



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

Diseño electromagnético de Máquinas Eléctricas con el programa de elementos finitos FEMM

Autor:

Haro Santos, José Miguel

Tutor:

Serrano Sanz, José Andrés

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Valladolid, septiembre 2021.







RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Grado se efectúa un estudio de diversos conceptos relativos al electromagnetismo, a las máquinas eléctricas y al método de elementos finitos, todo ello orientado hacia el diseño de máquinas eléctricas, con la herramienta de software libre FEMM (Finite Element Method Magnetic).

Se detallan asimismo ciertas particularidades del software FEMM, necesarias para su uso, relacionándolas con conceptos teóricos del electromagnetismo.

También se resuelven tres ejemplos de máquinas eléctricas (un transformador trifásico, una máquina simple de corriente continua en vacío y una máquina de corriente continua más compleja en carga) para mostrar la capacidad de diseño del programa. En el proceso se evaluarán los parámetros más relevantes de las máquinas seleccionadas, así como los resultados de simulación.

Finalmente, en el anexo se adjuntan dos prácticas pedagógicas tituladas "Circuito magnético" y "Máquina de corriente continua".

ABSTRACT

In this Final Degree Project, an analysis of various concepts related to electromagnetism, electrical machines and the finite element method is carried out, all oriented towards the design of electrical machines, with the free software tool FEMM (Finite Element Method Magnetic).

Certain particularities of the FEMM software, necessary for its use, are also detailed, relating them to theoretical concepts of electromagnetism.

Three examples of electrical machines (a three-phase transformer, a simple DC machine on no load, and a more complex DC machine on load) are also solved to show the design capability of the program. In the process, the most relevant parameters of the selected machines will be evaluated, as well as the simulation results.

Finally, in the annex two pedagogical practices entitled "Magnetic circuit" and "Direct current machine" are attached.

PALABRAS CLAVE

Elementos finitos, máquinas eléctricas, diseño, FEMM, manual.

KEYWORDS

Finite Elements, Electrical machines, design, FEMM, manual.





CONTENIDO

Resumen	3
ABSTRACT.....	3
Palabras Clave	3
Keywords.....	3
Índice de FIGURAS.....	7
Índice de tablas	9
1. Introducción y objetivos	11
2. Principios básicos del electromagnetismo	12
2.1. Definición de magnitudes fundamentales	12
2.1.2. Campo Eléctrico.....	13
2.1.3. Densidad de corriente J	13
2.1.4. Intensidad de corriente I	14
2.1.5. Permitividad	14
2.1.6. Campo magnético.....	15
2.2. Leyes del electromagnetismo	16
2.3. Ecuaciones diferenciales relevantes para FEMM	19
2.3.1. Problemas magnetostáticos	19
2.3.2. Problemas electrostáticos.	20
2.3.3. Problemas magnéticos de baja frecuencia	20
2.3.4. Problemas Térmicos.....	20
2.4. Clasificación del magnetismo	21
2.4.1. Introducción	21
2.4.2. Tipos de magnetismo	21
2.6. Ciclo de histéresis.....	25
2.6.1. Curva de Imanación en FEMM.....	28
3. Método de los elementos finitos.....	30
3.1. Introducción y definición	30
3.2. Fundamento teórico	30
3.2.1. Elementos nodos y mallas	34
3.2.2. Etapas del MEF.....	34
4. Software FEMM	36
4.1. Introducción	36
4.2. Preproceso	37
4.2.1. Interfaz: Diseño con FEMM.....	38



4.2.2.	Interfaz: Propiedades de los materiales	41
4.2.3.	Malla	43
4.3.	Proceso	44
4.4.	Postproceso.....	44
4.4.1.	Medidas de punto.....	44
4.4.2.	Medidas de línea	45
4.4.3.	Medidas de flujo	46
4.5.	Condiciones de contorno.....	47
4.5.1.	Condiciones de contorno para problemas magnéticos y electrostáticos 48	
4.5.2.	Condición de contorno para problemas de flujo de calor.....	49
4.6.	Lua Script	50
4.7.	Problemas electromagnéticos a resolver con FEMM	51
4.7.1.	Circuitos magnéticos. Base de los transformadores	52
4.7.2.	Imanes permanentes. Base para el estudio de campos magnéticos .	56
4.7.3.	Campo magnético giratorio. Base para máquinas rotativas	59
5.	Clasificación de máquinas eléctricas	67
5.1.	Análisis cuantitativo de máquinas eléctricas.....	68
5.1.1.	Transformadores	69
5.1.2.	Máquinas síncronas	69
5.1.3.	Máquinas de corriente continua	70
5.1.4.	Máquinas asíncronas o de inducción	71
6.	Máquinas eléctricas con FEMM	72
6.1.	El transformador	72
6.2.	La máquina de corriente continua.....	79
7.	Conclusiones	88
	Bibliografía	90
	ANEXOS	92
	Anexo 1. Práctica de laboratorio. “Circuito Magnético”	93
	Anexo 2. Práctica de laboratorio. “Máquina de corriente continua”	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: densidad de corriente	12
Figura 2: densidad de corriente.[4].....	14
Figura 3: ley de Gauss para el campo eléctrico [13].	16
Figura 4: ley de Gauss para el campo magnético [13].	17
Figura 5: ley de Faraday [13].....	17
Figura 6: valores de la permeabilidad.....	21
Figura 7: curva de imanación del hierro. Fuente [4].....	25
Figura 8: dominios magnéticos	25
Figura 9: curva de imanación de diversos materiales. Fuente [4].....	26
Figura 10: curva de imanación de diversos materiales. Fuente [4]	26
Figura 11: ciclo de Histéresis modelizado por ordenador	27
Figura 12: menú de modificación, curva de imanación. Fuente [2].....	29
Figura 13: introducción a elementos finitos-Cidesi-Conacyt	30
Figura 14: gráfica precisión/Nº de elementos	31
Figura 15: diseño mecánico de elementos finitos UPV/EHU	33
Figura 16: tipos de nodos. Fuente: Holm, 2002.	34
Figura 17: partes del software FEMM.....	36
Figura 18: interfaz principal FEMM	37
Figura 19: definir la rejilla en FEMM	39
Figura 20: elementos de dibujo en FEMM.....	40
Figura 21: herramientas de dibujo en FEMM.....	40
Figura 22: biblioteca de materiales en FEMM	41
Figura 23: añadir nuevo material a FEMM	42
Figura 24: mallado con “Run mesh generator”	43
Figura 25; visualización propiedades de punto	44
Figura 26: visualización propiedades de línea	45
Figura 27:visualización propiedades de flujo	46
Figura 28: condiciones de contorno.....	47
Figura 29: probleas a resolver con FEMM	51
Figura 30: ejercicio 1.3 página 77 libro máquinas eléctricas J.F. Mora 5ª ed.	52
Figura 31: curva BH en FEMM.....	53
Figura 32: resultados ejercicio 1.3	54



Figura 33: introducción de amperaje para la propiedad Circuits	54
Figura 34: resultados entrehierro ejercicio 1.3.....	55
Figura 35: simulación de un Imán permanente	57
Figura 36: configuración electroimán	58
Figura 37: simulación de un electroimán	58
Figura 38: devanados desfasados 120° eléctricos. Fuente: [4].....	60
Figura 39: f.m.m. de un devanado trifásico [4].....	61
Figura 40: geometría básica para simulación. Fuente: Propia	62
Figura 41: consola Lua con algoritmo para campo giratorio. Fuente: Propia	65
Figura 42: líneas de campo a 90° y 120° Fuente: Propia	66
Figura 43: líneas de campo a 240° y 180° Fuente: Propia	66
Figura 44: clasificación máquinas eléctricas. Fuente [4].....	68
Figura 45: transformador Fuente [4]	69
Figura 46: máquina síncrona Fuente [4]	69
Figura 47: máquina de c.c. Fuente [4].....	70
Figura 48: máquina síncrona Fuente [4]	71
Figura 49: circuito equivalente con valores aleatorios. Fuente: AulaMoisan	73
Figura 50: configuración transformador trifásico en FEMM	77
Figura 51: resultado en FEMM transformador trifásico	78
Figura 52: mallado máquina c.c.....	82
Figura 53: líneas de flujo máquina c.c. vacío	82
Figura 54: flujo entrehierro máquina c.c.	83
Figura 55: construcción máquina c.c. para estudio en carga	85
Figura 56: líneas de flujo máquina c.c. en carga.	86



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: constante dieléctrica. Fuente [4]	15
Tabla 2: permeabilidad relativa. Fuente: [4]	16
Tabla 3: programas de resolución de algoritmos de FEMM.....	44
Tabla 4: semejanza de parámetros electromagnéticos	52
Tabla 5: factores fundamentales de un transformador	72
Tabla 6: datos de transformador de distribución sacados a partir de [9].....	74
Tabla 7: datos de transformador de distribución [8]	76
Tabla 8: placa de características máquina c.c.....	79
Tabla 9: geometría máquina c.c.....	79
Tabla 10: placa de características máquina c.c. en carga	83
Tabla 11: datos geométricos máquina c.c. en carga	84



1. Introducción y objetivos.

El presente Trabajo Fin de Grado trata de realizar el modelado de máquinas eléctricas con el software de elementos finitos FEMM (Finite Element Method Magnetic) y estudiar las funciones de este programa que sirvan de utilidad para su uso en las prácticas del laboratorio de Máquinas Eléctricas.

El análisis y diseño de máquinas eléctricas empleando programas de elementos finitos ya estaba introducido en la asignatura de Máquinas Eléctricas II, con un software profesional (COSMOS/M y COSMOS EMS). Se trata ahora de introducir un programa de libre acceso (FEMM) para facilitar el uso del mismo por parte de los alumnos en las prácticas de esta asignatura, y de alguna otra asignatura de máquinas eléctricas, de distintos grados.

El objetivo principal, es generar unas prácticas de diseño de máquinas eléctricas a través del programa FEMM. Para ello hemos elaborado dos modelos de prácticas de laboratorio que sinteticen el aprendizaje del software libre FEMM.

Para conseguir los objetivos nos planteamos los siguientes hitos:

- Reducción de las instrucciones del manual del programa FEMM para que sean asequibles en el tiempo limitado que se permite para la realización de una práctica de una asignatura cuatrimestral
- Sintetizar los conocimientos imprescindibles de la teoría del análisis magnetostático; valor de la permeabilidad magnética en los diferentes medios y establecimiento de las condiciones de contorno, y su implementación en el programa FEMM
- Análisis de los problemas magnéticos que es capaz de resolver FEMM
- Propuesta de dos prácticas de laboratorio, para la asignatura de máquinas eléctricas.

Comenzaremos el desarrollo del TFG con un breve recorrido por el método de elementos finitos, así como el estudio aplicable de las leyes fundamentales que rigen los campos electromagnéticos y en las que se basa el propio software.

Posteriormente se introduce un tutorial sobre el uso del FEMM, a través de la exposición de los problemas que FEMM es capaz de resolver, centrándonos en el apartado magnetostático. Para finalizar se desarrollan dos ejemplos de diseño de máquinas eléctricas.

Previo a este trabajo se ha realizado un TFG titulado Estudio de Máquinas Eléctricas mediante software de elementos finitos de Alberto Muñoz [19] encaminado a escoger un software libre adecuado para las asignaturas de máquinas eléctricas, que resultó ser FEMM.

La búsqueda bibliográfica relacionada con FEMM ha dado como resultado las siguientes referencias:

- Cálculo de máquinas eléctricas por elementos finitos [15], trabajo muy completo.
- Aplicación del método de los elementos finitos al diseño de una máquina de corriente continua. [16]
- Estudio y simulación mediante software de elementos finitos (femm) de un motor síncrono de imanes permanentes sin escobillas [17]

También se han utilizado las prácticas de la asignatura Máquinas eléctricas II relativas a los programas de elementos finitos [18]

2. Principios básicos del electromagnetismo.

Un campo de fuerzas (o abreviadamente un campo) es una región alterada del espacio, bien vacía, bien ocupada total o parcialmente por algún medio material, en la que se presentan fenómenos físicos que suponen la aparición de fuerzas o pares sobre la magnitud de prueba fundamental del campo [10]. Un **campo electromagnético** es un **campo**, producido por aquellos elementos cargados eléctricamente, que afecta a partículas con carga eléctrica.

Convencionalmente, dado un sistema de referencia, el **campo electromagnético** se divide en una "parte eléctrica" y en una "parte magnética".

2.1. Definición de magnitudes fundamentales.

El origen de todos los fenómenos electromagnéticos, es la existencia de carga eléctrica y el movimiento de la misma. Por medio de un campo electromagnético lo que se pretende, es describir las interacciones entre cargas y elementos de corriente.

2.1.1. Densidad de carga.

Se llama densidad de carga eléctrica a la cantidad de carga eléctrica por unidad de longitud, área o volumen que se encuentra sobre una línea, una superficie o una región del espacio, respectivamente.

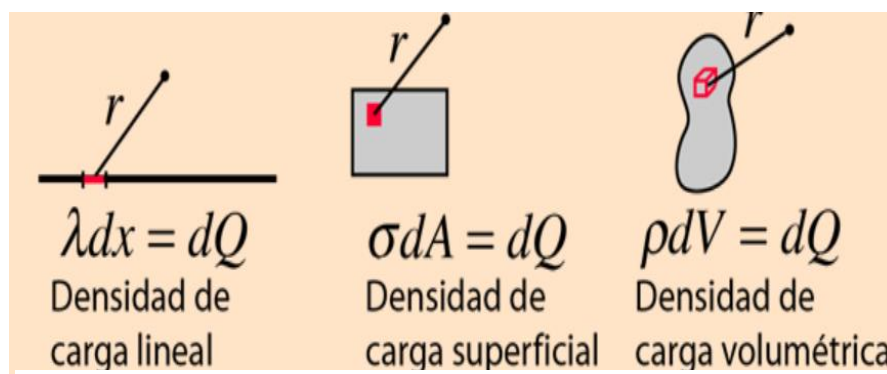


Figura 1: densidad de corriente

DENSIDAD LINEAL

$$\lambda = \frac{Q}{L}$$

Donde Q es la carga encerrada en el cuerpo y L es la longitud. En el Sistema Internacional de Unidades (SI) se mide en C/m (culombios por metro).

DENSIDAD SUPERFICIAL

$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

Se emplea para superficies, por ejemplo una plancha metálica delgada como el papel de aluminio.

donde Q es la carga encerrada en el cuerpo y S es la superficie. En el SI se mide en C/m² (culombios por metro cuadrado).

DENSIDAD VOLUMÉTRICA

$$\rho = \frac{Q}{V}$$

Se emplea para cuerpos que tienen volumen donde Q es la carga encerrada en el cuerpo y V el volumen. En el SI se mide en C/m³ (culombios por metro cúbico).

2.1.2. Campo Eléctrico.

Si se tiene un conjunto de cargas eléctricas y se coloca una carga de prueba inmóvil “q” en esta región, experimentará una fuerza F (newton). Esta fuerza es proporcional a la carga Q, de tal modo que el cociente F/q es un invariante que representa una propiedad local del espacio. El cociente anterior se denomina campo eléctrico E, de tal modo que se cumple:

$$E = \frac{F}{q} [V/m]$$

2.1.3. Densidad de corriente J.

Es de todos conocido que el movimiento ordenado de cargas eléctricas en una cierta dirección provoca lo que denominamos corriente eléctrica.

Supongamos que se tiene una densidad de carga volumétrica ρ y supongamos también que las cargas tienen unas velocidades medias representadas por una función vectorial $\vec{u}(x,y,z)$. Se puede definir una densidad de corriente J en un punto P de la región por la expresión:

$$\vec{J} = \rho_v \cdot \vec{u}$$

2.1.4. Intensidad de corriente I.

La densidad de corriente J es una medida, en el entorno del punto (véase figura 1), de la cantidad de carga eléctrica que atraviesa en una unidad de tiempo, la unidad de superficie normal a u . Si se tiene una superficie S a través de la cual existe movimiento de cargas, el flujo J a través de S , se denomina *intensidad de corriente eléctrica* i :

$$\vec{i} = \int_S \vec{J} dS$$

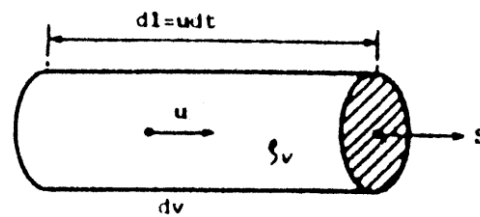


Figura 2: densidad de corriente.[4]

Si relacionamos los conceptos que tenemos hasta ahora nos quedan las expresiones totales que manejaremos de estos tres conceptos:

$$dq = \rho_v \cdot dv = \rho_v \cdot S \cdot u \cdot dt = J \cdot S \cdot dt = i \cdot dt$$

$$i = \frac{dq}{dt} \left[\frac{C}{s} \right] \text{ ó } [A]$$

2.1.5. Permitividad.

La permitividad eléctrica (llamada también constante dieléctrica para dieléctricos homogéneos) es un parámetro físico de los materiales que describe cuánto son afectados por un campo eléctrico. La información del campo eléctrico está contenida en los vectores \vec{E} y \vec{D} , donde \vec{E} es la intensidad y \vec{D} es el desplazamiento eléctrico o densidad de flujo eléctrico. Es este último el que cuenta la influencia del campo sobre un material (análogo al vector \vec{B} del campo magnético el cual es llamado "densidad de flujo magnético" o "inducción magnética" sobre un material).

La permitividad eléctrica del vacío es constante y está dada por

$$\epsilon = 8.8541878176 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2).$$

CONSTANTE DIELECTRICA ϵ_r			
Material	ϵ_r	Material	ϵ_r
Aire	1	Cuarzo fundido	3,8
Petróleo	2,1	Baquelita	5,0
Parafina	2,1	Mica	5,6-6
Teflón	2,1	Porcelana	5,7
Papel	2-3	Diamante	16,5
Aceite	2,3	Agua destilada	80
Tierra seca	3-4	Dióxido de titanio	100

Tabla 1: constante dieléctrica. Fuente [4]

2.1.6. Campo magnético.

El campo magnético es un concepto introducido en electromagnetismo para explicar las fuerzas que aparecen entre corrientes eléctricas. Una carga eléctrica en movimiento produce un campo magnético.

Las propiedades de los materiales son debidas a una propiedad cuántica del electrón que recibe el nombre de momento magnético o spin.

Se define como campo de imanación M de un material, al momento dipolar magnético por unidad de volumen:

$$M = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Sigma m}{\Delta v}$$

El campo magnético como:

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M$$

A su vez la inducción magnética B se define como:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(q\vec{v}) \times \hat{u}_r}{r^2}$$

Y la permeabilidad relativa (μ) es una constante sin dimensiones y se conoce como la capacidad que tienen los materiales, medios o sustancias de afectar y ser afectados por los campos magnéticos, así como la capacidad de convertirse en fuentes de estos, es decir, capacidad para crearlos sin la necesidad de corrientes externas.

Este será uno de los parámetros más importantes en el diseño de máquinas eléctricas. Algunos valores de la permeabilidad relativa son:

PERMEABILIDAD RELATIVA μ_r			
Material	μ_r	Material	$\mu_r = 1 \pm \chi_m$
Ferromagnéticos		Diamagnéticos	
Niquel	250	Bismuto	$1-1,7 \cdot 10^{-4}$
Cobalto	600	Oro	$1-3,6 \cdot 10^{-5}$
Hierro Comercial	4000	Cobre	$1-1 \cdot 10^{-6}$
Hierro alta pureza	$2 \cdot 10^5$	Agua	$1-0,9 \cdot 10^{-5}$
Supermalloy	$1 \cdot 10^6$	Paramagnéticos	
79% Ni; 5% Mo		Aire	$1+3,6 \cdot 10^{-7}$
		Aluminio ...	$1+2,5 \cdot 10^{-5}$
		Paladio	$1+8,2 \cdot 10^{-4}$

Tabla 2: permeabilidad relativa. Fuente: [4]

2.2. Leyes del electromagnetismo.

La conexión de los campos eléctricos y magnéticos con las fuentes de carga y de corriente que los crean viene determinada por una serie de ecuaciones, que recogen diversas leyes experimentales descubiertas por otros científicos recogidas por James Clerk Maxwell en su obra: “*Electricity and Magnetism*” publicada en 1873 y son:

I) Ley de Gauss para el campo eléctrico

"Si en un campo eléctrico consideramos una superficie geométrica cerrada, el flujo eléctrico total que la atraviesa es igual a la carga eléctrica total existente en su interior dividida por la permitividad del medio."

$$\Phi = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

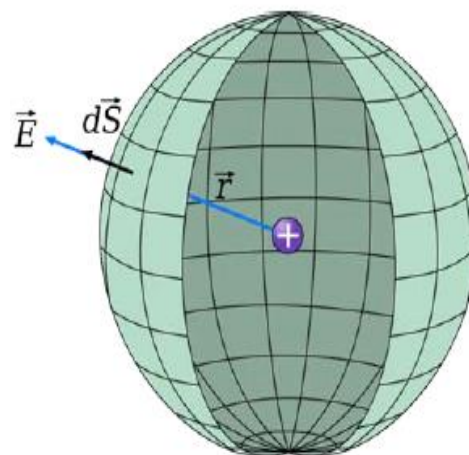


Figura 3: ley de Gauss para el campo eléctrico [13].

II) Ley de Gauss para el campo magnético

"Si en un campo magnético consideramos una superficie geométrica cerrada, el flujo magnético que la atraviesa es siempre igual a cero."

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

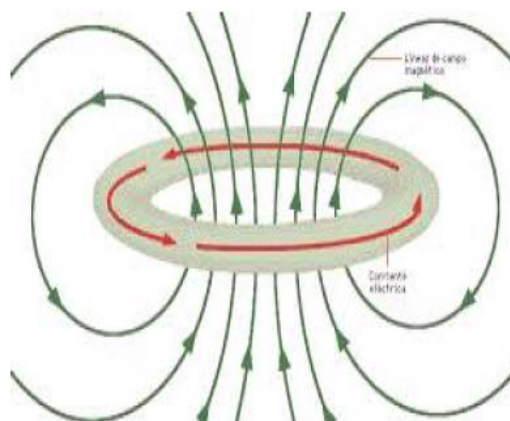


Figura 4: ley de Gauss para el campo magnético [13].

III) Ley de Faraday-Henry

"Toda variación del flujo magnético que atraviesa un circuito cerrado produce en él una corriente eléctrica inducida."

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

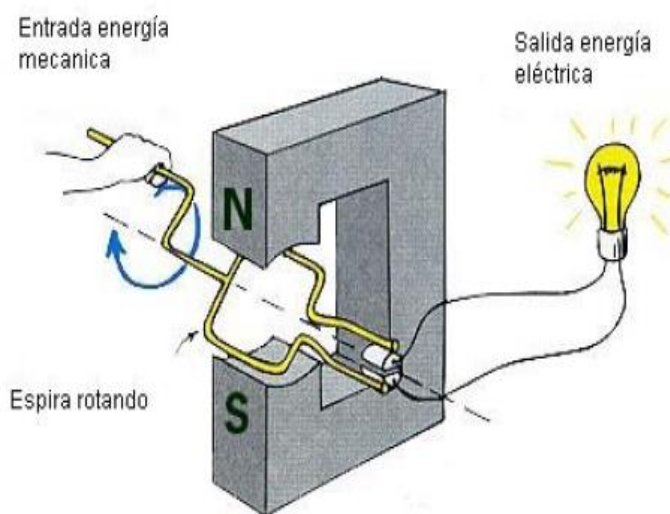


Figura 5: ley de Faraday [13]

IV) Ley de Ampere-Maxwell

"Los campos magnéticos son producidos por corrientes eléctricas y también por campos eléctricos variables."

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oint \vec{E} d\vec{S}$$

En resumen:

Forma integral	Forma diferencial
$\oiint_S D \cdot ds = \iiint_V \rho_v dv = Q_{encerrada}$	$\nabla \cdot D = \rho_v$
$\oint_L E \cdot dl = 0$	$\nabla \times E = 0$
$\oiint_S B \cdot ds = 0$	$\nabla \cdot B = 0$
$\oint_L H \cdot dl = \iint_S J \cdot ds = I_{encerrada}$	$\nabla \times H = J$

La forma diferencial se obtiene aplicando el teorema de Divergencia y el teorema de Stokes a su forma integral.

2.3. Ecuaciones diferenciales relevantes para FEMM.

FEMM aborda algunos casos límite de las ecuaciones de Maxwell. Los problemas magnéticos abordados son aquellos que pueden ser considerados como "problemas de baja frecuencia", en los que las corrientes de desplazamiento pueden ser ignoradas. Las corrientes de desplazamiento son típicamente relevantes para problemas magnéticos solo en radiofrecuencia.

De manera similar, el solucionador electrostático considera el caso inverso en el que solo se considera el campo eléctrico y se desprecia el campo magnético.

FEMM también resuelve problema 2D / axisimétricos de conducción de calor en estado estacionario. Este problema de conducción de calor es matemáticamente muy similar a la solución de problemas electrostáticos.

2.3.1. Problemas magnetostáticos.

Son aquellos en los que los campos magnéticos son invariantes en el tiempo, y las corrientes a frecuencia cero. En este caso, el campo, la intensidad (H) y la densidad de flujo (B) deben obedecer a la ecuación:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}$$

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

Sujetas a una relación constitutiva para cada material:

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

Si un material no es lineal:

$$\mu = \frac{B}{H(B)}$$

FEMM buscará un campo que satisfaga las ecuaciones anteriores a través de un vector de potencial magnético. La densidad de flujo se escribe en **términos del potencial vectorial, A**, como:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$$

Ahora bien, esta definición de B siempre satisface la ecuación $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$, entonces la ecuación $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}$, para un material lineal e isotrópico (y asumiendo el calibre de Coulomb $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$) puede reescribirse:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J}$$

La ventaja de utilizar el vector de potencial A es que todas las condiciones que deben ser satisfechas están siendo combinadas en una sola ecuación.

Encontrando A, B y H pueden deducirse de manera sencilla diferenciando A.

Algunos ejemplos de problemas magnetostáticos:

- Bobinas en corriente continua
- Circuitos con imanes permanentes
- Circuitos en general donde las corrientes inducidas sean despreciables

2.3.2. Problemas electrostáticos.

Son problemas en que aparecen tensiones a frecuencia cero y carga inmóvil. Sólo se considera el campo eléctrico y el campo magnético se desprecia.

Matemáticamente cumple con la ecuación expresada de otra forma:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

2.3.3. Problemas magnéticos de baja frecuencia.

En estos casos la frecuencia es mayor que cero, por lo tanto, los campos varían y se pueden inducir corrientes. El campo eléctrico inducido tiene que cumplir con:

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

Algunos problemas magnéticos:

- Motores de inducción
- Transformadores
- Bobinas acopladas
- Hornos de inducción

2.3.4. Problemas Térmicos.

Son problemas de flujo de calor en régimen permanente. FEMM resuelve la ecuación:

$$-\nabla \cdot (k \nabla T) = q$$

Se utiliza para calcular distribuciones de temperatura, ver puntos más calientes, dimensionar sistemas de refrigeración, etc.

2.4. Clasificación del magnetismo.

2.4.1. Introducción.

En los circuitos eléctricos, la conexión existente entre los elementos pasivos se realiza mediante materiales conductores que obligan a la corriente eléctrica a seguir ciertos caminos, obedeciendo las *leyes de Kirchoff*. Un circuito magnético plantea un problema similar donde se trata de canalizar y concentrar altas densidades de flujo magnético, en las regiones donde se necesita a través de materiales ferromagnéticos. En general los circuitos magnéticos están formados por una estructura de hierro, sobre la que se arrollan una o más bobinas por las que circulan corrientes, que dan lugar a flujos que aparecen en el sistema.

2.4.2. Tipos de magnetismo.

Las propiedades magnéticas macroscópicas de un material lineal e isótropo, se conocen en función de la susceptibilidad magnética χ_m , que es un coeficiente adimensional que expresa la proporcionalidad entre magnetización o imanación M y la intensidad del campo magnético H

Donde μ representa la permeabilidad magnética del medio, y μ_r la permeabilidad relativa, μ_0 es la permeabilidad del vacío.

Los materiales se pueden clasificar según el valor de μ_r :

- **Diamagnéticos:** si $\mu_r \approx 1$ (χ_m es del orden de -10^{-5})
- **Paramagnéticos:** si $\mu_r \approx 1$ (χ_m es del orden de $+10^{-3}$)
- **Ferromagnéticos:** si $\mu_r \gg 1$ (χ_m tiene un valor elevado)

Figura 6: valores de la permeabilidad

2.5. Materiales magnéticos.

En esta clasificación se pueden observar materiales de aleaciones ferrosas que serán las más utilizadas y demandadas en la construcción de máquinas.

Casi todas las aleaciones y compuestos ferromagnéticos contienen uno o más de los siguientes elementos: hierro, cobalto y níquel o de manganeso que son los que presentan a temperatura ambiente y por encima de ella, imanaciones grandes en presencia de campos magnéticos muy débiles (también tierras raras: gadolinio y disprosio)

- **Materiales magnéticamente blandos:** Se caracterizan por su estrecho ciclo de histéresis, de forma que una vez desaparecida la fuerza magnética, estos materiales, pierden pronto sus propiedades magnéticas. Esta característica de “todo o nada” es muy interesante cuando no interesan inercias magnéticas como es el caso de **máquinas eléctricas, transformadores, núcleos de relés, contactores...**

Casi todos los materiales magnéticamente blandos son:

1. Aleaciones hierro-carbono
 - a. Hierro dulce → disminuye pérdidas histéresis, aumenta resistencia a la corrosión (**núcleos de relés, contactores**)
 - b. Acero dulce → Sustituido por el acero al silicio, para reducir pérdidas de histéresis
 - c. Fundición de hierro → magnéticamente inferior al hierro dulce pero más moldeable (**Carcasas de máquinas**)
 - d. Acero colado → empleo en partes de máquinas que estando sometidas a flujos magnéticos uniformes y continuos necesitan resistencia mecánica.
 - e. Acero forjado → órganos de máquinas con altas velocidades periféricas
2. Aleaciones hierro-silicio: La adición de silicio al hierro permite obtener una importante reducción de las pérdidas en el hierro lo que es efecto de dos causas:
 - a. El silicio reacciona con las impurezas, con el consiguiente aumento de permeabilidad y reducción de las pérdidas por histéresis.
 - b. Gracias al silicio estas aleaciones tienen mayor resistividad eléctrica que las aleaciones hierro-carbono, con la consiguiente reducción de las pérdidas por corrientes parásitas.

En general se fabrican en forma de chapas magnéticas de espesores entre 0,35 y 0,5 mm para los núcleos magnéticos de las máquinas eléctricas, según su contenido en silicio:

1. Chapa de transformador → 4 a 5% de Si. Se usa para dispositivos

estáticos(transformadores) por ser quebradiza.

2. Chapa de dinamo → 3 a 4% de Si (fundición gris). Se emplea en los circuitos magnéticos de máquinas rotativas de alta calidad.
3. Chapa de motor → sobre el 2,5% de Si (fundición dúctil). Chapas para motores de mediana y pequeña potencia.
4. Chapa magnética → sobre el 1% de Si (fundición blanca). Motores de corriente alterna de pequeña potencia.
5. Chapa de inducido → sobre el 0,5 % de Si (fundición maleable). Máquinas de corriente continua de pequeña potencia

3. Aleaciones hierro-níquel
4. Aleaciones hierro-cobalto
5. Aleaciones hierro-aluminio

Las tres últimas aleaciones se explican en la referencia [5] de la bibliografía, quedando fuera de este estudio, al no establecerlas en la clasificación de aleaciones ferrosas.

- **Materiales magnéticamente duros:** Los materiales magnéticamente duros deben estar caracterizados por las siguientes propiedades:
 - Moderada o baja permeabilidad
 - Alta fuerza coercitiva
 - Altas pérdidas por histéresis

Precisamente la fuerza coercitiva, los hace muy apropiados para la construcción de imanes permanentes, que constituyen su principal campo de aplicación. Los materiales empleados en la construcción de imanes permanentes por lo general son:

- a) Aceros
- b) Aleaciones especiales
- c) Materiales cerámicos

Se adquieren generalmente al fabricante de acero como productos semiterminados y deben recibir la forma definitiva. Los aceros más utilizados en la práctica son:

- a) Aceros al carbono → Se utilizan para fabricar pequeños imanes. Entre el 0,6 al 1 % de C y 0,3 al 0,8 % de manganeso. Se forjan a 900°C y se efectúa un recocido a 700°C enfriados al aire. El temple se efectúa a 800°C enfriados al agua. Posteriormente se imanar y se les da un tratamiento de envejecimiento en agua hirviendo durante varias horas.



b) Aceros al tungsteno → Contienen aproximadamente de 0,6 a 1 % de C y de 4 a 6% de tungsteno y alrededor de 0,5 % de manganeso; algunas veces se añade hasta un 2% de cromo.

c) Aceros al cromo → Contienen de 0,6 a 1% de carbono, de 1 a 1,5 % de cromo y alrededor de 0,5 % de manganeso. Estos aceros se forjan a 900°C, para someterse después a un tratamiento de recocido a 700°C y de temple a 800°C, con enfriamiento al agua. Tienen características magnéticas parecidas a los aceros al tungsteno con la ventaja de que resultan más baratos.

d) Aceros al cromo-cobalto: Aleaciones con un 10 a 16 % de cobalto, y 9% de cromo. Tienen la ventaja de que pueden mecanizarse fácilmente, por lo que resulta apropiado para la producción a gran escala. Aunque magnéticamente no son tan eficientes, como los aceros al cobalto (36% cobalto, 4% de tungsteno, y 6% cromo), tienen la ventaja de ser más baratos.

2.6. Ciclo de histéresis.

Cuando una muestra de material ferromagnético se coloca dentro de un campo magnético, los dominios tienden a alinearse de tal forma que sus campos magnéticos se suman al campo externo, resultando un campo total más fuerte. Este efecto puede observarse a través de lo que llamamos curva de imanación que relaciona la inducción B resultante en función de la intensidad de campo:

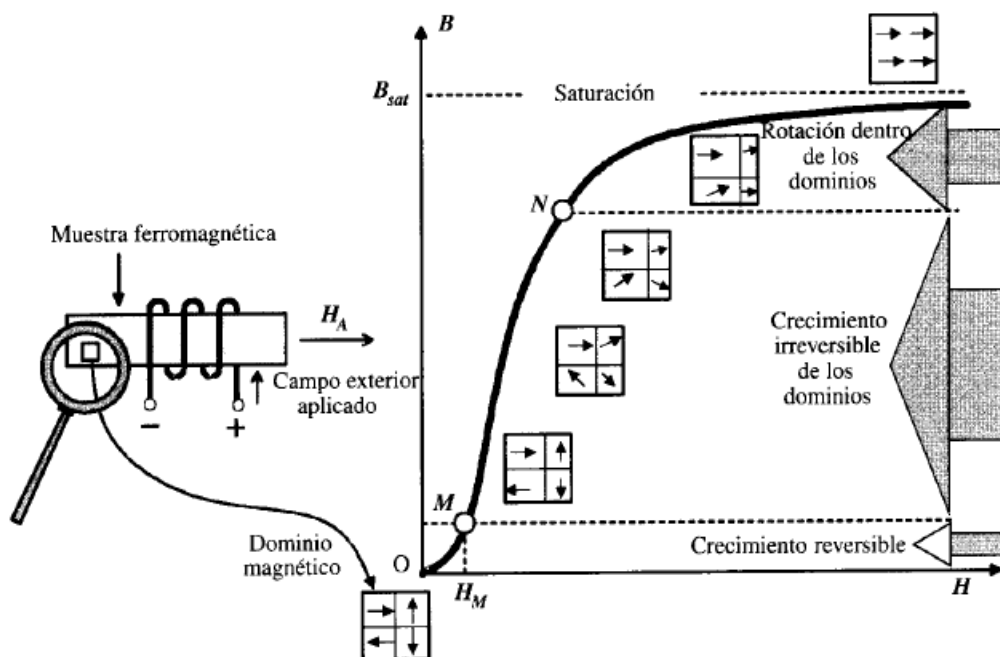


Figura 7: curva de imanación del hierro. Fuente [4]

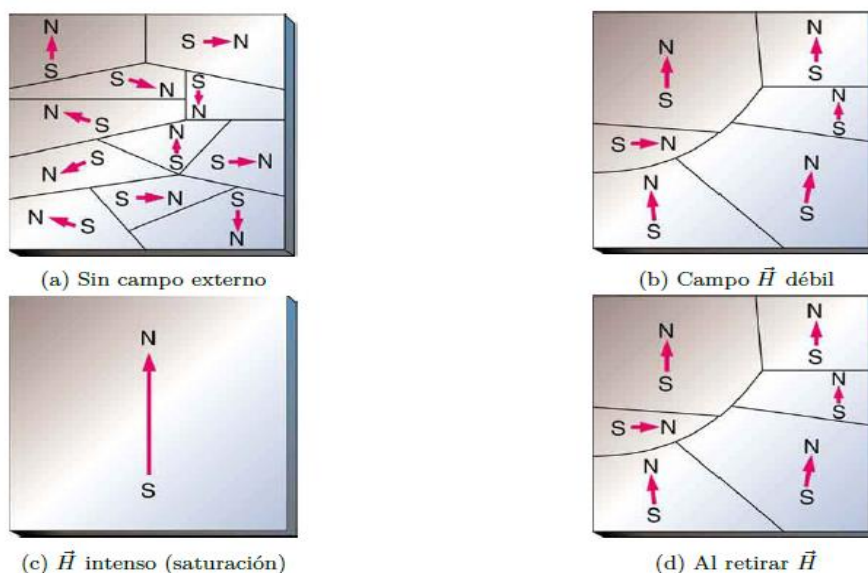


Figura 8: dominios magnéticos para un material ferromagnético en presencia o no de campo magnético

Para resolver ejercicios prácticos conviene utilizar una expresión analítica que relacione B con H. Una ecuación típica utilizada es la ecuación de Fröelich

$$B = \frac{aH}{1 + bH}$$

Que eligiendo unos valores adecuados de a y b pueden asemejarse a las curvas reales. En casos reales será conveniente utilizar las curvas de magnetización que proporciona el fabricante.

