraham De Moivre to Johann Carl Friedrich Gauss», Accedido: 7 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: www.ijesi.org
- [6] Campbell L, «The Life of James Clerk Maxwell - Google Libros». <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=I5MJAAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Jamen+Clerk+Maxwell&ots=cb7PHJvjo5&sig=QgB1G598zFqodxb2JGNRojwvQlc#v=onepage&q=Jamen%20Clerk%20Maxwell&f=false> (accedido 7 de abril de 2023).
- [7] Fraile Mora J, *Electromagnetismo*, 1º. Madrid: IBERGARCETA PUBLICACIONES, S.L., 2015.
- [8] Murillas Rapún M, «Facultad de Ciencias TRABAJO FIN DE GRADO Título: CAMPOS MAGNÉTICOS EN SUPERFICIES».
- [9] Sanz Feito J, *Máquinas eléctricas*, 1º. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A, 2002.
- [10] Carbonell M. V, Floréz M, Martínez E, y Álvarez J, «Aportaciones sobre el campo magnético: Historia e influencia en sistemas biológicos», *Rev. Intropica*, vol. 12, n.º 2, pp. 143-159, 2017.
- [11] Reitz J.R, Milford F.J, y Christy R.W, *Foundations of electromagnetic theory*, 4.ª ed. AddisonWesley Pub. Co., 1913.
- [12] Zemansky S y Freedman Y, *Física universitaria*, Pearson. San Francisco: 13th, 2012.
- [13] Fouillé A, *Electrotecnia para ingenieros*, 1º. madrid: aguilar, 1965.
- [14] Alvarado Silos D. A, «Ecuaciones de Maxwell», *ResearchGate*, junio de 2020. <https://www.researchgate.net/publication/342153868> (accedido 7 de abril de 2023).

- [15] Paz Parra A, *Electromagnetismo para Ingeniería Electrónica*. Pontificia Universidad JAVERIANA, 2013.
- [16] Arranbide I *et al.*, (*Fundamentos de tecnología eléctrica*). UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO, 2013.
- [17] Rodríguez Pozueta M. A, *MATERIALES Y CIRCUITOS MAGNÉTICOS*. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, 2013.
- [18] Universidad de Vigo, «Materiales y propiedades», *Departamento de Tecnología Electrónica*, 2011.
http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/magnetismo_materiales.htm (accedido 7 de abril de 2023).
- [19] Santos Rodríguez J. D, «Propiedades mecánicas y magnéticas de cintas amorfas producidas por enfriamiento ultrarrápido e inducción de anisotropías magnéticas durante su fabricación», 2003.
- [20] «Tecnología Fácil: Electricidad, Electrónica, Informática, etc.»
<https://areatecnologia.com/> (accedido 19 de junio de 2023).
- [21] Meeker D, «Finite Element Method Magnetics», 2015.
- [22] «FEMM ».
- [23] «femm@groups.io | Search».
<https://groups.io/g/femm/search?p=Created%2C%2Cangle+hysteresis%2C20%2C2%2C0%2C0&q=periodic> (accedido 7 de abril de 2023).
- [24] Corrales Martín J, *Cálculo industrial de máquinas eléctricas*. Barcelona: MARCOMBO S.A, 1982.
- [25] Laurent R, *Materiales electrotécnicos modernos*. Barcelona: Gustavo Gili S.A, 1952.
- [26] «VanillaSteel». <https://www.vanillasteel.com/content/steel-grades> (accedido 7 de abril de 2023).
- [27] «norma española», 2016. [En línea]. Disponible en: www.aenor.es
- [28] Serrano Iribarnegaray L y Martínez Román J, *Máquinas Eléctricas*, Cuarta. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, 2013.
- [29] «Goldium Steel CRGO/CRNGO». <http://www.goldium.es/es/crgo-crngo> (accedido 9 de abril de 2023).
- [30] González Torres J. I y González Ortiz J. H, *Área Transversal de un Cable y su Calibre AWG (American Wire Gauge)*, vol. 46. 2013.



- [31] «Tabla de Equivalencias AWG-mm | PDF». <https://es.scribd.com/document/325662895/Tabla-de-Equivalencias-AWG-mm#> (accedido 8 de junio de 2023).
- [32] «Propiedades eléctricas de los materiales: qué son, cuáles, ejemplos». <https://www.lifeder.com/propiedades-electricas-materiales/> (accedido 9 de abril de 2023).
- [33] «Imanes cerámicos / imanes de ferrita / imanes anisotrópicos». http://www.permanentmagnet.com/spain/ceramic_magnet_ferrite_magnet.html (accedido 9 de abril de 2023).
- [34] «IMANES SOLOIMANES - Cerámica». <http://www.soloimanes.com/ceramica> (accedido 9 de abril de 2023).
- [35] «Electronics, Cars, Fashion, Collectibles & More | eBay». <https://www.ebay.com/> (accedido 9 de abril de 2023).
- [36] «Amazon.com». <https://www.amazon.com/> (accedido 19 de junio de 2023).
- [37] Fraile Mora J y Fraile Ardanuy J, *Accionamientos Eléctricos*, vol. 1º. Madrid: Ibergarceta Publicaciones, S.L, 2016.
- [38] «Analysis of a Woofer Motor:Finite Element Method Magnetics». <https://www.femm.info/wiki/Woofer> (accedido 9 de abril de 2023).
- [39] Pantelyat M, Trichet D, Wasselynck G, Bajda Y. I, y Klymenko B. V, «Electromagnetic and thermal transients during induction heating of cylindrical workpieces View project French Korean Cooperation View project Electromagnetic and thermal transients during induction heating of cylindrical workpieces 1», 2018. [En línea]. Disponible en: <http://journal.it.cas.cz>
- [40] «Manual para Radialistas Analfatécnicos». <https://analfatecnicos.net/> (accedido 19 de junio de 2023).