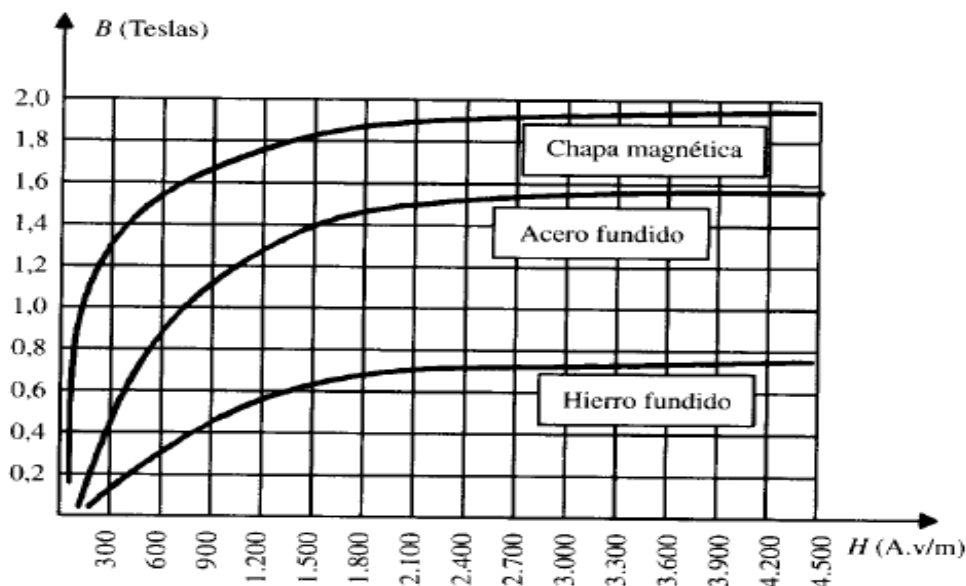


Figura 9: curva de imanación de diversos materiales. Fuente [4]

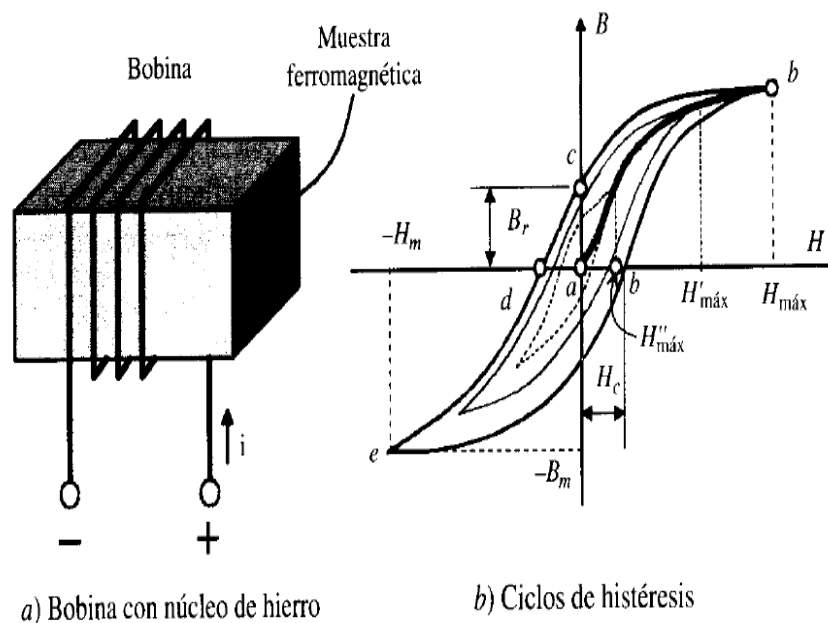


Figura 10: curva de imanación de diversos materiales. Fuente [4]

Se parte de un material desmagnetizado indicado por el punto a (figura 2.10 b) y se aplica un campo H creciente, hasta que se alcanza el punto b. Cuando se hace disminuir H , se reduce el valor de B , pero según un camino diferente. Al volver H a cero, persiste cierta magnetización H (punto c). Al valor de B en ese punto se le conoce con el nombre de magnetismo de inducción o remanente y constituye el estado de magnetización remanente de la muestra. El punto d determina el campo coercitivo, que es el campo opuesto que resulta necesario aplicar para desmagnetizar la muestra. Si continuamos hasta el punto e, y después invertimos el sentido de H , llegaremos a formar la curva cerrada denominada **ciclo de Histéresis**.

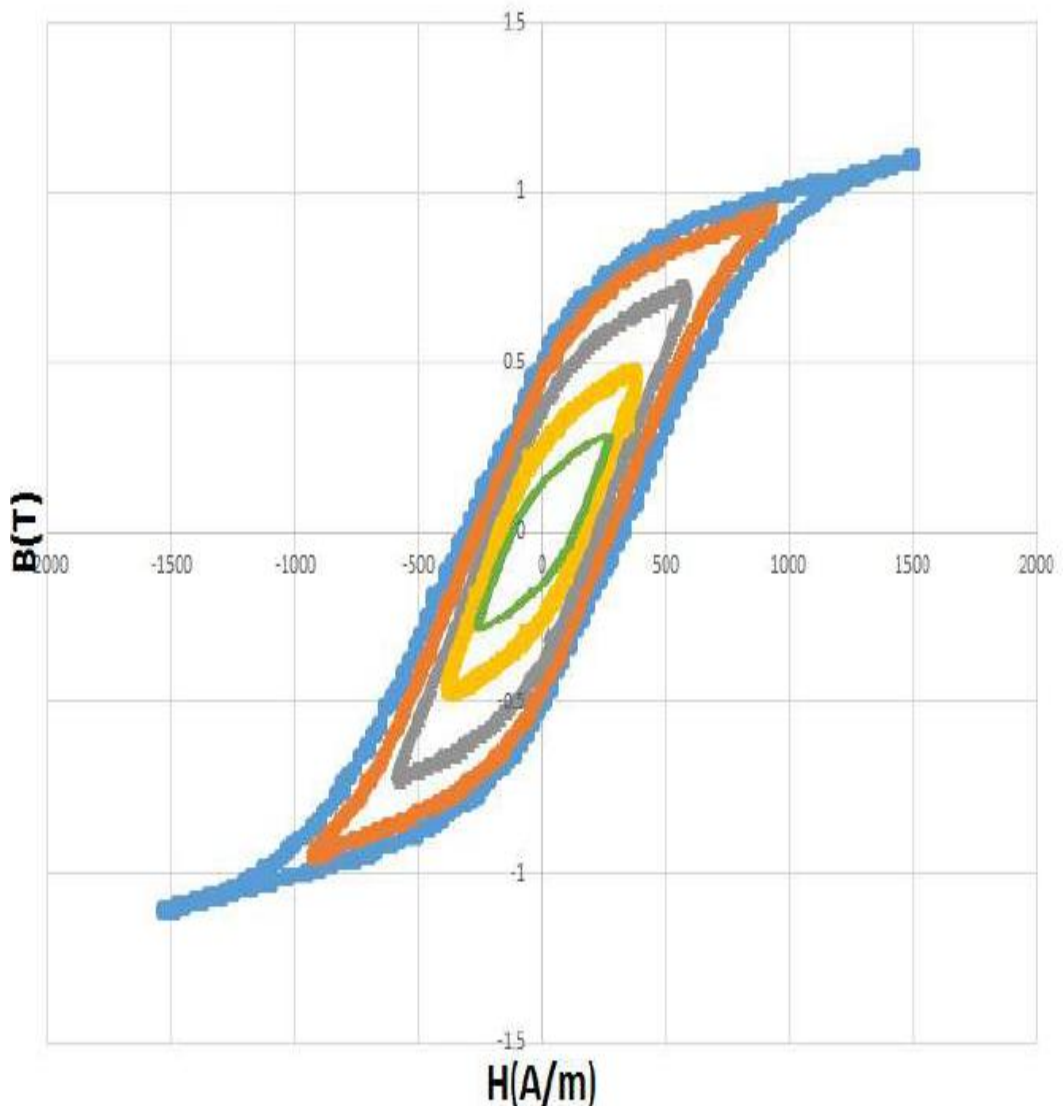


Figura 11: ciclo de Histéresis modelizado por ordenador

La causa de este ciclo es la dificultad que presenta al desplazar las paredes de los dominios. Las imperfecciones del cristal tienden a fijar las paredes, que como consecuencia no se mueven suavemente con el campo aplicado.

2.6.1. Curva de Imanación en FEMM.

El software FEMM puede modificar la curva de imanación de un material o ingresar una nueva en dos casos posibles:

Relación lineal: se pueden especificar diferentes permeabilidades relativas en las direcciones vertical u horizontal. También hay casillas para los ángulos de retardo de histéresis también hay casillas para ϕ_{hx} y ϕ_{hy} , que denotan el ángulo de retardo de histéresis correspondiente a cada dirección, para ser utilizado en los casos en los que se han especificado propiedades lineales del material.

Un modelo simple, pero sorprendentemente efectivo, para definir la histéresis en problemas armónicos es asumir que la curva crea un desfase constante entre B y H que es independiente de la frecuencia. Esto es exactamente lo mismo que asumir que el bucle de histéresis tiene forma elíptica.

Cuando la curva de Histéresis no es exactamente elíptica el ángulo de histéresis percibido variará algo para diferentes amplitudes de excitación. El ángulo de histéresis normalmente no aparece en las hojas de datos del fabricante; se tiene que identificar, a partir de un barrido de frecuencia en una bobina toroidal con un núcleo compuesto por el material de interés. Para la mayoría de los aceros laminados, el ángulo de histéresis se encuentra entre 0° y 20° , puede consultarse [6] para más información sobre estos parámetros.

Block Property

Name: Air

B-H Curve: Linear B-H Relationship

Linear Material Properties

Relative μ_x : 1

Relative μ_y : 1

ϕ_{hx} , deg: 0

ϕ_{hy} , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve

ϕ_{hmax} , deg: 0

Coercivity

H_c , A/m: 0

Electrical Conductivity

σ , MS/m: 0

Source Current Density

J, MA/m²: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Not laminated or stranded

Lam thickness, mm: 0

Lam fill factor: 1

Number of strands: 0

Strand dia, mm: 0

OK Cancel

Relación no lineal: Si seleccionamos la relación no lineal del desplegable, el grupo de parámetros se habilita. Para ingresar puntos en su curva BH, presione *Edit B-H curve*. Cuando se presiona el botón, aparece un cuadro de diálogo que permite ingresar datos de B y H (Figura 2.14). La información que se debe ingresar en estos cuadros de diálogo generalmente se obtiene seleccionando puntos de la hoja del fabricante. Introduciendo los puntos seleccionados (al menos 3 y 10-15 para una curva bien ajustada), pinchamos en el botón *Plot BH Curve* o *Log Plot Curve*.

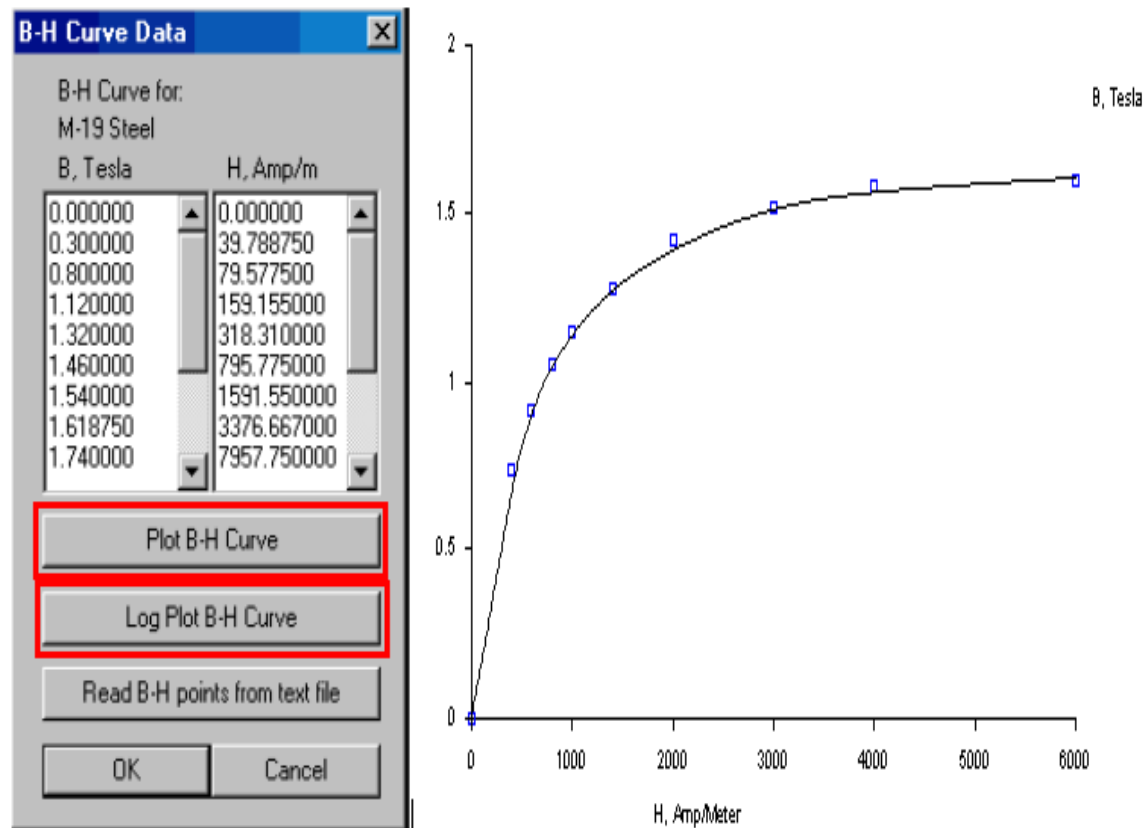


Figura 12: menú de modificación, curva de imanación.
Fuente [2]

Una vez introducidos o modificados los puntos del material, FEMM interpola los puntos BH ingresados usando "splines" cúbicos y así los va ajustando. Hay que tener en cuenta que al final de la curva FEMM extrapola linealmente los valores que queden muy fuera de rango, por lo que se obtendrá una curva bastante más alejada de la realidad.

3. Método de los elementos finitos.

3.1. Introducción y definición.

Diseñar, es definir un sistema físico que satisfaga una serie de requisitos o criterios mecánicos, térmicos, estéticos, eléctricos, económicos, etc...

Se debe decidir qué procedimiento de análisis usar:

- Métodos tradicionales
- Métodos numéricos
- Ensayos experimentales

El potencial de cálculo y accesibilidad de los ordenadores ha permitido que los métodos numéricos sustituyan o reduzcan los ensayos experimentales, ya que, permiten entender el comportamiento de la pieza, mecanismo, máquina, etc., con más versatilidad y menos coste.

En diversos campos de la ingeniería muchos problemas se plantean mediante modelos matemáticos. Estos modelos, muy a menudo se describen mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, cuya resolución es muy compleja. Generalmente la solución exacta no existe o es imposible de obtener. La incógnita es una función de las diversas variables (normalmente el espacio y el tiempo) y la ecuación diferencial da una relación entre esta función y algunas de sus derivadas parciales, así como otros parámetros.

El principal método de análisis numérico es el método de elementos finitos (MEF). Este método comenzó siendo útil para el análisis de elementos mecánicos con solicitaciones estáticas, como por ejemplo el cálculo de celosías.

3.2. Fundamento teórico.

El método de elementos finitos FEM (Finite Element Method) es un método numérico para la solución de ecuaciones diferenciales.

Consiste en discretizar un dominio, dividiéndolo en un número finito de elementos geométricos que se aproxime al modelo original.

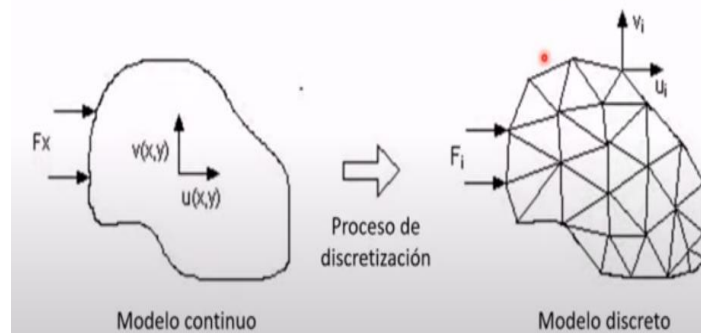


Figura 13: [Introducción a elementos finitos-Cidesi-Conacyt](#)

Las ecuaciones diferenciales rigen el comportamiento de multitud de fenómenos. Por ejemplo:

- Flexión de viga:

$$\frac{d^2u}{dx^2} \left(EI \frac{d^2u}{dx^2} \right) = -q(x)$$

- Tensión-deformación

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + Q = 0$$

- Transmisión de calor:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + f = 0$$

Todas estas ecuaciones tienen una forma particular de discretizarse, dividiendo el dominio en un número finito de partes, en contraste con el análisis diferencial donde se discretiza el dominio en un número infinito de partes con elementos infinitesimalmente pequeños de forma que cuantas más partes se divida el dominio de la estructura más cercana será la solución a la solución exacta. El problema del análisis diferencial es que conlleva una gran cantidad de cálculo computacional y por ende un gran consumo de recursos.

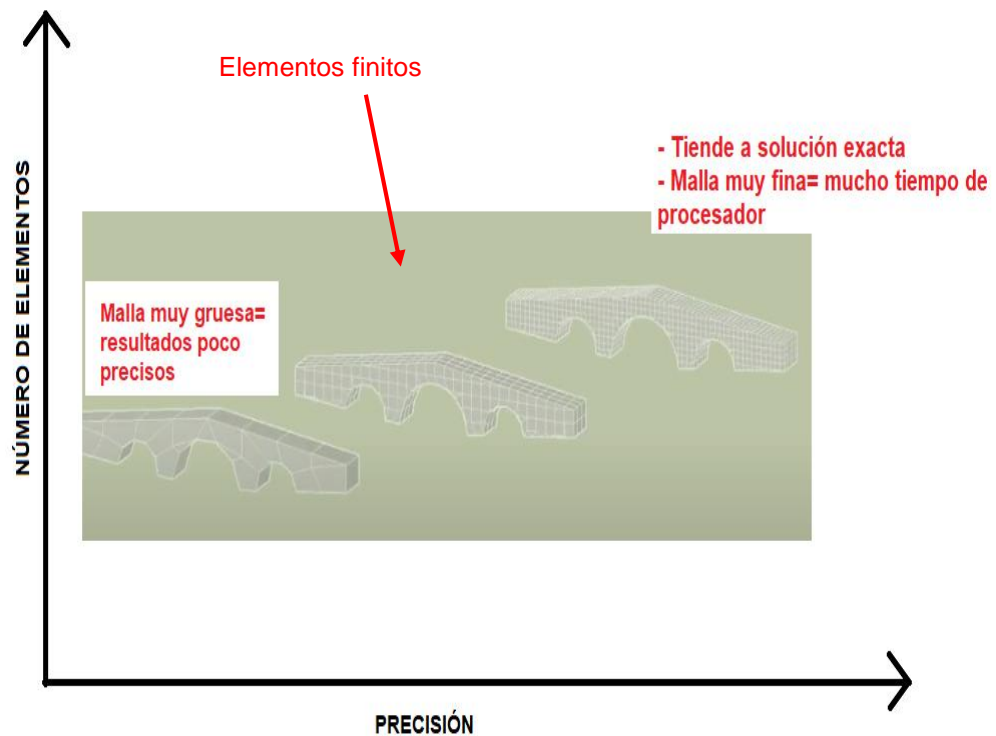


Figura 14: gráfica precisión/Nº de elementos

Una vez modelizado el material, estructura, máquina o lo que se vaya a diseñar, las ecuaciones diferenciales que afectan al conjunto se aplican a cada elemento en que se haya dividido, y se resuelven obteniendo un conjunto de soluciones particularizadas que definen el comportamiento del conjunto.

Un caso sencillo que sirve para explicar este método es el de una celosía simple. En el cálculo de celosías, como en cualquier análisis estático, se trata de resolver la ecuación $F=K\cdot\delta$, donde:

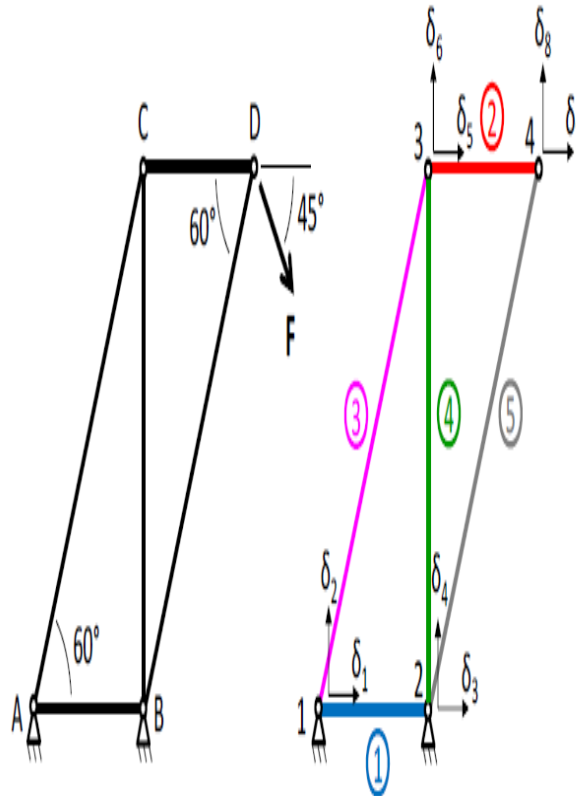
- F: fuerza que soporta la celosía (cargas aplicadas y reacciones en los apoyos)
- K: rigidez de la celosía
- δ : deformación resultante de la celosía

Por tanto, para calcular cómo se deforma la celosía bajo unas cargas, se necesita conocer su rigidez.

La rigidez de la celosía es desconocida, pero una celosía no es más que un conjunto de barras, y la rigidez axial de una barra sí es conocida ($k=EA/L$)

Así, el cálculo de celosías:

- discretiza el medio continuo de rigidez desconocida (la celosía) en elementos finitos de rigidez conocida (elementos barra)
- combina la rigidez k de todas las barras para calcular la rigidez K de la celosía, y entonces resuelve la ecuación $F=K\cdot\delta$



$$\{F\} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \\ F_7 \\ F_8 \end{Bmatrix} \quad \{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \\ \delta_7 \\ \delta_8 \end{Bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} + \frac{EA}{l} \cos 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin \alpha \cos \alpha & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} \cos 2\alpha & -\frac{EA}{l} \sin 2\alpha & 0 & 0 \\ \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & 0 & 0 & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & 0 & 0 \\ \frac{EA}{l} \sin \alpha \cos \alpha & \frac{EA}{l} \sin \alpha \cos \alpha & \frac{EA}{l} \sin \alpha \cos \alpha & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} \sin \alpha \cos \alpha & -\frac{EA}{l} \sin \alpha \cos \alpha & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 \\ \frac{EA}{l} \cos 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \cos 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & 0 & -\frac{EA}{l} \\ \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{EA}{l} \cos 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & 0 & -\frac{EA}{l} \cos 2\alpha & -\frac{EA}{l} \sin 2\alpha & \frac{EA}{l} + \frac{EA}{l} \cos 2\alpha & -\frac{EA}{l} \sin 2\alpha \\ 0 & 0 & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & 0 & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha & \frac{EA}{l} \sin 2\alpha \end{bmatrix}$$

Figura 15: Diseño mecánico de elementos finitos UPV/EHU

3.2.1. Elementos nodos y mallas.

Las ecuaciones diferenciales de interés suelen tener una apariencia compacta, de manera que al aplicarlas a geometrías complejas pueden resultar tediosas o en muchos casos irresolubles, es por ello que se buscan, en el proceso de discretización del MEF, geometrías sencillas, como por ejemplo el triángulo.

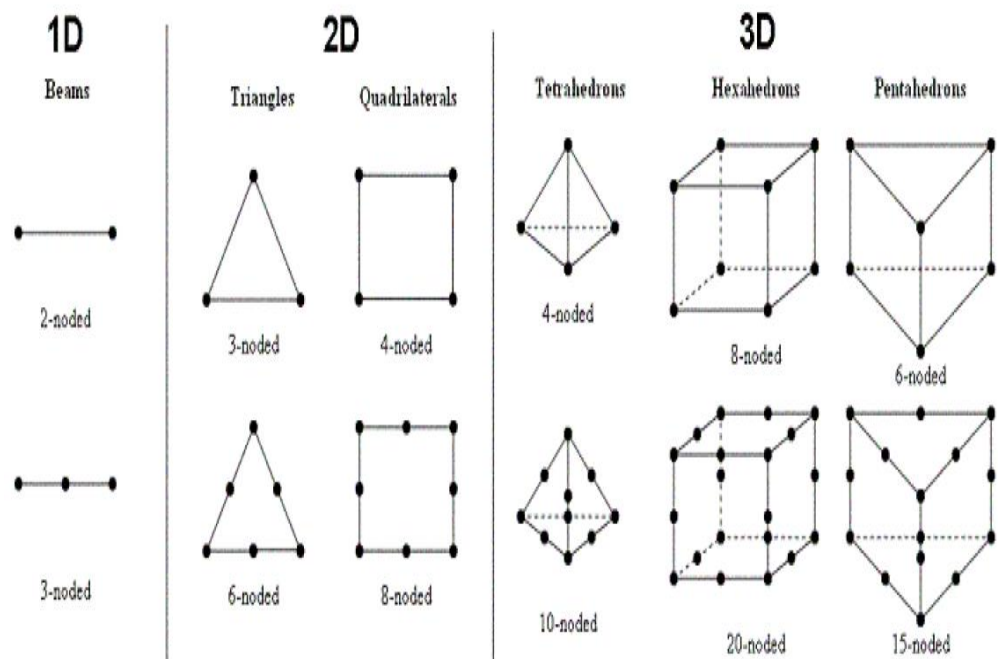


Figura 16: tipos de nodos. Fuente: Holm, 2002.

Como observamos en la figura 16 existen diferentes tipos de elementos con diversos números de nodos que acaban conformando el mallado.

Es en los nodos donde se aplicarán las condiciones de contorno, ya que son los puntos donde se unen, uno o varios elementos que conforman la malla resultante.

3.2.2. Etapas del MEF.

Como en todo proceso, existen etapas, las del MEF son:

- Preproceso
- Proceso (o resolución)
- Postproceso

Preproceso.

En esta primera etapa, es donde se define el problema imponiendo unas condiciones. Es aquí donde se quitarán grados de libertad posibilitando la obtención de un sistema compatible determinado, pasando a un sistema de n ecuaciones con n incógnitas y de solución única. Las acciones a definir son:

- Dominio: espacio físico, su definición geométrica.
- Condiciones iniciales y/o de frontera: valores iniciales y de contorno
- Otros: propiedades físicas, entorno y otros parámetros

El último paso es el mallado. Se aproxima el dominio con una red de elementos sencillos (por ejemplo, triángulos) que cubra la totalidad del dominio, formando lo que se llama la malla. Es decir, se pasa de una formulación continua del problema a una formulación discreta. Por muy pequeños que sean los elementos, siempre se introduce cierto error al mallar.

Proceso.

Una vez conformado el dominio en pequeños elementos, se formulan las ecuaciones para cada elemento y se combinan para obtener la solución en todo el cuerpo.

Existen multitud de métodos y literatura científica a cerca de los procesos para estas soluciones, pero el denominador común es aproximar la función solución mediante muchas funciones sencillas definidas a trozos. Los métodos más utilizados se fundamentan en:

- Método de Galerkin
- Principio de Trabajos virtuales

Sobre cómo resuelve los diferentes problemas el software FEMM hablaremos más adelante.

Postproceso.

Una vez obtenida la solución del problema, se visualizan los resultados a través de una interfaz gráfica, lo que permite al diseñador tomar decisiones acerca de las sollicitaciones críticas e intervenir en el diseño si fuese necesario.

4. Software FEMM.

En el presente TFG el programa de estudio es FEMM (Finite Element Method Magnetics),

A continuación, se verán las propiedades, herramientas y posibilidades, que ofrece el software.

Se utiliza la versión 4.2, del 15 de noviembre de 2013, que ocupa 7.3MB de memoria. Se puede descargar de la web del autor, David Meeker, en la siguiente dirección:

<http://www.femm.info/wiki/HomePage>

4.1. Introducción.

FEMM es un programa para ordenador que permite resolver problemas electromagnéticos en dos dimensiones y dominios planos y simétricos.

Se divide en tres partes:

- SHELL interactivo (femm.exe): Es un preprocesador de interfaz de múltiples documentos y un posprocesador para los distintos tipos de problemas a resolver. Contiene un CAD, para trazar la geometría del diseño y para definir materiales y condiciones de contorno. También se pueden importar Archivos .DFX de Autocad.
- TRIANGLE (triangle.exe): divide la región en una gran cantidad de triángulos. Este programa fue escrito por [Jonathan Shewchuk](#)
- SOLVERS (fkern.exe//belasolv//hsolv//csolv): cada uno de los solucionadores toma un conjunto de archivos de datos que describen el problema y resuelven las ecuaciones diferenciales parciales relevantes para obtener valores para todo el campo del dominio de la solución.

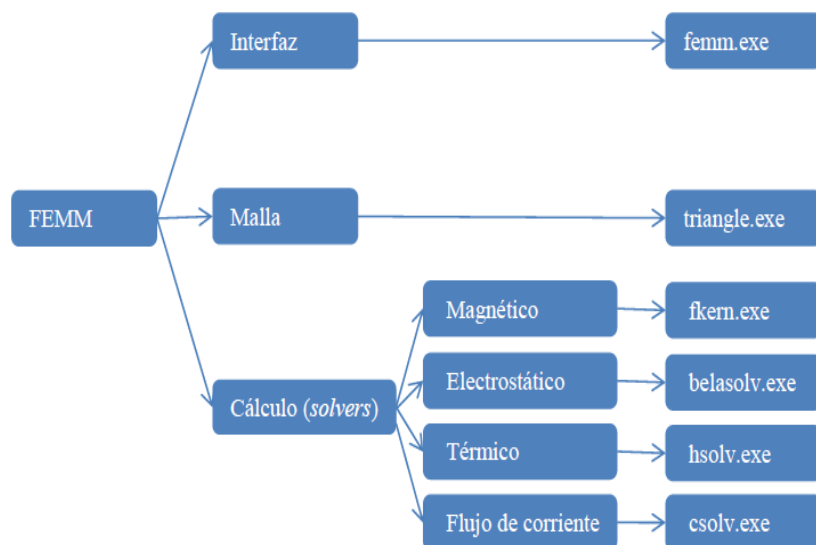


Figura 17: partes del software FEMM

Específicamente, FEMM discretiza el dominio del problema utilizando elementos triangulares. Mediante el proceso de discretización, se forma un problema de álgebra lineal con quizás decenas de miles de incógnitas. Sin embargo, existen algoritmos que permiten una realizar en un periodo corto de tiempo resolver el resultante problema de algebra lineal.

Sobre cada elemento, la solución se aproxima por una interpolación lineal de los valores de potencial en los tres vértices del triángulo. El problema de álgebra lineal se forma minimizando una medida del error entre la ecuación diferencial exacta y la ecuación diferencial aproximada como escrito en términos de las funciones de prueba lineales.

Los métodos numéricos aparecen en la guía del FEMM 4.2 [2].

4.2. Preproceso.

Para cada problema a resolver tendremos una interfaz diferente, ya que el programa diferencia en el motor de resolución del problema, entre diversas opciones como ya se comentó en la introducción teórica de este capítulo. Se pueden diferenciar tres, al abrir un nuevo archivo:

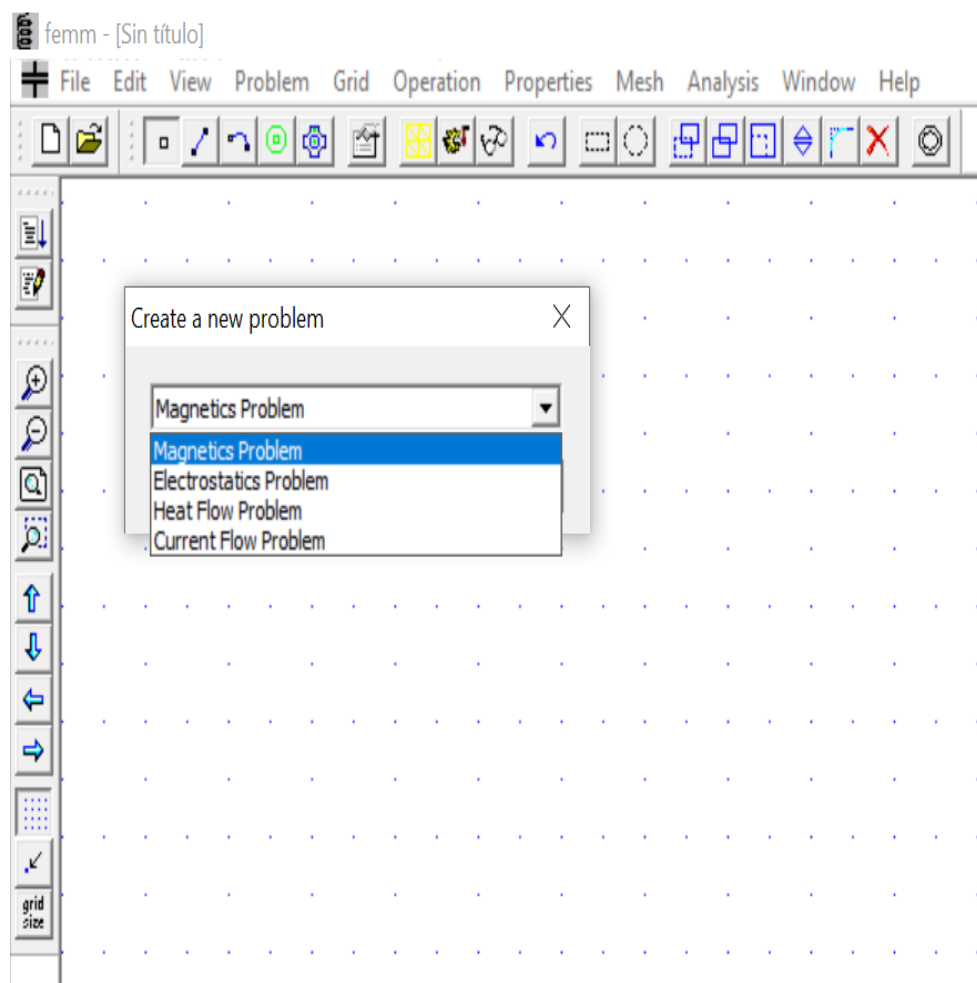


Figura 18: interfaz principal FEMM

En nuestro caso explicaremos en detalle los elementos de diseño para resolver **problemas magnetostáticos**.

4.2.1. Interfaz: Diseño con FEMM.

Nuevo Archivo.

En estos apartados detallaremos qué son y para qué sirven los diferentes elementos que nos presta el programa FEMM.

En primer lugar, hablaremos de los elementos de diseño de geometrías de estudio.

Si creamos un nuevo archivo nos preguntará que clase de problema queremos resolver, tal como se ilustra en la figura 10.

Automáticamente después deberemos realizar unos ajustes en la opción *Problem*, en la barra superior del panel principal:

femm - [Práctica Máquinas II.FEM]

File Edit View **Problem** Grid Operation Properties Mesh Analysis Window Help

- Problem Type: Aquí definimos el tipo de simetría del problema.
- Length Units: Seleccionamos las unidades sobre las que vamos a referir todas las cotas
- Frequency (Hz): es la frecuencia de operación del sistema, si se indica 0 Hz, será un problema magnetostático; en electrostática no sale la casilla.
- Depth: aquí seleccionamos la profundidad, únicamente si tenemos simetría planar.
- Solver Precision: indicamos la precisión en la resolución numérica, la mínima es 1×10^{-8}
- Min Angle/Max Angle: Ángulo mínimo/máximo de los triángulos que componen el mallado de la herramienta TRIANGLE vista en el epígrafe 4.1. El ángulo varía entre 1° y $33,8^\circ$. Sólo se debe bajar en caso de encontrar problemas al mallar.

Problem Definition

Problem Type: Planar

Length Units: Inches

Frequency (Hz): 0

Depth: 1

Solver Precision: 1e-008

Min Angle: 30

Comment: Add comments here.

OK Cancel

Posteriormente debemos ajustar la rejilla, “Grid”, y ajustarla al dibujo. Aparecen una serie de botones en la esquina inferior derecha de las barras de herramientas donde podemos definir y ajustar el dibujo a la rejilla.

En programas con funciones de dibujo es importante tener un marco de referencia, sobre todo en este software donde dibujaremos las geometrías basándonos en cotas y coordenadas de nodos. Por ejemplo, un cuadrado de material debe estar bien delimitado, porque el programa puede detectar una mala conexión entre rectas, aunque no se apreciase en el dibujo, dando fallos de cálculo.

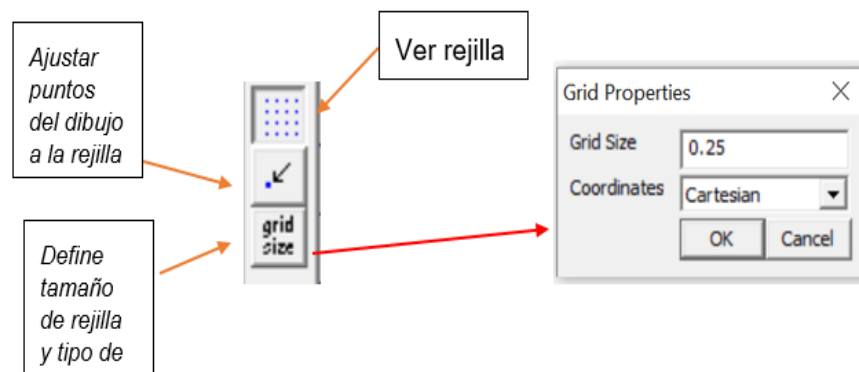


Figura 19: definir la rejilla en FEMM

Herramientas de dibujo.

El programa permite importar ficheros desde Autocad desde el menú “File” o se pueden realizar geometrías diversas con un sencillo (aunque limitado) editor de gráficos.

La forma de dibujar con FEMM, se basa en colocar puntos distribuidos en la rejilla según sus coordenadas y después realizar segmentos entre ellos, bien líneas rectas, bien curvas.

También existe la posibilidad de importar el diseño desde archivos en formato .dxf (dibujos de AutoCAD, Catia, etc.) desde la pestaña *File > Import DXF*. Hay que tener en cuenta que al dibujar con Autocad una geometría es necesario poner todos los puntos, FEMM no reconoce los “atajos” de edición que tiene AutoCAD, por lo que es recomendable dibujar todos y cada uno de los puntos de la geometría.

Para poder recrear una geometría mediante el dibujo, es necesario en primer lugar la introducción de puntos, bien con el ratón o a través de la tecla TAB. FEMM nos brinda la oportunidad de copiar, rotar y mover diferentes figuras que queramos recrear, tantas veces como queramos:

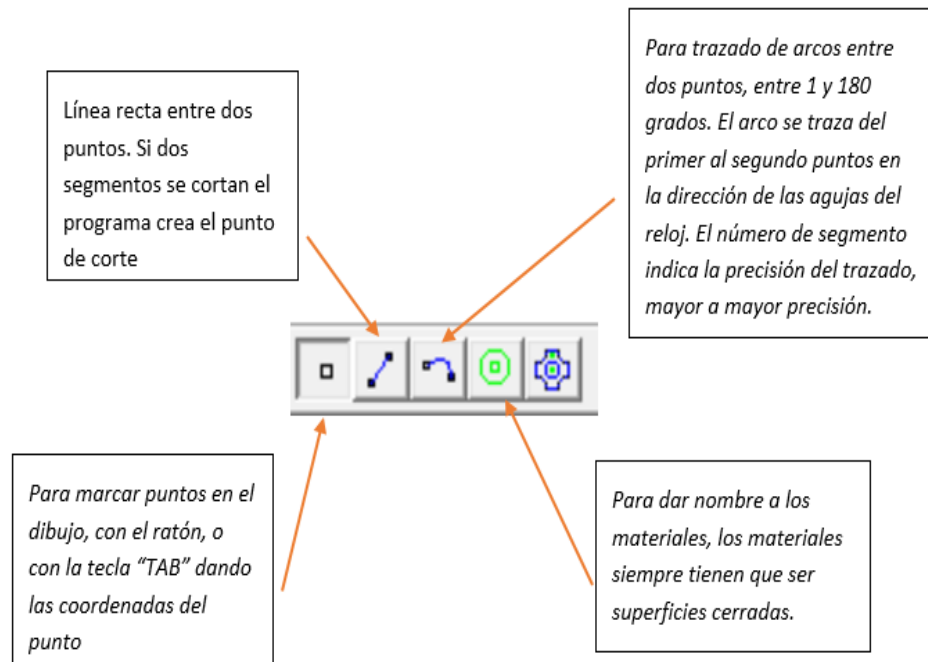


Figura 20: Elementos de dibujo en FEMM

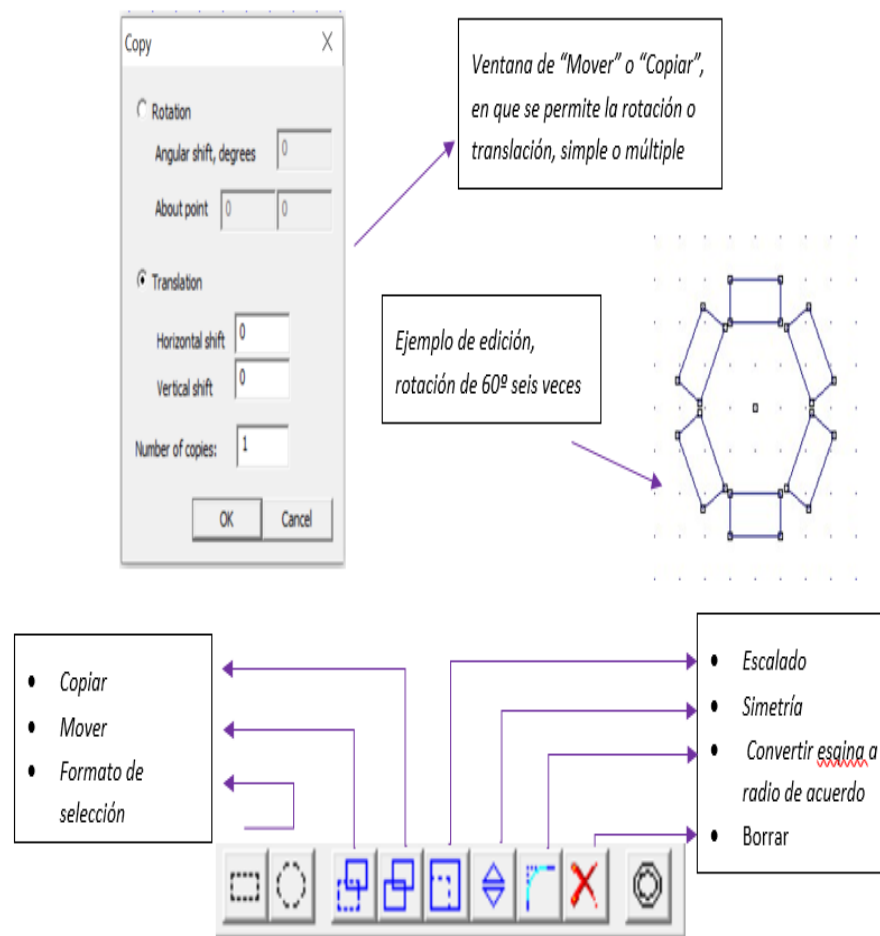


Figura 21: Herramientas de dibujo en FEMM

4.2.2. Interfaz: Propiedades de los materiales.

Una vez tengamos la representación de la máquina que vamos a utilizar, debemos indicar qué materiales constituyen nuestro diseño. Definir los puntos las líneas o contornos, será indispensable para que el programa realice los cálculos.

Para realizar esta tarea tenemos un menú desplegable de “Propiedades” que nos permitirá introducir materiales desde una biblioteca propia del programa, hasta crear unos nuevos con los parámetros que deseemos.

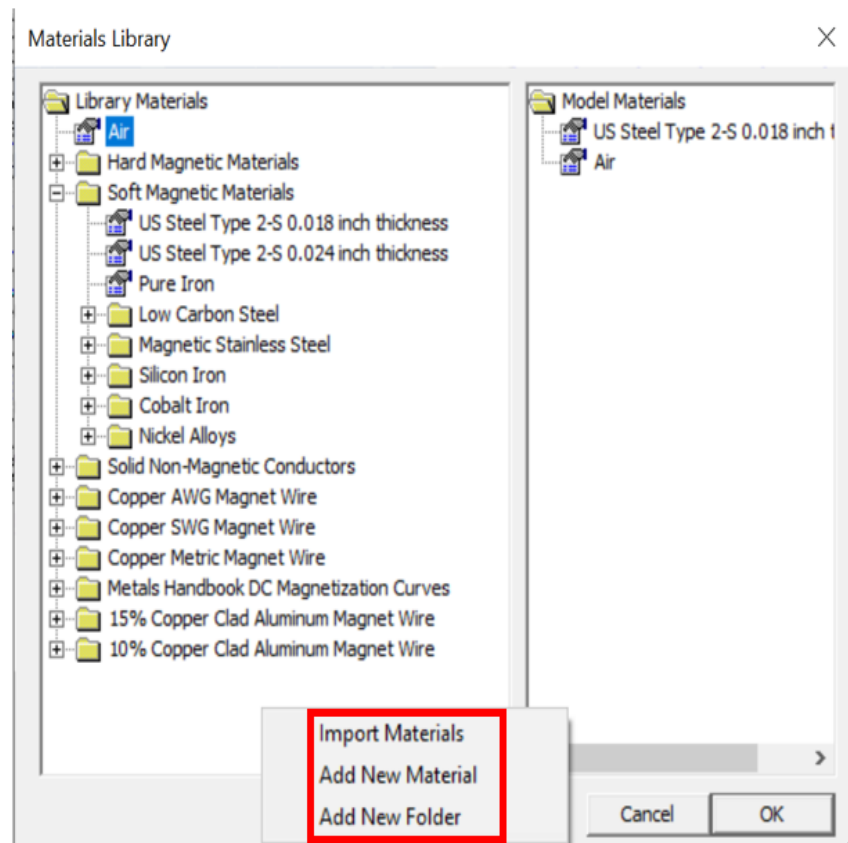
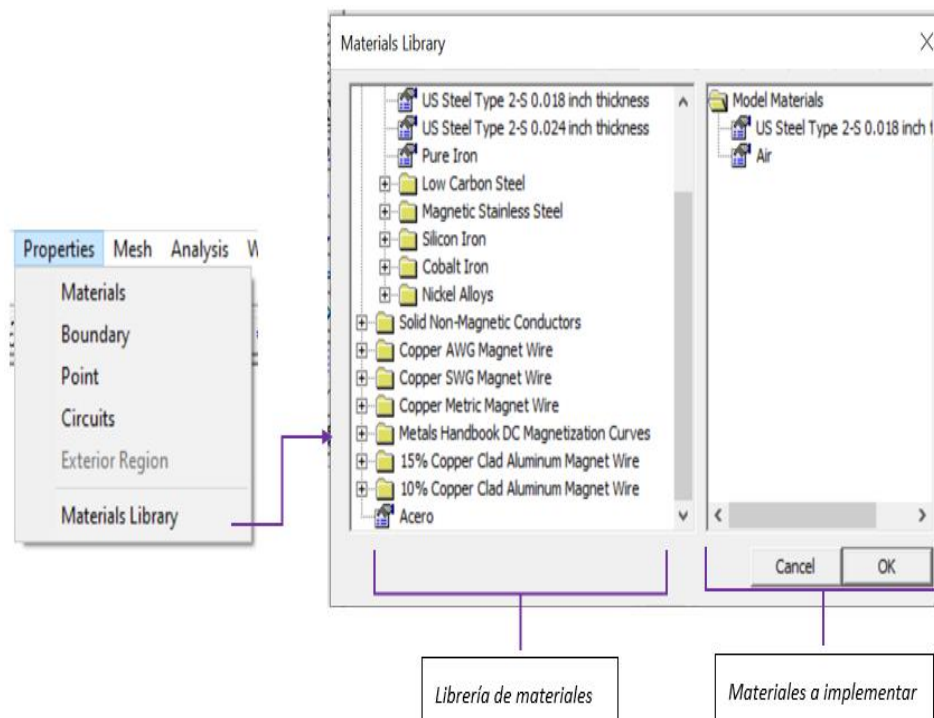


Figura 22: biblioteca de materiales en FEMM

Si lo que deseamos es crear un nuevo material, pinchamos con el botón derecho en la librería de materiales y seleccionamos *Add New Material* o *Import Material*. Si añadimos uno nuevo deberemos introducir sus características magnéticas (en este caso porque el problema que vamos a resolver es de magnetostática), y después arrastrarlo a la columna de *Model Materials*:



FEMM nos permite introducir propiedades magnéticas de los materiales, según queramos trabajar en la zona lineal o en la zona curva del ciclo de histéresis. En materiales magnéticos no lineales tenemos que entrar pares de valores de densidad de flujo, B y intensidad de campo magnético, H , hasta conseguir la característica deseada. En las siguientes imágenes muestro cómo se puede seleccionar las propiedades magnéticas de un material:

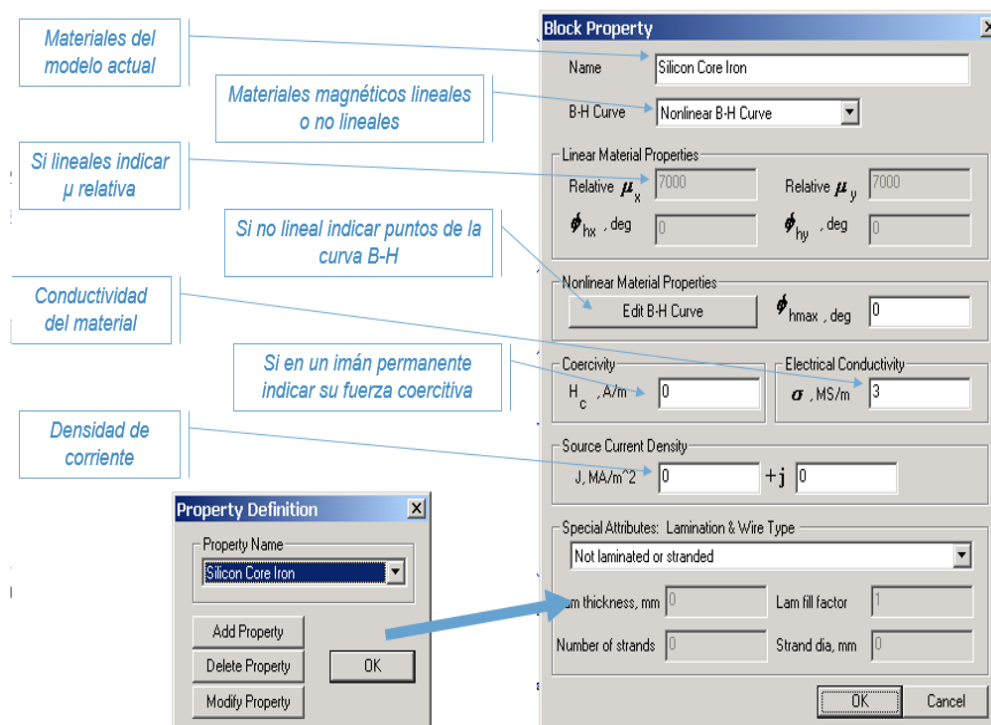


Figura 23: añadir nuevo material a FEMM

4.2.3. Malla.

El mallado lo realiza otro programa independiente (triangle.exe). Viene incluido dentro del programa FEMM, aunque también se puede descargar por separado.



Se ejecuta cuando hacemos click en el botón *Run mesh generator*.

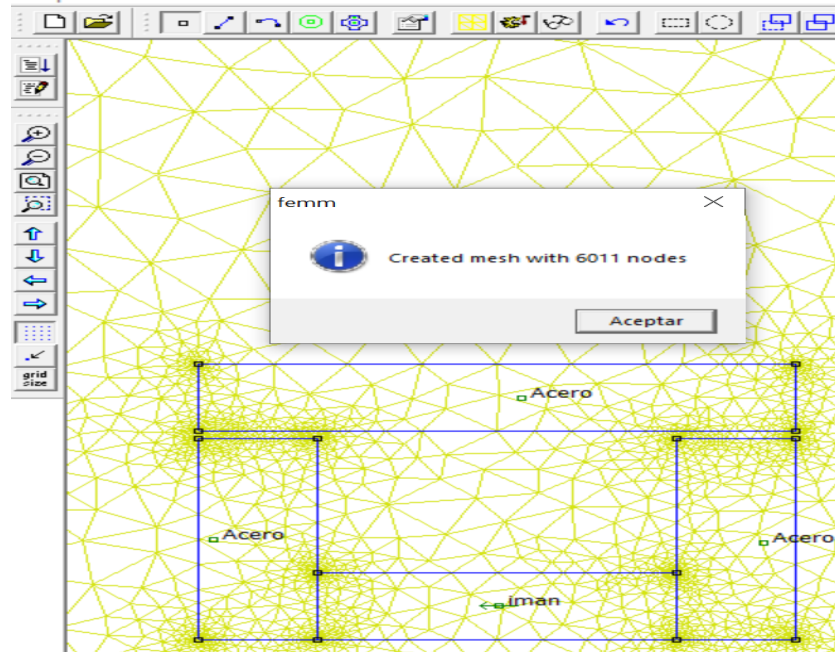


Figura 24: mallado con “Run mesh generator”

El solucionador lo proporciona el botón *Run analysis*, y ejecuta el algoritmo acorde al programa que estemos resolviendo tal como se introdujo en la sección 4.1. en la figura 9.

El tipo de elemento utilizado es el triángulo. El mallado puede configurarse a través de dos funciones básicas de FEMM:

- *Min Angle*: En el menú desplegable “*Problem*” se puede cambiar el ángulo mínimo de los triángulos que forman la malla. A mayor ángulo mayor calidad de malla. Este parámetro varía entre 1° y 33.8° , como ya se dijo anteriormente, y sólo deberemos variarlo cuando aparezca el error: “*Call to triangle was unsuccessful*”
- *Mesh Size*: Seleccionando un bloque y a continuación apretando espacio accedemos al cuadro de diálogo “*Properties for selected block*”. En él podemos modificar el tamaño de malla “*Mesh size*”, desactivando la casilla “*Let Triangle choose Mesh Size*” y escribiendo el valor que queramos.

4.3. Proceso.

Procesador: Algoritmos de cálculo Dentro del cálculo de algoritmos FEMM tiene los solvers que se utilizarán en función de los distintos tipos de problemas que tengamos. Estos son como ya se dijo anteriormente:

Tipo de problema	Solver
Magnético	Fkern.exe
Electrostático	Belasolv.exe
Térmico	Hsolv.exe
Flujo de corriente	Csolv.exe

Tabla 3: programas de resolución de algoritmos de FEMM

4.4. Postproceso.

Una vez que hemos ejecutado el programa, tenemos a nuestra disposición multitud de herramientas para extraer datos sobre el comportamiento de nuestra geometría.

Para visualizar los resultados, después de ejecutar es necesario pinchar en el botón:



4.4.1. Medidas de punto.

Si seleccionamos un punto cualquiera en nuestro dibujo, el programa nos permite visualizar datos, como el flujo en ese punto, la intensidad de campo etc...

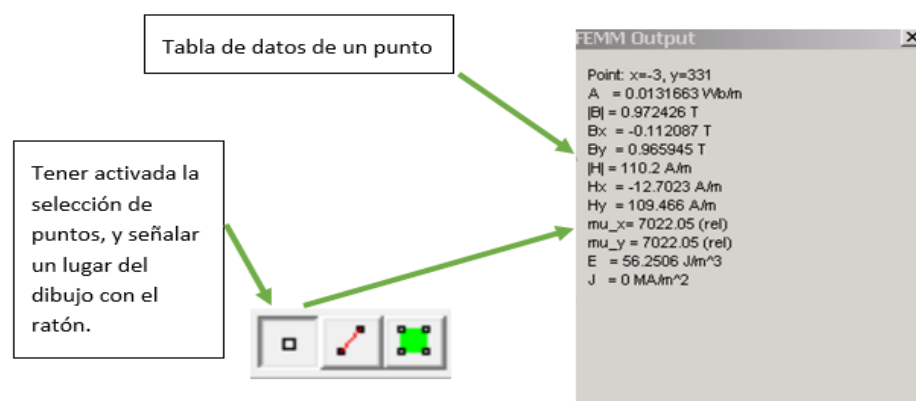


Figura 25; visualización propiedades de punto

4.4.2. Medidas de línea.

Si lo que queremos es observar las propiedades de una línea del dibujo deberemos seleccionarla para que el sistema nos represente una gráfica con la variación de la magnitud que deseemos:

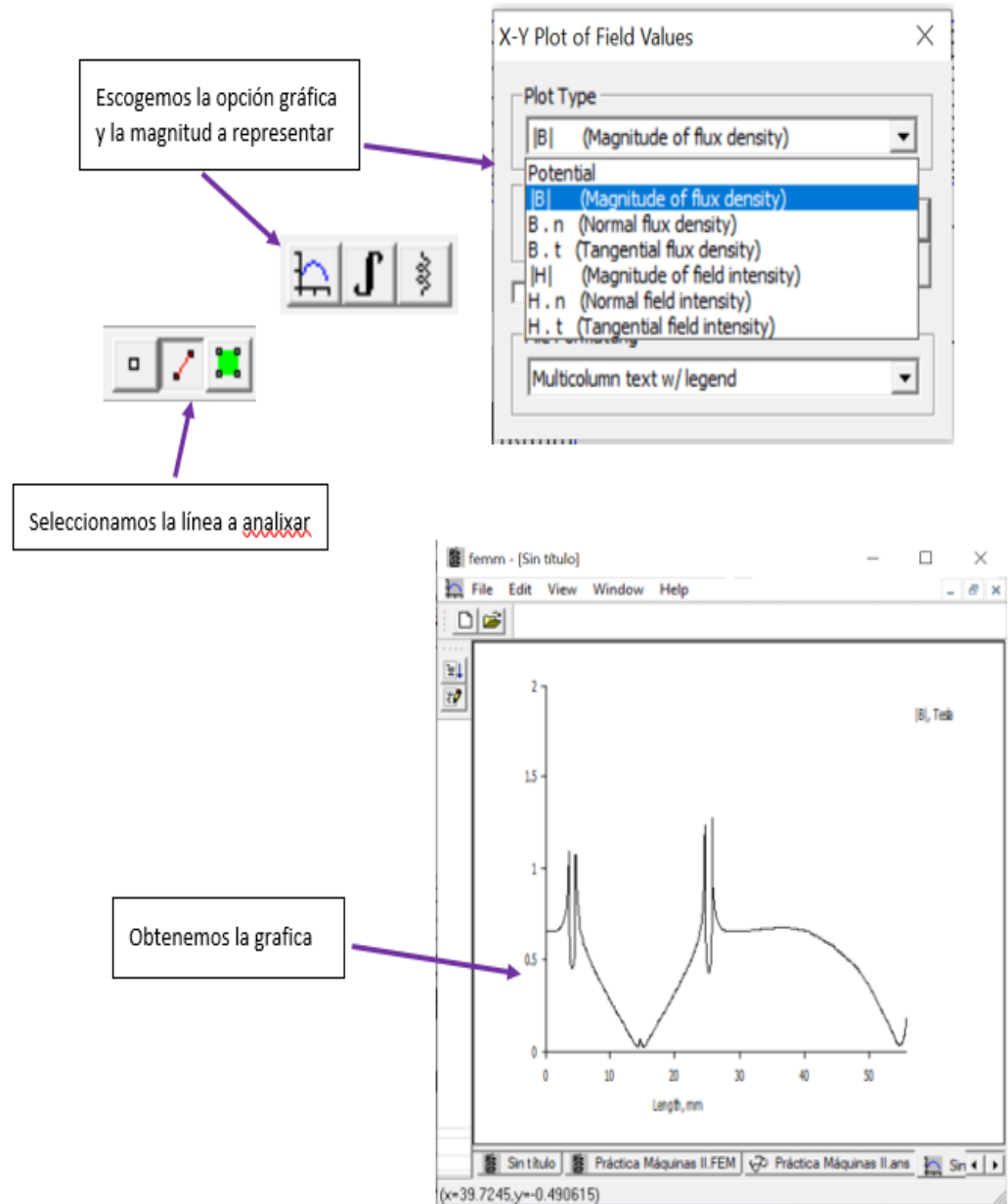


Figura 26: visualización propiedades de línea

4.4.3. Medidas de flujo.

A nivel visual e informativo este apartado es el más importante pues nos da una imagen muy clara de cómo se reparten los valores de las diferentes magnitudes. Podremos visualizar las líneas de flujo magnético, elegir su número, su rango máximo etc.

Lo que realmente se representa es el potencial magnético A , magnitud explicada en el apartado teórico (2.3.1.):

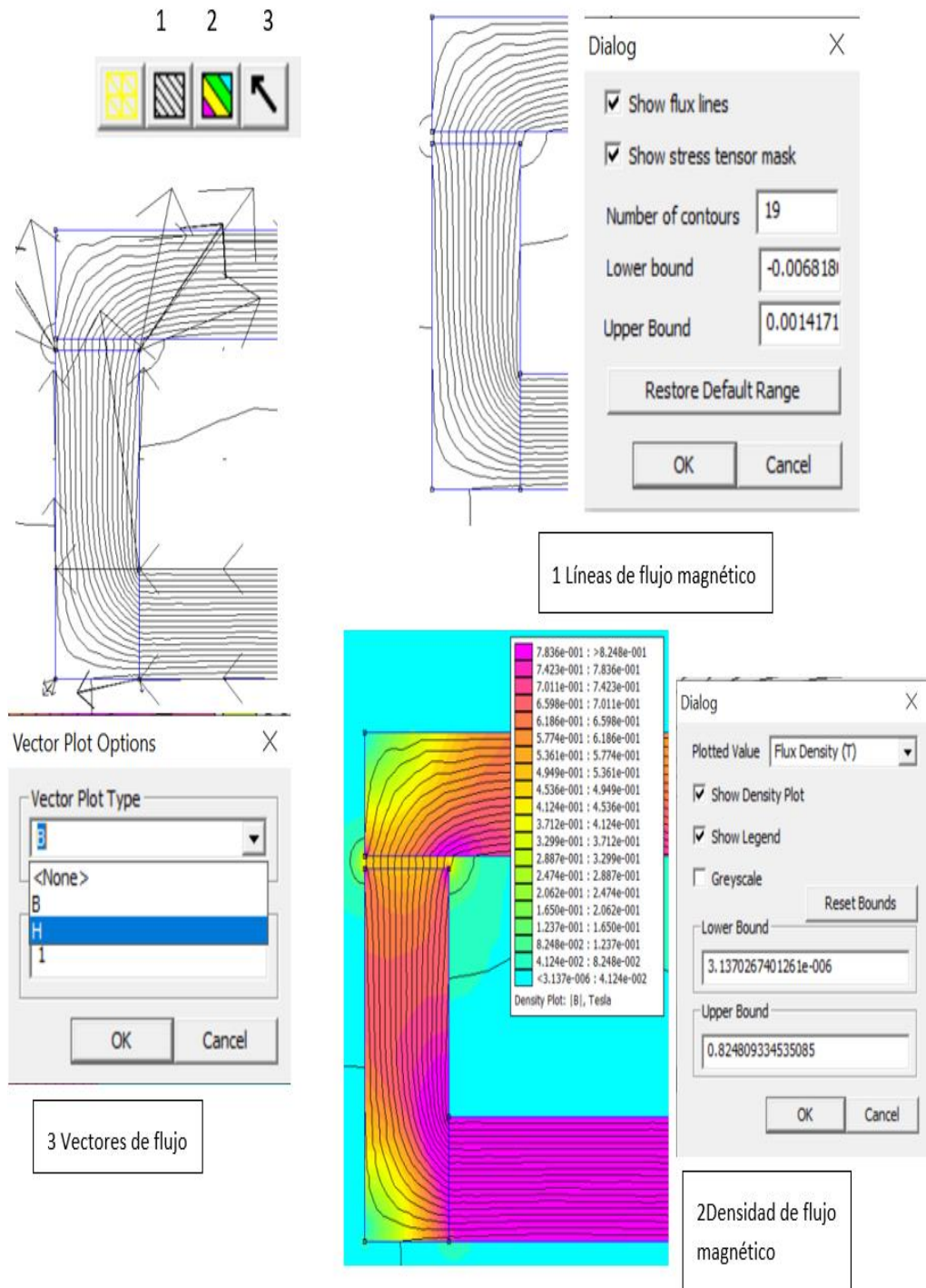


Figura 27: visualización propiedades de flujo

4.5. Condiciones de contorno.

En FEMM es necesario definir unas condiciones de contorno aplicables a los elementos que hacen de separación entre el exterior y el campo de estudio. Dicho de otro modo, para que el algoritmo del software funcione se deben tener definidas una serie de condiciones de frontera para que las operaciones matemáticas internas converjan en una solución única.

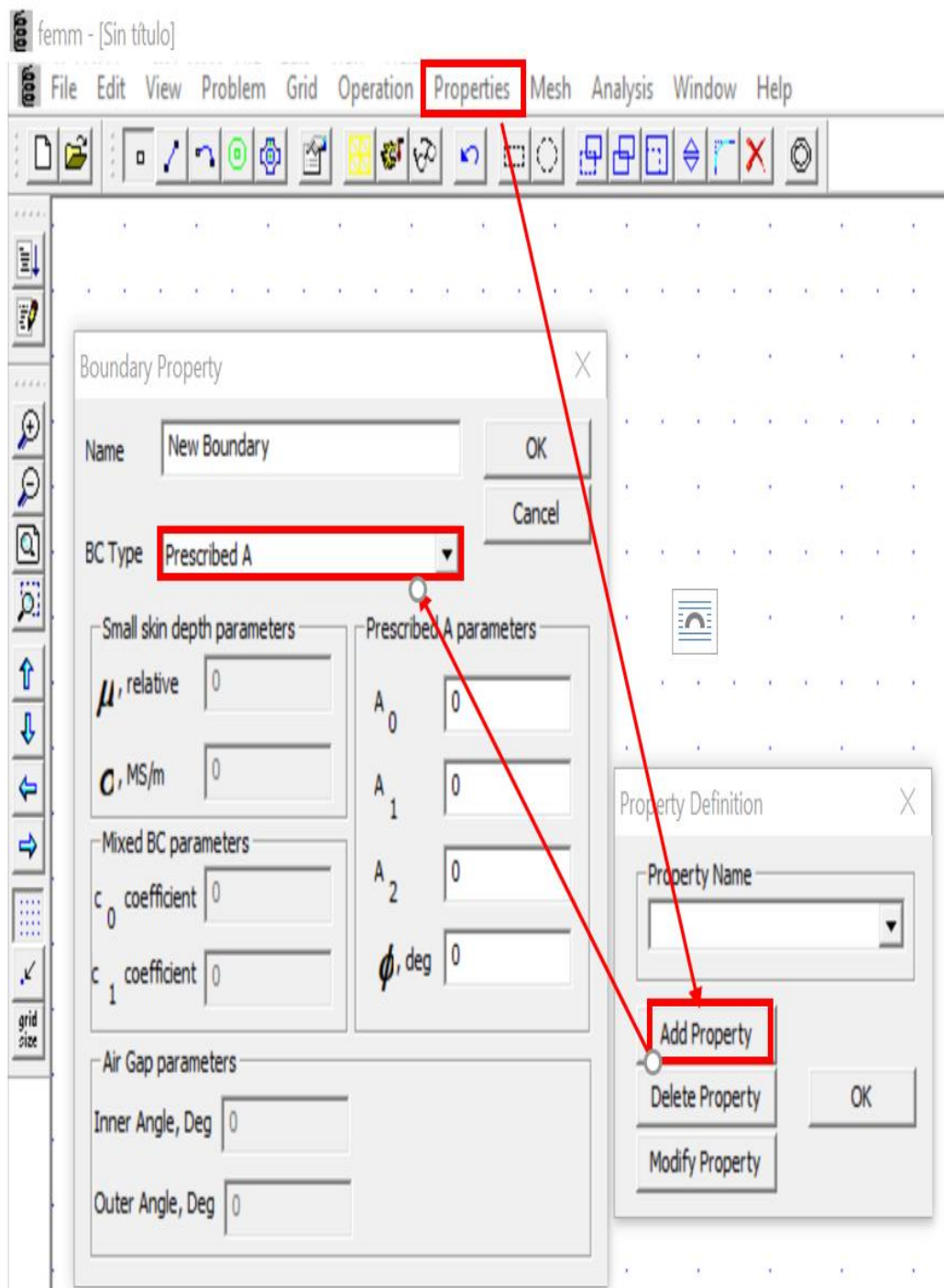


Figura 28: condiciones de contorno

4.5.1. Condiciones de contorno para problemas magnéticos y electrostáticos.

Las condiciones de contorno para problemas magnéticos y electrostáticos se presentan en cinco variedades:

- *Dirichlet* . En este tipo de condición de contorno, el valor del potencial A o V (A es el POTENCIAL MAGNÉTICO, V es el POTENCIAL ESCALAR) es explícitamente definido en el límite, *por ejemplo*, $A = 0$. El uso más común del límite de tipo Dirichlet en problemas magnéticos es definir $A = 0$ a lo largo de un límite para mantener el flujo magnético encerrado bajo él. . En nuestro caso añadiremos esta condición a la carcasa externa de las máquinas rotativas. En problemas electrostáticos, las condiciones de Dirichlet se utilizan para corregir el voltaje de una superficie en el dominio del problema
- *Neumann*: Esta condición de frontera especifica la derivada normal del potencial a lo largo del perímetro. En problemas magnéticos, la condición de frontera de Neumann homogénea, $\partial A / \partial n = 0$ se define a lo largo de un límite para forzar al flujo a pasar por el límite exactamente en un ángulo de 90° *con* respecto al Perímetro. Este tipo de condición de contorno es consistente con un metal muy permeable.
- *Robin*: La condición de frontera de Robin es una especie de mezcla entre Dirichlet y Neumann, prescribiendo una relación entre el valor de A y su derivada normal en el límite. Un ejemplo de esta condición de contorno es: $\partial A / \partial n + cA = 0$.
- *Periódica*: Una condición de contorno periódica une dos límites. En este tipo de condición de frontera, los valores de frontera en los puntos correspondientes de los dos límites son iguales entre sí. Generalmente se usan para definir ejes de simetría, para no tener que dibujar la geometría completa. Se dibuja media máquina a través de un eje de simetría y posteriormente el programa tiene en cuenta la máquina completa, aunque no esté dibujada.
- *Antiperiódico*. La condición de límite antiperiódica también une dos límites. Como siempre, los valores de los límites se hacen de igual magnitud, pero de signo opuesto.

Si no se definen explícitamente condiciones de contorno, cada límite se establece por defecto en un nivel homogéneo de la condición de frontera de Neumann.

4.5.2. Condición de contorno para problemas de flujo de calor.

Hay seis tipos de condiciones de contorno para los problemas de flujo de calor:

- *Temperatura fija*: la temperatura a lo largo del límite se establece en un valor prescrito.
- *Flujo de calor*: se prescribe el flujo de calor, f , a través de un límite. Esta condición de frontera puede ser representado matemáticamente como:

$$K \frac{\partial T}{\partial n} + f = 0$$

donde n representa la dirección normal al límite.

- *Convección*: la convección ocurre si el límite es enfriado por un flujo de fluido. Este límite La condición se puede representar como:

$$K \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_o) = 0$$

donde h es el "coeficiente de transferencia de calor" y T_o es la temperatura ambiente del fluido refrigerante.

- *Radiación*: el flujo de calor a través de la radiación se puede describir matemáticamente como:

$$K \frac{\partial T}{\partial n} + \beta k_{sb}(T^4 - T_0^4) = 0$$

donde β es la emisividad de la superficie (un valor adimensional entre 0 y 1) y k_{sb} es la constante de *Stefan-Boltzmann*.

- *Periódica* Una condición de contorno periódica une dos límites. En este tipo de condición de frontera, los valores de frontera en los puntos correspondientes de los dos límites son iguales entre sí.
- *Antiperiódico* La condición de límite antiperiódica también une dos límites. Como siempre, los valores de los límites se hacen de igual magnitud, pero de signo opuesto.

Si no se definen explícitamente condiciones de límite, cada límite establece por defecto una condición de aislamiento (es decir, sin flujo de calor a través del límite). Sin embargo, una condición de frontera no derivada debe ser definido en alguna parte (o el potencial debe definirse en un punto de referencia en el dominio) para que el problema tiene una solución única.



4.6. Lua Script.

El lenguaje de extensión Lua se ha utilizado para agregar funciones de procesamiento por lotes / secuencias de comandos a FEMM. Interactive Shell puede ejecutar scripts Lua a través de la selección *Open Lua Script* el menú archivo, o se pueden ingresar, los comandos, directamente en la ventana de la consola de Lua.

Lua es un lenguaje de programación de código abierto completo. El código fuente, y la documentación adicional puede descargarse de: <http://www.lua.org>.

Debido a que los archivos de secuencias de comandos son texto, se pueden editar con cualquier editor de texto. (por ejemplo, bloc de notas).

Además del conjunto de comandos estándar de Lua descrito en [7], se han añadido una serie de comandos específicos de FEMM para manipular archivos tanto en el preprocesador como en el posprocesador. Estos comandos se describen en las siguientes secciones.

Pueden consultarse los comandos específicos en el manual 4.2 FEMM.

FEMM dispone de una consola LUA para poder realizar operaciones a través del código, desde extraer datos en tablas, hasta imprimir por pantalla datos, gráficas y resultados.

4.7. Problemas electromagnéticos a resolver con FEMM.

En el estudio de una máquina eléctrica a menudo nos encontramos con diversos problemas a tener en cuenta a la hora de hacer un diseño. Por ejemplo, no será lo mismo un transformador cuyo campo magnético es estático, a una máquina de corriente continua, o una de inducción.

Recordemos los tipos de problemas que nos puede resolver FEMM:

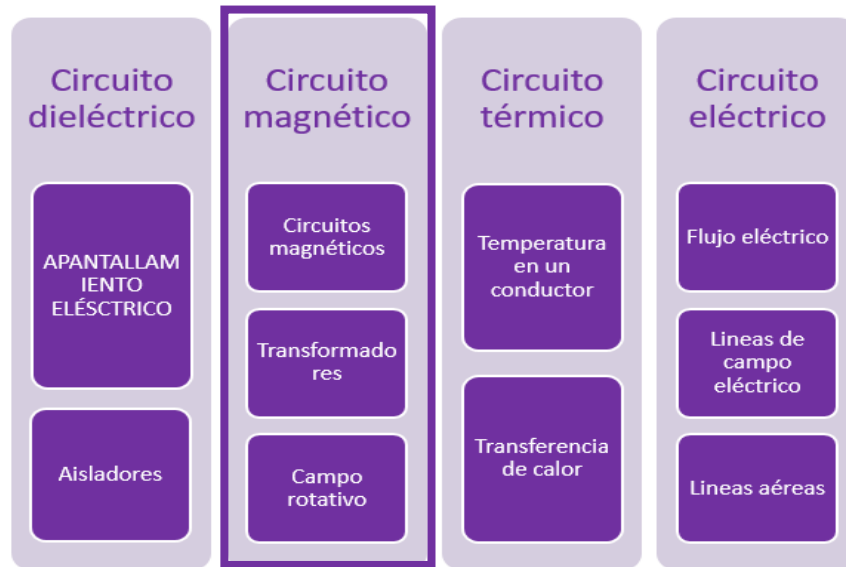


Figura 29: problemas a resolver con FEMM

Aunque podamos modelizar tanto el problema de disipación térmica por pérdidas de la máquina eléctrica, así como la cuestión de aislamiento de los conductores de su interior, Nos vamos a centrar en el problema electromagnético que es donde FEMM se hace fuerte.

A la hora de diseñar máquinas eléctricas nos veremos ante la dificultad de recrear las condiciones que aparecen en los modelos reales para que los resultados obtenidos en el diseño sean lo más próximos al posterior prototipo.

Los siguientes epígrafes tratan de resumir cómo recrear esas condiciones que nos encontraremos más adelante a la hora de diseñar una máquina en condiciones lo más próximas a la realidad.

4.7.1. Circuitos magnéticos. Base de los transformadores.

El circuito magnético es resultado de la conversión de los elementos que componen el espacio ocupado por las líneas de campo que se generan al interactuar unos con otros.

Igualmente, las leyes que siguen ambos circuitos son similares:

$$U = R \cdot I \text{ (Ley de Ohm)} \quad \mathcal{F} = \mathcal{R} \cdot \phi \text{ (Ley de Hopkinson)}$$

Analizadas sus analogías, este apartado pretende explicar cómo podemos modelizar con FEMM un circuito magnético y resolver sus parámetros.

Circuito magnético			Circuito eléctrico		
Magnitud	Símbolo	Uds. S.I.	Magnitud	Símbolo	Uds. S.I.
Fuerza magnetomotriz	\mathcal{F}	Av	Potencial	U	V
Flujo magnético	ϕ	Wb	Corriente eléctrica	I	A
Reluctancia	\mathcal{R}	H-1	Resistencia	R	Ohm
Densidad de flujo	B	T	Densidad de corriente	J	A/m ²
Permeabilidad	μ	H/m	Conductividad	σ	S/m
Intensidad campo Mag.	H	A/m	Campo eléctrico	E	V/m

Tabla 4: semejanza de parámetros electromagnéticos

Calcular la corriente necesaria en la bobina de la figura P.1.2 para producir una densidad de flujo en el entrehierro igual a 0.8 T. El núcleo está hecho de una materia cuya curva de imanación viene dada por:

$$B = \frac{1,6 H}{75 + H} \quad B: \text{Teslas}; \quad H: \text{A.v/m}$$

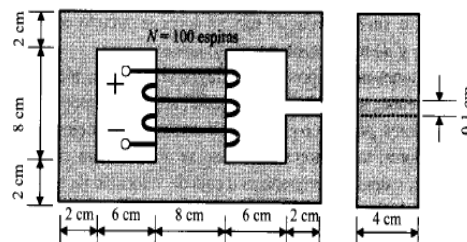


Figura P.1.2.

Figura 30: ejercicio 1.3 página 77 libro máquinas eléctricas J.F. Mora 5ª ed.

Supongamos un problema tipo de circuitos magnéticos, por ejemplo, el problema 1.3 de la pag.77 de [4].

Para comenzar a resolver el problema representamos la figura con el programa FEMM, vía coordenadas como ya vimos al principio del epígrafe 4. Una vez dibujada la geometría, importamos de la librería los materiales:

Properties → *Materials Library* →

- Air
- Nuevo material (Opción No-Linear Curve B-H, e introducimos los puntos según la ecuación que nos da el problema)
- 18 AWG

Es importante crear alrededor de nuestra geometría un entorno con una circunferencia para que el programa aligere los cálculos. La creación del nuevo material se debe a que el ejercicio propuesto no nos da un material estándar, si no que nos muestra la ecuación de la curva B-h que nosotros podemos introducir manualmente:

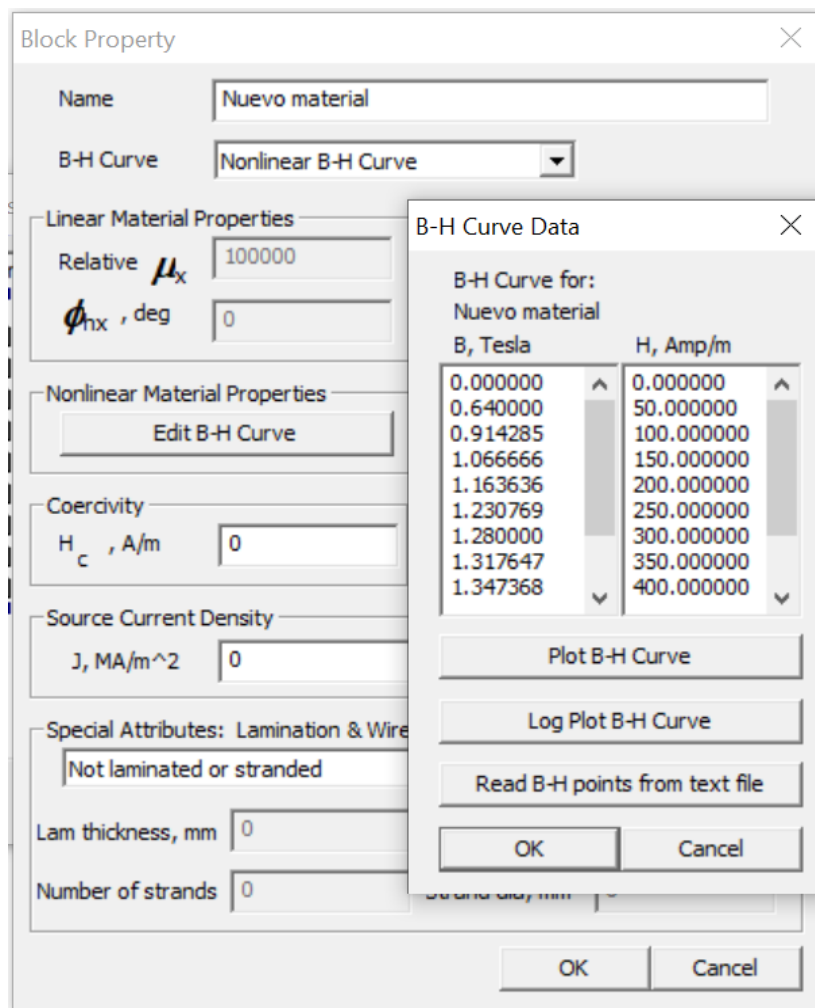


Figura 31: curva BH en FEMM

Para modelizar la bobina debemos “decirle” al programa que en el centro del núcleo magnético existe un solenoide de 100 espiras con una intensidad determinada:

Properties → *Circuit* → (*Bobinado serie*)

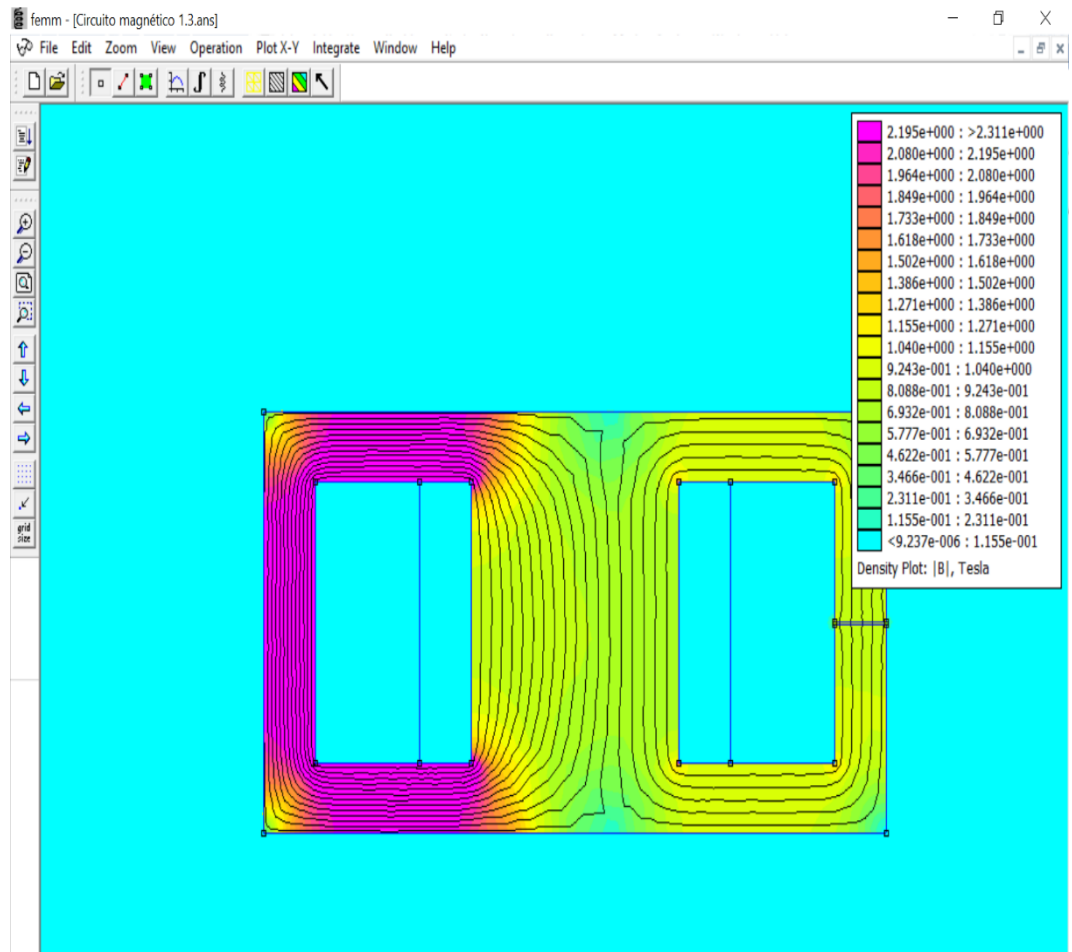


Figura 32: resultados ejercicio 1.3

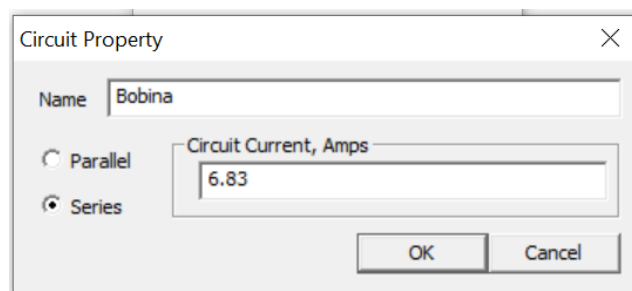


Figura 33: introducción de amperaje para la propiedad Circuits

Una vez colocados todos los materiales, presionamos *Mesh*, para realizar el mallado correspondiente y después pinchamos en *Run Analysis* para ejecutar el programa. Por último, le damos a *View* para visualizar resultados.

Para identificar el flujo en el entrehierro, realizamos un zoom en esa zona, marcamos la línea a través de la cual observaremos resultados, y seleccionamos *Integrate*:

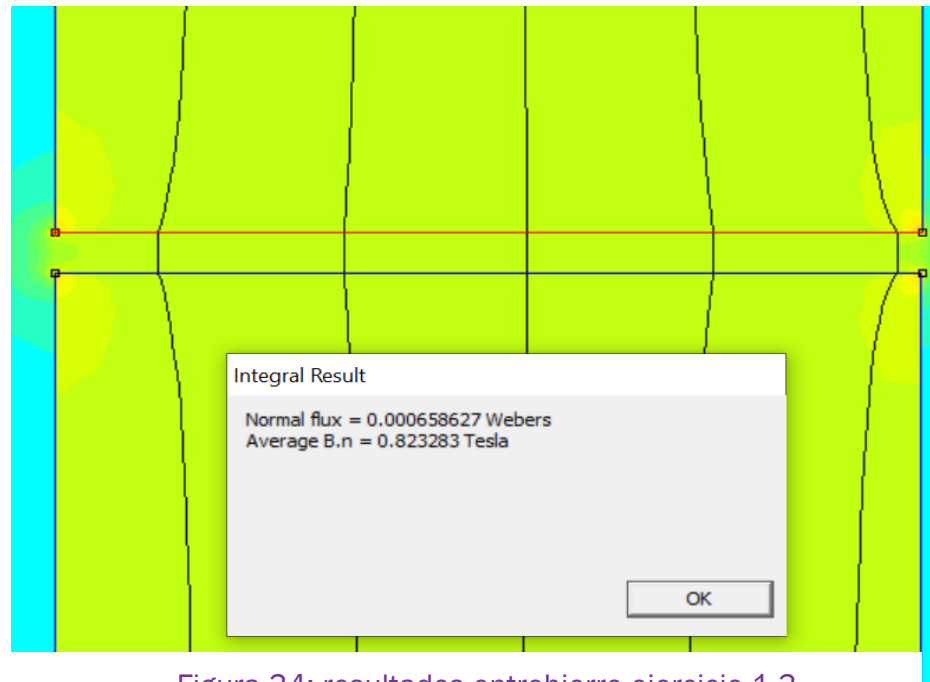


Figura 34: resultados entrehierro ejercicio 1.3

Conclusiones:

- La resolución de problemas de circuitos magnéticos sigue una lógica inversa a la resolución manual, pues el problema plantea, dados:
 $B \rightarrow H \rightarrow \text{Flujo entrehierro} \rightarrow \text{Intensidad en la bobina}$, y FEMM resuelve:
 $B \rightarrow H \rightarrow \text{Intensidad en la bobina} \rightarrow \text{Flujo entrehierro}$
- Una vez introducidas las propiedades de los materiales, la geometría, y simulado la generación de corriente el software nos permite conocer:
 - Propiedades de punto (B, H, μ, J , factores de relleno, etc.)
 - Propiedades de circuito (I , caídas de tensión, flujo, L, Z , potencias)
 - Integrales de línea (B, H , fuerzas, pares)
 - Integrales de volumen (Fuerzas, pares, energía...)
 - Gráficos
- Por norma general deberemos definir condiciones de frontera, modificar las propiedades de los materiales, y para conseguir resolver problemas de tipo circuito magnético, modelizar las bobinas.

4.7.2. Imanes permanentes. Base para el estudio de campos magnéticos

Otro de los problemas que nos encontraremos, es el de simular en FEMM un imán permanente. Como ya hemos visto, podemos simular un electroimán con un núcleo de hierro, añadiendo el circuito eléctrico con la propiedad *Circuits*

Pues bien, ahora explicaremos cómo crear un imán permanente sin utilizar bobinas alrededor de un núcleo magnético y lo compararemos con este método.

Recordemos los parámetros básicos necesarios para definir un imán permanente, y a la vez le daremos unos valores que nos servirán para nuestra simulación.

- Remanencia del imán:
 $B_r = 1 T$
- Coercitividad del Imán:
 $H_c = 150000 A/m$

Para este imán consideraremos que la relación B-H en el 2º cuadrante de la curva B/H. El resto de parámetros los deducimos de los dos anteriores:

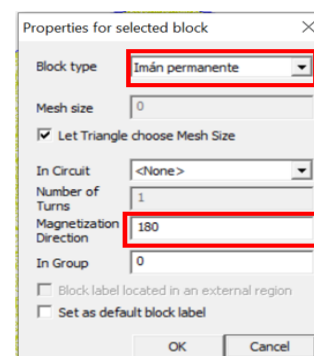
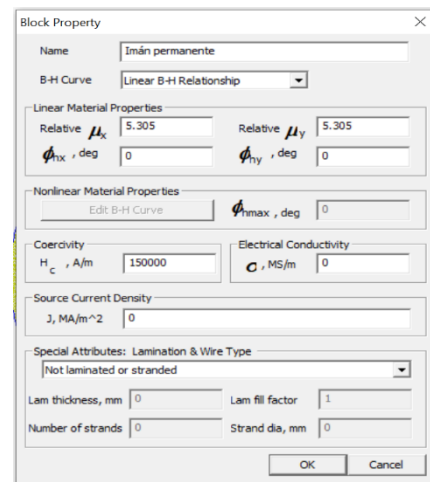
- Permeabilidad absoluta del aire: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$
- Permeabilidad del material: $B = \mu \cdot H; \mu = \frac{B}{H} = 6.666 \cdot 10^{-6} H/m$
- Permeabilidad relativa: $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 5.3051 H/m$

Dibujamos una geometría sencilla para simular una muestra de material magnético de dimensiones 100x50x10, e introducimos los materiales:

Properties → Materials Library →

- Air
- Nuevo material (imán permanente)

El aire viene definido por defecto, el imán tendremos que crearlo introduciendo sus características antes descritas.



Para simular las líneas de campo en el apartado *Magnetización direction*. introducimos la dirección que queremos para dichas líneas creando un polo norte y un polo sur, de la siguiente manera:

El resultado que obtenemos:

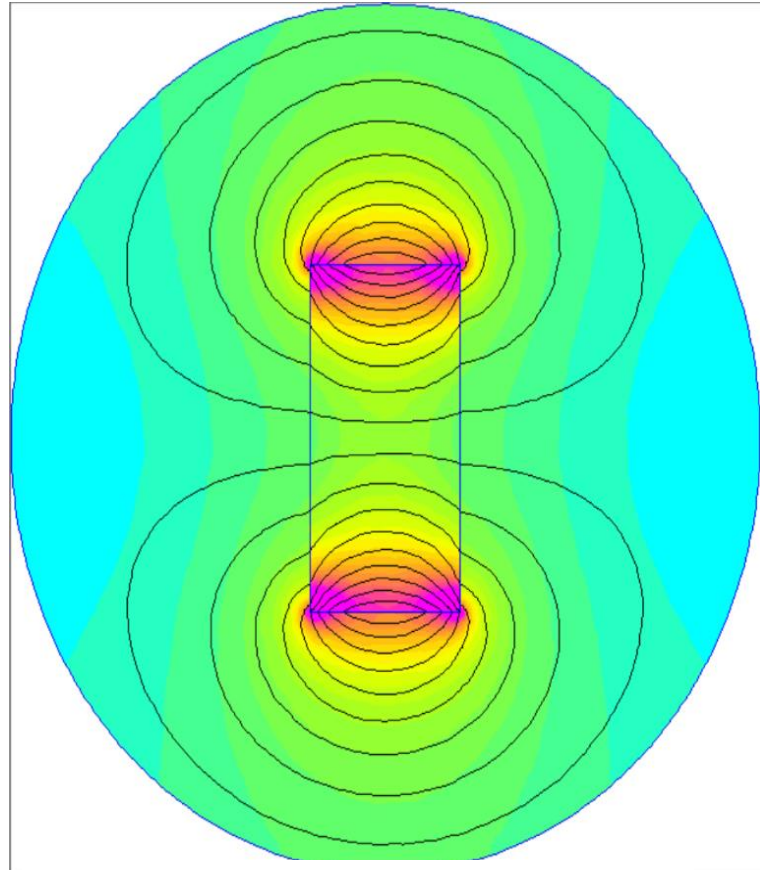


Figura 35: simulación de un Imán permanente

Con la misma geometría, pero simulando como electroimán, debemos utilizar un material con *No-Linear curve B-H* de forma que:

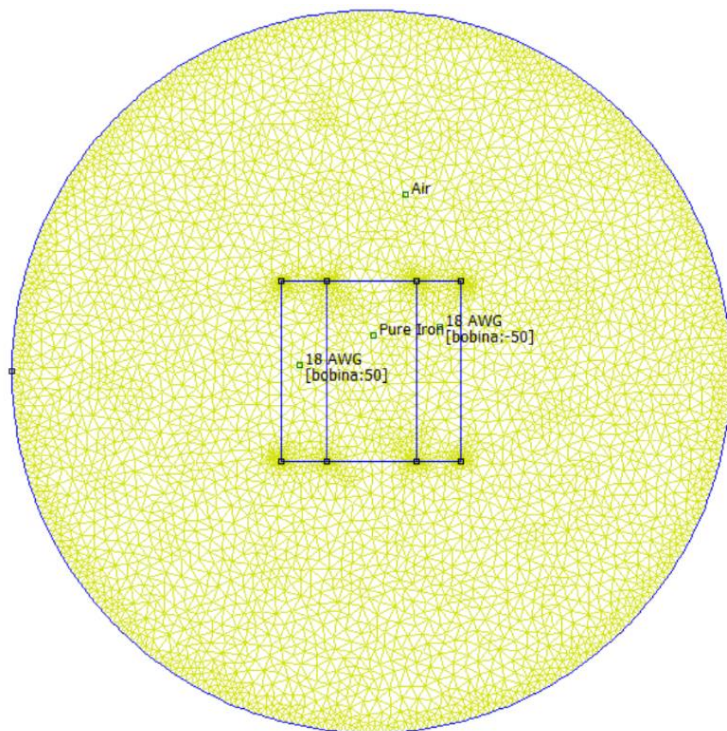


Figura 36: configuración electroimán

Como resultado de la simulación:

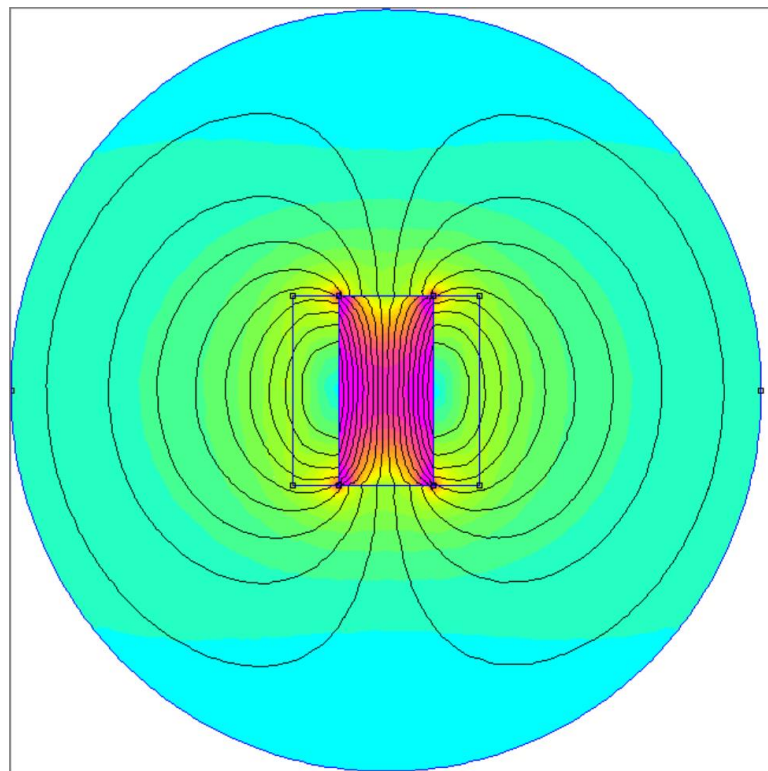


Figura 37: simulación de un electroimán

Conclusiones:

- Podemos definir en un circuito magnético un electroimán o un imán permanente; de la misma forma lo podremos introducir en máquinas rotativas o en máquinas estáticas.
- Según le demos la orientación, bien a las bobinas, bien a la dirección de campo, las líneas de campo magnético irán en una dirección u otra.
- Una vez introducidas las propiedades de los materiales, la geometría, y simulado la generación de corriente el software nos permite conocer:
 - Propiedades de punto (B,H, μ ,J, factores de relleno,etc.)
 - Propiedades de circuito (I, caídas de tensión, flujo, L, Z, potencias)
 - Integrales de línea (B, H,fuerzas,pares)
 - Integrales de volumen (Fuerzas, pares, energía...)
 - Gráficos

4.7.3. Campo magnético giratorio. Base para máquinas rotativas.

Uno de los conceptos más importantes para entender el funcionamiento de una máquina rotativa es el de campo giratorio. Este concepto se explica a través del Teorema de Ferraris y en extensión e Teorema de LeBlanc:

El teorema de Ferraris dice que para un conjunto de bobinas separadas de forma equidistante y por las que circulan unas corrientes senoidales equilibradas, desfasadas en el tiempo se crea un campo magnético senoidal que se desplaza en el espacio con una frecuencia igual a la circula la corriente por las bobinas.

El ejemplo más sencillo para explicar este fenómeno es el de tres devanados colocados (en el estator o en el rotor) de tal forma que estén desfasados entre sí 120° eléctricos en el espacio. Para ilustrar nuestro ejemplo:

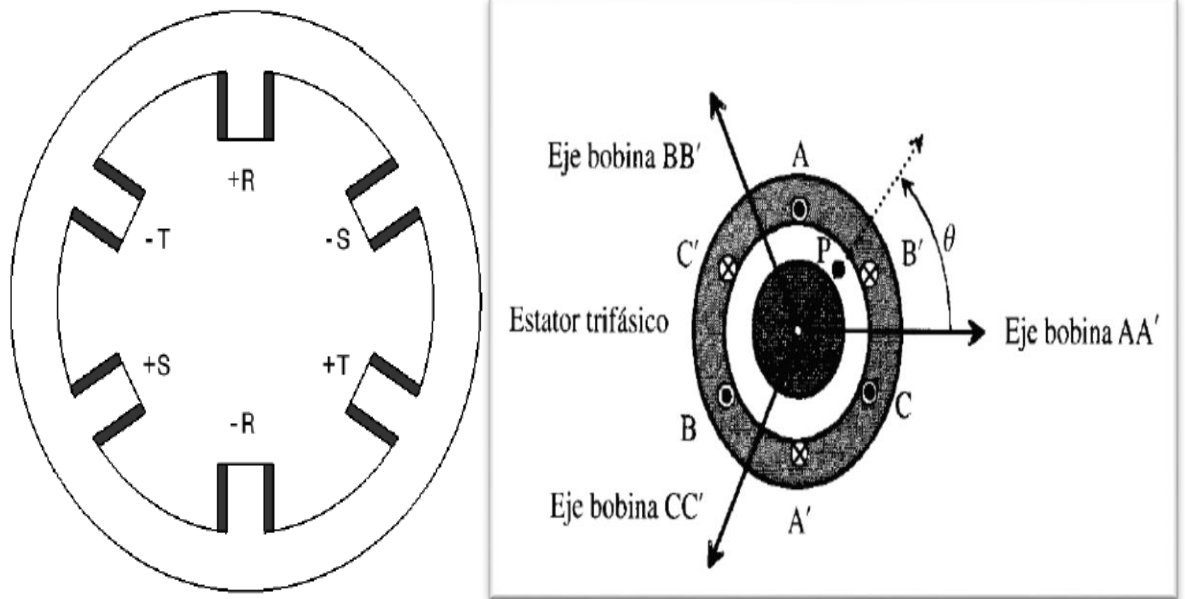


Figura 38: devanados desfasados 120° eléctricos. Fuente: [4]

Debe recalcar que los devanados llevan corrientes desfasadas 120° en el tiempo y que los bobinados están desfasados 120° eléctricos en el espacio.

Suponiendo que la distribución de cada devanado sea senoidal en el espacio, cada devanado producirá una f.m.m. pulsatoria orientada en su eje respectivo. Como quiera que los ejes magnéticos están desfasados 120° eléctricos el campo magnético irá girando en torno a estos ejes:

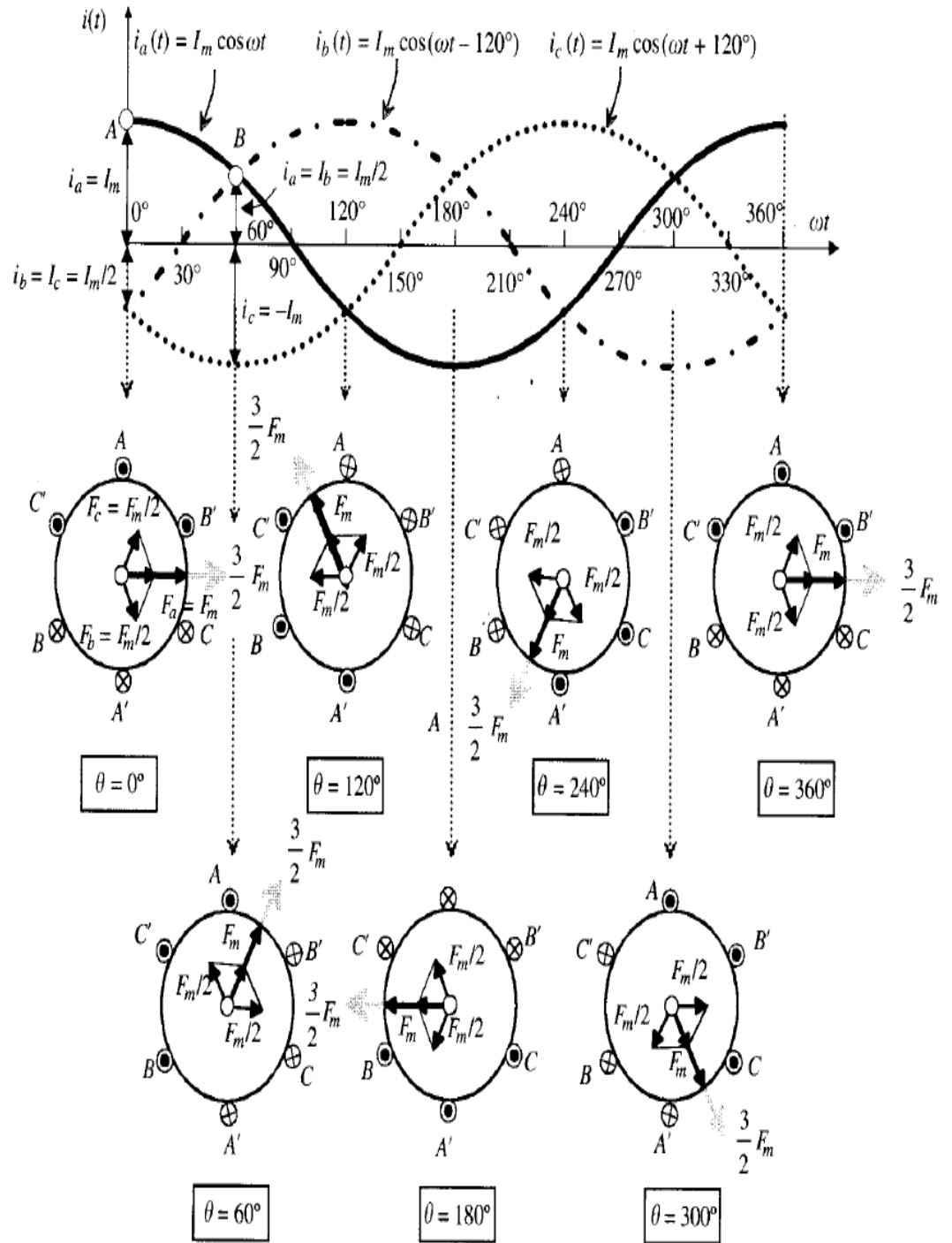


Figura 39: f.m.m. de un devanado trifásico alimentado por corrientes trifásica.

Fuente: [4]

Este campo magnético giratorio lo podemos idealizar y simular con FEMM. Teniendo en cuenta la idea principal podremos realizar el siguiente problema.

En primer lugar, dibujamos la geometría, bien por coordenadas o importando el archivo .DXF de Autocad. Nuestra geometría quedaría de la siguiente manera:

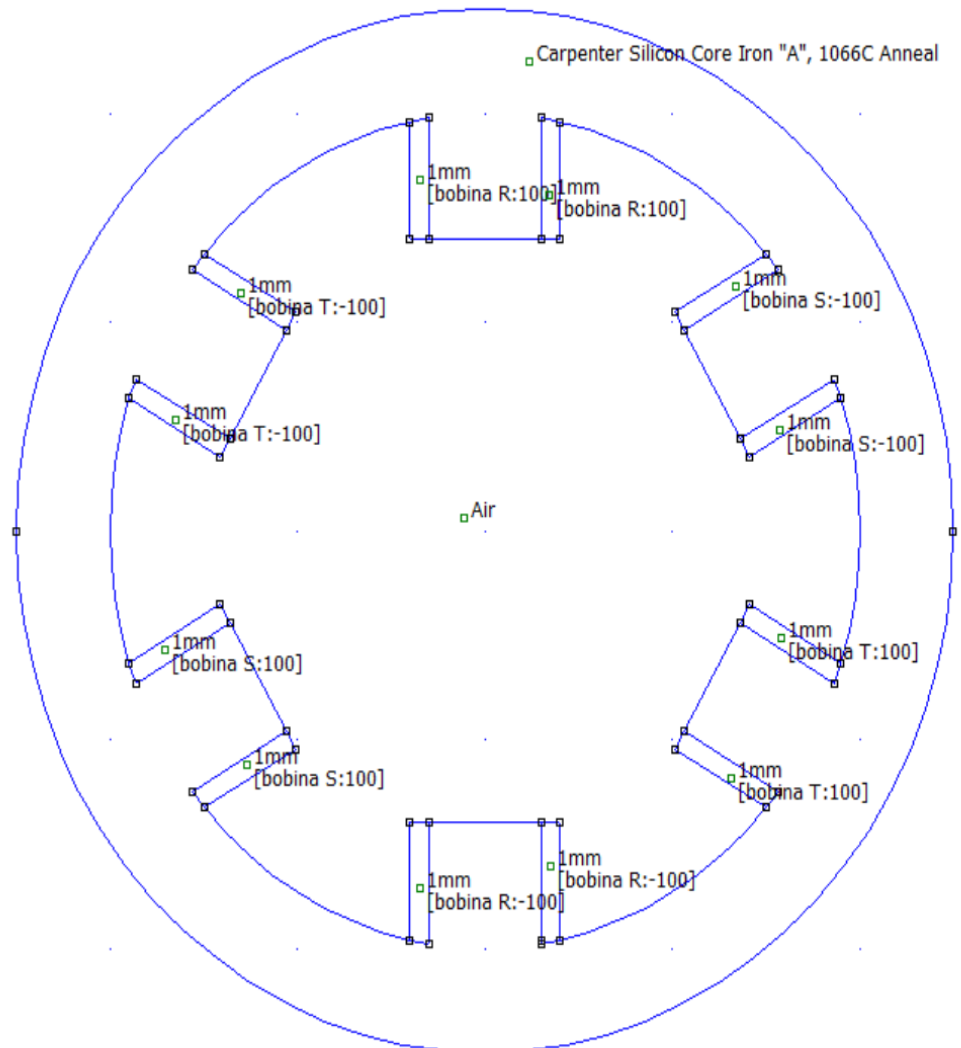


Figura 40: geometría básica para simulación. Fuente: Propia

Tendremos que definir el problema para ello: *Problem definition* → problema planar a 50 Hz. Escogemos unidades el milímetro y asignamos una profundidad de 1 m.

Importamos de la librería los siguientes materiales:

Properties → *Materials Library* →

- Air
- Carpenter Silicon core iron "A", 1066C Anneal
- Copper Metric Magnet wire 1mm

Se han escogido estos materiales porque son buenos conductores del campo magnético y eléctrico respectivamente. El hueco interior se rellena con aire.

Un detalle a tener en cuenta es la necesidad de modificar los parámetros del acero al silicio, pues en los materiales macizos el campo magnético no conduce como nos gustaría por tanto es necesario indicarle al programa que trabajaremos con acero laminado para reducir las pérdidas de Foucault.

Properties → *Materials* → *Carpenter Silicon core iron "A", 1066C Anneal* → *modify Property* → *Special Attributes: Lamination & wire Type* → *Laminated in-plane* → *Lam Thickness=0.1mm, Lam fill Factor=0.95*

Properties → *Circuits* → *bobina R, bobina S, bobina T* a los polos negativos les asignamos -100 vueltas y a los positivos +100.

- $I_R = \sqrt{2} \cdot \cos(\varphi) + j\sqrt{2} \cdot \sin(\varphi)$
- $I_S = \sqrt{2} \cdot \cos(\varphi - 120^\circ) + j\sqrt{2} \cdot \sin(\varphi - 120^\circ)$
- $I_T = \sqrt{2} \cdot \cos(\varphi + 120^\circ) + j\sqrt{2} \cdot \sin(\varphi + 120^\circ)$

Por último, añadimos las condiciones de contorno a la carcasa del circuito. *BC Type: Prescribed A* → *Prescribed A*. mallamos el diseño y ejecutamos.

Finalizado el diseño preliminar de nuestro estudio procedemos a girar el campo. Esto se consigue escribiendo una serie de comandos en la *consola Lua*.

Abierta la consola procedemos a escribir un pequeño programa que le irá dando valores diferentes a las propiedades de las bobinas R, S, T, y unos desfases angulares a las corrientes, la estructura del programa es la siguiente:



```
mi_saveas('temp01.FEM'); --Guarda y crea en un fichero temporal.
--Podemos ir cambiando el incremento de la iteración
--El número de simulaciones irá en función de los grados de avance que le demos
--incr_fi= 1.04719755 --Incrementos de 60 grados (Pi/3 rad)
[nº simulaciones:5]
--incr_fi=0.523598776 --Incrementos de 30 grados (Pi/6 rad)
[nº simulaciones:11]
incr_fi=0.261799388 --Incrementos de 15 grados (Pi/12 rad)
[nº simulaciones:23]
for index_fi=0,23,1 do --Inicia bucle para 23 iteraciones
fi=0+index_fi*incr_fi
--Comandos que asigna el valor de la corriente en cada iteración
```



```
mi_modifycircprop("bobinaR",1,sqrt(2)*cos(fi)+1*sqrt(2)*sin(fi
))
mi_modifycircprop("bobinaS",1,sqrt(2)*cos(fi-
2.0943951)+1*sqrt(2)*sin(fi-2.0943951))
mi_modifycircprop("bobinaT",1,sqrt(2)*cos(fi+2.0943951)+1*s
qrt(2)*sin(fi+2.0943951))
mi_analyze(); -Calcula
mi_loadsolution(); -Carga resultados
-Opciones para el postproceso: podemos quitar y poner para
que salgan unos resultados u otros
mo_showcontourplot(40,-500e-6,500e-6,"real")
-mo_showdensityplot(1,0,0,2e-4,"bmag")
mo_savebitmap(format("campo120_%1$d.bmp",index_fi)); -
Guardar imágenes
end -Acaba el bucle
```

```
Lua Console
mo_savebitmap(format("campo120_%1$d.bmp",index_fi));
end
mi_saveas("temp01.FEM");
delta_fi=0.261799388
for index_fi=0,23,1 do
fi=0+index_fi*delta_fi

mi_modifycircprop("bobina R",1,sqrt(2)*cos(fi)+I*sqrt(2)*sin(fi))
mi_modifycircprop("bobina S",1,sqrt(2)*cos(fi-2.0943951)+I*sqrt(2)*sin(fi-2.0943951))
mi_modifycircprop("bobina T",1,sqrt(2)*cos(fi+2.0943951)+I*sqrt(2)*sin(fi+2.0943951))
mi_analyze();
mi_loadsolution();

mo_showcontourplot(40,-500e-6,500e-6,"real")
mo_showdensityplot(1,0,0,2e-4,"bmag")
mo_savebitmap(format("campo120_%1$d.bmp",index_fi));
end

mi_saveas("temp01.FEM");
delta_fi=0.261799388
for index_fi=0,23,1 do
fi=0+index_fi*delta_fi

mi_modifycircprop("bobina R",1,sqrt(2)*cos(fi)+I*sqrt(2)*sin(fi))
mi_modifycircprop("bobina S",1,sqrt(2)*cos(fi-2.0943951)+I*sqrt(2)*sin(fi-2.0943951))
mi_modifycircprop("bobina T",1,sqrt(2)*cos(fi+2.0943951)+I*sqrt(2)*sin(fi+2.0943951))
mi_analyze();
mi_loadsolution();

mo_showcontourplot(40,-500e-6,500e-6,"real")
mo_showdensityplot(1,0,0,2e-4,"bmag")
mo_savebitmap(format("campo120_%1$d.bmp",index_fi));
end
|

Clear Input Clear Output Evaluate
```

Figura 41: consola Lua con algoritmo para campo giratorio. Fuente: Propia

Una vez introducido el código presionamos *Evaluate* y automáticamente el programa realiza 23 iteraciones, (se pueden poner las que se quiera) dando valores diferentes a las corrientes que pasan por las bobinas, tal como le indicamos al programa que hiciera y grabando las imágenes en cada iteración de la forma del flujo. Se tiene en cuenta que por las bobinas pasa 1 A de corriente eficaz.

El resultado que mostramos ahora tan solo es de 4 posiciones:

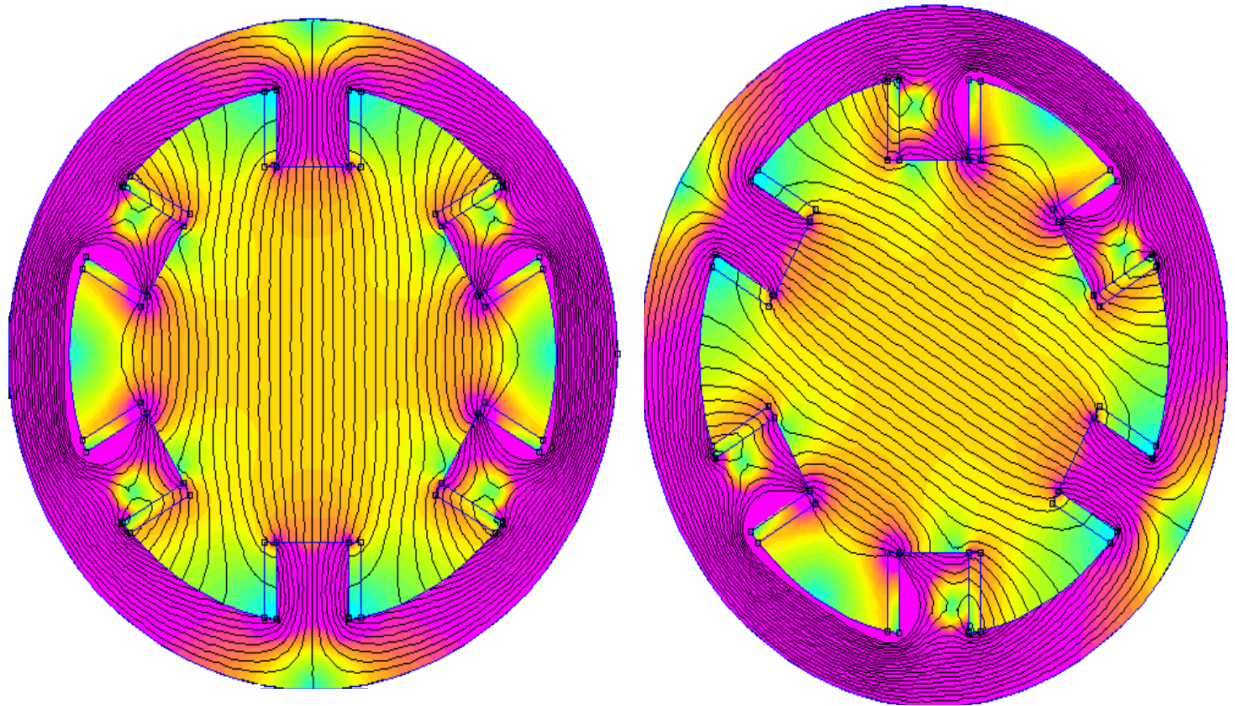


Figura 42: líneas de campo a 90° y 120° Fuente: Propia

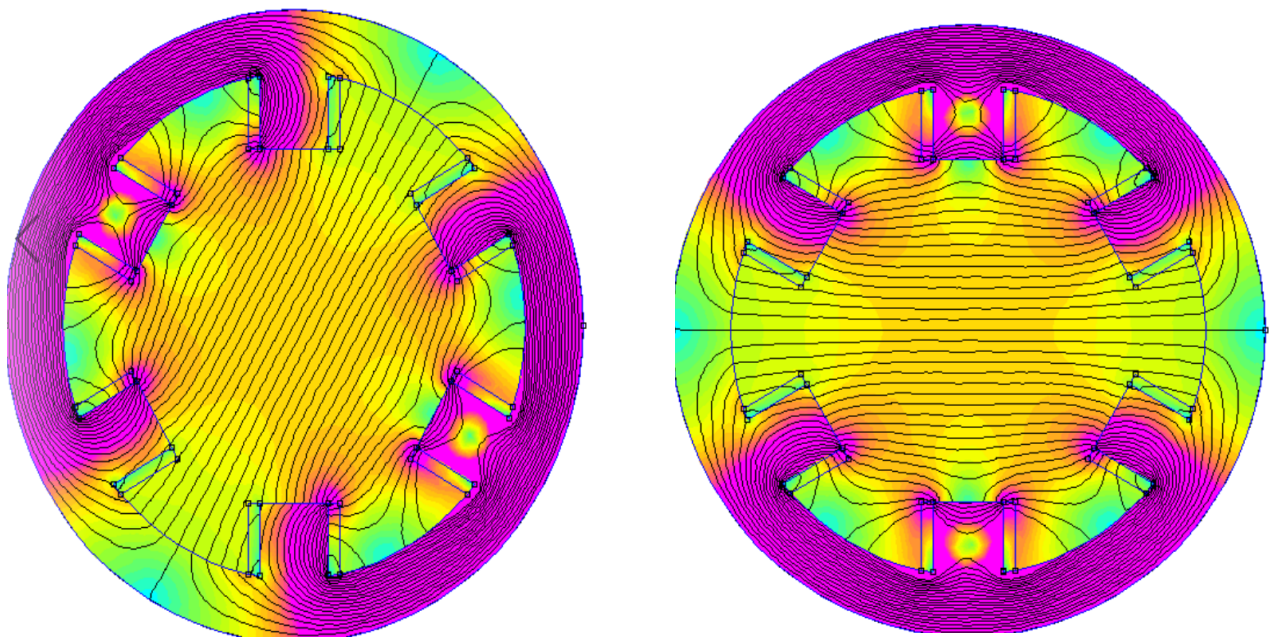


Figura 43: líneas de campo a 240° y 180° Fuente: Propia

5. Clasificación de máquinas eléctricas.

- Definición

Se entiende por máquina eléctrica como el dispositivo capaz de transformar cualquier forma de energía en energía **eléctrica** o a la inversa y también se incluyen en esta **definición** las **máquinas** que transforman la **electricidad** en la misma forma de energía, pero con una presentación distinta más conveniente a su transporte o utilización

- Clasificación ([4])

- Estáticas: Son los llamados transformadores. Su función principal es la de gobernar la tensión o intensidad del circuito eléctrico, manteniendo la potencia (en el análisis ideal). Su principal característica es que no tiene movimiento relativo entre sus partes constituyentes.
- Dinámicas/Rotativas: Se basa en el *Principio de conservación de la energía mecánica*. Si la máquina convierte energía mecánica en energía eléctrica, se las denomina generadores, si es al revés se las denomina motores. Son máquinas reversibles, y se las clasifica como rotativas porque existe un movimiento relativo entre el rotor (que gira) y el estator (que es fijo).

5.1. Análisis cuantitativo de máquinas eléctricas.

La clasificación que hace [4] de las máquinas eléctricas va en función de los dos criterios de flujo de inductor e inducido y las frecuencias de sus corrientes:

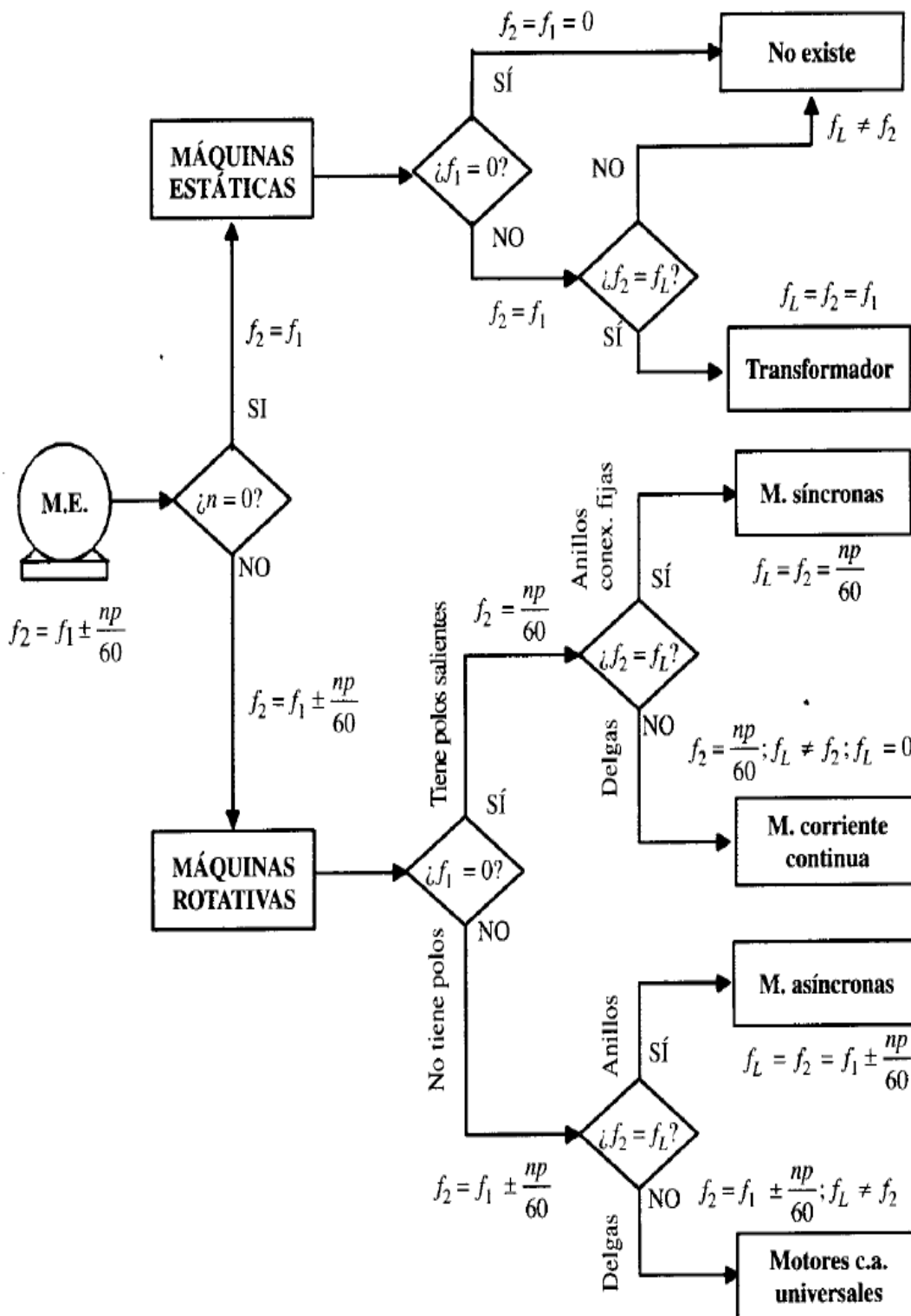


Figura 44: clasificación máquinas eléctricas. Fuente [4]

5.1.1. Transformadores.

Son máquinas estáticas, constituidas por dos devanados, inductor e inducido.

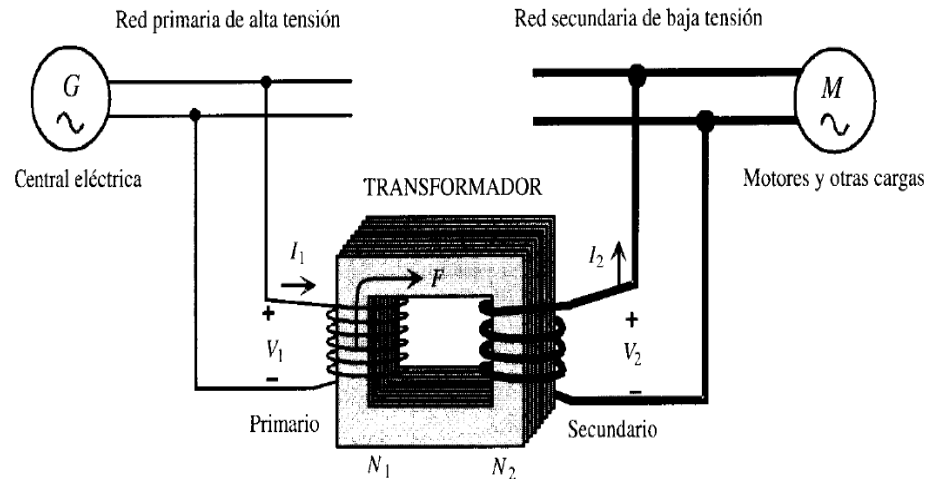


Figura 45: transformador Fuente [4]

5.1.2. Máquinas síncronas.

Son máquinas rotativas $n \neq 0$ y se caracterizan por ser:

$$f_1 = 0; f_2 = \pm \frac{n \cdot p}{60}; f_L = f_2$$

Es decir, consisten en un inductor de c.c. ($f_1 = 0$), que se denomina también devanado de excitación o campo, que suele colocarse en el rotor alimentado por medio de anillos. El inducido normalmente es trifásico y suele colocarse en el estator.

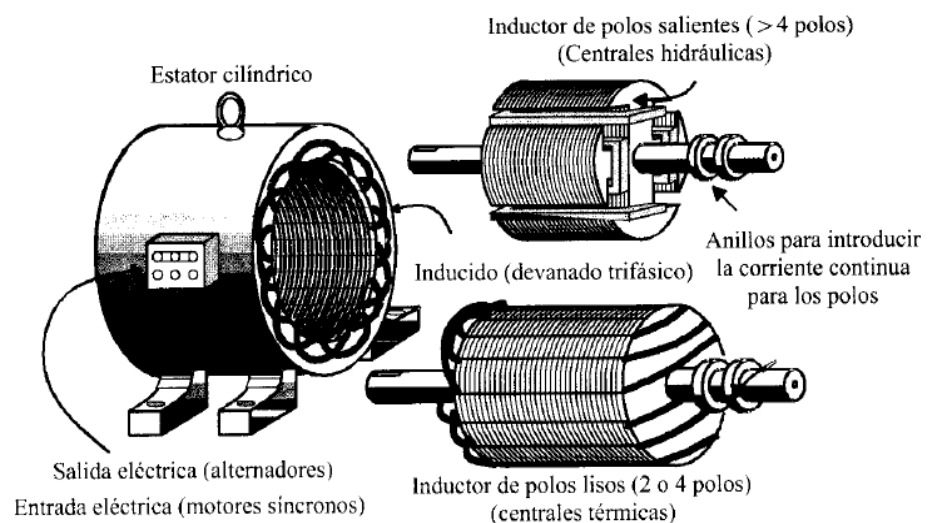


Figura 46: máquina síncrona Fuente [4]

5.1.3. Máquinas de corriente continua.

Son máquinas rotativas $n \neq 0$ y se caracterizan por ser:

$$f_1 = 0; f_2 = \pm \frac{n \cdot p}{60}; f_L \neq f_2$$

Las máquinas de c.c. reciben este nombre porque la frecuencia de alimentación/generación es cero, por lo tanto, reciben corriente continua, lo cual se consigue con la acción rectificadora del colector.

Debido a la acción rectificadora del colector se obtiene una c.c. entre las escobillas de salida $f_L = 0$; energía aplicada a la carga. Cuando funcionan como motor, es preciso introducir c.c. por el inductor y por las escobillas del inducido, apareciendo un par que hace girar el rotor de la máquina. La velocidad de giro puede regularse fácilmente, controlando la corriente del inductor o del inducido, mediante el sistema "Ward-Leonard".

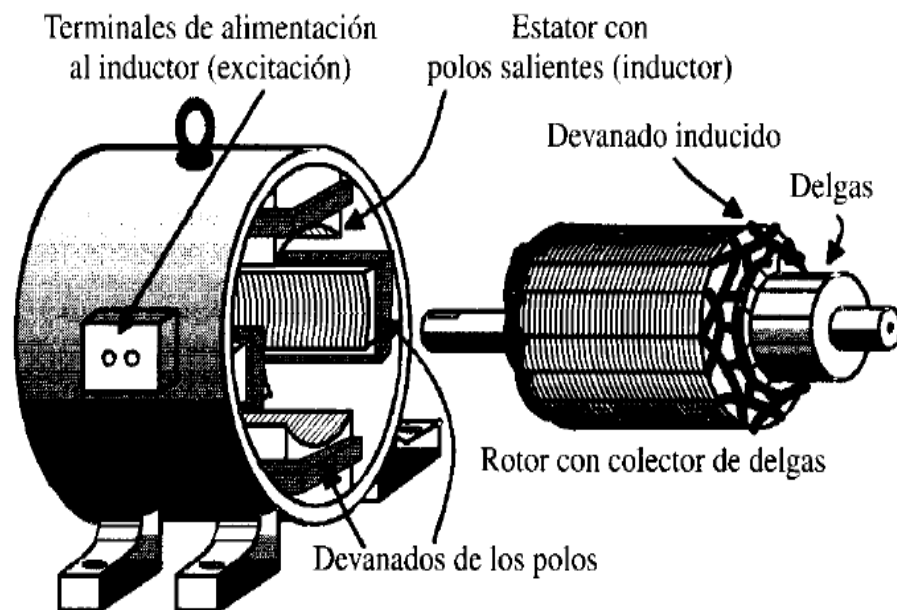


Figura 47: máquina de c.c. Fuente [4]

5.1.4. Máquinas asíncronas o de inducción.

Son máquinas rotativas $n \neq 0$ y se caracterizan por ser:

$$f_1 \neq 0; f_2 = f_1 = \pm \frac{n \cdot p}{60}; f_L = f_2$$

Están formadas por un devanado inductor situado en el estator por el que se introduce una c.a. de frecuencia f_1 . En el caso de máquinas de potencia superior a $\frac{1}{2}$ Cv, el devanado anterior es trifásico, al igual que la corriente de alimentación, apareciendo, de acuerdo con el “Teorema de Ferraris” un campo magnético giratorio, cuya velocidad es:

$$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$$

Tiene tres modos de funcionamiento:

- a) Motor
- b) Generador
- c) Convertidor de frecuencia

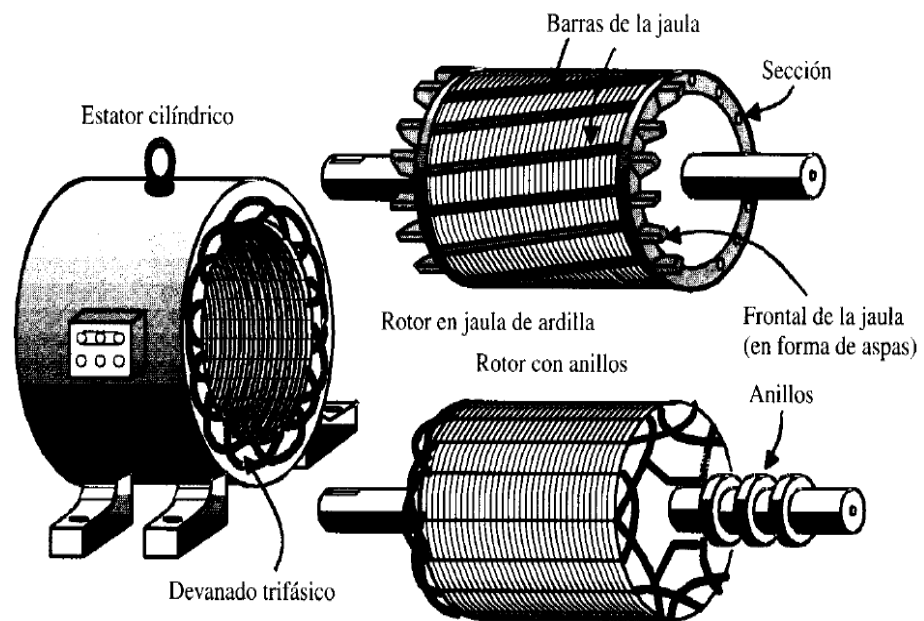


Figura 48: máquina síncrona Fuente [4]

6. Máquinas eléctricas con FEMM.

6.1. El transformador.

6.1.1. Introducción.

El objetivo del presente epígrafe es presentar un modelo de transformador a través del programa FEMM.

Un transformador de determinados datos nominales, se modela mediante un circuito equivalente que consta de bobinas y resistencias (modelo de parámetros concentrados).

Los parámetros que van a definir a ese transformador son:

Parámetro	Simbología	Unidades
Tensión aplicada al primario, tensión al secundario	U1(lado de alta), U2(lado de baja)	V
f.e.m. inducida en el primario y en el secundario	E1, E2	V
Número de espiras en el primario y secundario	N1, N2	Nº de vueltas
Resistencia del arrollamiento primario y secundario	R1, R2	Ω
Reactancia de dispersión en el primario, secundario	Xd1, Xd2	Ω
Corriente en el primario y secundario	I1 (lado de alta), I2 (lado de baja)	A
Corriente de vacío	I_0	A
Corriente magnetizante	I_μ	A
Corriente de pérdidas en el hierro	$I(Fe)$	A
Relación de transformación	r_t	-
Pérdidas en el hierro (Histéresis+Foucault)	$P(Fe)$	W
Pérdidas en el cobre (efecto Joule)	$P(Cu)$	W
Tensión de cortocircuito(% respecto U_n)	U_{cc}	%
Potencia activa, reactiva, aparente.	P,Q,S	W, VAR, VA

Tabla 5: factores fundamentales de un transformador

Para obtener los citados parámetros de un transformador se realizan dos ensayos, uno de vacío y otro de cortocircuito. Los transformadores pueden ser monofásicos o trifásicos, pero para ambos se hará el estudio de una fase.

6.1.2. Objetivo.

Simular el comportamiento magnético de un transformador trifásico

6.1.3. Planteamiento.

El circuito equivalente de una fase de un transformador es el siguiente:

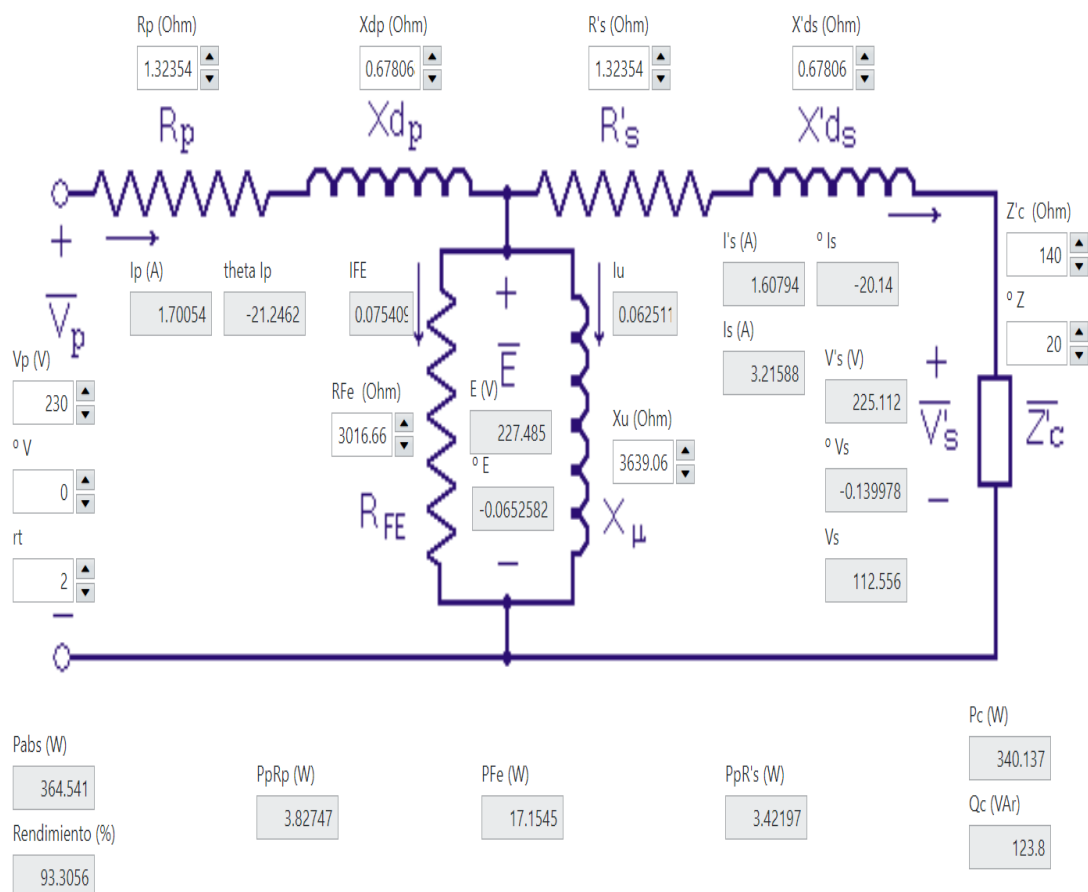


Figura 49: circuito equivalente con valores aleatorios. Fuente: [AulaMoisan](#)

El diseño de máquinas eléctricas, a partir de los datos nominales, se hace mediante un método de cálculo llamado Cálculo Paramétrico, que utiliza un parámetro magnético (la inducción máxima en una zona característica, que en el caso del transformador es el núcleo) y dos parámetros eléctricos (la carga lineal específica y la densidad de corriente en los conductores). De

ese cálculo se deducen todas las dimensiones de la máquina y su circuito equivalente, que se contrastará después con el prototipo a construir.

Los programas de elementos finitos, como FEMM, nos permiten comprobar, partiendo de la geometría deducida previamente si la inducción magnética es la supuesta. También nos permiten introducir “cambios” en la geometría sin construir el prototipo y mejorar el diseño electromagnético (inducción óptima).

La propuesta de diseñar un transformador con FEMM se basa en hacer una simulación de los parámetros de alta y baja tensión para que el programa reconozca ambos circuitos y calcule la densidad de campo magnético que se establecería en nuestro apilamiento magnético.

6.1.3.1. Datos del transformador.

Para modelizar el transformador trifásico, es importante tener una serie de datos para poder realizar cálculos de diseño. A partir de los datos de la placa de características del fabricante, podemos deducir y calcular los datos necesarios para implementar en la simulación. En este apartado tendremos que tener en cuenta la sección 4.7. donde se resumen los diferentes problemas que resolveremos con FEMM, estos son:

- Problema magnético
- Transformadores.
- Corrientes desfasadas

Los datos del transformador son:

Placa de características	Características constructivas
Potencia nominal: 2000 kVA	Material: Chapa ferromagnética
Grupo de conexión Dy11	Espesor 0.4mm
Frecuencia 50Hz	Factor de empilado 0.95
U1/U2 20/0.4 (kV)	Sección 200x200 mm

Tabla 6: datos de transformador de distribución sacados a partir de [9]

6.1.3.2. Cálculo de parámetros.

Comenzamos calculando el número de espiras en el arrollamiento primario para conseguir una inducción en el núcleo de 1,5 T. Las N_1 espiras del lado de alta generan una f.c.e.m, e_1 , aproximadamente igual y de signo contrario a la tensión aplicada.

$$e_1 = -u_1 = -N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

Siendo el valor eficaz de e_1 :

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_1 \phi_{max} \approx 4.44 N_1 f s B_{max}$$

donde “s” es la sección del núcleo de magnético del transformador.

Luego N_1 :

$$N_1 = \frac{20000}{4.44 \cdot 50 \cdot (199.5^2 \cdot 10^{-6} \cdot 0.96) \cdot 1.5 \cdot \sqrt{2}} = 1111.5 \text{ espiras}$$

Queremos que la relación de transformación sea próxima a 50 (20/0.4 kV). Al estar conectado en Dy11, el número de espiras tendrá que cumplir con la siguiente relación:

$$m = \frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$$

$$N_2 = \frac{1111.5}{\sqrt{3} \cdot 50} = 12.83 \text{ espiras}$$

Redondeando:

$$N_1 = 1125 \text{ espiras} \quad N_2 = 13 \text{ espiras}$$

La intensidad (eficaz, de línea) que circulará por el arrollamiento de alta, en carga nominal, y por el arrollamiento de baja será de:

$$I_2 = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_1} = \frac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} \quad I_1 = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_2} = \frac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 20000}$$

$$I_2 = 1443.4 \text{ A}$$

$$I_1 = 28.87 \text{ A}$$

Por último, calculamos las secciones de los bobinados de alta y de baja. Imponemos como condición una densidad de corriente de 3A/mm².

$$Sección_{AT} = \frac{I_{1 \text{ fase}}}{J} = \frac{\left(\frac{28.868}{\sqrt{3}}\right) [A]}{3 [A/mm^2]} = 5.556 \text{ mm}^2$$

$$Sección_{BT} = \frac{I_{2 \text{ fase}}}{J} = \frac{1443.4 [A]}{3 [A/mm^2]} = 481.13 \text{ mm}^2$$

Redondeando y expresando en diámetro:

$$\phi_{AT} = 2.764 \text{ mm} \quad \phi_{BT} = 25.231 \text{ mm}$$

6.1.3.3. Problema con FEMM.

Como he dicho anteriormente, no entraremos en profundidad en el cálculo de parámetros del transformador, por lo que le voy a dar unos valores aproximados a los elementos básicos para conseguir una simulación y extraer conclusiones. Estos datos son:

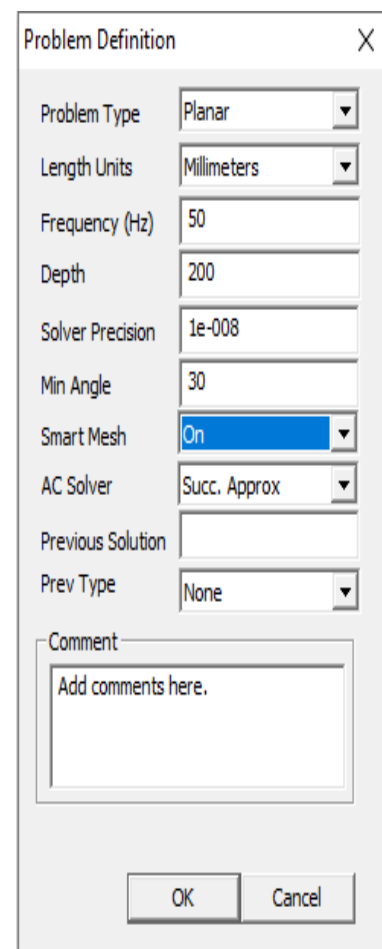
Lado de Alta tensión	Lado de Baja tensión
Nº de espiras N1=1125	Nº de espiras N2=13
Intensidad I1=28.87 A	Intensidad I2=1443.4
Sección conductor Sat=6 mm ²	Sección conductor Sbt=500 mm ²

Tabla 7: datos de transformador de distribución sacados a partir de las ecuaciones propuestas en [8]

Con estos datos podemos empezar con la realización del problema en FEMM. En primer lugar, debemos realizar las condiciones del problema:

- Create a new problema → *Magnetics problem*
- Problem definition →

- Seleccionamos los materiales para luego introducirlos en nuestro diseño:
 - Chapa magnética: “Carpenter Silicon Core Iron A, 1066C”. Especificamos en *Special Attributes: Lamination & WireType > Laminated in-plane > Lam thickness = 0.4mm > Lam fill factor = 0.95*
 - Espiras de alta: De cobre. Permeabilidad relativa 1 y conductividad de 58MS/m. Especificamos en *Special Attributes: Lamination & WireType > MagnetWire > Strand dia = 2.764mm*
 - Espiras de baja: De cobre. Permeabilidad relativa 1 y conductividad de 58MS/m. Especificamos en *Special Attributes: Lamination & WireType > MagnetWire > Strand dia = 25.231mm*



- Introducimos tres circuitos desfasados 120 grados entre sí:

- Lado de Alta (en triángulo)

$$\begin{aligned} &(28.86/\sqrt{3}) * \sqrt{2} * \sin(2 * 50 * 3.1416 * t) \\ &(28.86/\sqrt{3}) * \sqrt{2} * \sin(2 * 50 * 3.1416 * t - 2.0944) \\ &(28.86/\sqrt{3}) * \sqrt{2} * \sin(2 * 50 * 3.1416 * t + 2.0944) \end{aligned}$$

- Lado de baja (en estrella) desfasados 30 grados por ser Dy11

$$\begin{aligned} &1236.42 * \sqrt{2} * \sin(2 * 50 * 3.1416 * t - 0.5236) \\ &1236.42 * \sqrt{2} * \sin(2 * 50 * 3.1416 * t - 2.0944 - 0.5236) \\ &1236.42 * \sqrt{2} * \sin(2 * 50 * 3.1416 * t + 2.0944 - 0.5236) \end{aligned}$$

- El resultado final de la geometría queda:

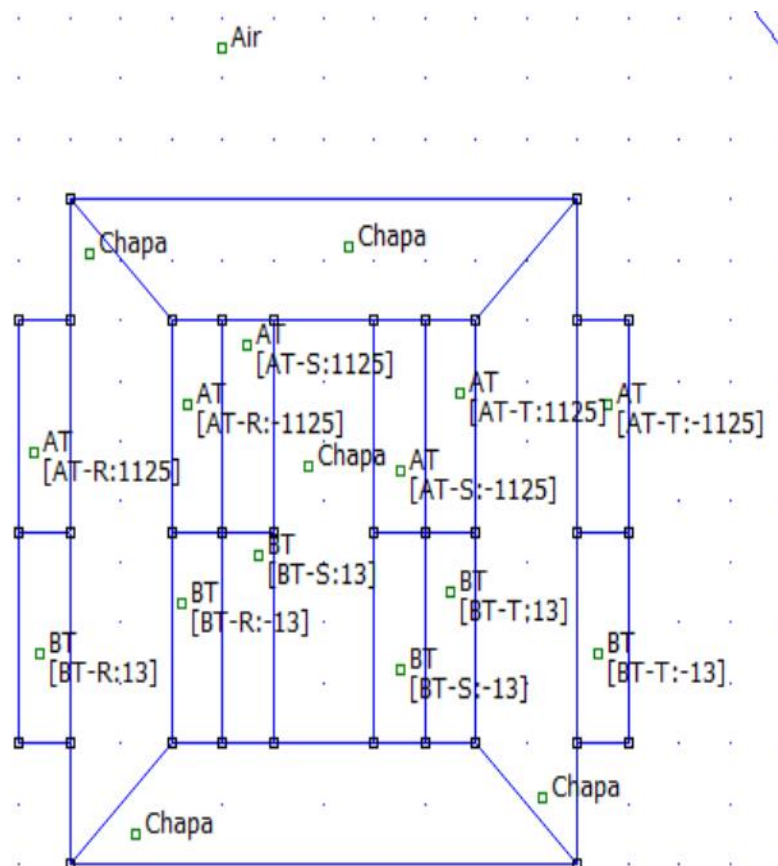


Figura 50: configuración transformador trifásico en FEMM

- Tras la simulación:

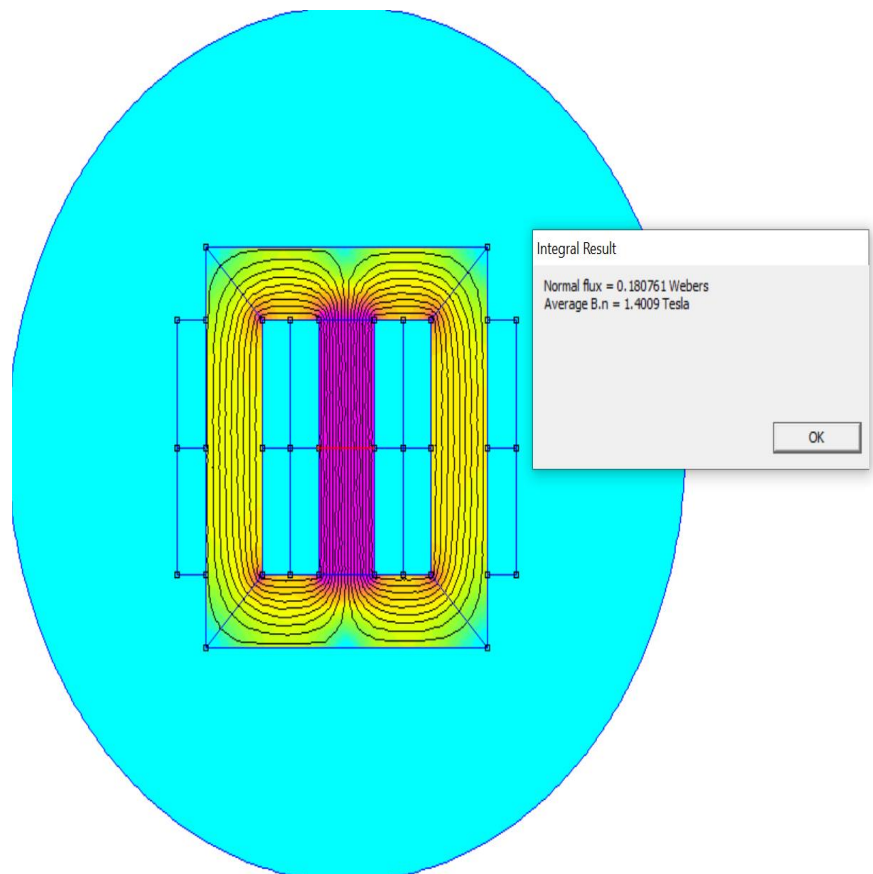


Figura 51: resultado en FEMM transformador trifásico

6.1.4. Conclusiones.

En primer lugar, es necesario apuntar que la simetría planar corta los devanados que envuelven el núcleo de chapa magnética, lo que ya de partida, nos dice que FEMM tendrá unas serias limitaciones para el estudio de transformadores.

Evidentemente, esta simulación es para un instante determinado, por el que pasa una corriente alterna de valor determinado.

A pesar de ello, podemos establecer un modelo más o menos cercano al transformador real, ya que realizamos un diseño teórico para 1,5 T y vemos que el resultado es de 1.4 T de valor medio de la inducción, de modo que, para realizar un estudio de flujos primario, podría servir perfectamente. Otro aspecto que sería interesante estudiar es el modelo térmico, para calcular así el fluido que embebe el conjunto de la máquina, pero esto no entra en este estudio.

Para finalizar, lo más útil que podríamos hacer con FEMM es una simulación del ensayo en carga y en vacío para calcular las especificaciones del transformador, Existen programas en internet, con código LUA para implementar en FEMM que calculan y muestran gráficamente dichos parámetros.

6.2. La máquina de corriente continua.

6.2.1. Introducción.

En este ejemplo se aborda un modelado de máquina de c.c. de forma básica para extraer algunas conclusiones sobre FEMM. Primeramente, haremos un estudio en carga y posteriormente se analizará el campo magnético en el entrehierro y a lo largo del eje polar. El inducido se modela sin ranuras para simplificar.

6.2.2. Objetivo.

Realizar un análisis magnetostático en vacío para analizar el campo magnético en el entrehierro.

6.2.3. Planteamiento.

La máquina elemental planteada es un modelo simplificado de una máquina real de continua. Sus datos se corresponden con la máquina de referencia extraída del libro titulado: “Cálculo de Máquinas de Corriente Continua”, publicado por la Sección de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, cuyo autor es M. Cuesta Saiz.

Datos.

Los datos de la máquina son los siguientes:

Placa de características
Potencia Nominal: 147kW
Tensión Nominal: 500V
Velocidad nominal: 300 r.p.m. (excepcionalmente 1500 r.p.m.)
Excitación: independiente a 240 V
Aislamiento: F
Ventilación: Forzada

Tabla 8:placa de características máquina c.c.

Geometría y otros
Diámetro del rotor: 55.9 cm
Ángulo abarcado por el arco polar: 62°
Altura de polo: 17.8 cm
Entrehierro: 0.6 cm
Diámetro exterior de la carcasa 106.7
Carga lineal específica: 310 A/cm

Tabla 9: geometría máquina c.c.

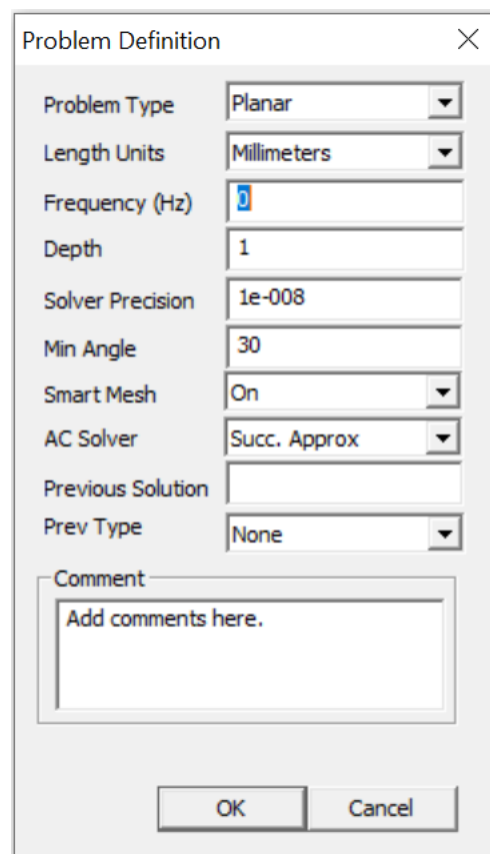
Para simplificar también, a los materiales magnéticos en vez de caracterizarlos mediante su curva B-H, les impondremos una permeabilidad constante, de un valor aproximadamente real. Así, al inducido le impondremos una permeabilidad magnética absoluta de 2.33×10^{-3} H/m, a las piezas polares 2×10^{-3} H/m, a la culata 2.25×10^{-3} H/m y finalmente, para el aire se toma, naturalmente, la permeabilidad del vacío.

Además, del cálculo de la máquina se deduce que es necesaria una Fuerza Magnetomotriz de 14280 Av por cada par de polos.

Problema con FEMM.

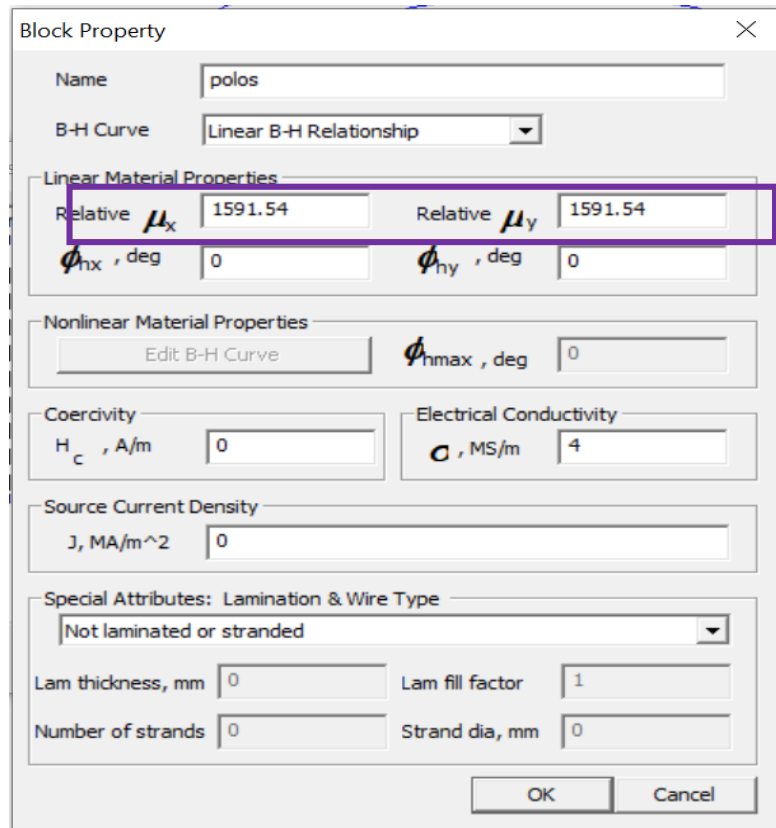
Creamos un nuevo problema con femm

- *Create a new problem* → *Magnetics problema*
- *Problem* → *Problem definition* (aquí la frecuencia es cero por estar en continua)



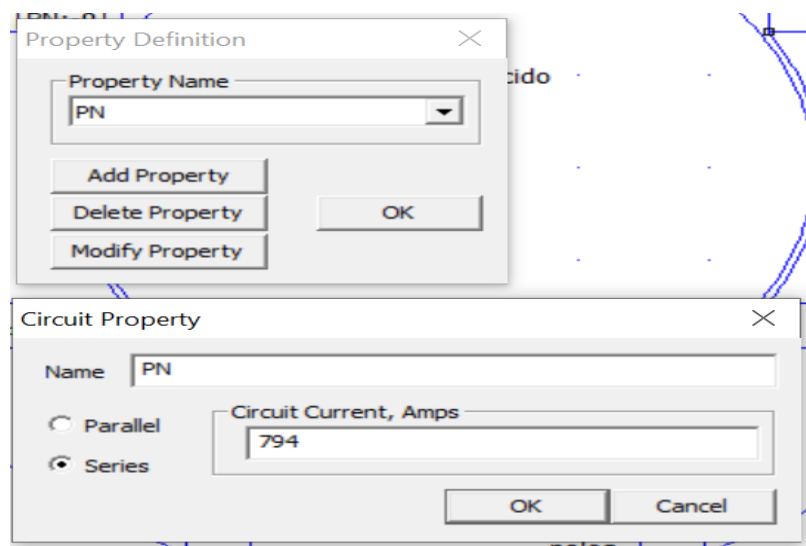
- Seleccionamos los materiales para luego introducirlos en nuestro diseño:
 - Culata: “*Carpenter Silicon Core Iron A, 1066C*”. Especificamos en *Linear Material properties* → **Permeabilidad relativa**. Hacemos esto para todos los materiales diferentes que nos encontremos. Ojo a la permeabilidad, el problema nos la da en absoluta y hay que introducirla en relativa.

- Bobinado de cobre. Permeabilidad relativa 1 y conductividad de 58MS/m. Especificamos en *Special Attributes: Lamination & WireType > MagnetWire > Strand dia = 2 mm*



- Introducimos las características de nuestro circuito. Hay que tener en cuenta que si deseamos una fuerza magnetomotriz de 14280 Av por cada par de polos. Tendremos 7140 Av en cada polo. Para una bobina de 9 espiras, resulta una intensidad de:

$$F = N \cdot I \rightarrow I = \frac{F}{N} = \frac{7140}{9} \left[\frac{AV}{\text{espira}} \right] \approx 794 \text{ A en cada nodo}$$



- El resultado de la geometría queda:

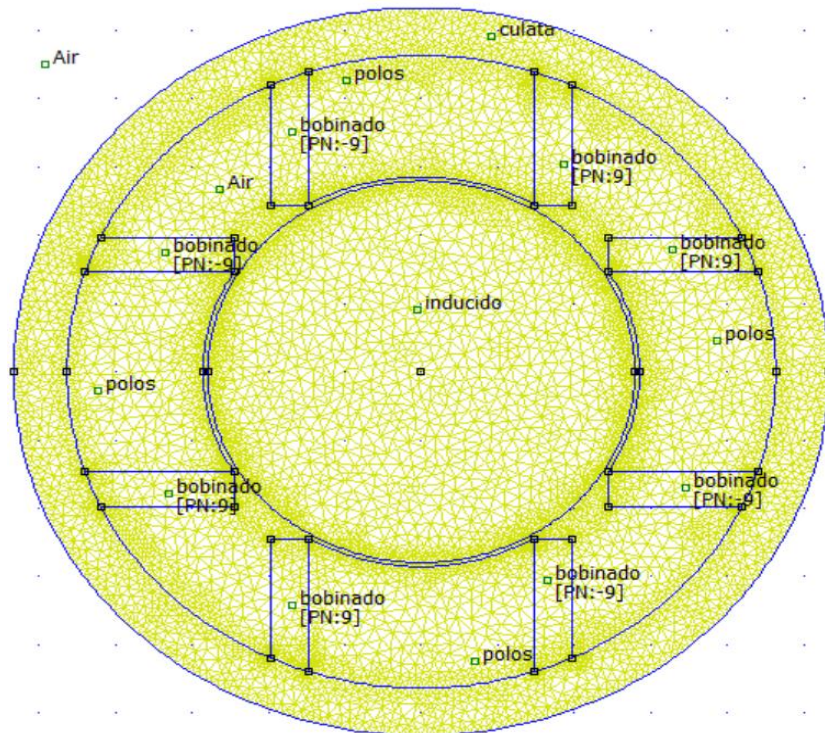


Figura 52: mallado máquina c.c.

- Tras la simulación:

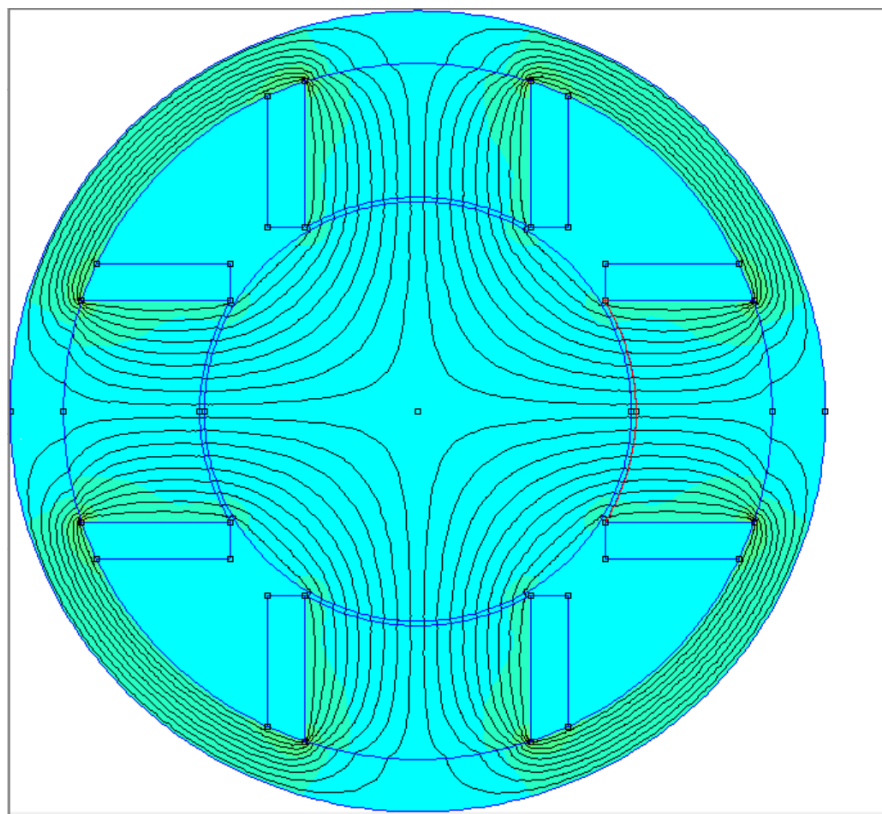


Figura 53: líneas de flujo máquina c.c. vacío

- Si observamos el flujo en el entrehierro:

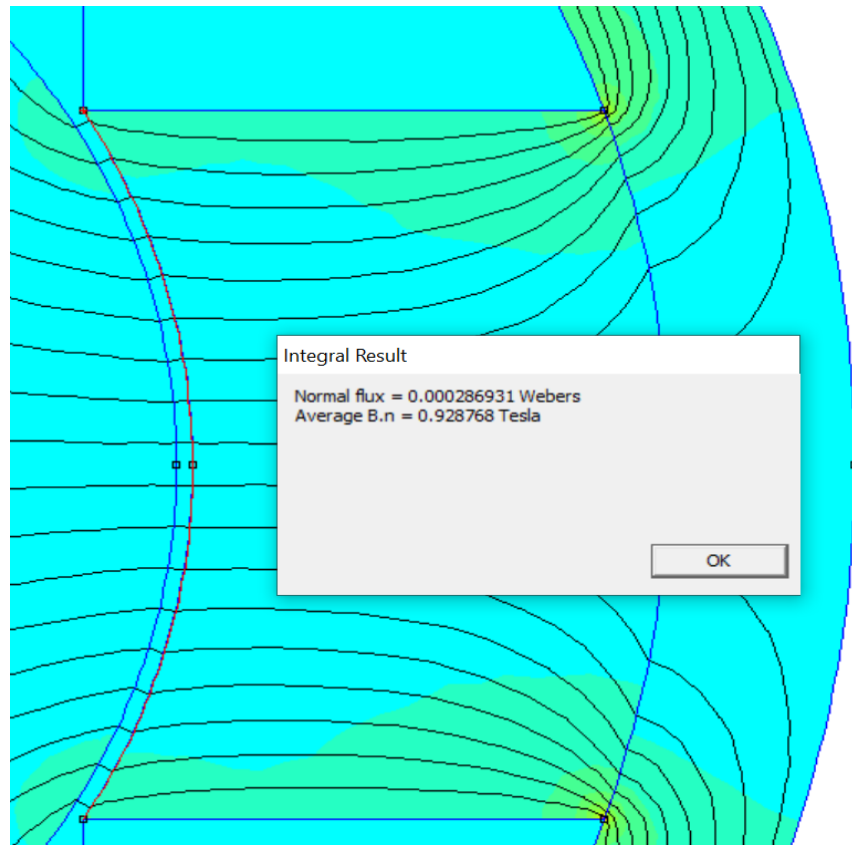


Figura 54: flujo entrehierro máquina c.c.

Esta geometría es muy sencilla, para una máquina de 150 Kw, hemos simplificado el problema para observar cómo se comportan las líneas de flujo. A continuación, expongo una geometría más compleja y realizaremos un estudio en carga y en vacío.

Problema complejo en carga con FEMM.

Para analizar el modelo en carga de una máquina de corriente continua, se ha extraído un pequeño modelo de [10], cuyas características son:

Placa de características	
Potencia Nominal	42.25 W
Tensión nominal	110V
Intensidad Nominal	0.5 A
Velocidad de rotación	1500 rpm
Excitación tipo	Independiente
I_{exc}	0.165 A
U_{exc}	5.10V

Tabla 10: placa de características máquina c.c. en carga

Características constructivas	
Dos polos	$p=1$
Número de ranuras	12
Devanado imbricado doble	$2a=4p$
Número de vías en paralelo	$a=2$
Conductores por ranura	65
Número de conductores serie	390
Diámetro exterior	2.875" (73.025mm)
Diámetro rotor	1.578" (40.0812mm)
Profundidad	160mm
Material estátor:	Chapa ferromagnética
Espesor:	1 mm
Factor de empilado:	0.98
Material rotor:	Chapa ferromagnética
Espesor:	0.5
Factor de empilado:	0.98

Tabla 11: datos geométricos máquina c.c. en carga

- Construyo la geometría e insertamos los materiales de forma que el resultado sea el siguiente:

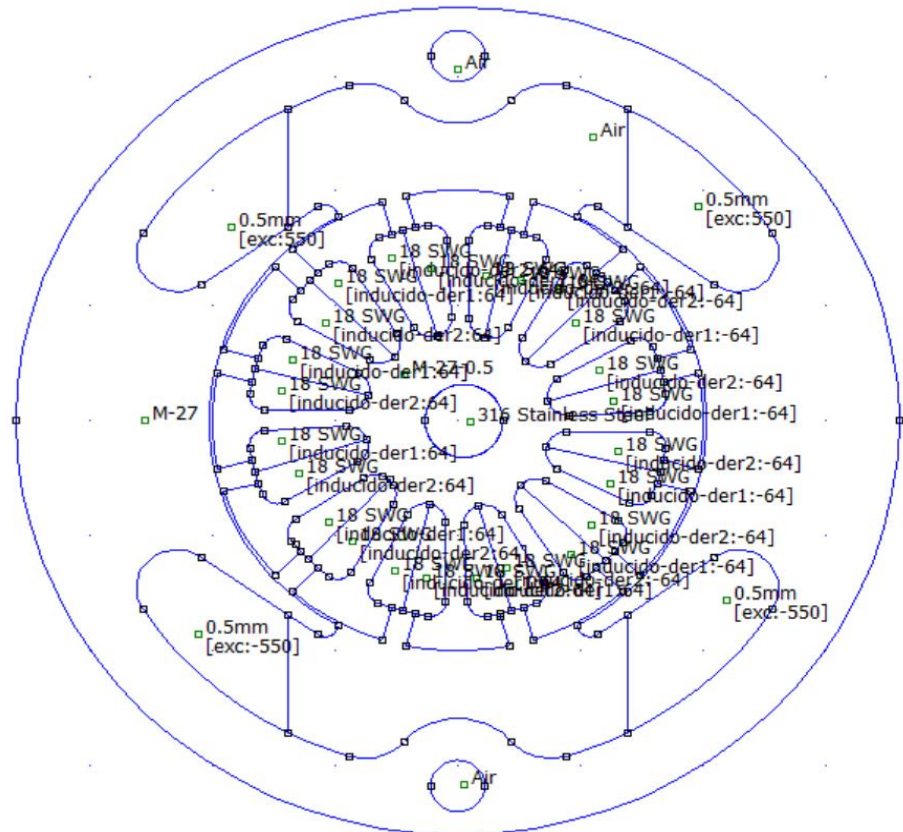
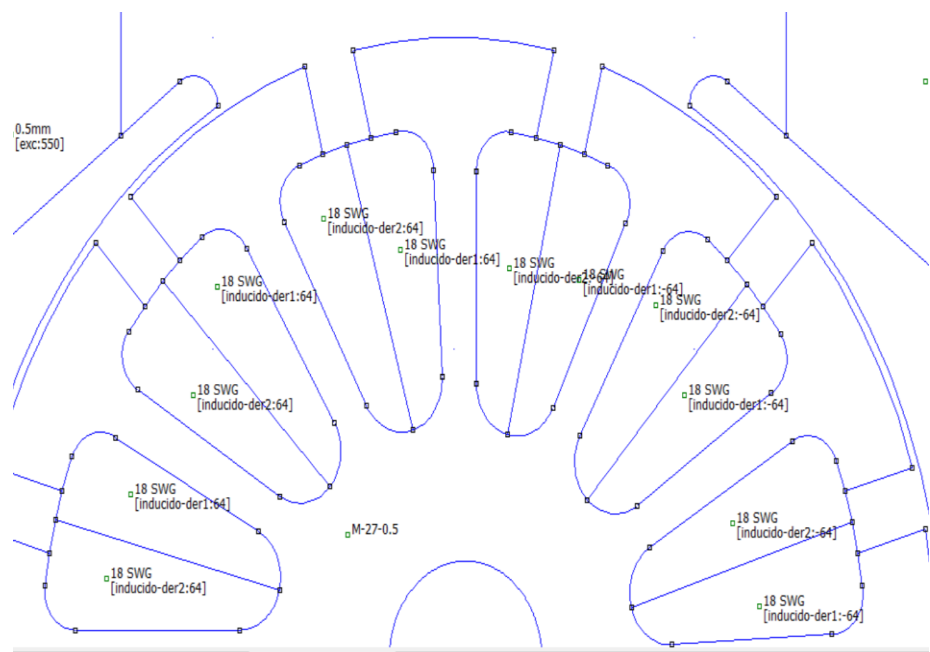


Figura 55: construcción máquina c.c. para estudio en carga

- Introducimos los circuitos y sus propiedades teniendo en cuenta que si queremos simular el giro del campo magnético deberemos asociar cada circuito correspondiente del rotor con el signo de vueltas correspondiente a la influencia de cada polo:



- Mallamos y simulamos:

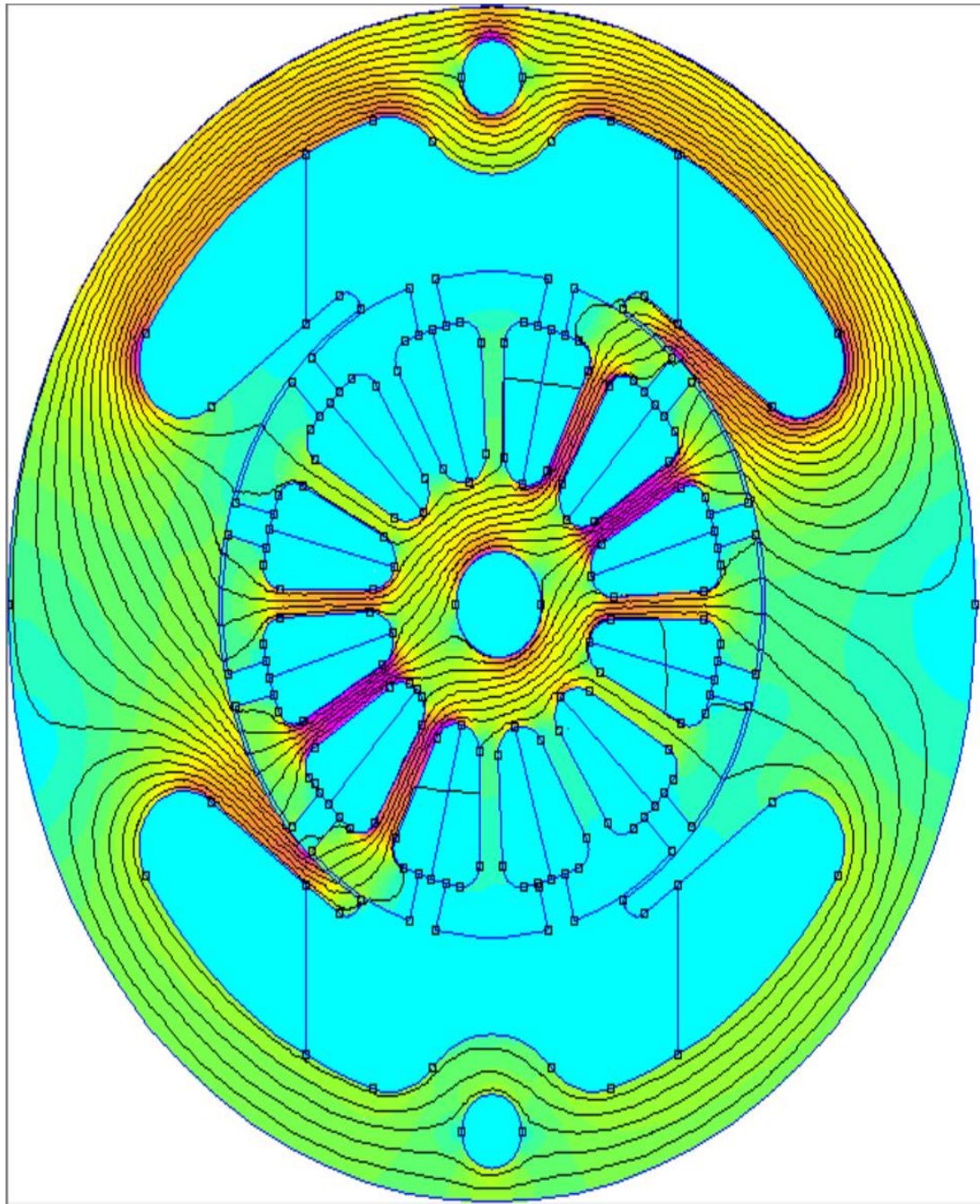
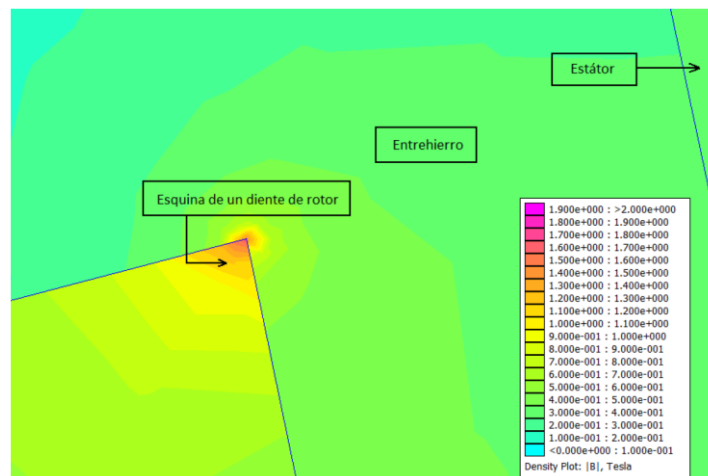


Figura 56: líneas de flujo máquina c.c. en carga.

Conclusiones.

Tras realizar varias geometrías y estudios de la máquina de continua con FEMM podemos afirmar, que tanto las posibilidades de diseño, como de modificación de materiales y condiciones de contorno, son suficientemente amplias para extraer datos bastante aproximados a la realidad del comportamiento de los materiales frente al flujo magnético. Es más, en la siguiente imagen podemos ver un detalle de como el flujo se concentra en la esquina del diente del rotor, se va a acumular por efecto de la reacción del inducido, salvo que se introduzca un devanado de compensación o se aumente el entrehierro en esa zona.



Además, nos permite sacar la densidad de flujo del entrehierro y otros datos importantes para obtener los datos de diseño relevantes para tener una idea clara de cómo puede comportarse la máquina

7. Conclusiones.

Las capacidades del método de elementos finitos, normalmente usado en cálculos mecánicos, es ampliamente reutilizable para los casos eléctrico, magnético y térmico.

El desarrollo de este trabajo creemos que sirve para comprender mejor el funcionamiento de las máquinas eléctricas y como introducción a una herramienta de cálculo de elementos finitos, “FEMM”, que, debido a su licencia de uso libre, puede servir de base para trabajos de diseño e investigación a cualquier usuario interesado.

Uno de los grandes beneficios de este software es la experimentación con varios y diversos materiales para simular una máquina que requiera unas especificaciones técnicas concretas. El programa nos permite cambiar las propiedades físicas de los materiales, por ejemplo, podemos usar un material con una remanencia más alta o más baja para un imán permanente, o unos conductores con resistividad más alta o más baja etc.

La simplicidad de su interfaz lo hace un programa muy interesante para las prácticas de laboratorio, así como generador de imágenes pedagógicas, para su inclusión en presentaciones para clases magistrales.

Las posibilidades se amplían al trabajar con la consola LUA, a través de la cual podemos extraer datos en formato Excel para su posterior tratamiento con programas.

Esta consola nos permite trabajar con un modelo de software parecido a MATLAB, con interfaz gráfico y tratamiento de código.

El inconveniente principal reside en su limitación a la hora de construir (no calcular) una geometría complicada. FEMM dispone de unas herramientas de dibujo no muy abundantes. Sin embargo, permite importar dibujos desde AutoCAD, con la salvedad que todo aquello que importemos tiene que tener todas las líneas y puntos dibujados de manera manual, por ejemplo, no reconoce las copias por matrices u otros atajos de dibujo de Autocad.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Allaire, P. E. (1985). *Basics of the finite element method*. Dubuque, Iowa.: W.C. Brown.
- [2] Meeker, D. (2018). *Magnetismo del método de los elementos finitos Versión 4.2 Manual de usuario*. Libre.
- [3] MHEDUCACIÓN. (07 de mayo de 2020). Obtenido de <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448127641.pdf>
- [4] Mora, J. F. (2003). *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGRAW HILL.
- [6] Stoll, R. (1974). *The analysis of eddy currents*. Oxford University Press.
- [5] Vázquez, J. R. (s.f.). *Materiales electrotécnicos*. CEAC.
- [7] R. Ierusalimschy, L. H. de Figueiredo, and W. Celes, *Reference Manual of the Programming Language Lua 4.0* <http://www.lua.org/manual/4.0/>
- [8] RAS, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. 7ª Edición. Barcelona: Marcombo, 1988. 283p.
- [9] Catálogo de transformadores de distribución Ormazábal
- [10] YEADON, William H.; YEADON, Alan W. Handbook of small electric motors. Figure 4.56
- [11] *Máquinas Eléctricas*. Serrano y Martínez. Ed. Univ. Politécnica de Valencia. 2017
- [12] Aula Moisan (<https://www.aulamoisan.com/practicar-via-web/simuladorwebdetransformadorelectrico>) 27/04/2021
- [13] IES Antonio machado. <http://iesmachado.org/web%20insti/depart/fisqui/apuntes/files/Las%20leyes%20de%20Maxwell.pdf> 27/04/2021
- [14] Chapman, S.J. (2000) *Máquinas eléctricas*. McGraw Hill
- [15] Cálculo de máquinas eléctricas por elementos finitos Autor: Fermín Torán Zorrilla Tutor: J. Ignacio Candela García 19/05/2015 Escola d'Enginyeria de Terrassa – UPC
- [16] *Aplicación del método de los elementos finitos al diseño de una máquina de corriente continua*. José Andrés Serrano- EII UVA
- [17] *Estudio y simulación mediante software de elementos finitos (femm) de un motor síncrono de imanes permanentes sin escobillas* Autor: Álvaro Acosta Santos Tutor: Vicente Simón Sempere Escuela Politécnica Superior Universidad de Sevilla Curso: 2016 - 2017
- [18] *Práctica de Elementos finitos con software libre (FEMM)* Autor: José Andrés Serrano
- [19] *Estudio de Máquinas Eléctricas mediante software de elementos finitos* Autor: Muñoz Rubio, Alberto, julio 2020

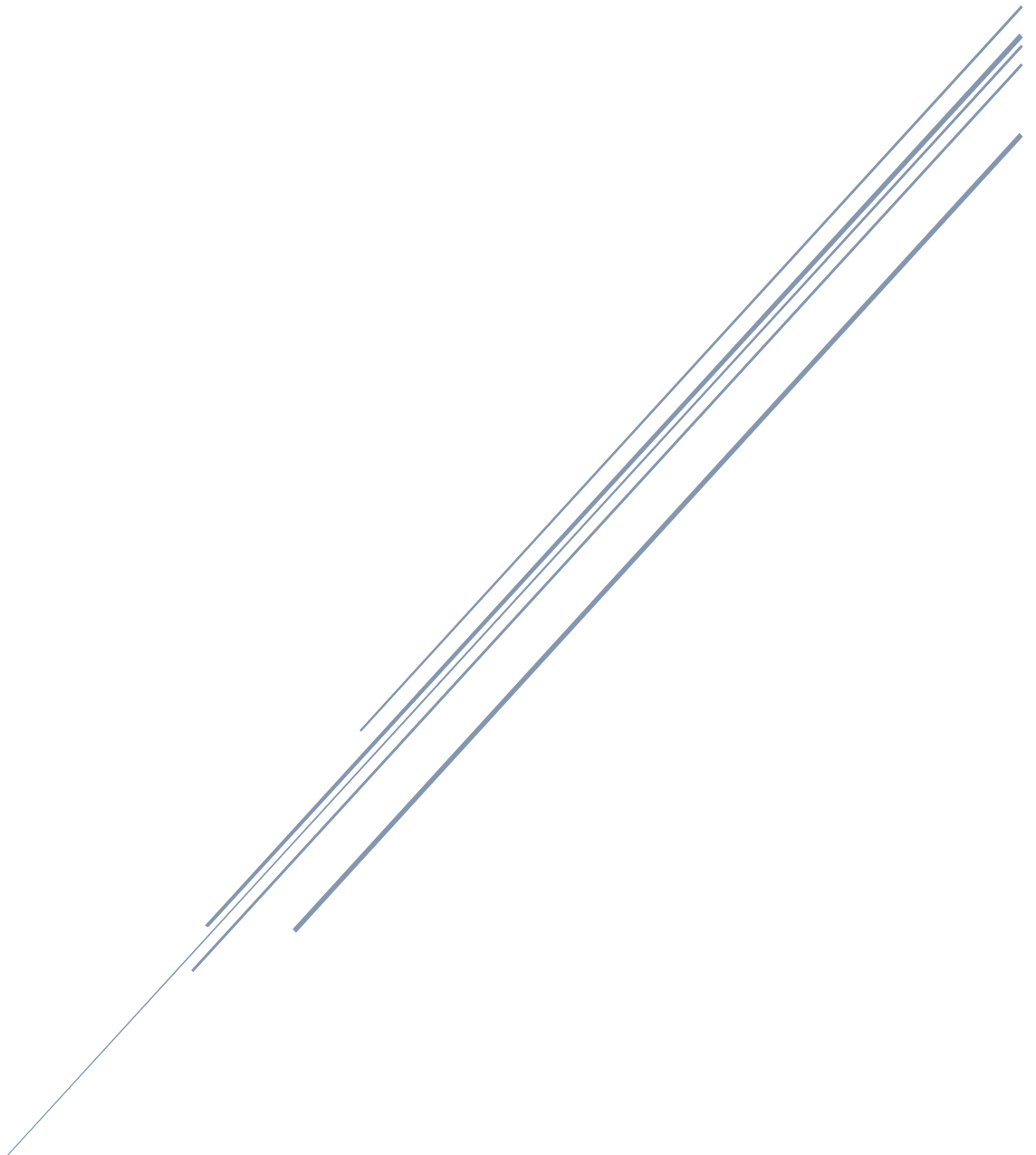




ANEXOS

A.1. Práctica de laboratorio “Circuito Magnético”.

A.2. Práctica de laboratorio “Máquina de corriente continua”.





ANEXO 1. PRÁCTICA DE LABORATORIO. “CIRCUITO MAGNÉTICO”



Práctica de Elementos finitos con software libre (FEMM)

Introducción

En esta práctica utilizaremos un software, libre, de elementos finitos: FEMM.

Dirección de descarga: <http://www.femm.info/wiki/Download> (hay una versión de 32 bits y otra de 64 bits. Ante la duda descargar la de 32 bits).

En YouTube hay vídeos interesantes sobre este software. Por ejemplo los siguientes:

1º) <https://www.youtube.com/watch?v=5LvWE1JscO4> (video introductorio).

2º) <https://www.youtube.com/watch?v=5m0eEwUBxfs> (este es un tutorial con un ejemplo parecido al Circuito Magnético de la práctica anterior, donde el imán es sustituido por un solenoide).

3º) <https://www.youtube.com/watch?v=tCEGpLLcels>

4º) <https://www.youtube.com/watch?v=UQvGJaT5BVc> (está en español). Más ejemplos (tutoriales) de FEMM: <http://www.femm.info/wiki/Examples> (Aquí hay un Ejemplo de imán permanente interesante para modelar imanes).

¿Qué hay que hacer?

Hay que estudiar este software FEMM y resolver el problema “Circuito Magnético” que se propone a continuación con él: introducir la geometría, propiedades de los materiales, mallado, condiciones de contorno y resultados. Es interesante que comparemos los resultados obtenidos por el software como los obtenidos al realizar el ejercicio a mano.

Posteriormente se responderá al cuestionario final.

Enunciado de la práctica

Para el circuito magnético de la figura con una fuente y tres ramas en paralelo con entrehierro y la geometría indicada, determinar la fuerza magnetomotriz necesaria para que el flujo de la rama 3 (que contiene al entrehierro) valga 0,1 Wb. Determinar, además, los flujos Φ_1 y Φ_2 . El material es acero laminado (característica (1)).

Datos:

$$S_1 = S_2 = S_3 = S = 0,1 \text{ m}^2$$

$$l_1 = 1 \text{ m}$$

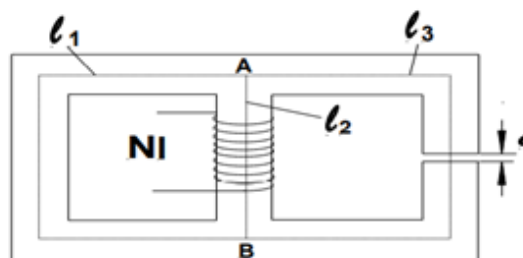
$$l_2 = 0,5 \text{ m}$$

$$l_3 = 1,20 \text{ m}$$

$$\delta = 0,001 \text{ m}$$

$$\Phi_3 = 0,1 \text{ Wb}$$

Material 1



Característica del material (1)

H [A/m]	20	40	60	80	160	300	600	1200	2000	3000
B [Wb/m ²]	0,04	0,29	0,68	0,88	1,15	1,46	1,66	1,80	1,85	1,87

Unidades S.I. y C.G.S. de Fuerza Magnetomotriz F:

Sistema Internacional: la unidad de f.m.m. es el A (amperio). Se suele llamar Av (amperivuelta). Se define por la ecuación $F = NI$.

Sistema CGS: La unidad de f.m.m. es el Gb (Gilbert). Se define por la ecuación $F = \frac{4\pi}{10} NI$.

Si tenemos $I = 1 \text{ A}$ y $N = 1$ vuelta, entonces:

Sistema Internacional: $F = NI = 1 \text{ Av}$

Sistema CGS: $F = \frac{4\pi}{10} NI = \frac{4\pi}{10} \text{ Gb}$.

Luego:

$$1 \text{ Av} = \frac{4\pi}{10} \text{ Gb} \quad \text{y} \quad 1 \text{ Gb} = \frac{10}{4\pi} \text{ Av}$$

Unidades S.I. y C.G.S. de Intensidad de Campo Magnético H:

Sistema Internacional: la unidad de H es el A/m (Amperio partido metro). Se suele llamar Av/m (Amperivuelta partido metro).

Se define por la ley de Ampère $\oint H dl = NI$

Sistema CGS: La unidad de H es el Oe (Oersted).

Tenemos:

$$1 \text{ Oe} = \frac{1 \text{ Gb}}{1 \text{ cm}} = \frac{\frac{10}{4\pi} \text{ Av}}{10^{-2} \text{ m}} = \frac{1000}{4\pi} \frac{\text{Av}}{\text{m}} \quad \text{y} \quad 1 \frac{\text{Av}}{\text{m}} = \frac{4\pi}{1000} \frac{\text{Gb}}{\text{cm}} = \frac{4\pi}{1000} \text{ Oe} \quad \text{y}$$

por tanto:

$$1 \frac{\text{Av}}{100 \text{ cm}} = \frac{4\pi}{1000} \frac{\text{Gb}}{\text{cm}} \rightarrow 1 \frac{\text{Av}}{\text{cm}} = \frac{4\pi}{10} \frac{\text{Gb}}{\text{cm}} = \frac{4\pi}{10} \text{ Oe}$$



Cuestionario

Responde a las siguientes preguntas:

- a) Calcula el error absoluto entre el resultado teórico “sobre el papel” y el obtenido con FEMM, para el flujo en el entrehierro

Respuesta:

- b) ¿A qué puede deberse dicho error?

Respuesta:

- c) Si quisiéramos disminuir o aumentar el flujo en el entrehierro, ¿Qué parámetros debemos modificar en FEMM, y cómo debemos realizarlo?

Respuesta:

- d) ¿Cómo podríamos mejorar el diseño del núcleo?

Respuesta: Insertando un material laminado para evitar corrientes parásitas de Foucault.

- I. Cambia el material del núcleo según y extrae el valor del flujo en el entrehierro: special Attributes: Lamination & Wire Type > Laminated in-plane > Lam thickness = 0.35mm > Lam fill factor = 0.96.
- II. ¿se acercan o se alejan los valores respecto a los reales?

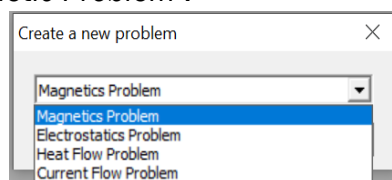
- e) Cuál de los materiales que hay en la biblioteca mejora el flujo en el entrehierro con las mismas características.

Respuesta:

Guion para la resolución de la práctica

1) Introducción de la geometría.

Abrimos el programa FEMM 4.2, es importante tener la última actualización instalada. Seleccionamos *File* → *New* o pulsamos *Ctrl+N*, para iniciar un nuevo archivo. En el panel desplegable del inicio seleccionamos *Magnetic Problem* :



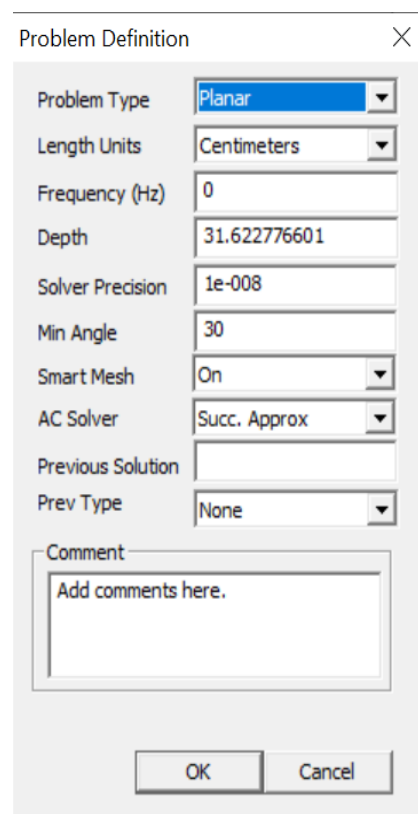
Comenzaremos estableciendo las unidades y el tipo de dibujo. Para ello seleccionamos en la barra de herramientas la función *Problem*, e inmediatamente después nos aparecerá la ventana que se muestra a la derecha en la figura.

Escogemos el tipo de problema *Planar*, es decir en 2D. Las unidades las establecemos en cm. Para la profundidad escogeremos un valor que nos haga cumplir con el valor de sección del enunciado. En nuestro caso escogeremos 50 cm de profundidad y 20 cm de ancho para cumplir con la sección de 0.1 m²

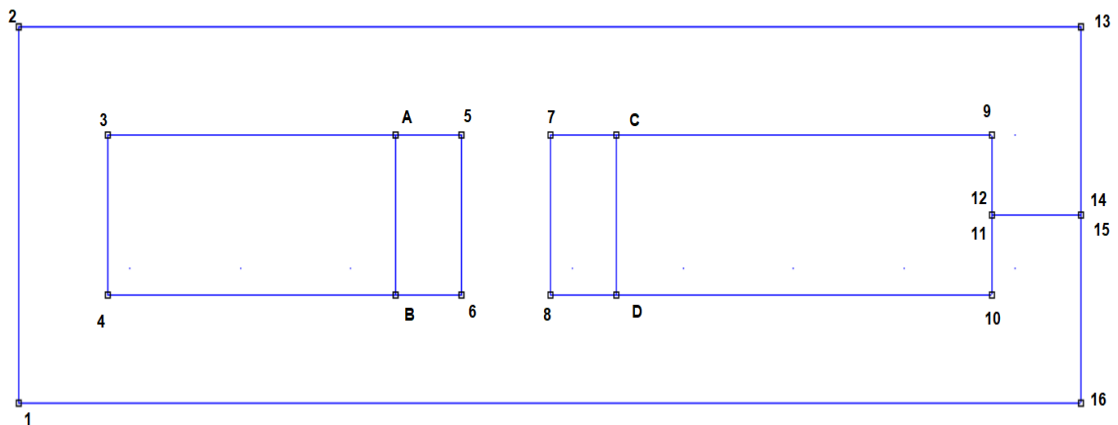
Una vez hecho esto, podemos introducir los puntos por coordenadas, que utilizaremos para dar forma a la geometría del circuito.

Tomaremos la siguiente tabla como referencia para su construcción:

PUNTO	X,Y	PUNTO	X,Y	PUNTO	X,Y
1	0,0	8	120,20	15	240,34.9
2	0,70	9	220,50	16	240,0
3	20,50	10	220,20	A	85,50
4	20,20	11	220,64.9	B	85,20
5	100,50	12	220,35.1	C	135,50
6	100,20	13	240,70	D	135,20
7	120,50	14	240,35.1	-	-



Así obtenemos el siguiente resultado:



2) Materiales y propiedades

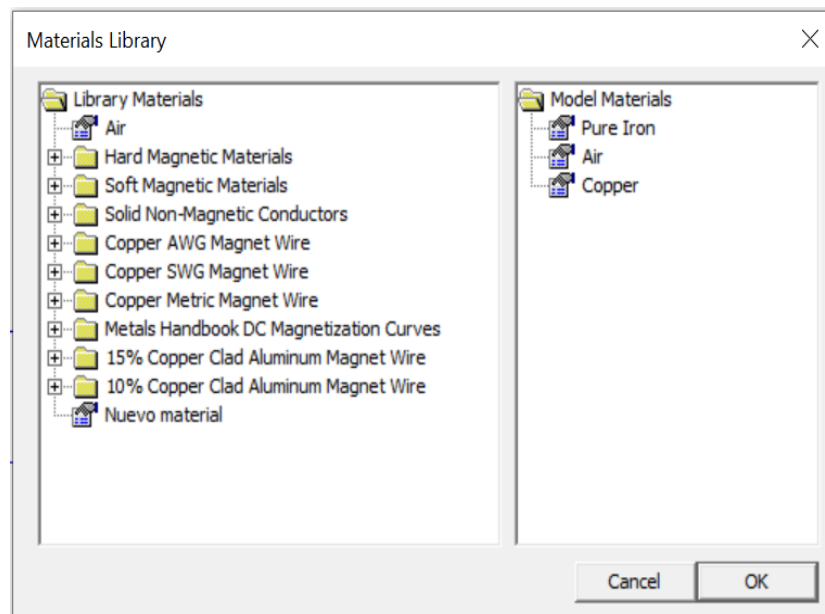
Para establecer que cada bloque sea del material que le corresponde, hay que crear un nodo dentro de dicha parte. Observamos que existen varias partes diferenciadas en la geometría:

- Núcleo: Acero
- Aire entre las columnas: Aire
- Bobina para crear el campo: Cobre
- Aire del contorno: Aire

a) Crear materiales

Para establecer las propiedades, primero vamos a crear los materiales en la biblioteca, así como el circuito magnético y posteriormente las introduciremos en cada parte.

Para ello seleccionamos *Properties* → *Material Library*, y cargamos en la ventana de la derecha todos los materiales que necesitamos:



Antes de Continuar, vamos a modificar el material *Pure Iron*, para que tenga las propiedades magnéticas que nos indica el enunciado. Hacemos click derecho con el ratón sobre el material y seleccionamos *Modify material*, se abrirá entonces una ventana donde podremos editar las propiedades e incluso el nombre del material. Nombraremos Núcleo a este material para diferenciarlo del resto, y seleccionamos *Edit B-h curve*. Esto nos permitirá abrir una consola donde introducir los datos que el enunciado nos propone para la característica magnética del núcleo. En ella introducimos los valores para la curva B-H que nos marca el problema, e incluso podemos exportarla de manera gráfica. Es importante recordar que el acero es laminado.

Block Property

Name: Núcleo

B-H Curve: Nonlinear B-H Curve

Linear Material Properties

Relative μ_x : 14872 Relative μ_y : 14872

ϕ_{hx} , deg: 0 ϕ_{hy} , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve ϕ_{hmax} , deg: 0

Coercivity: H_c , A/m: 0 Electrical Conductivity: σ , MS/m: 10.44

Source Current Density: J , MA/m²: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Laminated in-plane

Lam thickness, mm: 0 Lam fill factor: 1

Number of strands: 0 Strand dia, mm: 0

OK Cancel

B-H Curve Data

B-H Curve for: Nucleo

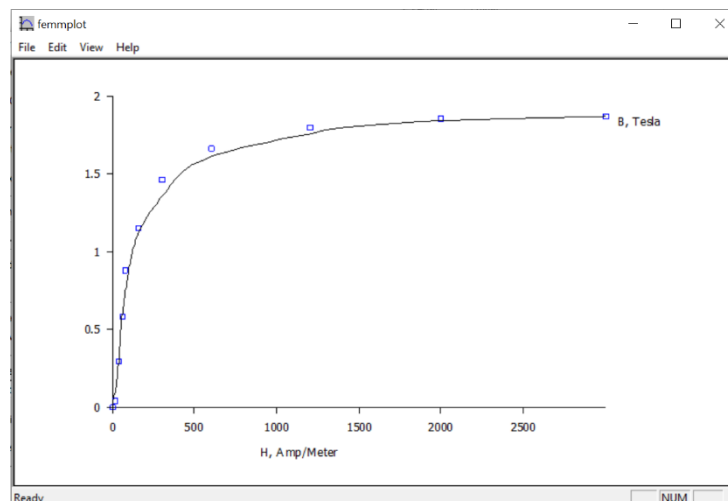
B, Tesla	H, Amp/m
0.04	20
0.29	40
0.68	60
0.88	80
1.15	160
1.46	300
1.66	600
1.80	1200
1.85	2000

Plot B-H Curve

Log Plot B-H Curve



Read B-H points from text file

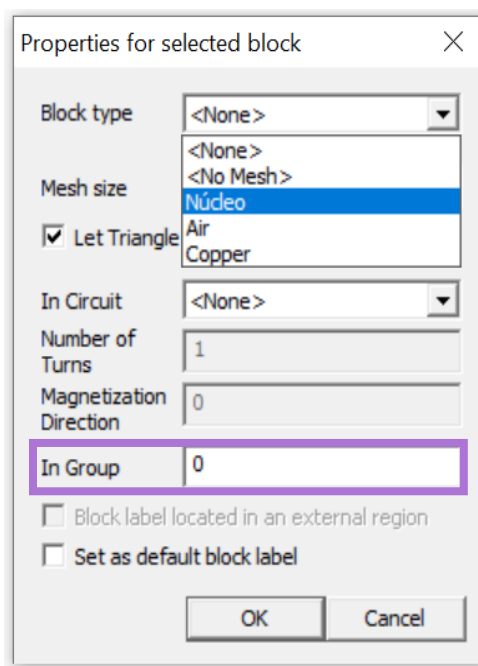
OK Cancel



b) Introducir materiales

Seleccionamos Properties→Materials→Add Propertie

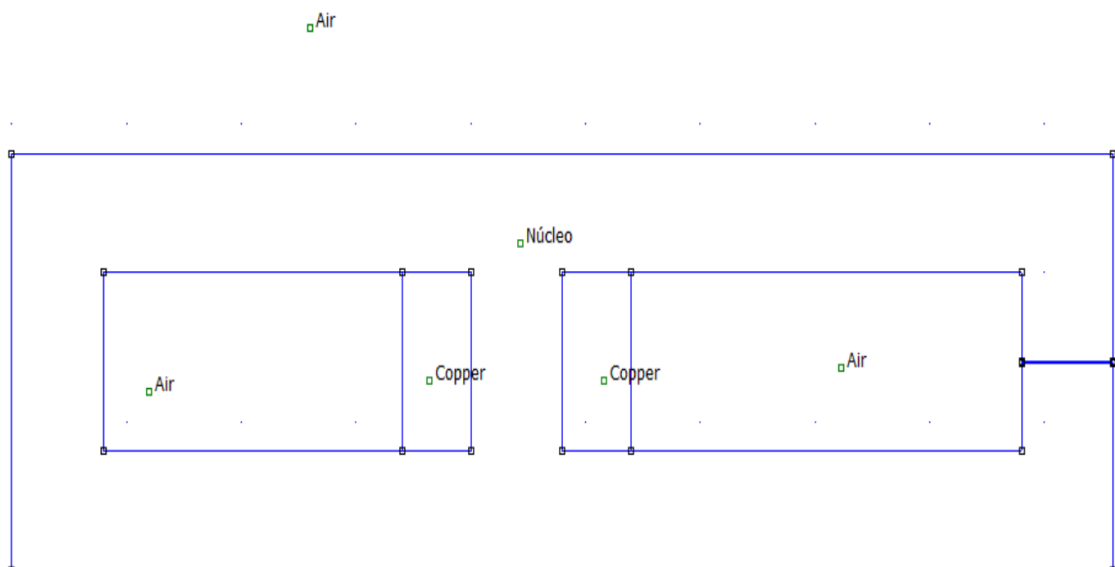
Para crear las propiedades del núcleo, seleccionamos primeramente en la barra de herramientas el botón:  y colocamos el nodo dentro del núcleo, que al no estar dividido en ninguna de sus columnas y al ser un material homogéneo, bastará con ponerlo en cualquier lugar dentro de éste. Para seleccionar sus propiedades hacemos click derecho sobre el nodo en verde y pulsamos el botón:  nos aparecerá la siguiente pantalla:



Escogemos el material que queremos introducir y seleccionamos OK. Esto tenemos que hacerlo para todos los materiales. En el exterior y en el interior de las columnas aire, en los laterales de la bobina central Cobre para el bobinado, y así con todos los que queramos emplear.

Otra función de este programa es la posibilidad de clasificar los materiales en grupos numerados para poder modificar las propiedades de todos ellos a la vez.

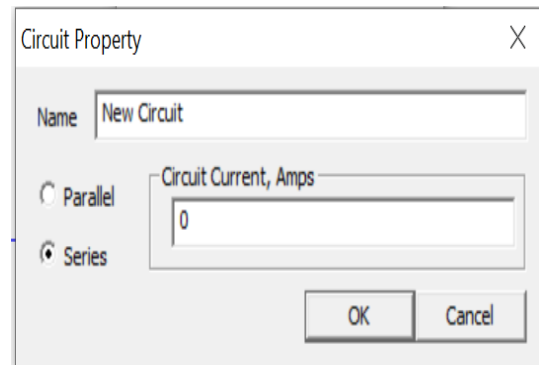
Procediendo de este modo el resultado final tras introducir los materiales sería el de la figura de abajo:



c) Crear los circuitos

En nuestro caso, para crear el circuito, propondremos la creación de un circuito enrollado en la columna central que simule el paso de una corriente determinada. Seleccionamos *Properties* → *Circuits* → *Add Propertie*:

El programa nos pide dos parámetros para simular el circuito y que indiquemos si el arrollamiento será serie o paralelo. Estos son Amperios y número de vueltas. Para obtener estos datos primero debemos realizar la solución analítica del problema y calcular precisamente los Amperivueltas que van a generar dicho flujo.



i) Solución analítica:

Para la malla de la izquierda
$$NI = H_2 \cdot l_2 + H_1 \cdot l_1 \quad 1$$

que también se puede escribir
$$NI - H_2 \cdot l_2 = H_1 \cdot l_1 \quad 2$$

Para la malla de la derecha
$$NI = H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3 + H_e \cdot \odot \quad 3$$

o también
$$NI - H_2 \cdot l_2 = H_3 \cdot l_3 + H_e \cdot \odot \quad 4$$

Se puede suponer sin cometer gran error que $S_e = S_3$, con lo cual resulta $B_e = B_3$

Dado que $B_e = B_3 = \frac{\Phi_3}{S_3} = 1 \text{ Wb/m}^2$, de esta forma se puede determinar H_3 a partir de la

característica del material 3, y H_e de la relación $H_e = \frac{B_e}{\mu_0}$, que resultan respectivamente:

$$H_3 = 116 \text{ A/m}$$

$$H_e = 795.775 \text{ A/m}$$

Para la rama 3, que incluye el entrehierro, resulta a partir de (4) :

$$NI - H_2 \cdot l_2 = H_3 \cdot l_3 + H_e \cdot \odot = 795.775 \cdot 0,001 + 116 \cdot 1,20 \approx 935 \text{ Av}$$

Combinando la **2** y la **4** se tiene:

$$H_1 \cdot l_1 = H_3 \cdot l_3 + H_e \cdot \odot$$

De la cual se puede obtener $H_1 = 935 \text{ A/m}$

de la característica del material 1 se determina $B_1 = 1,738 \text{ Wb/m}^2$

con lo que $\Phi_1 = 0,1738 \text{ Wb}$

y $\Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_3 = 0,2738 \text{ Wb}$.

Luego, con Φ_2 se determina $B_2 = \frac{\Phi_2}{S_2} = 0,2738 \text{ Wb/m}^2$

y de la tabla del material 1 se obtiene $H_2 = 46.400 \text{ A/m}$

con lo cual, mediante el uso de la **1** se llega a que $NI = 24.135 \text{ Av}$

ii) Introducción de parámetros.

Sabemos que para generar el flujo deseado en la rama 3 de 0.1 Wb/m^2 necesitaremos 24.135 Av , por lo que podremos generar un circuito de $24,135 \text{ Amperios}$ y 1000 vueltas en serie. Seleccionamos el bloque denominado Copper y la introducimos la propiedad Bobina, que ya el programa reconoce como un circuito en serie de $24,135 \text{ A}$. En las propiedades del bloque tendremos que proponer 1000 en *Number of Turns* para un lado y -1000 para el otro,

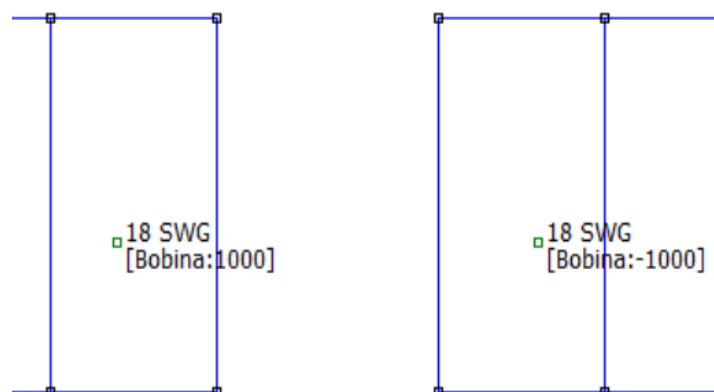
The image shows two dialog boxes from a software interface. The left dialog, titled "Circuit Property", has a "Name" field containing "Bobina". It has two radio buttons: "Parallel" (unselected) and "Series" (selected). A "Circuit Current, Amps" field contains the value "24.135". There are "OK" and "Cancel" buttons at the bottom. Below this dialog, a schematic shows two vertical rectangular blocks representing coils. The left block is labeled "18 SWG [Bobina:1000]" and the right block is labeled "18 SWG [Bobina:-1000]". A small square labeled "Núcleo" is positioned between the two blocks. The right dialog, titled "Properties for selected block", has a "Block type" dropdown menu set to "Copper". The "Mesh size" field is set to "0". There is a checked checkbox for "Let Triangle choose Mesh Size". The "In Circuit" dropdown menu is set to "Bobina". The "Number of Turns" field is set to "10". The "Magnetization Direction" field is set to "0". The "In Group" field is set to "0". There are two unchecked checkboxes: "Block label located in an external region" and "Set as default block label". There are "OK" and "Cancel" buttons at the bottom.

Tras calcular la corriente que debe circular, por el bobinado, debemos calcular su sección e introducirla en el material imponiendo una densidad de corriente de $3 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$. Para ello primero calculamos la sección y el diámetro.

$$S_{conductor} = \frac{I_{fase}}{J} = \frac{24.135 [A]}{3 \left[\frac{A}{mm^2} \right]} = 8,045 mm^2$$

$$\varnothing_{conductor} = 3,2005 mm$$


Cambiamos el material Copper por un cobre que nos permita introducir el diámetro del conductor, quedando como resultado la siguiente configuración:

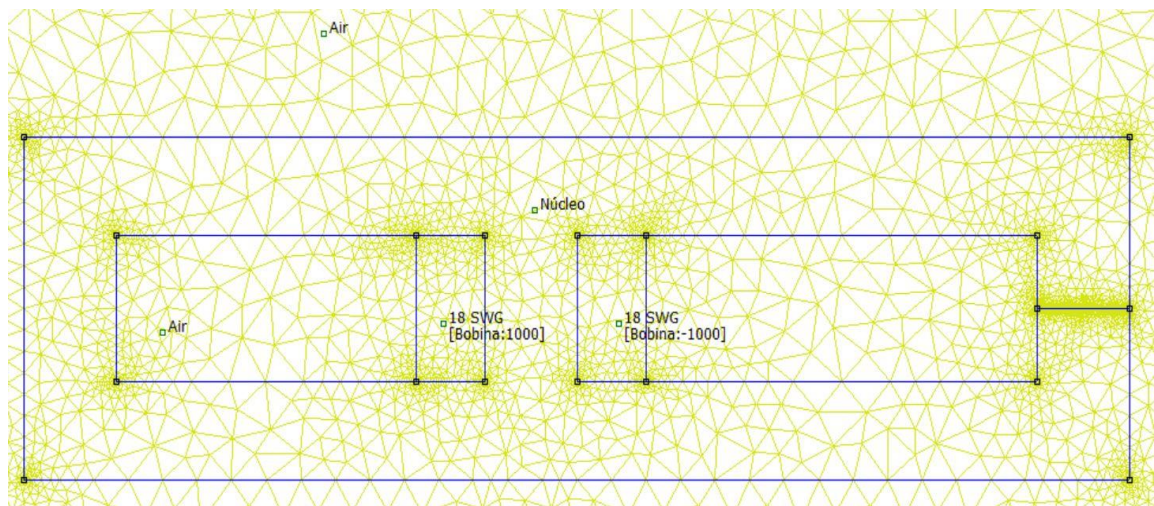
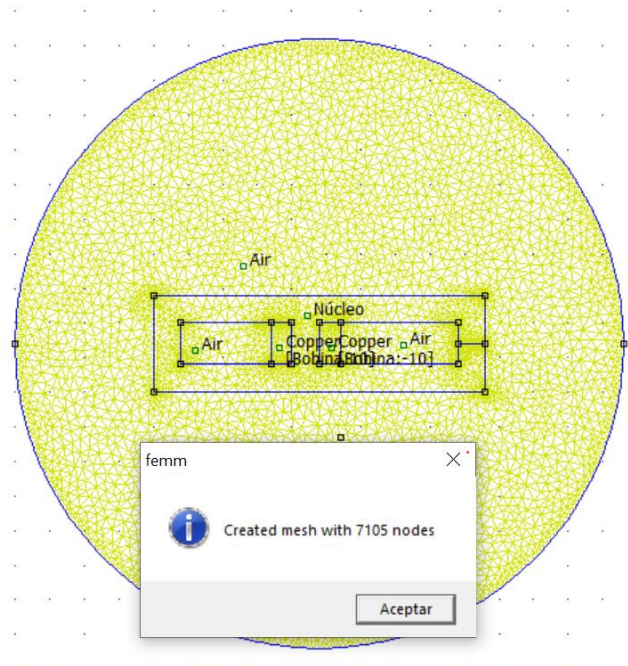


3) Condición de frontera y mallado.

Antes de pasar a la simulación, es conveniente establecer un contorno para amenizar la simulación al software. Para ello, creamos unas condiciones de contorno en *Properties* → *Boundary*, tomamos los valores por defecto que nos aparecen y le damos nombre: *CondiciónFrontera*.

Nuestro contorno va a ser una circunferencia que podemos dibujar estableciendo dos puntos en las coordenadas (-100, 35) y (220,35) y trazamos dos arcos entre ellos, formando así nuestra circunferencia. Por último, hacemos clic en cada una de las semicircunferencias, pulsamos la barra espaciadora y seleccionamos la propiedad que hemos establecido, *CondicionFrontera*.

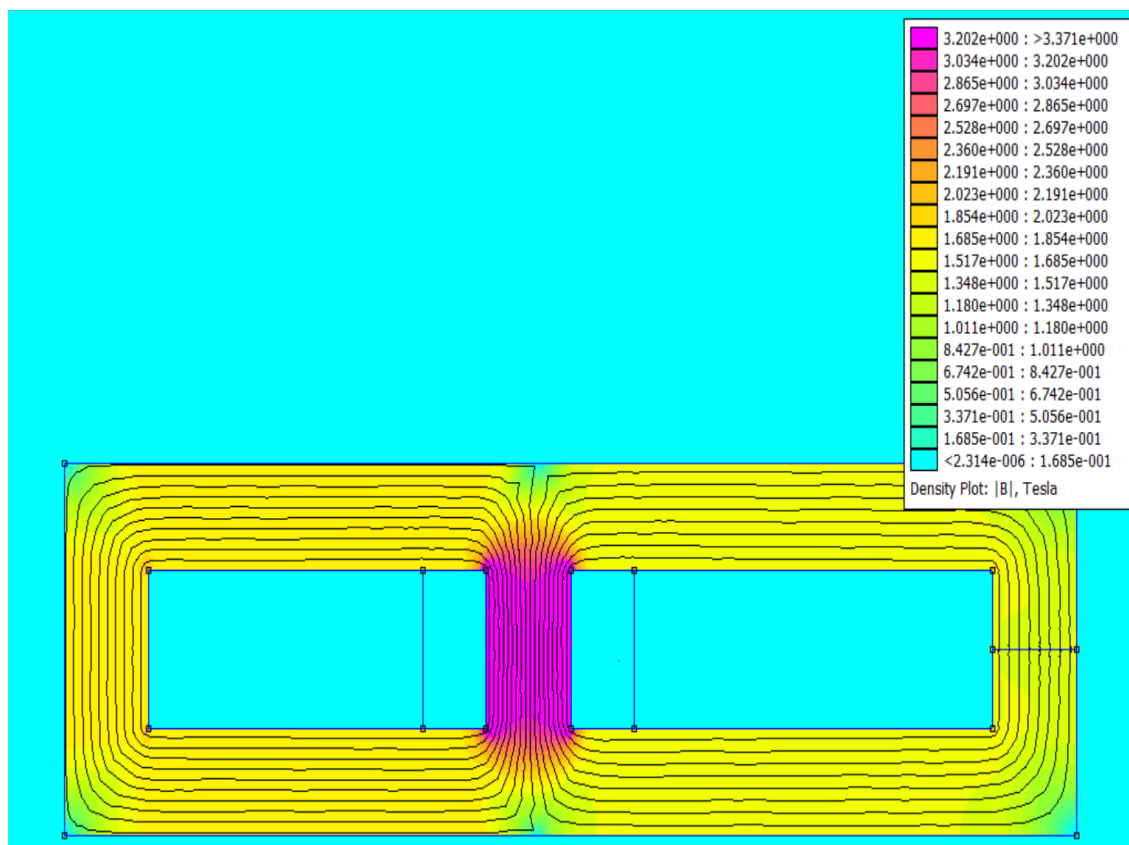
Una vez generada la frontera y guardado el documento en un archivo local, seleccionamos el botón mallar:  obteniendo el siguiente resultado:



4) Simulación y resultados


Tras realizar el mallado, y establecido todos los parámetros, podemos pasar a la simulación. Para ello no hay más que pulsar la opción *Analysis* → *Analyze* y para ver los resultados *Analysis* → *View results*.

Para obtener la densidad de flujo obtenemos lo siguiente.

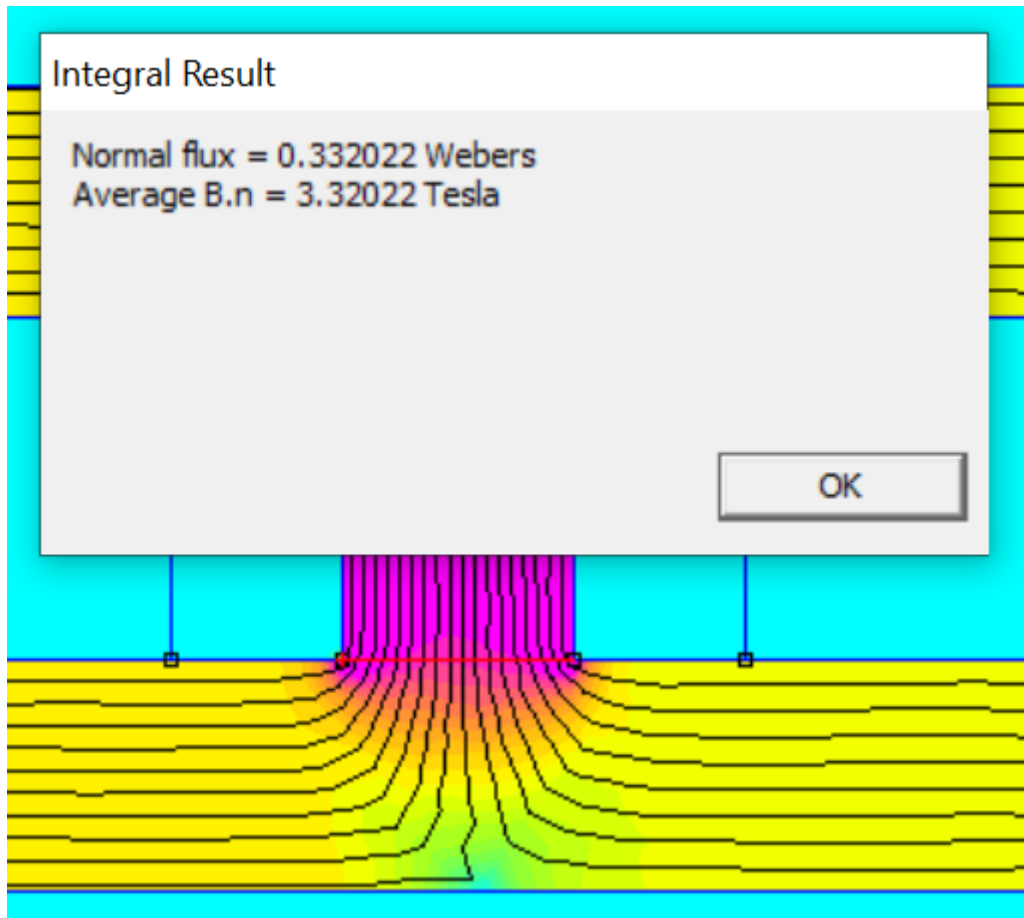


El programa también nos permite obtener información de un punto en concreto del esquema, o de líneas a lo largo de la geometría. Por ejemplo para responder al cuestionario de abajo se necesitarán los valores del flujo en las columnas y en el entrehierro. Para ello seleccionamos medida de línea:



Para después trazar una línea de punto a punto. Tras trazar la línea seleccionamos  y con esto nos aparece el valor medio del flujo que atraviesa dicha línea.

Así pues, para la columna central nos aparece un valor medio de 0.332022 Webber, y analíticamente calculamos que eran 0.2738 Webber.





ANEXO 2. PRÁCTICA DE LABORATORIO. “MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA”



Práctica de Elementos finitos con software libre (FEMM)

Introducción

En esta práctica utilizaremos un software, libre, de elementos finitos: FEMM.

Dirección de descarga: <http://www.femm.info/wiki/Download> (hay una versión de 32 bits y otra de 64 bits. Ante la duda descargar la de 32 bits).

En YouTube hay vídeos interesantes sobre este software. Por ejemplo, los siguientes:

1º) <https://www.youtube.com/watch?v=5LvWE1JscO4> (video introductorio).

2º) <https://www.youtube.com/watch?v=5m0eEwUBxfs> (este es un tutorial con un ejemplo parecido al Circuito Magnético de la práctica anterior, donde el imán es sustituido por un solenoide).

3º) <https://www.youtube.com/watch?v=tCEGpLLcels>

4º) <https://www.youtube.com/watch?v=UQvGJaT5BVc> (está en español).
Más ejemplos (tutoriales) de FEMM: <http://www.femm.info/wiki/Examples>
(Aquí hay un Ejemplo de imán permanente interesante para modelar imanes).

¿Qué hay que hacer?

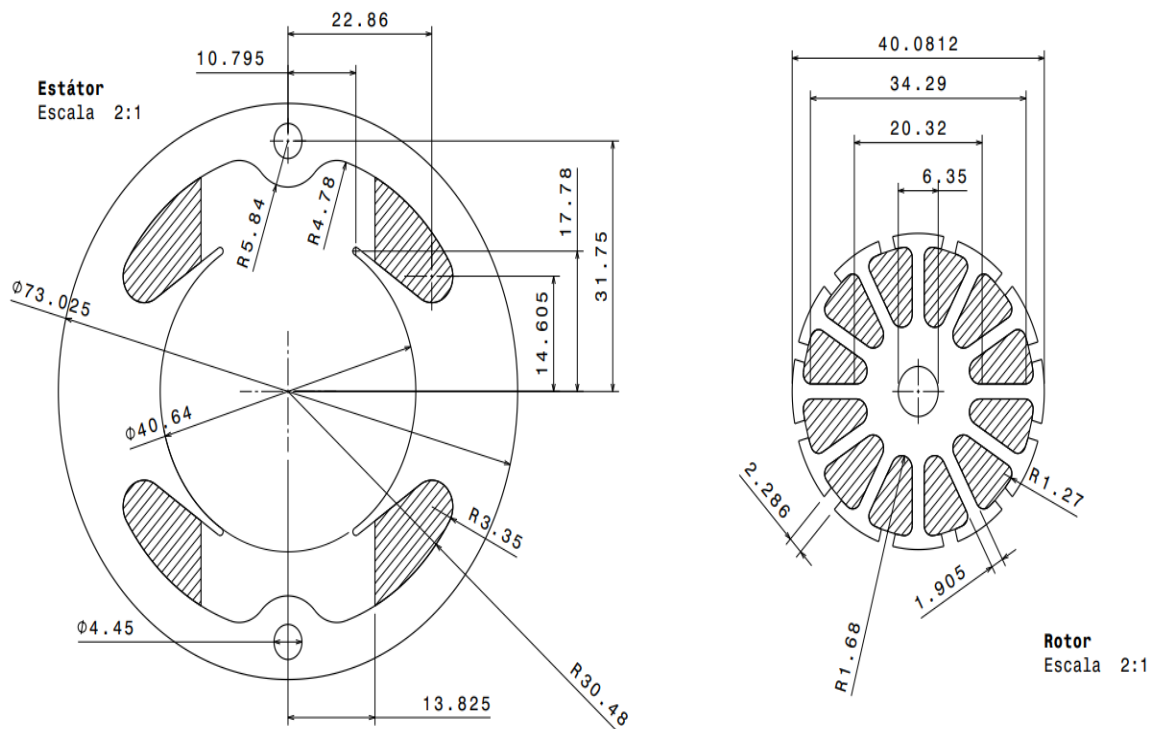
Hay que estudiar este software FEMM y resolver el problema “Circuito Magnético” que se propone a continuación con él:

Cargar la geometría del archivo adjunto “máquina de continua en vacío.FEM” y “máquina de continua en carga.FEM” (la máquina y su configuración ha sido extraída de: YEADON, William H.; YEADON, Alan W. “Handbook of small electric motors”. Figure 4.56). [10].

Los materiales y la geometría ya están precargados, únicamente iremos modificando sus parámetros.

Posteriormente se responderá al cuestionario final.

La máquina es la siguiente:



Placa de características	
Potencia nominal	42.25 W
Tensión nominal	110 V
Intensidad nominal	0.5 A
Velocidad rotación	1500 rpm
Excitación tipo	independiente
I_{exc}	0.165 A
U_{exc}	5.10 V

Características constructivas	
Dos polos	$p=1$
Número de ranuras	12
Devanado imbricado doble	$2a=4p$
Número de vías en paralelo	$a=2$
Conductores por ranura	65
Número de conductores serie	390
Diámetro exterior	2.875" (73.025mm)
Diámetro rotor	1.578" (40.0812mm)
Profundidad	160mm
Material estátor:	Chapa ferromagnética
Espesor:	1 mm
Factor de empilado:	0.98
Material rotor:	Chapa ferromagnética
Espesor:	0.5
Factor de empilado:	0.98



Cuestionario

MÁQUINA DE CONTINUA EN VACÍO

a) En primer lugar, comprueba que los siguientes materiales han sido correctamente introducidos:

- Aire
- Chapa magnética del estator. “M-27 Steel”. Con espesor de 1mm y factor de empilado de 0.98
- Chapa magnética del rotor. “M-27 Steel”. Con espesor de 0.5mm y factor de empilado de 0.98
- Excitación de los polos. Tipo hilo de cobre 58MS/m (Magnet Wire)
- Bobinados de rotor. Tipo hilo de cobre 58MS/m (Magnet Wire)
- Bobinados de rotor_n. Cobre 58MS/m. Con corriente asignada cero. (En vacío o sobre líneas neutras.), 0 Aire en las ranuras del rotor
- Acero (eje). Tipo 316 Stainless Steel.

Y las siguientes condiciones de contorno:

- Masa. (BC Type “Prescribed A” A0=0, A1=0, A2=0, $\Phi, deg=0$)
- Anti-periodic. (En caso de dibujar un corte por la mitad)
- Anti-periodic estátor. Aplicar en líneas de estátor a izquierda y derecha. (En caso de dibujar un corte por la mitad)
- Anti-periodic rotor. Aplicar en líneas de rotor a izquierda y derecha. (En caso de dibujar un corte por la mitad)
- Anti-periodic eje. Aplicar en líneas de eje a izquierda y derecha. (En caso de dibujar un corte por la mitad)

Comprobamos también los bobinados del estator:

- Bobinados estator: $\emptyset = 0.5m$ y 550 vueltas \rightarrow Winding Fill = 93.45 %

b) Se desea, con esta geometría, una inducción media aproximada de 0.2T en el entrehierro. ¿Se consigue? ¿Cuál es valor de la corriente de excitación necesaria?

Respuesta:

c) ¿Cuánto mide el paso polar de la máquina para dicho flujo?

Respuesta:

d) Si quisiéramos disminuir o aumentar el flujo en el entrehierro, ¿Qué parámetros debemos modificar en FEMM, y cómo debemos realizarlo?

Respuesta:



MÁQUINA DE CONTINUA EN CARGA.

- a) En primer lugar, abrir el archivo “máquina de continua en carga. FEM” ¿Cuál es el valor máximo de la inducción en el entrehierro? ¿y el del flujo?

Respuesta:

- b) ¿Cuánto vale la corriente de excitación?

Respuesta:

- c) ¿Cuál es la expresión del par de la máquina? ¿Y la potencia útil?

Respuesta:

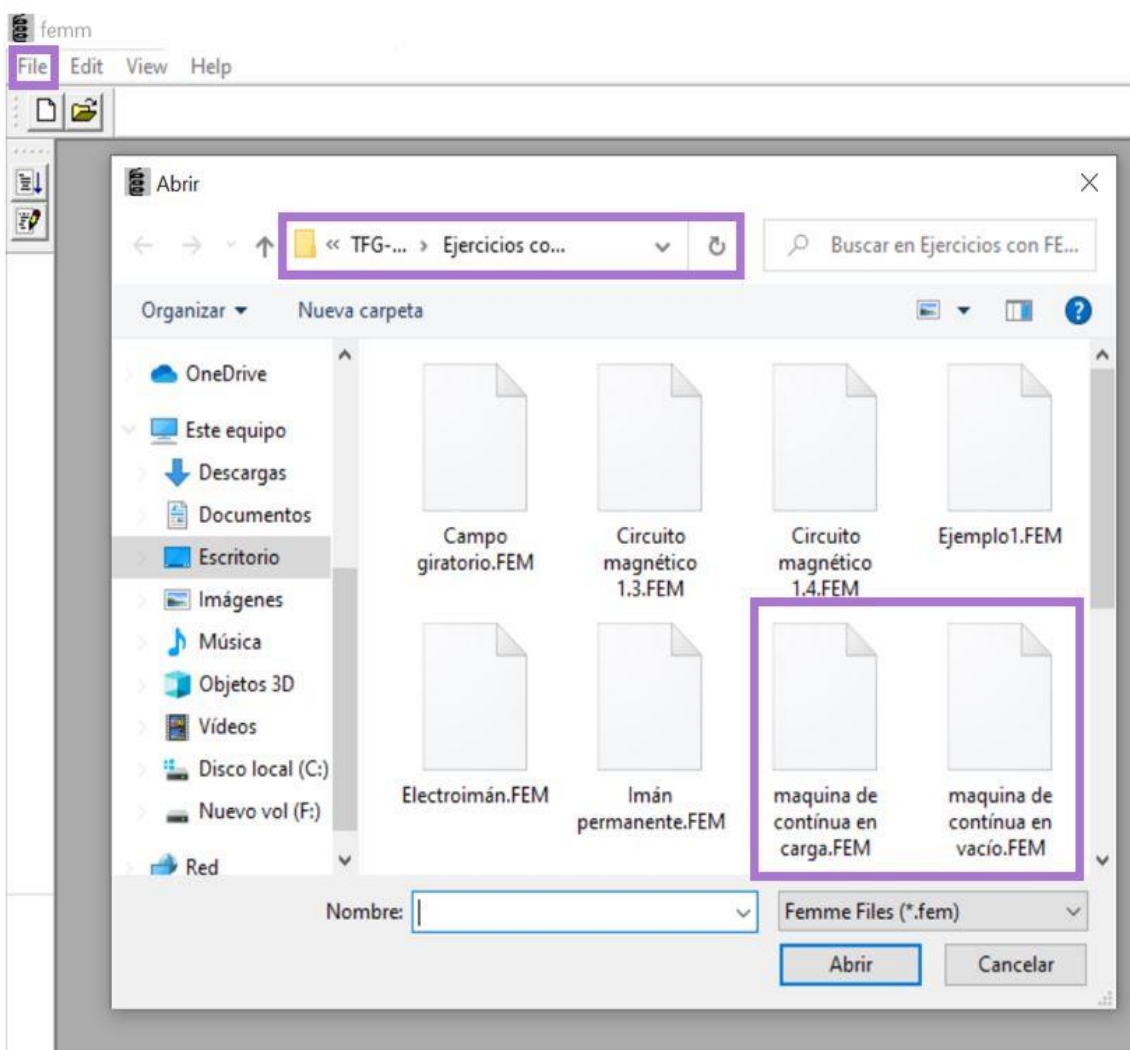
- d) ¿Cuál es la expresión potencia eléctrica absorbida? ¿Y el rendimiento?

Respuesta:

Guion para la resolución de la práctica

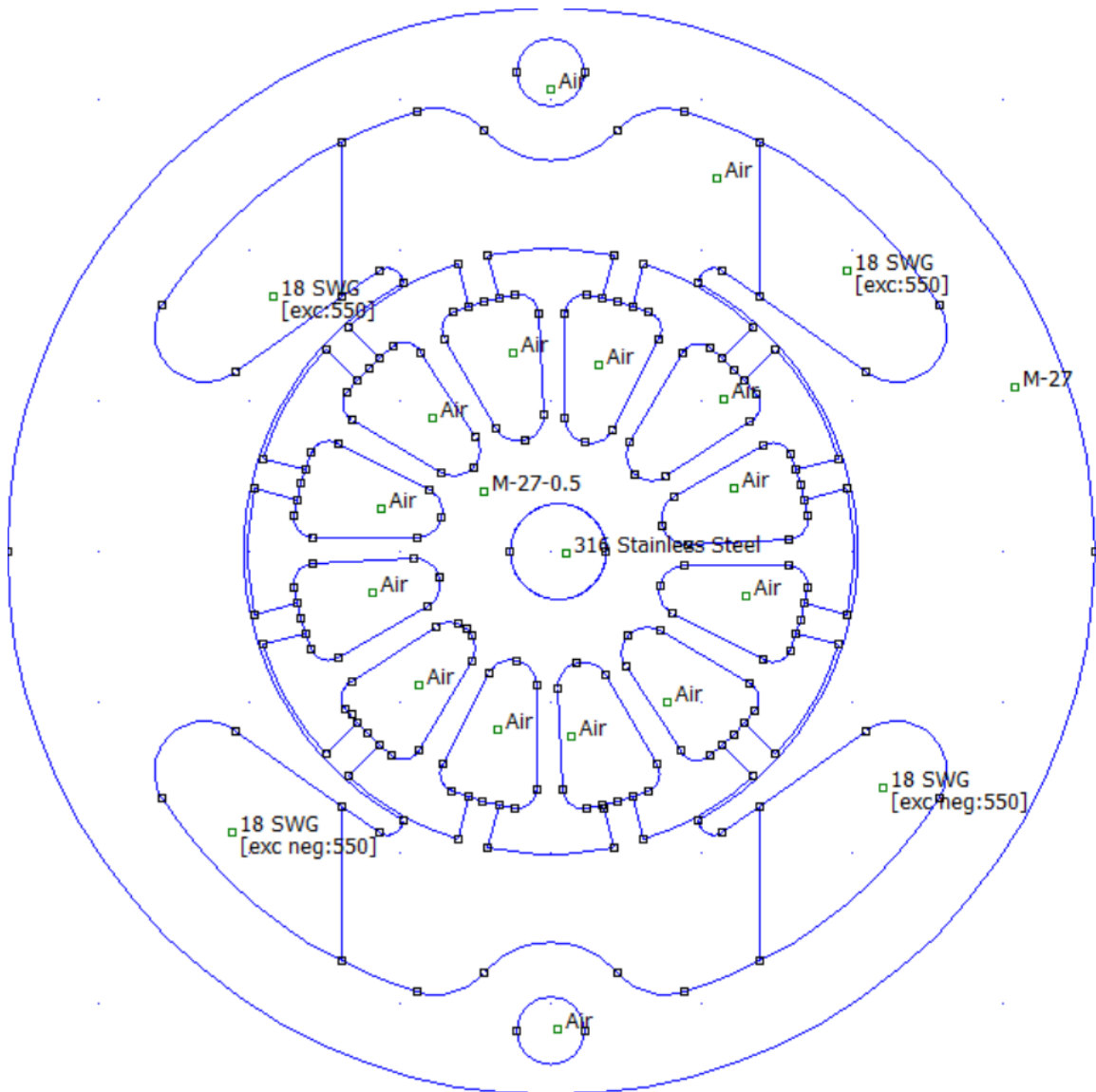
Antes de comenzar a resolver la práctica deberemos descargar y guardar en una dirección local, los archivos “. FEM” que nos van a servir para visualizar la máquina y trabajar con ella en el software.

Para realizar la carga de archivos, primeramente abriremos el programa de la forma habitual, seleccionaremos *File* → *Open* y buscaremos la ruta donde se alojen los archivos “máquina de continua en vacío.FEM” y “máquina de continua en carga.FEM”. Para agilizar este proceso se puede introducir la dirección en el buscador de Windows.



MÁQUINA DE CONTINUA EN VACÍO

- A) En este apartado se trata de abrir el archivo “máquina de continua en vacío.FEM”



La primera parte simplemente es comprobar que todos los elementos que existen en la configuración son los indicados en el enunciado de la práctica. Esto se consigue seleccionando “*Properties* → *Materials library*”, tras lo cual se desplegará la librería donde están cargados todos los materiales. Comprobaremos uno por uno si las características de los materiales son las correctas.

B) Aunque la máquina ya tiene todos los valores añadidos, comprobaremos de forma teórica si el valor que simula es correcta.

Se quiere conseguir una inducción media aproximada de 0.2T en el entrehierro.

$$B = \frac{\phi}{\tau_p \cdot L_{rot}}$$

El paso polar y la longitud del rotor son constantes de la máquina, por tanto, calculamos el flujo útil por polo que hay que conseguir:

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_{rot}}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 40,812}{2 \cdot 1}$$

$$\phi = B \cdot \tau_p \cdot L_{rot} = 0.2 \cdot 62,96 \cdot 10^{-3} \cdot 0,160$$

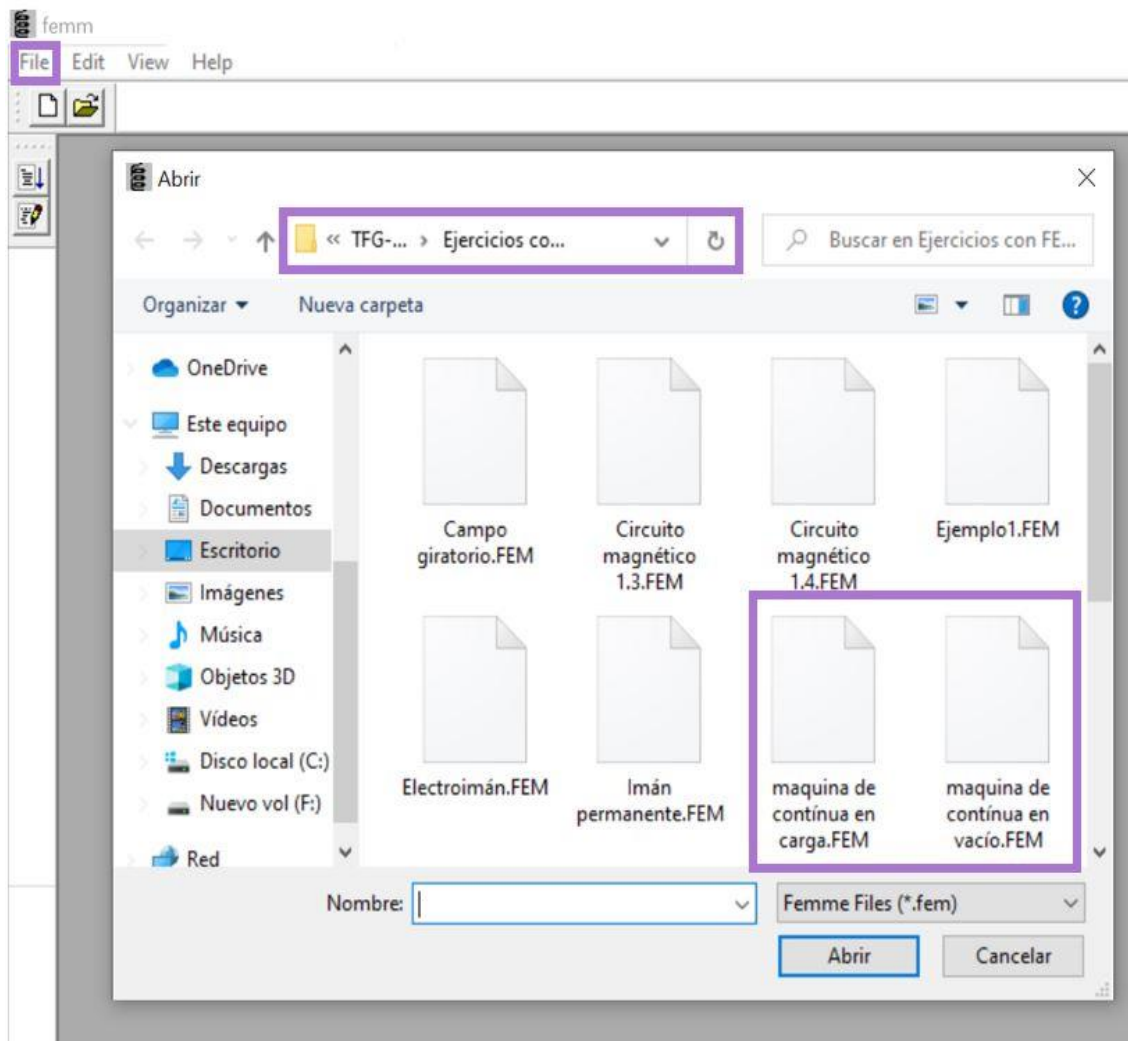
$$\phi = 2.015 \text{ mWb/polo}$$

El flujo es proporcional a la corriente de excitación. Probamos con varias intensidades y simulamos. Medimos el flujo en el polo hasta alcanzar un valor cercano a los 2.015 mWb

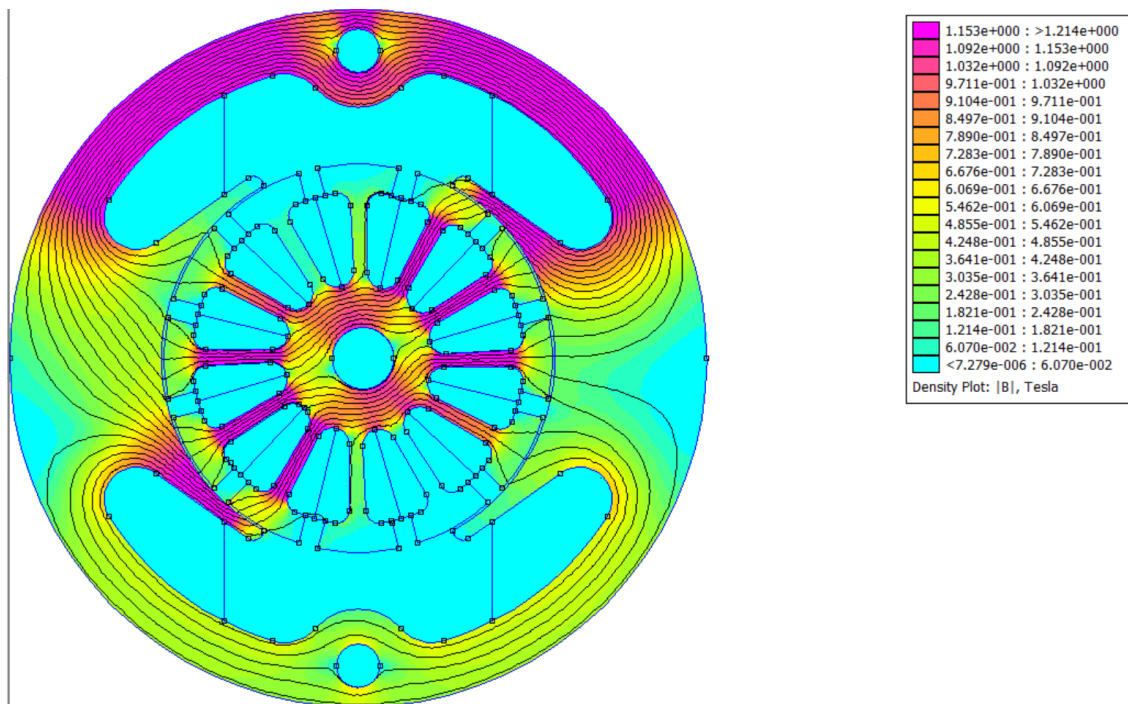
Prueba	I_{exc} (A)	ϕ (mWb)
A	0.25	2.38
B	0.15	1.92
C	0.175	2.08
D	0.165	2.02

MÁQUINA DE CONTINUA EN CARGA

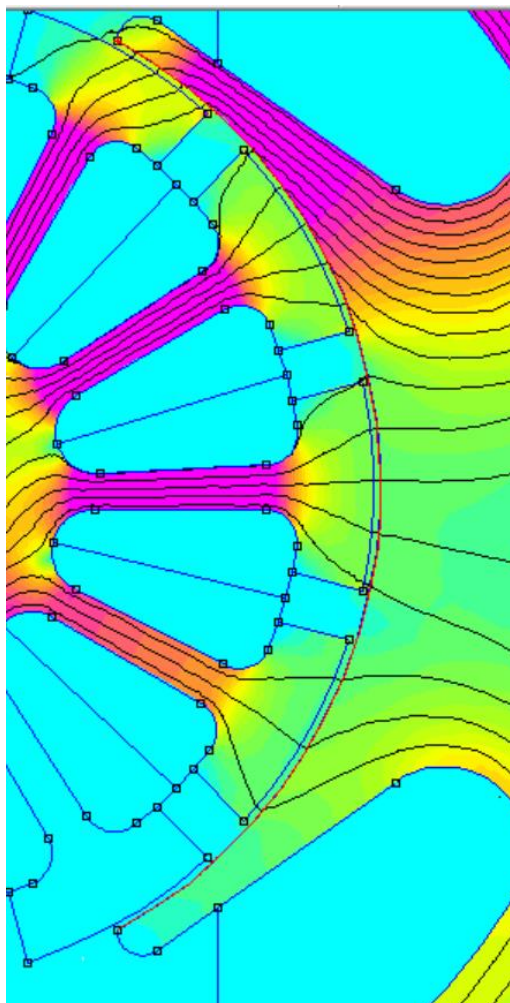
- A) Abrimos de la misma manera que en el anterior apartado de la práctica el archivo: “máquina de continua en carga. FEM”:



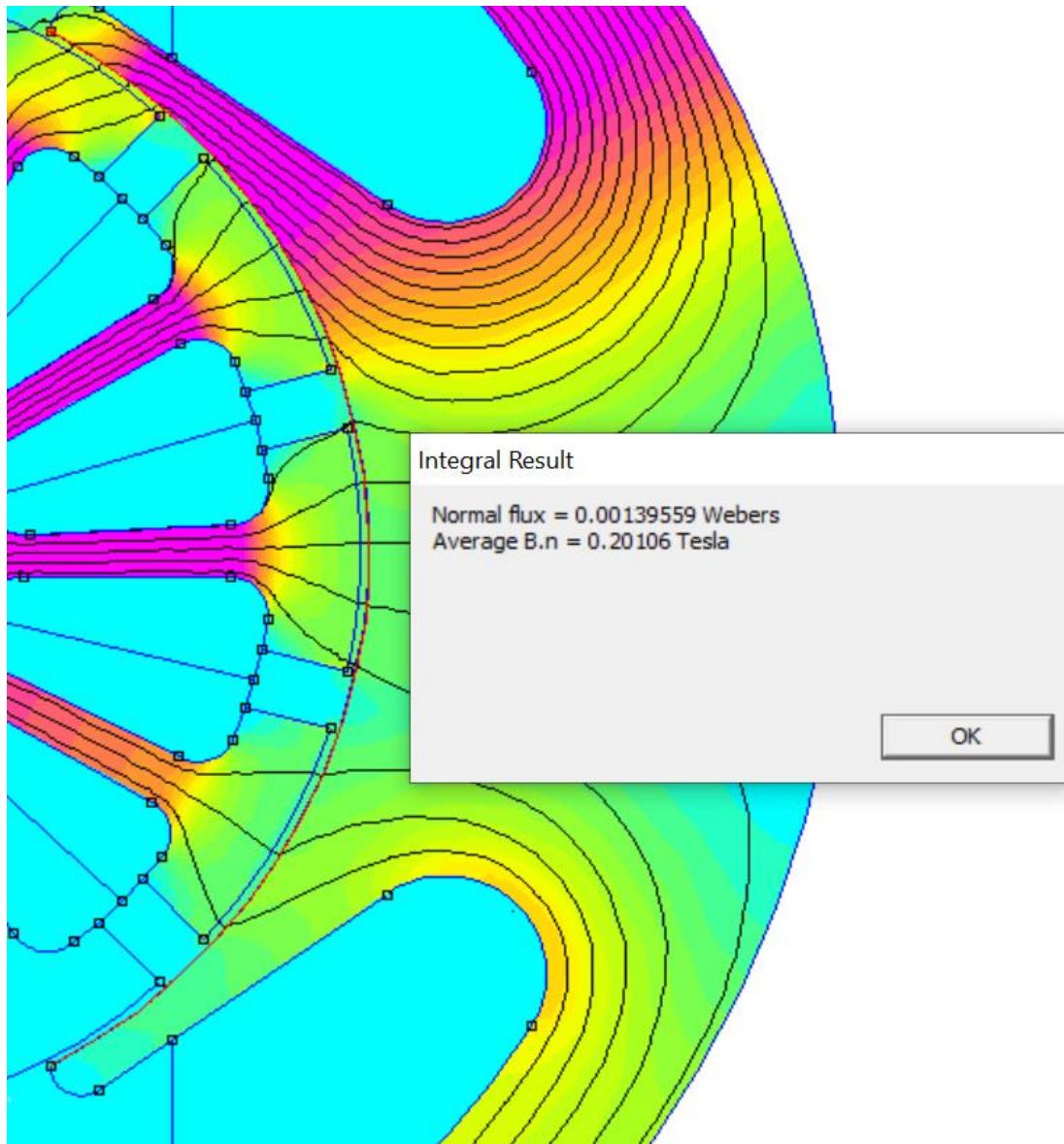
Para medir el flujo en el entrehierro, primero mallamos, simulamos y pinchamos en la opción View:



Medidas de línea y seleccionamos los dos puntos en los extremos del polo, de forma que el resultado de la línea para medir el flujo quedaría:



Seleccionamos “Integrate”:



B) Se sabe que la máquina, por su placa de características, en condiciones nominales trabaja a 110 V, 0.5 A y 1500 rpm.

El número de conductores tiene que cumplir la siguiente ecuación:

$$E = B_p \cdot vel \cdot long \cdot N$$

E: tensión inducida [V]

B_p: densidad de flujo media por polo, véase (fig6-00) [T]

vel: velocidad lineal de la superficie del rotor a la velocidad asignada [m/s]

long: profundidad de la máquina [m]

N: número de conductores en serie

$$N = \frac{E}{B_p \cdot [n_N \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{60}\right) \cdot \left(\frac{D_{rot}}{2}\right)] \cdot long}$$

$$N = \frac{110}{0.56159 \cdot [1500 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{60}\right) \cdot \left(\frac{40.0812e - 03}{2}\right)] \cdot 0.16} = 388.9$$

Hay dos vías en paralelo, y el rotor tiene doce ranuras por tanto se emplearán 64 conductores por ranura, consiguiendo un factor de relleno de en torno al 100%.

A continuación, calculamos la corriente que circulará por las ranuras del rotor:

$$I_N = \frac{I_r}{cr} \cdot a;$$

$$I_r = \frac{0,5 A \cdot 64 \frac{cond}{ranura}}{2 \text{ vías en paralelo}} = 16 A.$$

Por tanto, los circuitos de la máquina quedan recogidos en la siguiente tabla:

	Intensidad (A)	Nº vueltas	Ø (mm)	Winding Fill (%)	J (A/mm ²)
Circuito excitación	0.165	550	0.5	93.45	0.7850
Circuito inducido-derivación1	0.25	64	0.7	99.92	0.649
Circuito inducido-derivación2	0.25	64	0.7	99.92	0.649

A partir de la resolución del siguiente circuito ya podríamos resolver el resto de la práctica:

