

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE SEVILLA

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Proyecto Fin de Carrera

Pablo Macarro García

2013-2014



TUTORES:

Alejandro Marano Marcolini
Juan Manuel Mauricio Ferramola

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
RESUMEN.....	8
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Descripción.....	11
1.2. Motivación	11
1.3. Objetivos	11
1.4. Alcance y Justificación.....	12
2. ORIGEN Y FUNDAMENTOS DEL ELECTROMAGNETISMO	13
2.1. Bases teóricas del electromagnetismo.....	13
2.1.1. Interpretación relativista del campo magnético	13
2.1.2. El campo magnético atómico	20
2.1.3. El campo eléctrico y magnético en medios materiales.....	21
2.2. Ecuaciones de Maxwell. Leyes fundamentales.....	21
2.2.1. Conjunto de ecuaciones. Ecuaciones de Maxwell.....	22
2.2.2. Significado físico de las ecuaciones. Leyes experimentales	22
2.2.3. Ecuaciones de la electrostática y magnetostática.....	24
2.3. Comportamiento magnético de la materia	25
2.3.1. Par, fuerza y energía potencial de un dipolo en un campo magnético....	25
2.3.2. Magnetización	26
2.3.3. Clasificación de materiales	27
3. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN.....	34
3.1. FEMM 4.2	34
3.1.1. Descripción	34
3.1.2. Interfaz.....	36
3.1.3. Condiciones de contorno en problemas electromagnéticos	45
3.2. LUA	49
3.2.1. Descripción	49
3.2.2. Funcionalidades.....	50
3.3. Resumen. Ventajas y Limitaciones	51
3.3.1. FEMM 4.2.....	51
3.3.2. Lua 4.0	52
3.4. Metodología	52

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

3.4.1.	Descripción	52
3.4.2.	Ventajas y logros.....	57
4.	<u>MÁQUINA SÍNCRONA DE IMANES PERMANENTES</u>	58
4.1.	Introducción	58
4.1.1.	Máquinas eléctricas.....	58
4.1.2.	Fundamentos de las máquinas de Corriente Alterna.....	61
4.1.3.	Circuito magnético.....	67
4.2.	La máquina síncrona de imanes permanentes	71
4.2.1.	Máquina síncrona. Generalidades.....	71
4.2.2.	Principios de funcionamiento.....	72
4.2.3.	Máquina síncrona de Imanes Permanentes.....	73
4.2.4.	Constitución máquinas de flujo radial.....	76
4.2.5.	Dispersiones de flujo	78
5.	<u>SIMULACIONES Y RESULTADOS</u>	84
5.1.	Programa.....	84
5.2.	Estator.....	89
5.2.1.	Espesores	89
5.2.2.	Entrehierro	89
5.2.3.	Ranuras	90
5.2.4.	Circuitos y cableado.....	93
5.2.5.	Simulación y resultados	95
5.3.	Rotor.....	99
5.3.1.	Geometría del cuerpo rotórico.....	99
5.3.2.	Disposición de imanes	100
5.3.3.	Simulación y Resultados	103
5.4.	Maquina síncrona de imanes permanentes	108
5.4.1.	Características	108
5.4.2.	Simulación	109
5.4.3.	Resultados	111
5.5.	Conclusiones.....	116
6.	<u>MOTOR ALTERNATIVO.....</u>	117
6.1.	Objetivos y Justificación.....	117
6.2.	Pruebas de concepto	117

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

6.3. Análisis de posiciones relativas	118
6.4. Prueba de concepto de motor experimental	121
6.4.1. Programa	121
6.4.2. Modelo.....	121
6.4.3. Simulación y resultados	122
<u>7. CONCLUSIONES.....</u>	<u>124</u>
7.1. Valoración del proyecto y de los resultados.....	124
7.2. Conocimientos adquiridos.....	125
7.3. Aplicaciones del proyecto	126
<u>8. BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>127</u>
<u>9. ANEXOS</u>	<u>129</u>

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. SISTEMAS DE REFERENCIAS EN LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD RESTRINGIDA.....	14
FIGURA 2. CAMPO MAGNÉTICO GIRATORIO EN EL INTERIOR DE UNA ESPIRA Y CORRIENTE INDUCIDA.....	23
FIGURA 3. CICLO DE HISTÉRESIS.....	30
FIGURA 4. EFECTO BARKHAUSEN.....	30
FIGURA 5. EVOLUCIÓN DE LOS DOMINIOS EN UN MATERIAL FERROMAGNÉTICO.....	31
FIGURA 6. CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES DUROS.....	31
FIGURA 7. CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES BLANDOS.....	32
FIGURA 8. CURVA B-H PARA EL FE. OBTENIDO DE FEMM 4.2.....	32
FIGURA 9. INTERFAZ DEL PREPROCESADOR DE PROBLEMAS MAGNÉTICOS.....	36
FIGURA 10. BARRA DE COMANDOS DE DIBUJO.....	37
FIGURA 11. SELECCIÓN DE ÁREAS.....	37
FIGURA 12. BARRA DE COMANDOS DE MANIPULACIÓN DE ELEMENTOS SELECCIONADOS.....	37
FIGURA 13. BARRA DE COMANDOS DE MANIPULACIÓN DE LA VISUALIZACIÓN.....	38
FIGURA 14. COMANDOS DE LUA.....	38
FIGURA 15. CUADRO DE DIÁLOGO DE DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	38
FIGURA 16. LIBRERÍA DE MATERIALES.....	39
FIGURA 17. CUADRO DE DIÁLOGO PARA CREAR NUEVOS MATERIALES.....	39
FIGURA 18. CUADRO DE DIÁLOGO PARA CREAR CONDICIONES DE CONTORNO.....	40
FIGURA 19. CUADRO DE DIÁLOGO PARA CREAR UNA PROPIEDAD PUNTUAL.....	40
FIGURA 20. CREACIÓN DE CIRCUITOS.....	40
FIGURA 21. ASIGNACIÓN DE CIRCUITOS.....	41
FIGURA 22. MALLA TRIANGULAR AUTOMÁTICA.....	41
FIGURA 23. BARRA DE COMANDOS DE ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	42
FIGURA 24. INTERFAZ DEL POSTPROCESADOR.....	42
FIGURA 25. MODOS DEL POSTPROCESADOR.....	43
FIGURA 26. BARRA DE COMANDOS PARA VISUALIZACIONES GRÁFICAS.....	43
FIGURA 27. CUADRO DE DIÁLOGO PARA LÍNEAS DE FLUJO.....	43
FIGURA 28. CUADRO DE DIÁLOGO PARA DENSIDADES.....	43
FIGURA 29. CUADRO DE DIÁLOGO PARA VISUALIZACIÓN DE VECTORES.....	44
FIGURA 30. BARRA DE COMANDOS DE OPERACIONES.....	44
FIGURA 31. CUADRO DE DIÁLOGO GRÁFICAS EN 2D.....	44
FIGURA 32. TIPOS DE REPRESENTACIONES GRÁFICAS.....	44
FIGURA 33. TIPOS DE OPERACIONES INTEGRALES.....	44
FIGURA 34. CONDICIÓN DE DIRICHLET EN LA FRONTERA DEL ESTATOR A_0, A_1, A_2 , Y Φ	45
FIGURA 35. CONDICIÓN DE DIRICHLET EN LA FRONTERA DEL ESTATOR $A_0 \neq 0$ Y $A_1 = A_2 = \Phi = 0$	46
FIGURA 36. CONDICIÓN DE DIRICHLET EN LA FRONTERA DEL ESTATOR $A_0 = A_1 = A_2 = 0$ Y $\Phi = 0$	46
FIGURA 37. CONDICIÓN DE ROBIN CON $c_0 = 0$. EL CONTORNO NO INFLUYE.....	48
FIGURA 38. CONDICIÓN DE ROBIN CON c_0 TENDIENDO A INFINITO. FLUJO CONTENIDO EN EL DOMINIO.....	48
FIGURA 39. BARRA DE COMANDOS PARA EJECUTAR LUA.....	49
FIGURA 40. EJEMPLO DE PROGRAMACIÓN DE FEMM USANDO LUA A TRAVÉS DE NOTEPAD ++.....	49
FIGURA 41. LÍNEAS DE CÓDIGOS CON PARÁMETROS Y FUNCIONES MATEMÁTICAS.....	50
FIGURA 42. LÍNEAS DE CÓDIGO CON BUCLES SENCILLOS, PARAMETRIZADOS Y COMENTARIOS DE TEXTO.....	51
FIGURA 43. EJEMPLO Y ESQUEMA DEL MÓDULO PRINCIPAL.....	54
FIGURA 44. ESQUEMA DEL MÓDULO DE CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	55
FIGURA 45. PARÁMETROS APORTADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	55
FIGURA 46. ESQUEMA GIRO DEL ROTOR.....	56
FIGURA 47. ESQUEMA VARIACIÓN DE CORRIENTES ESTATOR.....	56
FIGURA 48. ESQUEMA DEL MÓDULO DE ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
FIGURA 49. ESQUEMA TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS.....	58
FIGURA 50. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA MÁQUINA ROTATIVA.....	58

FIGURA 51. CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS MÁQUINAS ROTATIVAS	59
FIGURA 52. PARTES CONSTITUTIVAS DE LAS MÁQUINAS ROTATIVAS	59
FIGURA 53. ROTOR	60
FIGURA 54. ESCOBILLAS	61
FIGURA 55. [10] ESTATOR TRIFÁSICO SENCILLO. SE ASUMEN NEGATIVAS LAS CORRIENTE CON EL SUPERÍNDICE ' , SALIENTES AL PLANO DEL DIBUJO	62
FIGURA 56. [10] CAMPO MAGNÉTICO GIRATORIO EN UN ESTATOR REPRESENTADO COMO POLO NORTE Y POLO SUR.....	63
FIGURA 57. REPRESENTACIÓN EN FEMM 4.2 DEL FLUJO MAGNÉTICO NETO PARA UN SISTEMA TRIFÁSICO DE TRES ESPIRAS	63
FIGURA 58. ESTATOR TRIFÁSICO ELABORADO EN FEMM 4.2 CON SECUENCIA A-C'-B-A'-C-B' REPETIDA DOS VECES. LA FASE A (BLANCO), B (ROJA), C (AMARILLA). SE OBSERVAN LOS 4 POLOS QUE APARECEN.	64
FIGURA 59. FEM INDUCIDA POR UN PAR DE POLOS GIRANDO EN EL INTERIOR DE UN CONDUCTOR: A) UNA ESPIRA, B) DOS ESPIRAS, c) MULTIESPIRA	65
FIGURA 60. CAMPO MAGNÉTICO QUE GIRA EN UN ESTATOR BOBINADO	65
FIGURA 61. PAR MÁXIMO PARA UNA MÁQUINA SÍNCRONA SIMPLIFICADA.....	66
FIGURA 62. BALANCE ENERGÉTICO DE LAS MÁQUINAS ROTATIVAS DE CA COMO MOTORES	67
FIGURA 63. BALANCE ENERGÉTICO DE LAS MÁQUINAS ROTATIVAS DE CA COMO GENERADORES.....	67
FIGURA 64. CIRCUITO MAGNÉTICO DE UN NÚCLEO FERROMAGNÉTICO ELÉCTRICAMENTE EXCITADO.....	69
FIGURA 65. DENSIDAD DE CAMPO B PARA UN NÚCLEO DE HIERRO EXCITADO CON UNA BOBINA DE N VUELTAS DE INTENSIDAD I [A].....	69
FIGURA 66. EFECTO DE LAS ESQUINAS EN LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO	70
FIGURA 67. EFECTO DE REFRIGERANCIA DE UN CAMPO MAGNÉTICO EN UN ENTREHIERRO	71
FIGURA 68. CORTE TRANSVERSAL DEL ENTREHIERRO. REPRESENTACIÓN DE LA SECCIÓN EQUIVALENTE DEL ENTREHIERRO... ..	71
FIGURA 69. CONFIGURACIÓN LISA Y DE POLOS SALIENTES PARA ROTOR DE 4 POLOS	72
FIGURA 70. ESQUEMA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA COMO GENERADOR.....	72
FIGURA 71. ESQUEMA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA COMO MOTOR	73
FIGURA 72. CONFIGURACIÓN DE FLUJO RADIAL. OBTENIDO DEL PROYECTO "GENERADOR DE FLUJO AXIAL ESTATÓRICO DE IMANES PERMANENTES"	74
FIGURA 73. ESQUEMA MOTOR PMSM	75
FIGURA 74. ESQUEMA MOTOR BLDC.....	75
FIGURA 75. CONFIGURACIONES BÁSICAS DE LAS MÁQUINAS ROTATIVAS	76
FIGURA 76. SIMULACIONES DE LAS CONFIGURACIONES BÁSICAS	76
FIGURA 77. A) SEMICERRADA RECTANGULAR. B) SEMICERRADA TRAPEZOIDAL. c) RECTANGULAR ABIERTA	77
FIGURA 78. ESQUEMA DE DEVANADO DE DOBLE CAPA	77
FIGURA 79. IMANES INTERIORES COLOCADOS EN V. EXTRAÍDO DEL PROYECTO "CÁLCULO Y REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN MÁQUINAS DE IMANES PERMANENTES"	78
FIGURA 80. CIRCUITO EQUIVALENTE EN VACÍO POR FASE. LA DIFERENCIA COMO GENERADOR Y MOTOR ES EL SENTIDO DEL LA INTENSIDAD.....	79
FIGURA 81. FLUJO DE DISPERSIÓN DEL INDUCIDO DE RANURA	80
FIGURA 82. DISPERSIÓN DE FLUJO PARA UNA RANURA EN MATERIAL FERROMAGNÉTICO	80
FIGURA 83. FLUJOS DE DISPERSIÓN DEL INDUCIDO, DE CABEZA DE DIENTE	81
FIGURA 84. DISTRIBUCIÓN DE LA INDUCCIÓN MAGNÉTICA EN MATERIAL FERROMAGNÉTICO.	81
FIGURA 85. INFLUENCIA DE LA ABERTURA DE LA RANURA EN LA INDUCCIÓN MAGNÉTICA	82
FIGURA 86. DISTRIBUCIÓN DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA QUE ATRAVIESA EL CONTORNO DE MEDIO ESTATOR OBTENIDA DE FEMM 4.2. SE OBSERVAN LAS IRREGULARIDADES CORRESPONDIENTES A DISPERSIONES DE FLUJO	82
FIGURA 87. FORMAS QUE ADQUIERE EL CAMPO DE DISPERSIÓN EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN DE LAS RANURAS.....	83
FIGURA 88. DISPERSIÓN EN UNA RUEDA TETRAPOLAR.	83
FIGURA 89. DISTRIBUCIÓN DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA PARA DISTINTOS ESPESORES DE ESTATOR.....	89
FIGURA 90. DISTRIBUCIÓN DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA PARA DISTINTOS ESPESORES DE ENTREHIERRO	90
FIGURA 91. DIFERENTES CONFIGURACIONES DE RANURAS DE BOBINADO CIRCULAR.	91
FIGURA 92. DIFERENTES CONFIGURACIONES DE RANURAS TRAPEZOIDALES	91
FIGURA 93. DIFERENTES CONFIGURACIONES DE RANURAS RECTANGULARES	92
FIGURA 94. GEOMETRÍA DE LA RANURA DE SIMULACIÓN EN MM. OBTENIDA DE CATIA v5	92

FIGURA 95. PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE COBRE CALIBRE AWG 24	93
FIGURA 96. DENSIDAD DE CORRIENTE Y LÍNEAS DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA. LA FASE A ESTÁ EN AMPLITUD MÁXIMA	96
FIGURA 97. INDUCCIÓN MAGNÉTICA INDUCIDA POR CORRIENTES ESTATÓRICAS	97
FIGURA 98. DENSIDAD DE CORRIENTE A LO LARGO DE TRES SUPERFICIES DIFERENTES: (ROJA) ENTRE RANURAS DE LA FASE A, (AGUAMARINA) PERPENDICULAR AL CAMPO, (NEGRO) EN LÍNEA CON EL CAMPO	97
FIGURA 99. DETALLE DE LA CONCENTRACIÓN DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA EN EL ROTOR	98
FIGURA 100. DISTRIBUCIÓN DE FLUJO MAGNÉTICO EXPRESADO EN TESLA POR UNIDAD DE SUPERFICIE	98
FIGURA 101. ROTOR DE 6 BRAZOS Y ESPESOR DE 50 MM	99
FIGURA 102. ROTOR DE 6 BRAZOS Y ESPESOR 100 MM	99
FIGURA 103. ENTREHIERRO, IMANES RECTANGULARES EN LA SUPERFICIE Y ROTOR DE CUATRO BRAZOS PARA UN PAR DE POLOS	99
FIGURA 104. ROTOR CILÍNDRICO CON 2 POLOS DE IMANES SUPERFICIALES	100
FIGURA 105. IMANES EMBEBIDOS EN LA SUPERFICIE DEL ROTOR. LA SEPARACIÓN ENTRE ELLOS ESTÁ DEFINIDA POR UN PARÁMETRO	101
FIGURA 106. IMANES INCRUSTADOS EN LA SUPERFICIE, CON SEPARACIÓN INTERIOR. OBSÉRVESE LA CONCENTRACIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO EN EL ÚLTIMO IMÁN DEL POLO	101
FIGURA 107. SIMULACIÓN DEL CAMPO GENERADO POR UN ROTOR CON DOS POLOS DE IMANES EN FORMA DE ARCO	102
FIGURA 108. POLO DE UN SOLO IMÁN EN FORMA DE ARCO DE CIRCUNFERENCIA Y DETALLE DE LA DIFERENCIA DE ARCO	102
FIGURA 109. DETALLE DE IMANES SOBRE SUPERFICIE: SEPARACIÓN ENTRE POLOS	103
FIGURA 110. PROPIEDADES DEL NbFeB 32 MGOE	104
FIGURA 111. INDUCCIÓN MAGNÉTICA GENERADA POR UN PAR DE POLOS DE IMANES PERMANENTES	105
FIGURA 112. DETALLE SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE LÍNEAS DE CAMPO	106
FIGURA 113. DENSIDAD DE CORRIENTE A LO LARGO DE TRES SUPERFICIES DIFERENTES: (ROJA) ENTRE RANURAS DE LA FASE A, (AGUAMARINA) PERPENDICULAR AL CAMPO, (NEGRO) EN LÍNEA CON EL CAMPO	106
FIGURA 114. DISTRIBUCIÓN DE FLUJO MAGNÉTICO PARA VARIAS ÁREAS	107
FIGURA 115. MODELADO DE LA MÁQUINA EN FEMM 4.2	108
FIGURA 116. DENSIDAD DE CORRIENTE PARA DISTINTAS POSICIONES RELATIVAS DEL ROTOR	109
FIGURA 117. DISTRIBUCIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO	109
FIGURA 118. $\theta_{\text{ROTOR}}=166.4^\circ$	110
FIGURA 119. $\theta_{\text{ROTOR}}=190.4^\circ$	110
FIGURA 120. $\theta_{\text{ROTOR}}=223.4^\circ$	110
FIGURA 121. $\theta_{\text{ROTOR}}=253.4^\circ$	110
FIGURA 122. $\theta_{\text{ROTOR}}=283.4^\circ$	110
FIGURA 123. $\theta_{\text{ROTOR}}=313.4^\circ$	110
FIGURA 124. $\theta_{\text{ROTOR}}=343.4^\circ$	110
FIGURA 125. $\theta_{\text{ROTOR}}=13.4^\circ$	110
FIGURA 126. $\theta_{\text{ROTOR}}=43.4^\circ$	110
FIGURA 127. $\theta_{\text{ROTOR}}=73.4^\circ$	110
FIGURA 128. $\theta_{\text{ROTOR}}=103.4^\circ$	110
FIGURA 129. $\theta_{\text{ROTOR}}=133.4^\circ$	110
FIGURA 130. CONTORNO PARA INTEGRALES DE SUPERFICIE EN LA SIMULACIÓN	111
FIGURA 131. FLUJO MAGNÉTICO FRENTE A ÁNGULO DE INCIDENCIA DE CAMPO TOTAL	111
FIGURA 132. DISTRIBUCIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO	112
FIGURA 133. INDUCCIÓN MAGNÉTICA TOTAL EN EL ROTOR EN UN GIRO MECÁNICO COMPLETO	112
FIGURA 134. CAMPO MAGNÉTICO TOTAL EN EL ROTOR EN UN CICLO MECÁNICO	113
FIGURA 135. ORIENTACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO TOTAL EN EL ROTOR RESPECTO A LA HORIZONTAL	113
FIGURA 136. PARTICIPACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO ROTÓRICO Y ESTATÓRICO EN EL TOTAL	114
FIGURA 137. ORIENTACIONES DE CAMPOS MAGNÉTICOS CONSTITUTIVOS	114
FIGURA 138. PAR MECÁNICO	115
FIGURA 139. INTERACCIÓN ENTRE IMANES ENFRENTADOS DESPLAZADOS PARALELAMENTE	118
FIGURA 140. IMAGEN DE LA SIMULACIÓN	119
FIGURA 141. INTERACCIONES ENTRE IMANES ENFRENTADOS, DESPLAZADOS PARALELAMENTE, PARCIALMENTE APANTALLADOS	119

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

FIGURA 142. IMANES PARALELOS, APANTALLADOS PARCIALMENTE.....	119
FIGURA 143. INTERACCIÓN ENTRE IMANES PARALELOS ASIMÉTRICAMENTE APANTALLADOS	120
FIGURA 144. IMÁN NdFeB 32 MGOE CON PLACA DE HIERRO PURO	121
FIGURA 145. DETALLE DE POSICIÓN RELATIVA INICIAL DE LOS IMANES	122
FIGURA 146. DISTRIBUCIONES DE CAMPO MAGNÉTICO PARA DISTINTAS POSICIONES DE LA SIMULACIÓN.....	122
FIGURA 147. PAR MECÁNICO PARA DOS PARES DE IMANES EN UN CICLO COMPLETO	123

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

El objetivo del Proyecto es el modelado y simulación en 2D, mediante software de elementos finitos, del circuito magnético de máquinas síncronas, particularizando en un motor síncrono de imanes permanentes, así como el estudio de viabilidad de motores alternativos de imanes permanentes.

Este Proyecto parte del deseo de comprender y estudiar el funcionamiento de los generadores eléctricos, la naturaleza del electromagnetismo y las posibles evoluciones de la tecnología. Por ello se ha realizado un Proyecto que comprende desde los estudios iniciales sobre la física intrínseca de la máquina eléctrica y los imanes permanentes, hasta el estudio de nuevas formas de obtención de energía pasando por el modelado de la tecnología actual.

ORIGEN Y FUNDAMENTOS DEL ELECTROMAGNETISMO

Se ha desarrollado la teoría electromagnética partiendo desde su origen cuántico y relativista. Se han estudiado las diferentes teorías actuales, llegando a la conclusión de que:

- Los *efectos magnéticos* deben inevitablemente suceder como un efecto relativista asociado a que la velocidad de la luz no es infinita, la invarianza de la carga y la ley de Coulomb.

Así pues, estos efectos magnéticos los producen cargas en movimiento. La estructura molecular se basa en cargas eléctricas en movimiento y por lo tanto llevan asociadas a su naturaleza comportamientos magnéticos:

- El movimiento de los electrones lleva asociado un *par mecánico orbital*, un *par magnético orbital* y un *par debido al spin*. El par magnético total dependerá de la configuración electrónica.

Para el estudio y la aplicación de los campos eléctricos y magnéticos, existen campos macroscópicos asociados a medios materiales:

- ***B*** y ***E*** son campos promediados generados por los átomos y moléculas en un volumen suficientemente grande respecto a ellas.

A continuación se han explicado las magnitudes y leyes del electromagnetismo: Las Leyes de Maxwell. Una vez entendidas, se ha procedido a exponer el comportamiento magnético de la materia, naturaleza de los materiales magnetizados, en qué consiste la magnetización y qué son los imanes permanentes.

HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

En este capítulo se han definido y explicado las herramientas informáticas utilizadas en el desarrollo del proyecto, así como la metodología de trabajo desarrollada.

Se ha utilizado *FEMM 4.2*, un programa gratuito de elementos finitos que permite la resolución de problemas de flujo de calor, en régimen permanente, y electromagnéticos (a baja frecuencia o estacionarios), en un dominio axilsimétrico en su plano de dos dimensiones. Se ha explicado su funcionamiento, ventajas y limitaciones.

Se ha utilizado el lenguaje de programación *Lua* para desarrollar líneas de código compilables por *FEMM 4.2*. Se han mostrado las ventajas y desventajas de usar este lenguaje en el entorno del software y sus aplicaciones en la metodología de trabajo.

Se han desarrollado simulaciones a través de la creación de geometrías, modelos, modificaciones y análisis de resultados, utilizando líneas de códigos en *Lua*. Se han parametrizado la geometría y las características de simulación.

MÁQUINA SÍNCRONA DE IMANES PERMANENTES

En primer lugar se ha introducido la máquina síncrona dentro de las máquinas eléctricas. Se han expuesto los principios de funcionamiento y se han simulado los aspectos teóricos más importantes.

En segundo lugar se ha particularizado el desarrollo a las máquinas de imanes permanentes, exponiendo los diferentes modelos que existen y modelos teóricos sencillos. Se han detallado y simulado los factores más importantes de dispersiones de flujo que existen, así como otros factores que afectan al diseño y operación de las mismas.

SIMULACIONES Y RESULTADOS

En este capítulo se ha modelado y simulado un motor síncrono de imanes permanentes. Se ha expuesto el programa englobado dentro de la metodología desarrollada.

En primer lugar se ha dimensionado, simulado y estudiado el estator: sus parámetros constitutivos y las magnitudes generadas en el conjunto del motor. En segundo lugar, se ha procedido de igual manera con el rotor antes de analizar y simular el motor completo. Se ha simulado, para 120 posiciones del rotor respecto al estator (con la misma configuración electromagnética) el motor completo. Se han analizado las

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

soluciones de flujo, distribución de campo y el par mecánico que se produce en el rotor. Además se han creado archivos de visualizaciones dinámicas *.gif*.

MOTOR ALTERNATIVO

Basándose en la teoría desarrollada en el Capítulo 2 y los conocimientos adquiridos en el desarrollo de los capítulos posteriores, se ha justificado la viabilidad de motores magnético con imanes permanentes como fuente exclusiva de energía. Se ha estudiado las condiciones que se deben dar para que un diseño sea potencialmente viable y se ha ejemplificado con una prueba de concepto muy sencilla.

CONCLUSIONES

Por último, se han expuesto las conclusiones globales y se ha valorado el desarrollo del proyecto, el conocimiento adquirido y el conocimiento generado.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción

El Proyecto consiste en el modelado y simulación en 2D mediante software de elementos finitos, del circuito magnético de máquinas síncronas, particularizando en un motor síncrono de imanes permanentes, así como el estudio de viabilidad de motores de funcionamiento exclusivo por interacción entre imanes.

1.2. Motivación

En un mundo cada vez más tecnológico, en el que cada vez más parte de la población mundial accede a nuevas tecnologías, las demandas energéticas crecientes requieren modelos energéticos diferentes. La obtención de energía eléctrica, como estado principal para el transporte y manipulación de la energía, debe reconsiderarse si queremos alcanzar un futuro sostenible que cubra las demandas energéticas de la población.

Esta idea incita a conocer la naturaleza de la energía eléctrica y de la tecnología asociada para su obtención en profundidad, para poder plantear nuevas soluciones al problema energético. Sería interesante poder prescindir de energía mecánica externa al propio generador, ya proceda ésta de energías renovables (que no terminan de cubrir las demandas actuales) o de combustibles fósiles (que generan grandes perjuicios al medio ambiente y que son finitos), y obtener la energía de la propia naturaleza de la materia.

Los imanes permanentes poseen inherentemente una energía potencial magnética, observable en experimentos sencillos, que es capaz de generar movimientos y compensar fuerzas exteriores, al interactuar entre ellos.

Así pues, este Proyecto parte del deseo de comprender y estudiar el funcionamiento de los generadores eléctricos, la naturaleza del electromagnetismo y las posibles evoluciones de la tecnología. Por ello se ha realizado un Proyecto que comprende desde los estudios iniciales sobre la física intrínseca de la máquina eléctrica y los imanes permanentes, hasta el estudio de nuevas formas de obtención de energía pasando por el modelado de la tecnología actual.

1.3. Objetivos

Los objetivos son principalmente tres:

- Comprensión y estudio de la naturaleza y comportamiento de los motores eléctricos.
- Simulación de un motor síncrono de imanes permanentes de características dadas.
- Estudio de viabilidad de modelos de funcionamiento exclusivo por interacción entre imanes.

1.4. Alcance y Justificación

- Desarrollo de la teoría que justifique la naturaleza del electromagnetismo.
- Desarrollo de la programación necesaria para el diseño y estudio de todas las fases del Proyecto.
- Se centra en un modelo de motor de imanes permanentes. Sería inabarcable el estudio de todos los diseños de generadores eléctricos y sus simulaciones.
- No incluye el estudio exhaustivo de materiales e imanes. Se basa en los proporcionados por el software.
- El Proyecto no pretende ser un estudio sobre electromagnetismo, aunque sí entender su naturaleza.
- No pretende ser el diseño de un motor optimizado y exhaustivo, ya que la industria actual cubre sobradamente este propósito.
- Por último, no se pretende realizar un diseño de motor alternativo de imanes permanentes, ya que actualmente existen patentes sobre ellos y el diseño y estudio de nuevas posibilidades sobrepasa el alcance de un Proyecto Fin de Carrera. Tan solo se pretende estudiar la viabilidad de ellos y los parámetros a estudiar.

2. ORIGEN Y FUNDAMENTOS DEL ELECTROMAGNETISMO

2.1. Bases teóricas del electromagnetismo

Todavía se discute la naturaleza del origen del electromagnetismo, así como su relación con el campo gravitatorio y como se acoplan las teorías cuánticas y relativistas [1] [2] [3].

La evolución de las teorías del origen del campo electromagnético parte de estudios macroscópicos a estudios microscópicos, desde una visión desacoplada entre campo eléctrico y magnético, a una visión unificada de campo electromagnético, estrechamente relacionada con la naturaleza de la luz.

Actualmente la teoría más exacta [1] es la que Feynman (1918-1988) postuló sobre electrodinámica cuántica, en la que todos los procesos electromagnéticos tienen origen en la interacción de absorción y emisión de fotones por parte de los fermiones (partículas de la familia de los electrones) que ocupan todo el espacio y el tiempo. Bajo esta teoría, la fuerza entre cargas eléctricas (Ley de Coulomb) se asocia a un intercambio de momento a través de fotones virtuales entre partículas cargadas. En consecuencia, del acoplamiento de los electrones con los cuatro estados de los fotones, surgen los potenciales electromagnéticos escalar y vectorial.

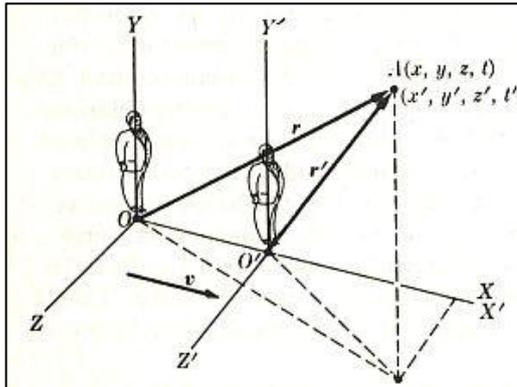
2.1.1. Interpretación relativista del campo magnético

- Teoría de la relatividad restringida

La teoría de la relatividad restringida está basada en tres postulados fundamentales (A. Einstein, 1905):

- *La velocidad de propagación de la luz es la misma para todos los sistemas de referencia que se muevan a velocidad constante.*
- *Todas las leyes de la física son invariantes respecto a sistemas de referencias que se muevan a velocidad constante.*
- *Un sistema no inercial se puede considerar instantáneamente inercial, respecto a otro sistema inercial.*

La formulación de esta teoría se basa en las ecuaciones de transformación de Lorentz. Estas ecuaciones establecen las relaciones entre dos sistemas de referencias K y K' , en movimiento relativo a velocidad constante:



$$\begin{aligned}
 x &= \gamma(x' + Vt') \\
 y &= y' \\
 z &= z' \\
 t &= \gamma\left(t + \frac{V}{c^2}x'\right)
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{aligned}
 \gamma &= \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\
 \beta &= \frac{V}{c}
 \end{aligned}$$

Figura 1. Sistemas de referencias en la teoría de la relatividad restringida

Para $\beta \rightarrow 0$ se obtienen las ecuaciones del movimiento válidas para sistemas mecánicos clásicos.

A partir de estas, se puede definir las transformaciones y fenómenos:

- Contracción de longitudes: La longitud l_0 medida de K , para el observador K' tiene una longitud l_0/γ .
- Dilatación del tiempo: Un suceso t_0 para K , para el observador K' dura $t_0\gamma$. Esto implica que dos sucesos simultáneos en K no tienen por qué serlo en K' .
- Transformación de velocidades:

$$v_x = \frac{v_x' + V}{1 + \frac{v_x'V}{c^2}} \quad v_y = \frac{v_y'}{\gamma\left(1 + \frac{v_x'V}{c^2}\right)} \quad v_z = \frac{v_z'}{\gamma\left(1 + \frac{v_x'V}{c^2}\right)} \quad (2.1.1- 1)$$

- Masa relativista: Es la que posee una partícula en función de su velocidad, conservándose la cantidad de movimiento. La masa es $m = \gamma m_0$, siendo m_0 la masa en reposo. Siendo m' la masa en K' la masa en K será:

$$m = \gamma\left(1 + \frac{v_x'V}{c^2}\right)m' \quad (2.1.1- 2)$$

- Transformación de fuerzas: La fuerza transversal sobre una partícula en movimiento es γ veces menor que cuando se encuentra en reposo bajo las mismas circunstancias

$$F_x = F_x' + V \frac{(v_y'F_y' + v_z'F_z')}{c^2\left(1 + \frac{v_x'V}{c^2}\right)} \quad F_y = \frac{F_y'}{\gamma\left(1 + \frac{v_x'V}{c^2}\right)} \quad F_z = \frac{F_z'}{\gamma\left(1 + \frac{v_x'V}{c^2}\right)} \quad (2.1.1- 3)$$

- Energía relativista: Cumple el principio de conservación de la energía, válidos para ambos sistemas de referencia.

$$E = mc^2 = \gamma m_0 c^2 = m_0 c^2 \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)^{-1/2} \quad (2.1.1- 4)$$

A continuación, se llegará al concepto de campo magnético creado por una carga móvil como fenómeno relativista. Normalmente, en la literatura, debido a que primero fueron constados los efectos magnéticos macroscópicos, se llega a la definición de campo magnético a través de la interacción entre cargas en movimiento desde un punto de vista experimental.

- Características de la carga eléctrica

La carga eléctrica de la naturaleza está asociada a su estructura atómica y se considera una característica asociada a las partículas. Sus principales características son:

- Manifestación dual: Únicamente existen dos variedades de carga (positiva y negativa). No se conoce la naturaleza íntima de este estado, pero se acepta ese comportamiento en las partículas.
- Conservación: La carga se conserva en un sistema aislado, entendiendo como sistema aislado un sistema en el que la materia no atraviesa sus límites.
- Cuantización: La carga se presenta como múltiplos de una magnitud (la carga del electrón). No se sabe la razón de que esta sea la menor carga posible, pero como la dualidad, se acepta como hecho experimental.
- Invarianza de la carga: Una carga de una partícula móvil es la misma que cuando se encuentra en reposo (se comprueba experimentalmente). Es interesante observar, como vimos anteriormente, que la masa no es invariante y depende de la velocidad (también constatable experimentalmente).

Se puede demostrar mediante el Teorema de Gauss, que un recinto con carga cumple:

$$\int_{S(t)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \int_{S'(t)} \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{S}' = \frac{Q_T}{\epsilon_0} \quad (2.1.1- 5)$$

Es importante no confundir “conservación” con “invarianza”. En el primer caso nos referimos a que en un sistema coordinado, la carga permanece constante. En el segundo caso nos referimos a que mediremos la misma carga en ese conjunto, desde cualquier otro sistema de referencia.

Ley de Coulomb

Se le conoce a la interacción entre dos cargas en el vacío y en reposo, obtenida experimentalmente. Es la base de la electroestática y veremos que se pueden derivar de ella comportamientos dinámicos y relativistas. Se expresa bajo la fórmula:

$$\mathbf{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{u}_{r_{21}} \quad (2.1.1- 6)$$

Sus principales características son:

- Fuerza newtoniana.
- Dirección la recta entre las dos cargas y sentido atractivo en cargas de signo opuesto y de repulsión entre cargas de mismo signo.
- Se cumple para cargas puntuales.
- Válida para cargas en reposo. Aparece un retraso en la información al existir movimiento relativo
- $k_e = 1/4\pi\epsilon_0$ depende del sistema de unidades, siendo ϵ_0 la constante de permitividad en el vacío.
- Es aplicable el Principio de Superposición.
- Se cumple en un dominio de distancias muy amplio.

Campo electrostático

El campo eléctrico en un punto se define como “la fuerza por unidad de carga positiva colocada en ese punto”. Es una perturbación de las características del espacio por la presencia de una carga eléctrica. Se expresa de la siguiente forma:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \mathbf{u}_r \quad (2.1.1- 7)$$

• Transformación del campo electrostático

Se medirá desde un sistema K' que se mueve a velocidad V respecto a K el campo eléctrico \mathbf{E} generado por distribución estacionaria respecto a K . Utilizando las transformaciones de Lorentz y la carga como invariante relativista, se transforma el campo eléctrico alcanza la expresión:

$$E'_z = \gamma E_z \quad (2.1.1- 8)$$

Se puede demostrar que esta expresión tiene carácter general y que la componente del campo eléctrico perpendicular a la velocidad es γ veces mayor en el sistema de referencia en el que las cargas están en movimiento que en el que las cargas están en reposo.

• Campo eléctrico generado por una carga móvil

Sea una carga q que se mueve a velocidad V en el eje X en un sistema de referencia K estático, y sea K' un sistema solidario con la carga, en dicho sistema de

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

referencia la carga está en reposo y el campo eléctrico generado por ella se expresa en dicho sistema para un instante $t=0$ en el que pasa por el origen de coordenadas de K :

$$E'_x = k_e \frac{q}{r'^2} \cos \theta' = k_e \frac{qx'}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}} \quad \left| \quad E_x = \gamma E'_x = k_e \frac{\gamma qx}{((\gamma x)^2 + y^2)^{3/2}} \quad (2.1.1- 9)$$

$$E'_x = k_e \frac{q}{r'^2} \cos \theta' = k_e \frac{qx'}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}} \quad \left| \quad E_x = \gamma E'_x = k_e \frac{\gamma qx}{((\gamma x)^2 + y^2)^{3/2}} \quad (2.1.1- 10)$$

Se observa que se genera un campo radial y parecería que la información de la posición de la carga se transmite de forma instantánea. Así pues una carga en movimiento genera un campo eléctrico, pero no electrostático. Sin embargo la fuerza sobre una carga en reposo en K sí es $F = q \cdot E$.

- Fuerza entre dos cargas móviles. Término de campo magnético

Se tienen dos cargas móviles q y q' , que se mueven a la misma velocidad constante en el plano xy respecto a un sistema de referencia K fijo. Siendo K' un sistema de referencia móvil a una velocidad V respecto del anterior (en él, las cargas están en reposo y contenidas en el plano $x'y'$).

Las componentes de la fuerza de q' sobre q serán:

$$F_x = k_e \frac{qq'x}{((x')^2 + y'^2)^{3/2}} \quad (2.1.1- 11)$$

$$F'_y = k_e \frac{qq'y}{((x')^2 + y'^2)^{3/2}}$$

Si analizamos esta fuerza desde el sistema de referencia fijo, usando las transformaciones de Lorentz en el instante $t=t'=0$:

$$\begin{array}{l} x' = \gamma x \\ y' = y \\ z' = z \\ F_x = F'_x \\ F_y = F'_y/\gamma \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} F_x = k_e \frac{qq'\gamma x}{((\gamma x)^2 + y^2)^{3/2}} \\ F_y = k_e \frac{qq'\gamma y}{\gamma((\gamma x)^2 + y^2)^{3/2}} \end{array} \quad (2.1.1- 12)$$

$$\mathbf{F} = k_e \frac{qq'\gamma x}{((\gamma x)^2 + y^2)^{3/2}} \left(\gamma x \mathbf{u}_x + \frac{y}{\gamma} \mathbf{u}_y \right) \quad (2.1.1- 13)$$

Desarrollando el término entre paréntesis, aplicando la definición de γ y teniendo en cuenta que $-\mathbf{v}\mathbf{u}_y = \mathbf{v} \times \mathbf{u}_z$:

$$\mathbf{F} = q \left[k_e \frac{q'\gamma r}{((\gamma x)^2 + y^2)^{3/2}} \mathbf{u}_r + \mathbf{v} \times \frac{k_e}{c^2} \frac{q'\gamma y v}{((\gamma x)^2 + y^2)^{3/2}} \mathbf{u}_z \right] \quad (2.1.1- 14)$$

Es a partir de este resultado, en el que se comprueba que $k_e/c^2 = 10^{-7}$ coincide con la constante del magnetismo $k_m = \mu_0/4\pi$, se puede definir la magnitud vectorial *campo magnético*. El segundo término de la expresión corresponde a una magnitud vectorial que depende de la carga y que tiene un valor diferente en cada posición del espacio. Podemos observar que se ha llegado a la expresión de la Fuerza de Lorentz para cargas en movimiento obtenida históricamente a partir de hechos experimentales:

$$\boxed{\mathbf{E} = k_e \frac{q' \gamma r}{((\gamma x)^2 + y^2)^{3/2}}} \qquad \boxed{\mathbf{E} = k_e \frac{q'}{r^2} \mathbf{u}_r f} \qquad (2.1.1- 15)$$

$$\boxed{\mathbf{B} = \frac{k_e}{c^2} \frac{q' \gamma y v}{((\gamma x)^2 + y^2)^{3/2}}} \qquad \boxed{\mathbf{B} = k_m \frac{q' (\mathbf{v} \times \mathbf{u}_z)}{r^2} f} \qquad (2.1.1- 16)$$

$$\boxed{\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})} \qquad (2.1.1- 17)$$

Siendo f el factor relativista, que toma valores cercanos a la unidad para velocidades mucho menores que la velocidad de la luz.

- Interacción de una carga móvil con una sucesión de cargas móviles

Partimos de dos distribuciones lineales de cargas, una positiva λ_+ y otra negativa λ_- , que se mueven respecto a un sistema fijo K a velocidad v_0 en sentidos opuestos, y que están separadas a una distancia muy pequeña en comparación con la distancia al origen, donde se encuentra una carga q que se mueve a velocidad v (podemos suponer que el campo eléctrico sobre q se compensa si esta estuviese en reposo).

Se define un sistema K' solidario con la carga q . Desde el sistema K' la velocidad de la distribuciones cambia. La distribución positiva (suponemos en el mismo sentido que la carga) es relativamente más lenta, y al contrario en la distribución negativa.

Este efecto provoca que la densidad lineal de carga cambie, relativamente las cargas positivas parecen más separadas y las negativas más pegadas, por lo tanto el *hilo conductor* (las dos distribuciones muy cercanas) se presenta como un hilo cargado en el sistema K :

$$\lambda' = \lambda'_+ - \lambda'_- \qquad (2.1.1- 18)$$

El campo eléctrico que provoca este hilo cargado será $E' = k_e \frac{2\lambda'}{r'}$ por lo que (suponiendo un factor relativista f cercano a la unidad) la fuerza sobre q será $F' = q \cdot E'$ dirigida hacia el hilo.

Aplicando relaciones de transformación de Lorentz se puede expresar $\lambda' = g(\lambda, \gamma, c, v, v_0)$. Aplicado a la fuerza F' y realizando las transformaciones de fuerza de Lorentz, se obtiene que la fuerza es proporcional a la velocidad de las partículas y perpendicular a ella. Concibiendo la sucesión de cargas como un hilo de intensidad $I = 2\lambda v_0$ la fuerza dependiente de la velocidad sobre una carga que se mueve paralelamente a un hilo que transporta una corriente I es:

$$F = \frac{k_e}{c^2} qv \frac{2I}{r} = qv \left(\frac{k_e}{c^2} \frac{2I}{r} \right) = qv \left(k_m \frac{2I}{r} \right) = qvB \quad (2.1.1- 19)$$

Debido a la corriente rectilínea en un punto situado a una distancia r se genera un efecto denominado *campo magnético*, que ejerce una fuerza sobre una carga q en movimiento.

Según este desarrollo, las interacciones entre corrientes eléctricas pueden admitirse derivadas de la Ley de Coulomb. Si los postulados de la teoría de la relatividad son válidos y la invarianza de la carga se cumple junto con las leyes de Coulomb, los *efectos magnéticos* deben inevitablemente suceder como un efecto relativista asociado a que la velocidad de la luz no es infinita (de serlo no existiría el magnetismo).

- Campo electromagnético para distintos sistemas de referencia

De los resultados obtenidos, se puede deducir que la interacción entre dos cargas móviles se expresa como:

$$\mathbf{F}_{12} = \left[k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{u}_r + k_m \frac{q_1 \mathbf{v}_1 \times (q_2 \mathbf{v}_2 \times \mathbf{u}_r)}{r^2} \right] f = q_1 \mathbf{E}_2 + q_1 \mathbf{v}_1 \times \mathbf{B}_2 \quad (2.1.1- 20)$$

Si observamos una carga q con velocidad v sobre la que actúan \mathbf{E} y \mathbf{B} desde un sistema de referencia K y lo comparamos con lo que se observa desde un sistema de referencia K' que se mueve a velocidad constante V en el eje OX , podemos obtener las relaciones entre ambos sistemas de referencia.

Desarrollando por componentes y aplicando las transformaciones de fuerzas y velocidad podemos, expresando las velocidades de un sistema en función de las del otro, alcanzar el siguiente resultado:

$$\begin{aligned} E'_x &= E_x & B'_x &= B_x \\ E'_y &= \gamma(E_y - VB_z) & B'_y &= \gamma \left(B_y - \frac{V}{c^2} E_z \right) \\ E'_z &= \gamma(E_z - VB_y) & B'_z &= \gamma \left(B_z - \frac{V}{c^2} E_y \right) \end{aligned} \quad (2.1.1- 21)$$

Una conclusión extraíble es que aunque no haya campo magnético en un sistema de referencia, sí lo hay en el otro. Una explicación a este fenómeno es que el campo magnético \mathbf{B}' aparece como un efecto relativista consecuencia de que la

velocidad de la luz no es finita. Se puede considerar que el campo magnético aparece como consecuencia del campo eléctrico y la velocidad del sistema móvil.

Expresando el campo magnético \mathbf{B}' para $\mathbf{B}=0$ en función de \mathbf{E}' :

$$\begin{array}{l}
 B'_x = 0 \\
 B'_y = \gamma \frac{V}{c^2} E_z = \frac{V}{c^2} E'_z \\
 B'_z = -\gamma \frac{V}{c^2} E_y = -\frac{V}{c^2} E'_y
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 \mathbf{V}' = (-V, 0, 0) \\
 \boxed{\mathbf{B}' = \frac{1}{c^2} (\mathbf{V}' \times \mathbf{E}')}
 \end{array}
 \right.
 \quad (2.1.1- 22)$$

Se pone de manifiesto que los campos eléctrico y magnético, no son independientes y son perpendiculares. Se observa una fuerte dependencia con la velocidad de la luz.

Las ecuaciones de transformación permiten encontrar unas ecuaciones invariantes en cualquier sistema de referencia aplicables a las ecuaciones de Maxwell:

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{E}' \cdot \mathbf{B}' \qquad \mathbf{B}^2 - \frac{\mathbf{E}^2}{c^2} = \mathbf{B}'^2 - \frac{\mathbf{E}'^2}{c^2} \quad (2.1.1- 23)$$

2.1.2. El campo magnético atómico

Una vez planteado el origen del campo electromagnético, es interesante discutir cómo es el movimiento de cargas eléctricas a nivel atómico.

Las teorías sobre el movimiento de los electrones, están ampliamente desarrolladas. Centrándonos en los efectos dinámicos que se generan, podemos señalar que el movimiento del electrón genera un *momento mecánico* y un *momento magnético orbital*.

- Momento mecánico

El momento mecánico, o momento mecánico angular depende del número cuántico principal, que define el tipo de órbita del electrón.

- Momento magnético orbital

Se puede asemejar el movimiento de un electrón, en su movimiento orbital, al de una carga en movimiento a lo largo de una espira, que genera un campo magnético. Este campo es muy similar al generado por un imán rectilíneo. El momento magnético será función del tipo de órbita.

- El giro del electrón

Se demuestra experimentalmente que los electrones giran alrededor de los protones en varias capas electrónicas. Del estudio de las rayas espectrales se demuestra que además del giro orbital el electrón lleva asociado un giro sobre sí mismo denominado *spin*.

Un electrón girando sobre en un campo magnético se comporta similarmente a un imán. Existe un par que tiende a alinear el electrón con el campo. Se produce por las propiedades mecánicas un movimiento de precesión alrededor de la dirección del campo. A consecuencia del movimiento orbital y de la carga positiva del núcleo, todo electrón de un átomo se encuentra sometido a un campo magnético.

Aunque solo se pueden predecir con exactitud a través de la teoría cuántica, se pueden obtener resultados cualitativos satisfactorios considerando que los electrones son pequeñas espiras o dipolos magnéticos que generan un momento magnético (en sentido opuesto al movimiento del electrón) y experimentando como tal un par de torsión en un campo magnético externo.

Se le atribuye un segundo momento al *spin del electrón*. No se obtienen resultados satisfactorios modelándolo como un giro en torno a su eje que genera un momento dipolar magnético. Es necesario hacer uso de la teoría relativista expuesta anteriormente para demostrar que el *momento de spin* es de aproximadamente $\pm 9 \cdot 10^{-24} A \cdot m^2$. En átomos con muchos electrones, solo contribuyen los espines de aquellos situados en campos que no estén completamente llenas.

El spin nuclear asociado al núcleo positivo del átomo, contribuye de manera despreciable.

Cada átomo tendrá diferentes contribuciones de momentos magnéticos. El momento magnético neto de un átomo dependerá de las orientaciones de sus electrones (su configuración electrónica) pudiendo tener un valor neto permanente.

2.1.3. El campo eléctrico y magnético en medios materiales

En medios materiales se superponen a los efectos eléctricos y magnéticos, los efectos de polarización dieléctrica y de magnetización. Es importante comprender que **B** y **E** son campos promediados generados por los átomos y moléculas en un volumen suficientemente grande respecto a ellas.

A partir del estudio microscópico, **B** es un campo real promedio al igual que **E**, y son los campos **H** y **D** definiciones auxiliares matemáticas, aunque por razones históricas se las consideró las magnitudes fundamentales magnéticas y eléctricas originalmente.

2.2. Ecuaciones de Maxwell. Leyes fundamentales

Los fenómenos del electromagnetismo fueron descubiertos a nivel macroscópico mediante experimentos. Maxwell recopiló los resultados y formuló una teoría electromagnética ampliamente estudiada en la que todos los fenómenos que engloba el electromagnetismo pueden explicarse bajo estas ecuaciones.

2.2.1. Conjunto de ecuaciones. Ecuaciones de Maxwell

Las cuatro *Ecuaciones de Maxwell* en el SI son:

Ley de Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	(2.2.1- 1)
Ley de Gauss para el campo magnético	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	(2.2.1- 2)
Ley de Faraday	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	(2.2.1- 3)
Ley de Ampère-Maxwell	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	(2.2.1- 4)

Hay que sumarles las relaciones de definición:

$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$	$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}$	(2.2.1- 5)
Ley de Ohm	$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$	(2.2.1- 6)

Se pueden expresar los campos eléctrico y magnético en función de sus *potenciales retardados*:

$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$	$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$	(2.2.1- 7)
Condición de Lorentz	$\nabla \cdot \mathbf{A} = -\epsilon\mu \frac{\partial V}{\partial t}$	(2.2.1- 8)

- \mathbf{D} : Vector *Desplazamiento eléctrico*.
- \mathbf{E} : Vector *Campo eléctrico*.
- \mathbf{P} : Vector *Polarización*.
- ρ : Densidad volumétrica de *carga libre*.
- \mathbf{B} : Vector *Campo magnético (inducción magnética)*.
- \mathbf{H} : Vector *Campo magnético auxiliar (intensidad de campo magnético)*.
- \mathbf{M} : Vector *Imanación*.
- μ_0 : Permeabilidad en el vacío.
- \mathbf{J} : Vector *Densidad de corriente libre*.
- σ : *Conductividad eléctrica*.
- \mathbf{A} : Potencial vector.
- V : Potencial vector

2.2.2. Significado físico de las ecuaciones. Leyes experimentales

- Ley de Gauss

Se puede expresar la primera ecuación de Maxwell como [4]:

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) = \rho \quad \rightarrow \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho + (-\nabla \cdot \mathbf{P})) = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho + \rho_p) \quad (2.2.2- 1)$$

Ecuación universal. Indica que las cargas reales son las fuentes o sumideros de las líneas de campo del vector \mathbf{D} admitiendo, por tanto, la existencia de cargas libres. y su posibilidad de aislamiento. También indica que las fuentes de campo también son debidas a la polarización, siendo el flujo de campo a través de una superficie igual a la carga que hay en el interior.

- Ley de Gauss para el campo magnético

Ecuación universal. Independiente del medio material, el campo magnético es solenoidal. Expresa que las líneas de campo son cerradas o llenan densamente una superficie. El campo magnético carece de fuentes y sumideros. No existen los monopolos magnéticos y no tiene sentido hablar de cargas magnéticas libres.

- Ley de Faraday

Resume todas las leyes de inducción eléctrica y traduce, junto a la Ley de Ampère-Maxwell, la relación entre campo eléctrico y magnético.

Estrictamente, expresa que todo campo magnético variable genera un campo eléctrico tal que el vector rotacional del campo eléctrico es a igual a la derivada local del campo magnético. Así pues el campo eléctrico total estará generado por las contribuciones de las cargas libres, cargas de polarización y la inducción magnética.

Si además existe un hilo conductor, ese campo inducido provocará una circulación de la corriente, generando un voltaje inducido o *fuerza electromotriz (f.e.m)*:

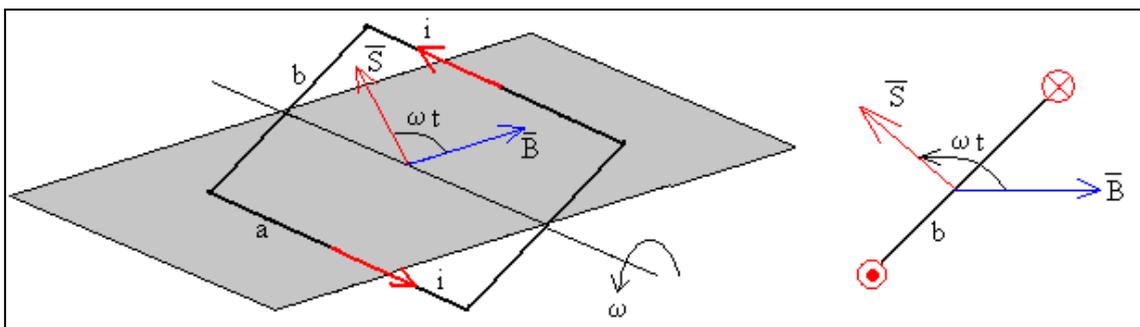


Figura 2. Campo magnético giratorio en el interior de una espira y corriente inducida

Para una espira, la Ley de inducción de Faraday tiene la forma:

$$e(t) = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.2.2- 2)$$

Donde $\phi(t)$ es el flujo magnético que atraviesa el área encerrada por una espira.

$$\phi(t) = \mathbf{B}(t) \cdot \mathbf{n} = B \cdot Area \cdot \cos(\omega t) = \phi_{\max} \cos(\omega t) \quad (2.2.2- 3)$$

- Ley de Ampère-Maxwell

Sustituyendo las relaciones de definición:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \nabla \times \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \right) = \mathbf{J} + \frac{\partial(\varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P})}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \nabla \times \mathbf{M} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} \right) \quad (2.2.2-4)$$

Esta ecuación expresa las fuentes de campo magnético. Existen cuatro fenómenos:

- *Ley de Biot-Savart*: Toda corriente eléctrica genera un campo magnético
- La materia imanada genera una densidad de corriente equivalente $\nabla \times \mathbf{M}$
- $\varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ es la corriente de desplazamiento en el vacío, fundamental en efecto de radiación. Un campo eléctrico variable, genera un campo magnético.
- La variación de la polarización trae consigo un movimiento de carga, que genera una corriente eléctrica, fuente de campo magnético. También llamada *corriente ligada*.

2.2.3. Ecuaciones de la electrostática y magnetostática

Considerando condiciones estacionarias, se obtienen los resultados experimentales de la electrostática y la magnetostática para cualquier medio:

Electrostática	Magnetostática
$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ $\nabla \times \mathbf{E} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$

(2.2.3-1)

Para medios lineales:

Electrostática	Magnetostática
$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$	$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$
$\mathbf{P} = \chi_e \mathbf{E}$	$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$
$\varepsilon = (\varepsilon_0 + \chi_e)$	$\mu = \mu(\mathbf{H})$
<ul style="list-style-type: none"> - χ_e: Susceptibilidad eléctrica - ε: Permisividad del medio 	<ul style="list-style-type: none"> - χ_m: Susceptibilidad magnética - μ: Permeabilidad magnética

(2.2.3-2)
(2.2.3-3)
(2.2.3-4)
(2.2.3-5)

Quedando las ecuaciones reducidas a:

	Electrostática	Magnetostática
Medios homogéneos, isótropos y lineales	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\varepsilon$ $\nabla \times \mathbf{E} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ $\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J}$
En el vacío	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\varepsilon_0$ $\nabla \times \mathbf{E} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$

(2.2.3-6)
(2.2.3-7)

Expresándolos en función de sus potenciales:

	Electrostática: $\mathbf{E} = -\nabla V$	Magnetostática: $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$	
Medios homogéneos, isótropos y lineales	$\Delta V = \rho / \epsilon_0$	$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J}$	(2.2.3- 8)
En el vacío	$\Delta V = 0$		(2.2.3- 9)
Condición de Lorentz estacionaria		$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$	(2.2.3- 10)

2.3. Comportamiento magnético de la materia

Al exponer un material a un campo magnético externo, se pueden observar experimentalmente los siguientes resultados [5]:

- La fuerza es proporcional a la masa e independiente de la forma geométrica, siempre y cuando el tamaño de la pieza a ensayar sea pequeña.
- En general la fuerza es muy pequeña comparada con el peso propio de la muestra para la mayoría de materiales.
- Para algunos materiales las fuerzas son de atracción y para otros de repulsión.
- Algunos materiales (ferromagnéticos) presentan interacciones del orden de 10.000-100.000 veces mayor que en otros materiales.
- La fuerza sobre cualquier material es mayor en el extremo que en el centro, a pesar de que el campo es mayor en el centro que en el extremo. Esto se debe a la no-uniformidad del campo. Existe una relación entre la fuerza y el espacio.
- La fuerza sobre sustancias no-ferromagnéticas es proporcional al cuadrado de la intensidad de la bobina (generadora del campo en el experimento).
- En sustancias ferromagnéticas es proporcional a la intensidad de la bobina.

2.3.1. Par, fuerza y energía potencial de un dipolo en un campo magnético

- Par

Para explicar el fenómeno de magnetización, es importante recordar el comportamiento de un dipolo magnético [6] dentro de un campo magnético estático. Se demuestra que un dipolo de momento magnético \mathbf{m} en un campo magnético \mathbf{B} experimenta un par que tiende a alinearlo con la dirección y sentido de \mathbf{B} de valor:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \tag{2.3.1- 1}$$

- Fuerza

Se puede aproximar macroscópicamente la expresión de la fuerzas sobre un dipolo magnético como:

$$\mathbf{F} = (\mathbf{m} \times \nabla) \times \mathbf{B} \quad (2.3.1- 2)$$

En el seno de un campo que varía suavemente, la expresión del momento total de fuerzas respecto al origen vendrá dada por la suma del momento de la fuerza más el par:

$$\tau_0 = \mathbf{r} \times \mathbf{F} + \mathbf{m} \times \mathbf{B} = \mathbf{r} \times ((\mathbf{m} \times \nabla) \times \mathbf{B}) + \mathbf{m} \times \mathbf{B} \quad (2.3.1- 3)$$

- Energía

Suponiendo un dipolo constante \mathbf{m} , la energía potencial de un dipolo en presencia de un campo externo \mathbf{B} , puede expresarse como el gradiente de F :

$$\mathbf{F} = \nabla(\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}) = -\nabla W_d \quad (2.3.1- 4)$$

$$\tau = -mB \operatorname{sen} \theta \quad (2.3.1- 5)$$

$$W_d = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B} \quad (2.3.1- 6)$$

Esta expresión nos indica que el dipolo tiende a alinearse con el campo e ir a las regiones de campo más intenso.

2.3.2. Magnetización

- Vector imanación

Se define el vector imanación (o magnetización) \mathbf{M} como el momento dipolar magnético por unidad de volumen en un punto determinado. Un material está magnetizado cuando es posible asignar a cada punto del mismo un vector $\mathbf{M}(x,y,z)$ y que valga cero fuera del mismo.

El origen microscópico del campo es causante de ciertas corrientes macroscópicas equivalentes (Amperianas):

- Corrientes de Magnetización: Densidad de corriente volumétrica debida a la magnetización, distribuida en el interior del material

$$\mathbf{J}_m = \nabla \times \mathbf{M} \quad (2.3.2- 1)$$

- Corrientes superficiales: Densidad de corriente sobre la superficies libres de la materia imanada. En materiales uniformemente imanados, son las únicas que aparecen, ya que las corrientes elementales a través del volumen están compensadas por las adyacentes.

$$\mathbf{K}_m = \mathbf{M} \times \mathbf{n} \quad (2.3.2- 2)$$

- Inducción magnética (campo magnético)

La inducción magnética \mathbf{B} depende tanto de las corrientes libres como de las de imanación. Es un vector tangencial a las líneas de campo:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{J} + \mathbf{J}_m) \quad (2.3.2- 3)$$

- Excitación magnética (Intensidad de campo magnético)

La excitación magnética \mathbf{H} es el rotacional del campo magnético, que no depende más que de las corrientes libres. La respuesta de la materia ante un campo magnético externo se suele considerar como la respuesta de \mathbf{M} (magnetización) ante el efecto que provoca \mathbf{H} (excitación), caracterizado en cada material por la *susceptibilidad magnética*:

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \quad (2.3.2- 4)$$

2.3.3. Clasificación de materiales

- Diamagnéticos

Son aquellos en los que un campo externo genera una débil fuerza de repulsión.

En estos materiales su estructura interna genera un campo magnético permanente nulo por cada átomo. Se puede demostrarse que la aplicación de un campo magnético externo, genera un desequilibrio en los momentos generados por el electrón, orbitales y de *spin*, con lo que se reduce ligeramente el campo interno. El efecto consiste, de una manera tremendamente simplificada, en una introducción de momento magnético en sentido opuesto al campo aplicado.

Todos los materiales presentan comportamiento diamagnético, ya que surge de la interacción de los electrones directamente con el campo externo. Cuando este efecto es el predominante se les denominan materiales diamagnéticos (en un lenguaje común, serían materiales de muy baja interacción magnética). Esto se ve reflejado en una *susceptibilidad magnética* χ_m prácticamente constante e independiente de la temperatura de signo negativo.

Son ejemplos de estos materiales el bismuto metálicos, agua, hidrógeno, helio (gases inertes en general), cloruro de sodio, cobre, oro, silicio, germanio, grafito y azufre.

- Paramagnéticos

Son aquellos materiales que frente a un campo externo experimentan una débil fuerza de atracción que se ven fuertemente influenciados por la temperatura.

Estos materiales presentan atómicamente un pequeño momento magnético, pero que en promedio de un conjunto mayor es nulo (es decir, no expresa fenómenos magnéticos en ausencia de campo externo). Al existir estos dipolos magnéticos atómicos, al aplicarse un campo externo, los dipolos tienden a alinearse con él. El efecto diamagnético está presente, pero se ve desbordado por el efecto paramagnético, que provoca un aumento del campo.

Esta orientación se ve contrarrestada por el efecto agitador de la temperatura. El efecto térmico tiende a desorientar los dipolos conforme mayor es la temperatura. Se puede obtener la expresión de la susceptibilidad magnética en función de la temperatura conocida como *Ley de Curie*.

Ejemplos típicos de estos materiales son el aluminio, potasio, oxígeno, tungsteno, muchas de las sales y de elementos de tierras raras.

- Ferromagnéticos

Son materiales que se ven fuertemente atraídos por un campo magnético externo. Son los más usados en la industria eléctrica.

Los átomos de estos materiales tienen un momento dipolar magnético relativamente elevado (por descompensación del momento de *spin*). Las fuerzas interatómicas hacen que se alineen de forma paralela en regiones con muchos átomos denominados *dominios*. Así pues, un material ferromagnético estará formado por dominios, cuyas orientaciones locales como conjuntos de átomos tienen unos campos magnéticos asociados diferentes, pero que se cancelan en promedio al observar el material al completo.

Generalmente, los dominios están relacionados con los ejes cristalográficos del material. En los cristales sencillos, estos materiales no son isótropos, en donde cabe destacar una característica de los materiales anisotrópicos denominada *magnetostricción*, que consiste en un cambio en las dimensiones de los cristales.

Los hechos experimentales más importantes que presentan estos materiales son los siguientes:

- Gran fuerza de atracción en las proximidades del imán.
- No hay proporcionalidad entre la magnetización y la excitación magnética, la susceptibilidad magnética no es constante.
- Mantienen una imanación permanente tras la aplicación de un campo externo.
- Por encima de cierta temperatura, característica de cada material, los materiales pierden la imanación. Se le denomina *Temperatura de Curie* y para el hierro es de 770°C y para el níquel de 358°C.

Para materiales como el hierro, los espines no están compensados, presentando un momento magnético muy grande. Además, al ser un material mecánico, los átomos presentan una interacción muy fuerte entre ellos, que la agitación térmica no es capaz de romper hasta llegar a una *Temperatura de Curie*.

Curva de magnetización

La relación entre M y H no tiene expresión analítica. Se obtiene experimentalmente una curva para cada material.

En la primera zona de la curva, la imanación aumenta muy despacio, a continuación existe una zona prácticamente lineal y tras un codo una zona dónde la magnetización no aumenta, aunque lo haga H . Si dice entonces que el material está *saturado*.

Histéresis magnética

Al aplicar un campo magnético externo se producen dos efectos sobre los dominios que se explican bajo la teoría de Weiss:

- Los dominios alineados con el campo, incrementan su tamaño a expensas de los dominios colindantes, incrementando el campo interno notablemente.
- Los dipolos magnéticos no alineados con el campo, experimentan un par magnético que tiende a alinearlos con el campo externo.

Al desaparecer el campo, no se recupera la estructura original, ni una ordenación aleatoria de los dominios, quedando el material con un imantado. Este hecho se conoce como *histéresis*.

Se conoce como *Ciclo de histéresis* al la curva que relaciona la inducción magnética (campo magnético) \mathbf{B} , y el campo magnético auxiliar (o intensidad de campo magnético) \mathbf{H} . La curva entre \mathbf{B} y \mathbf{H} es consecuencia de la curva de magnetización. Dado que $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$. Podemos estudiar la influencia del campo externo sobre un material ferromagnético a través de su ciclo de histéresis.

Primeramente, para un material con campo magnético neto nulo, si lo sometemos a un campo magnético externo H , las fronteras de los dominios son difíciles de mover, por lo que la magnetización aumenta lentamente (al igual que en la curva de magnetización). Se obtiene la primera curva de imanación (OP)

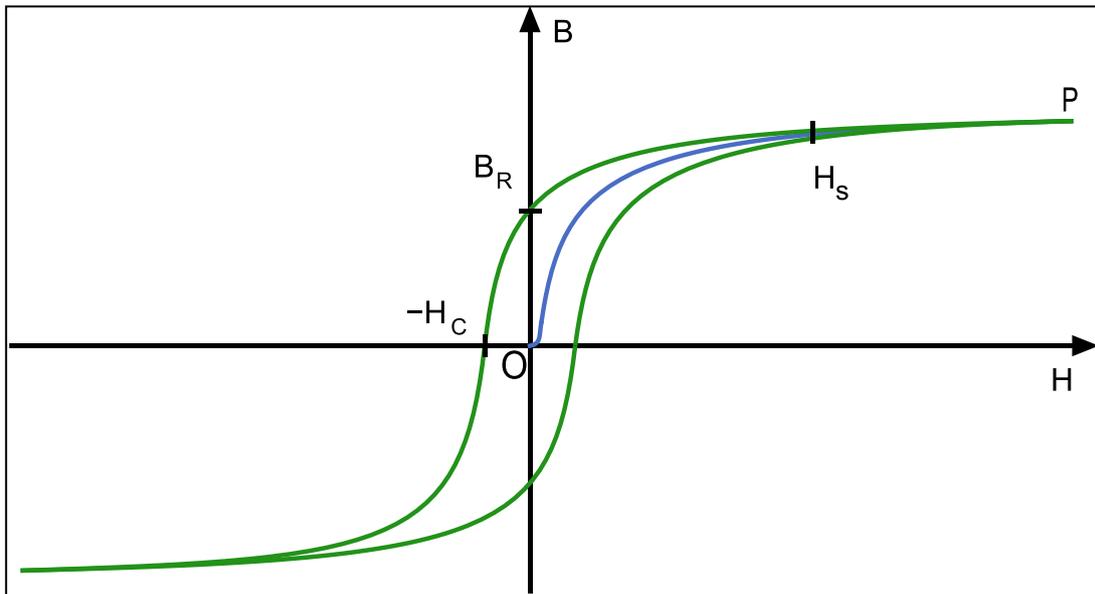


Figura 3. Ciclo de Histéresis

El primer efecto es consecuencia del aumento de los dominios alineados con el campo externo a costa de otros dominios.

Este proceso es escalonado, acumulando energía antes de conseguir alinear un átomo de los dominios próximos. Gráficamente se ve que la curva es escalonada. A este fenómeno se le conoce como efecto Barkhausen.

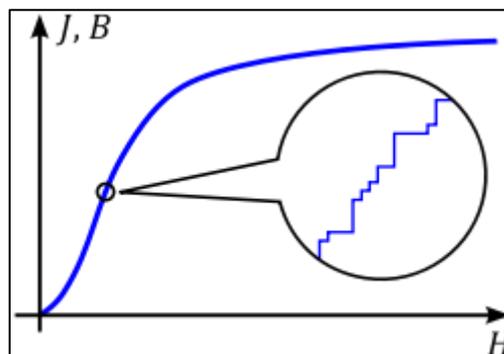


Figura 4. Efecto Barkhausen

Conforme aumentamos llegamos a una configuración en la que hay un dominio o varios dominios predominantes que ya no crecen más. Entonces todos los dipolos magnéticos de los dominios girarán ligeramente para alinearse con el campo externo. Esto requiere mucha energía y es por eso que la curva en ese momento es prácticamente plana, se está llegando a la saturación. La saturación absoluta sería cuando todos los dipolos estuviesen alineados con el campo externo.

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

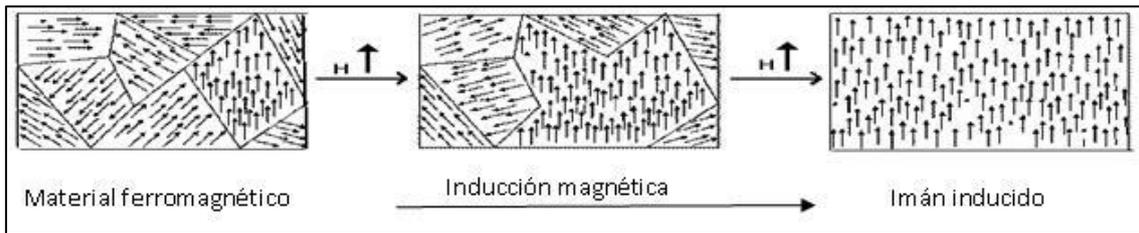


Figura 5. Evolución de los dominios en un material ferromagnético

Si ahora desaparece el campo externo, los dominios no vuelven a la forma primitiva. Quedan en una posición intermedia. Así pues queda una energía acumulada en el material denominado *campo remanente* o *remanencia*. Mientras mayor sea este valor de B_r , mayor será el valor de la imanación del imán permanente conseguido $M_r = B_r/\mu_0$.

Si se aplica un campo externo en sentido opuesto, se llegará a un punto en el que $B=0$. A esa excitación magnética H_c se le denomina *fuerza coercitiva*. Es el campo capaz de romper la imanación. Si seguimos aumentando la intensidad del campo se obtiene un punto de saturación simétrico.

Al cerrar el ciclo se generan unas pérdidas en forma de calor debidas al movimiento molecular generado. Dichas pérdidas son proporcionales el área que encierra el ciclo de histéresis

Los únicos materiales ferromagnéticos a temperatura ambiente son el hierro, el níquel y el cobalto. Aleaciones entre ellos, como el Alnico (Al-Ni-Co y una pequeña cantidad de Cu). A temperaturas bajas, elementos de tierras raras son ferromagnéticos. Existen aleaciones de materiales no-ferromagnéticos que presentan un comportamiento ferromagnético, como por ejemplo el Bi-Mn y el Cu-Mn-Sn.

Los materiales con ciclos muy anchos, llamados duros, son útiles para construir imanes permanentes:

Material y composición	Inducción remanente. B_r, T	Campo coercido $H_c, kA/m$
Alnico 1, 12 Al, 21 Ni, 5 Co, 2 Cu, bal Fe	0,72	37
Almco 5, 8 Al, 14 Ni, 25 Co, 3 Cu, bal Fe	1,28	51
Alnico 8, 7 Al, 15 Ni, 24 Co, 3 Cu, bal Fe	0,72	150
Tierra rara-Co, 35 Sm, 65 Co	0,90	675-1200
Tierra rara-Co, 25,5 Sm, 8 Cu, 15 Fe, 1,5Zr, 50 Co	1,10	510-520
Fe-Cr-Co, 30 Cr, 10 Co, 1 Si, 59 Fe	1,17	46
MO-Fe ₂ O ₃ (M = Ba, Sr) (fernta dura)	0,38	235-240

Figura 6. Características de materiales duros

Los materiales con ciclos estrechos son ideales para los núcleos de máquinas eléctricas. Este tipo de materiales tienen menores pérdidas.

Material y composición	Inducción de saturación, B_s , T	Campo coercivo, H_j , A/cm	Permeabilidad relativa inicial μ_i
Hierro magnético, chapa de 0,2 cm	2,15	0,8	250
M36 Si-Fe laminado en frío (aleatorio)	2,04	0,36	500
M6 (110) [001], 3,2% Si-Fe (orientado)	2,03	0,06	1.500
45 Ni-55 Fe (45 Permalloy)	1,6	0,024	2.700
75 Ni-5 Cu-2 Cr-18 Fe (Mumetal)	0,8	0,012	30.000
+79 Ni-5 Mo-15 Fe-0,5 Mn (Supermalloy)	0,78	0,004	100.000
48% MnO- Fe ₂ O ₃ , 52% ZnO- Fe ₂ O ₃ (ferrita suave)	0,36		1.000
36% NiO-Fe ₂ O ₃ , 64% ZnO-Fe ₂ O ₃ (ferrita suave)	0,29		650

Figura 7. Características de materiales blandos

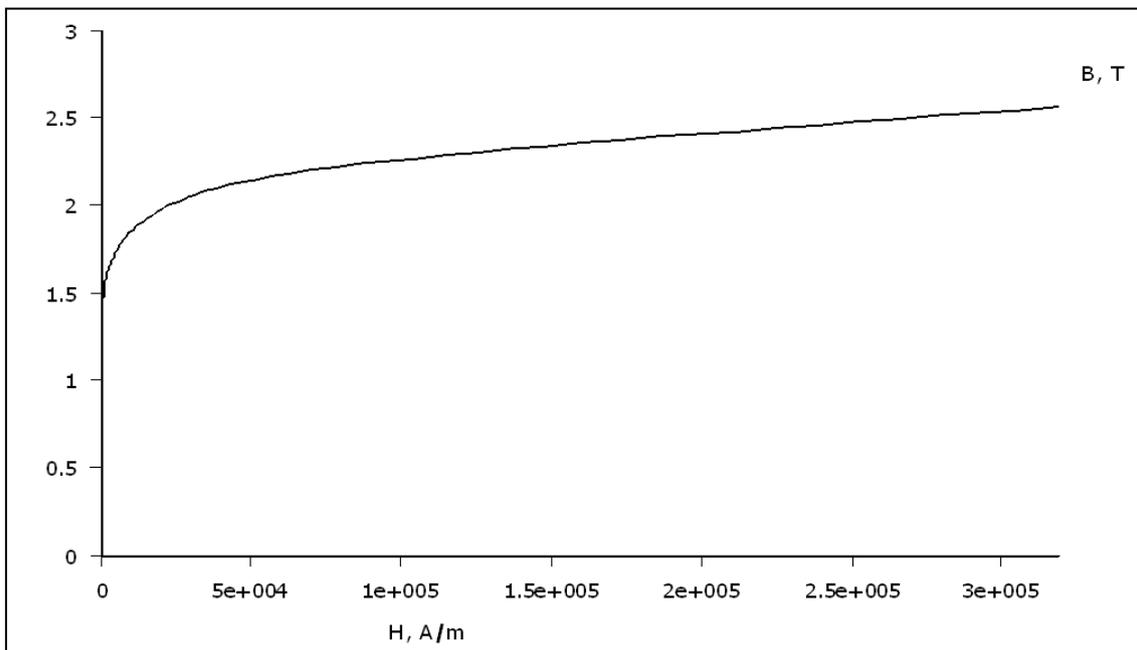


Figura 8. Curva B-H para el Fe. Obtenido de FEMM 4.2

- Antiferromagnéticos

Son materiales con dipolos magnéticos atómicamente iguales, pero con una disposición antiparalela debido a las fuerzas adyacentes. El campo neto es nulo y se ven levemente afectados por un campo magnético externo. Sólo presente en el óxido de manganeso.

- Ferrimagnéticos

Son materiales con dipolos magnéticos diferentes, con alineamiento antiparalelo. Presentan una respuesta importante ante un campo magnético externo, pero menor que los ferromagnéticos.

Los más importantes son las ferritas, que poseen una baja conductividad, lo que los hace útiles al reducir las corrientes parásitas en núcleos de transformadores.

Ejemplos claros de estos materiales son la magnetita de óxido de hierro (Fe_3O_4), ferrita de Níquel-Zinc ($\text{Ni}_{1/2}\text{Zn}_{1/2}\text{Fe}_2\text{O}_4$) y ferrita de níquel (NiFe_2O_4)

- Supermagnéticos

Son materiales compuestos por partículas ferromagnéticas en una matriz no ferromagnéticas. Existen dominios dentro del material, pero están limitados por el material de la matriz. Se utilizan en cintas magnéticas de video y audio.

3. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

3.1. FEMM 4.2

3.1.1. Descripción

Para el desarrollo del Proyecto se ha utilizado como herramienta principal el software *FEMM (Finite Element Method Magnetics)* en su versión 4.2. [7]

FEMM es un programa gratuito de elementos finitos que permite la resolución de problemas de flujo de calor, en régimen permanente, y electromagnéticos, a baja frecuencia o estacionarios, en un dominio axilsimétrico en su plano de dos dimensiones. El programa abarca problemas lineales y no-lineales de tipo:

- Magnetostáticos
- Electroestáticos
- Campo magnético armónico variable en el tiempo
- Transferencia de calor en régimen permanente.

Su estructura informática está compuesta de tres partes:

- Interfaz interactiva (*femm.exe*): actúa en el preprocesador y postprocesador de los problemas antes descritos.
- *triangle.exe*: Realiza un mallado con elementos triangulares. Escrito por Jonathan Shewchuk está disponible en Internet.
- Solvers (*fkern.exe, belasolv, hsolv* and *csolv*): En función del tipo de problema, cada uno de los solucionadores toma los datos que necesita y junto a las partes relevantes de las ecuaciones diferenciales obtiene la solución del problema en el dominio definido y mallado previamente.

El programa se basa en la resolución de las Ecuaciones de Maxwell aplicadas parcialmente:

- Problemas de magnetostática

Problema con campo magnético invariante. Se utilizan las ecuaciones de Maxwell descritas en la sección 2.2.3 *Ecuaciones de la electrostática y magnetostática*.

FEMM retiene la relación no-lineal entre $\mathbf{B} - \mathbf{H}$. Dado que se hace el análisis en 2D plano y axilsimétrico, el vector \mathbf{A} solo tiene una dimensión distinta de cero en el plano perpendicular a la interfaz de dibujo. Al usar el vector potencial magnético, la resolución consiste en encontrar el vector $\mathbf{A}(x,y,z)$ y hallar \mathbf{B} y \mathbf{H} por diferencias finitas.

En estos problemas, al considerarlos estacionarios, se desprecian las corrientes por desplazamiento.

- Problema de campo magnético armónico variable en el tiempo

Si el campo magnético es variable en el tiempo se inducen corrientes en los materiales con conductividad eléctrica. Se pueden adaptar las Ecuaciones de Maxwell para describir estos procesos como se observa en las ecuaciones descritas en 2.2.1 *Conjunto de ecuaciones. Ecuaciones de Maxwell*. Se puede encontrar relaciones 2D expresadas en función del potencial A obteniéndose:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = -\sigma \dot{A} + J - \sigma \nabla V \quad (3.1.1- 1)$$

FEMM usa el gradiente de tensiones en los problemas armónicos para cumplir las restricciones de corriente sobre las regiones conductoras. También utiliza esta ecuación para resolver problemas a una frecuencia fijada usando transformaciones fasoriales.

Aunque estrictamente la *permeabilidad* μ debe ser constante para resolver el problema armónico, el programa retiene la relación no-lineal de la misma, permitiendo aproximar los efectos de saturación del material. Aunque la relación $B-H$ no es la misma que en el caso de corriente continua, el programa selecciona la *permeabilidad* para dar un resultado correcto. La manera en que esto ocurre se detalla en anexos del manual del programa.

- Problemas de electrostática

La resolución del campo eléctrico obedece a las Ecuaciones de Maxwell particularizadas a la electrostática (véase 2.2.3 *Ecuaciones de la electrostática y magnetostática*). Aunque algunos problemas pueden ser no-lineales, el programa sólo contempla los lineales.

Para simplificar la resolución se emplea el potencial eléctrico V , del que se derivan los campos posteriormente.

- Problemas de transmisión de calor

FEMM resuelve estos problemas haciendo una analogía con la resolución de un campo electrostático, cambiando el potencial V por la temperatura T y deduciendo el gradiente de temperatura G y el la densidad de flujo térmico F

- Problemas de flujo térmico

FEMM resuelve estos problemas haciendo una analogía con la resolución de un campo cuasi-estacionario eléctrico, haciendo una analogía similar al caso anterior, pero incluyendo elementos análogos al campo magnético.

3.1.2. Interfaz

La interfaz de *FEMM* se compone de seis secciones, dos secciones (preprocesador y postprocesador) para cada uno de los tres problemas principales (Magnéticos, eléctricos y de transferencia de calor). Se centrará el desarrollo en el preprocesador y postprocesador de los problemas magnéticos. El primero maneja *.fem* (*Femm Document*) y el segundo actúa sobre archivos *.ans* (*Femmview Document*).

La interfaz de *FEMM 4.2* permite la importación y exportación de archivos DXF, compatibles con programas CAD. Esta funcionalidad no reconoce las etiquetas de materiales, condiciones de contorno y otros parámetros que se hayan usado en la construcción.

- Preprocesador

El preprocesador del programa es estéticamente similar a un programa de CAD. Permite realizar las siguientes funcionalidades:

- Gestión de documentos. Exportación/Importación DXF
- Manipulación de geometría
- *LUA console*
- Comandos del teclado y ratón
- Visualización y Manipulación del *grid*
- *Edit*
- Definición del Problema
- Definición de las propiedades
- Herramientas de análisis

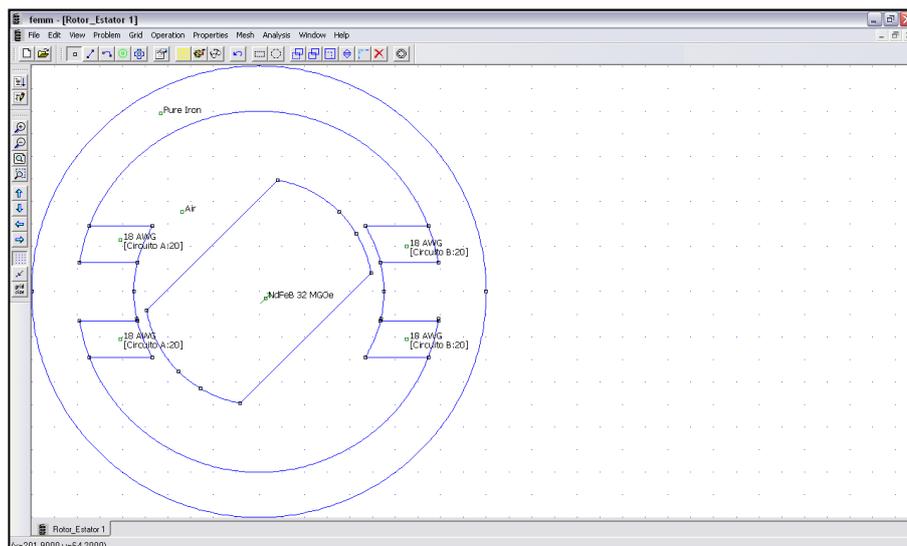


Figura 9. Interfaz del preprocesador de problemas magnéticos

A continuación se describen someramente los comandos más relevantes:

- **Modos. Creación de geometría:** Permite seleccionar el modo de funcionamiento, es decir que elemento podemos crear o manipular. Permite activar la selección grupal de elementos.
 - Puntos: Crear o manipular puntos
 - Rectas: Crear rectas, uniendo dos puntos ya definidos, o manipular rectas.
 - Curvas: Manipular curvas o crearlas, uniendo dos puntos ya existentes y definiendo un cierto ángulo de curvatura que no puede superar los 180° (Para hacer una circunferencia son necesarias dos curvas).
 - Etiquetas: Manipular o colocar una etiqueta a un dominio
 - Seleccionar todos los elementos



Figura 10. Barra de comandos de dibujo

- **Manipulación de geometría:** Es necesario seleccionar previamente en la barra de comandos de dibujo el tipo de elemento a seleccionar. Una vez hecho se pueden seleccionar los elementos comprendidos en:
 - Áreas rectangulares
 - Áreas circulares



Figura 11. Selección de áreas

Una vez seleccionado se puede:

- Trasladar/Girar
- Copiar/ Girar con copia
- Escalar
- Realizar simetrías
- Rebordear esquinas
- Eliminar elementos seleccionados



Figura 12. Barra de comandos de manipulación de elementos seleccionados

- **Visualización:** Permite:
 - Acercarse
 - Alejarse
 - Zoom sobre un área
 - Vista completa de todo lo que esté representado

- Desplazar la vista hacia la izquierda/derecha y arriba/abajo.



Figura 13. Barra de comandos de manipulación de la visualización

- **Comandos de LUA:** Permite ejecutar archivos o escribir líneas de código:
 - Ejecutar archivo
 - Abrir ventana para escribir líneas de código



Figura 14. Comandos de LUA

- **Definición del problema:**
 - Tipo de problema: Plano/Axilsimétrico
 - Unidades
 - Frecuencia
 - Profundidad (en el plano perpendicular)
 - Precisión de la solución
 - Mínimo ángulo de los triángulos del mallado

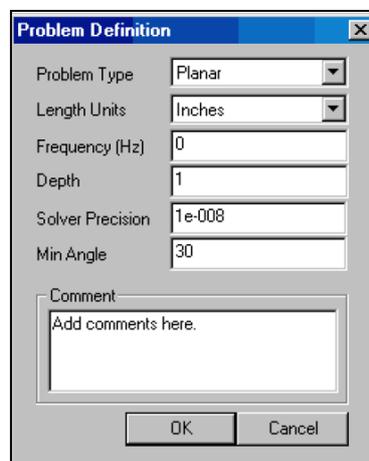


Figura 15. Cuadro de diálogo de definición del problema

- **Definición del Propiedades:** Permite crear propiedades que luego se aplicarán sobre dominios (a través de las etiquetas), contornos o puntos:
 - Librería de materiales

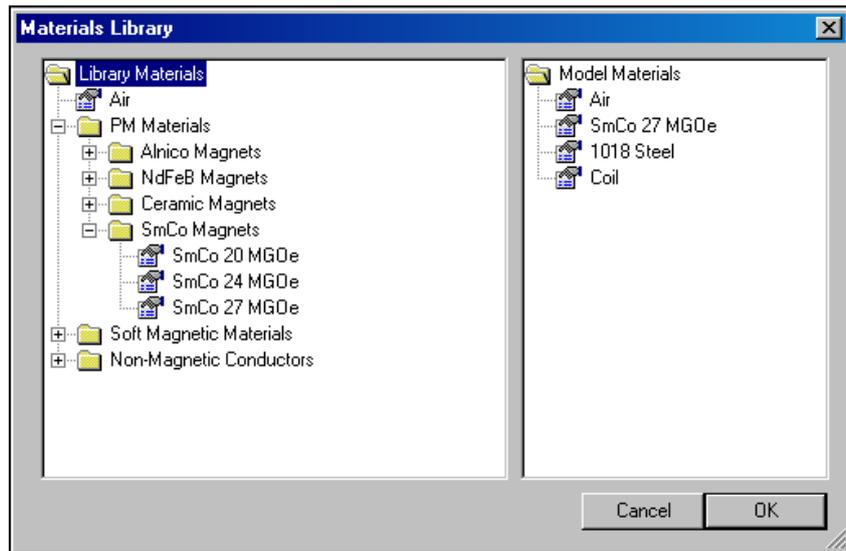


Figura 16. Librería de materiales

- Materiales

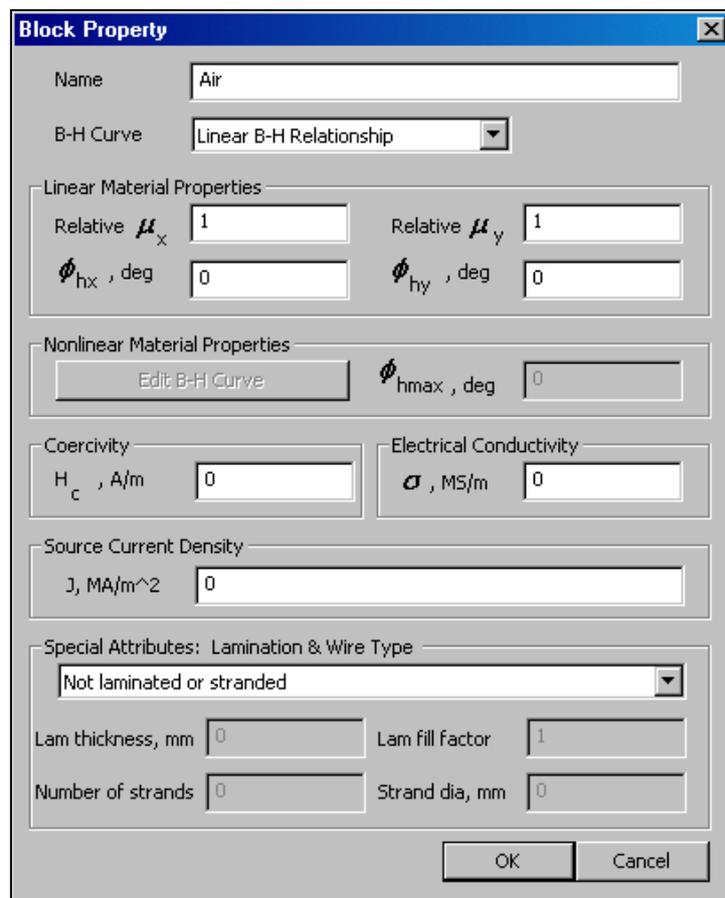


Figura 17. Cuadro de diálogo para crear nuevos materiales

- Condiciones de contorno

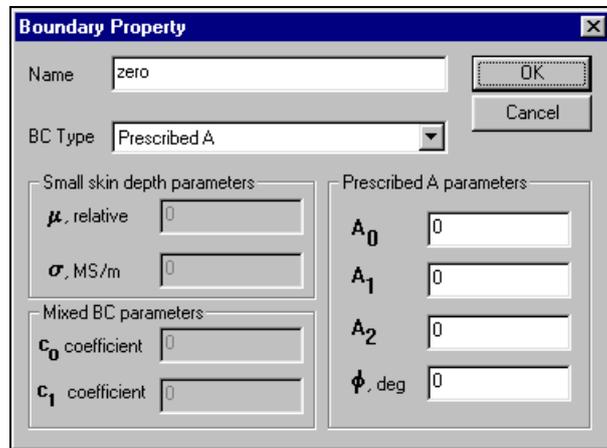


Figura 18. Cuadro de diálogo para crear condiciones de contorno

- Puntos

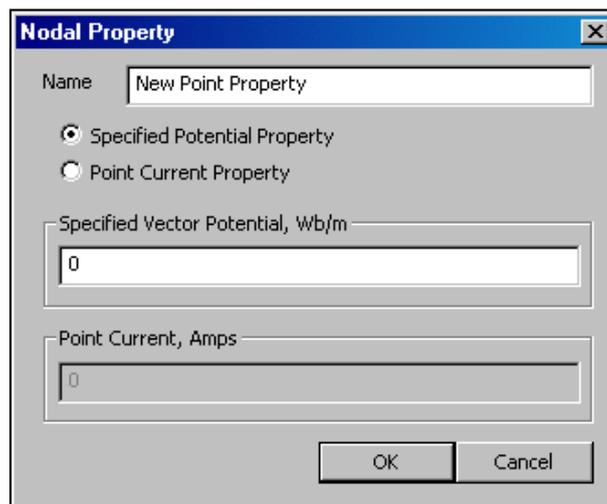


Figura 19. Cuadro de diálogo para crear una propiedad puntual

- Circuitos

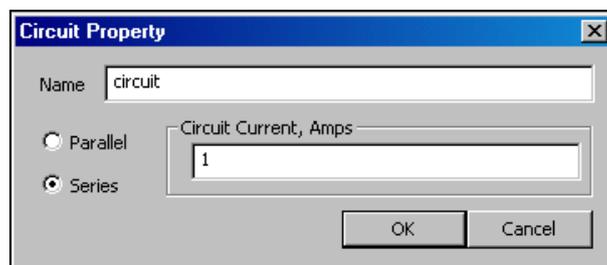


Figura 20. Creación de circuitos

Al asignar los circuitos, el programa contempla la opción de, sobre un área, definir el número que se repite el circuito. es decir, las vueltas en el caso de una bobina, o el número de alambres por área.

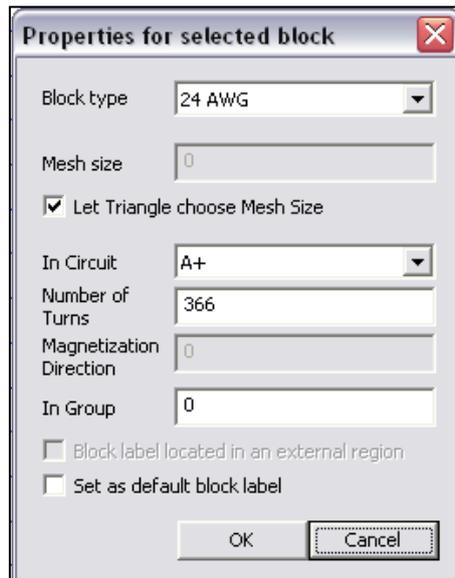


Figura 21. Asignación de circuitos.

- **Mallado y análisis de elementos finitos:** Permite ejecutar:
 - o Mallado de elementos triangulares automáticamente (se puede modificar ciertas propiedades en *Figura 15. Cuadro de diálogo de definición del problema*).

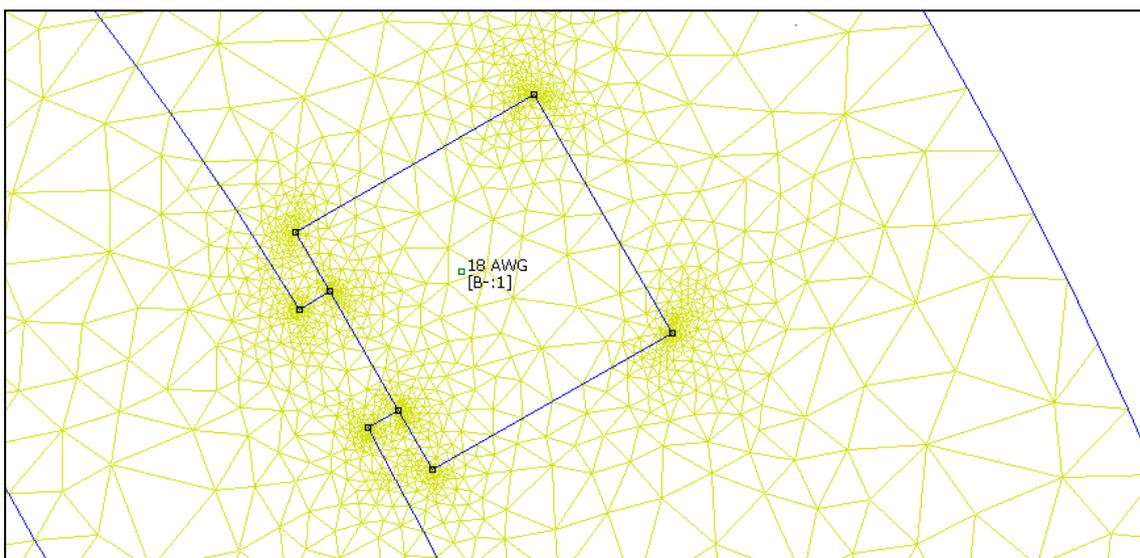


Figura 22. Malla triangular automática

- o Resolver el problema aplicando la teoría de elementos finitos a través del *solver* correspondiente.

- Generar una visualización de los resultados que lleva al postprocesador.



Figura 23. Barra de comandos de análisis del problema

- Postprocesador

El postprocesador del programa es estéticamente similar al preprocesador. Permite realizar las siguientes funcionalidades:

- Gestión de documentos. Impresión.
- Manipulación de geometría. Operaciones.
- *LUA console*.
- Comandos del teclado y ratón.
- Visualización y manipulación del *grid*.
- Opciones gráficas.
- Operaciones integrales.
- Definición de las propiedades.

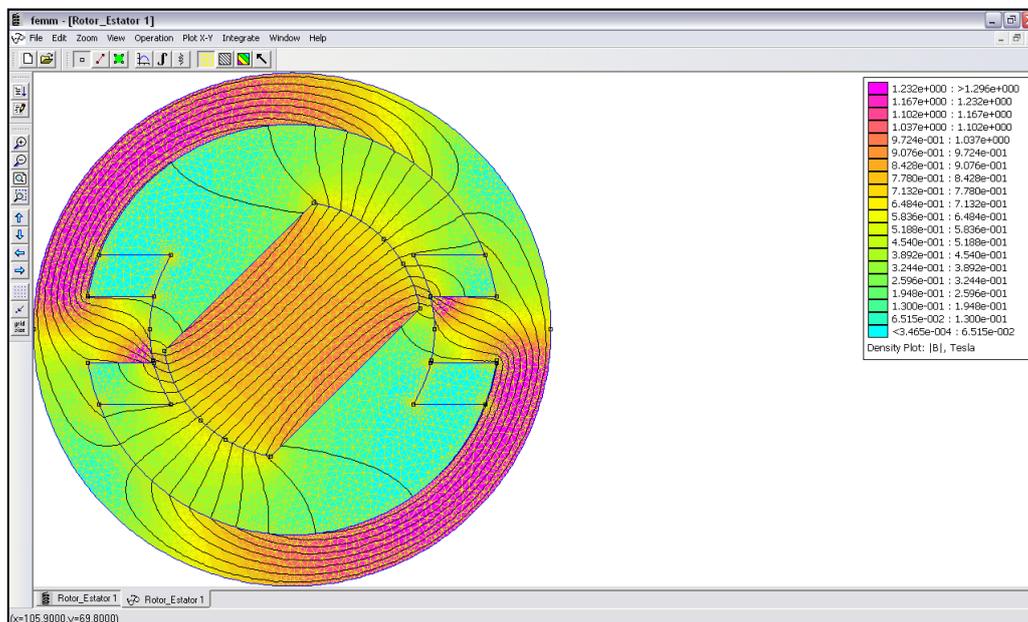


Figura 24 Interfaz del postprocesador

Se analizarán los más relevantes y que difieren del preprocesador:

- **Modos. Creación de geometría:** Seleccionar de forma aditiva los elementos geométricos a analizar, dentro del mismo tipo:
 - Puntos: Previamente definidos, no se pueden crear nuevos

- Contornos: Curvas definidas entre dos puntos (botón izquierdo), o una nueva curva recta entre dos puntos cualesquiera (botón derecho).
- Dominios: Dominios cerrados.



Figura 25. Modos del postprocesador

- **Visualizaciones gráficas**: Permite visualizar en la solución:



Figura 26. Barra de comandos para visualizaciones gráficas

- Mallado: Superpone el mallado realizado a la solución.
- Líneas de flujo

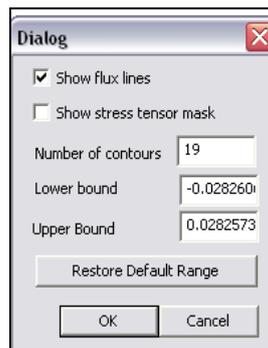


Figura 27. Cuadro de diálogo para líneas de flujo

- Densidades

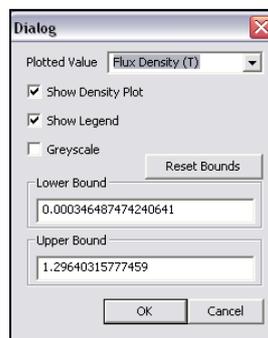


Figura 28. Cuadro de diálogo para densidades

- Vectores: Visualización de las direcciones y sentidos de las magnitudes. Se puede escalar el tamaño de las flechas vectoriales.

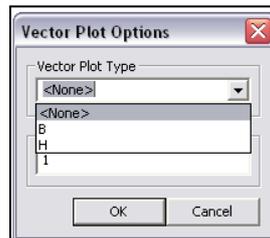


Figura 29. Cuadro de diálogo para visualización de vectores

- **Operaciones con magnitudes:** Permite realizar análisis de magnitudes:



Figura 30. Barra de comandos de operaciones

- o **Contornos:** Analizar la evolución de una magnitud a lo largo de un contorno seleccionado, generando una gráfica de dos ejes.

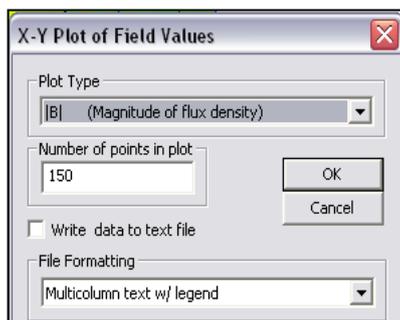


Figura 31. Cuadro de diálogo Gráficas en 2D

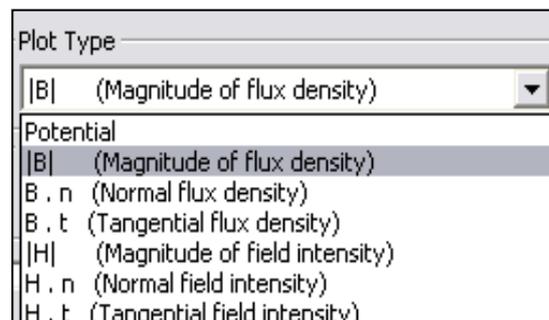


Figura 32. Tipos de representaciones gráficas

- o **Integrales de volumen:** Integra la magnitud seleccionada dentro de los dominios previamente seleccionados.

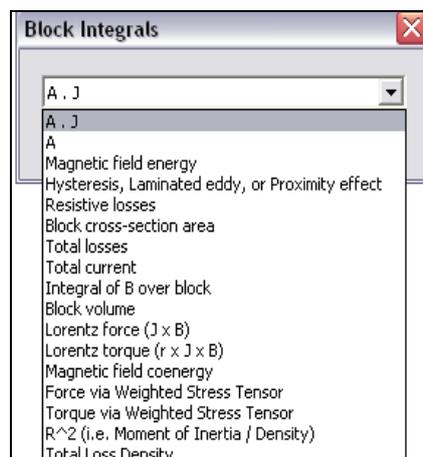


Figura 33. Tipos de operaciones integrales

- Circuitos: Indica las propiedades eléctricas de los circuitos existentes en el modelo.

3.1.3. Condiciones de contorno en problemas electromagnéticos

El software contempla cinco tipos:

- Dirichlet (Prescribed A)

$$\begin{aligned} \nabla^2 y + y &= 0 \\ y(x) &= f(x) \quad \forall x \in \partial\Omega \end{aligned} \quad (3.1.3- 1)$$

Se define el valor del potencial (A o V) en el contorno. En el programa se podrán imponer las condiciones en 2D:

$$A = (A_0 + A_1x + A_2y)e^{f\Phi} \quad (3.1.3- 2)$$

O en un problema axil simétrico con coordenadas cilíndricas:

$$A = (A_0 + A_1r + A_2z)e^{f\Phi} \quad (3.1.3- 3)$$

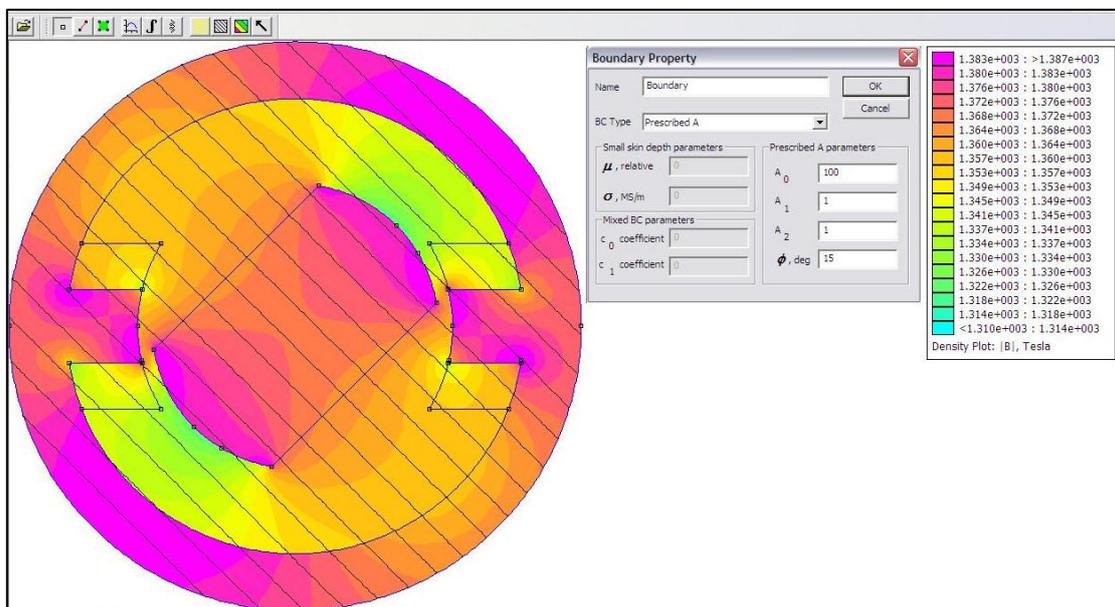


Figura 34. Condición de Dirichlet en la frontera del estator A_0, A_1, A_2 , y Φ

Imponiendo que A_1 y A_2 y Φ sean cero, se restringe el flujo a la región que envuelve el contorno:

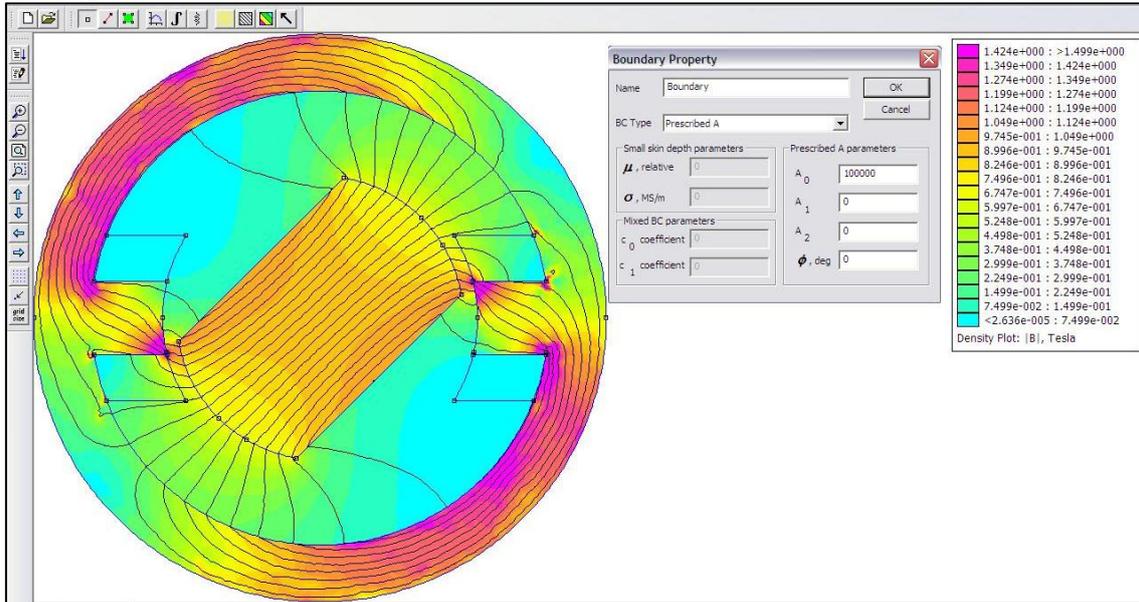


Figura 35. Condición de Dirichlet en la frontera del estator $A_0 \neq 0$ y $A_1 = A_2 = \Phi = 0$

Es una opción que se utilizará para restringir el flujo magnético, imponiendo que $\mathbf{A}=0$ en la frontera de manera que no hay pérdidas ni influencia exterior sobre el potencial magnético:

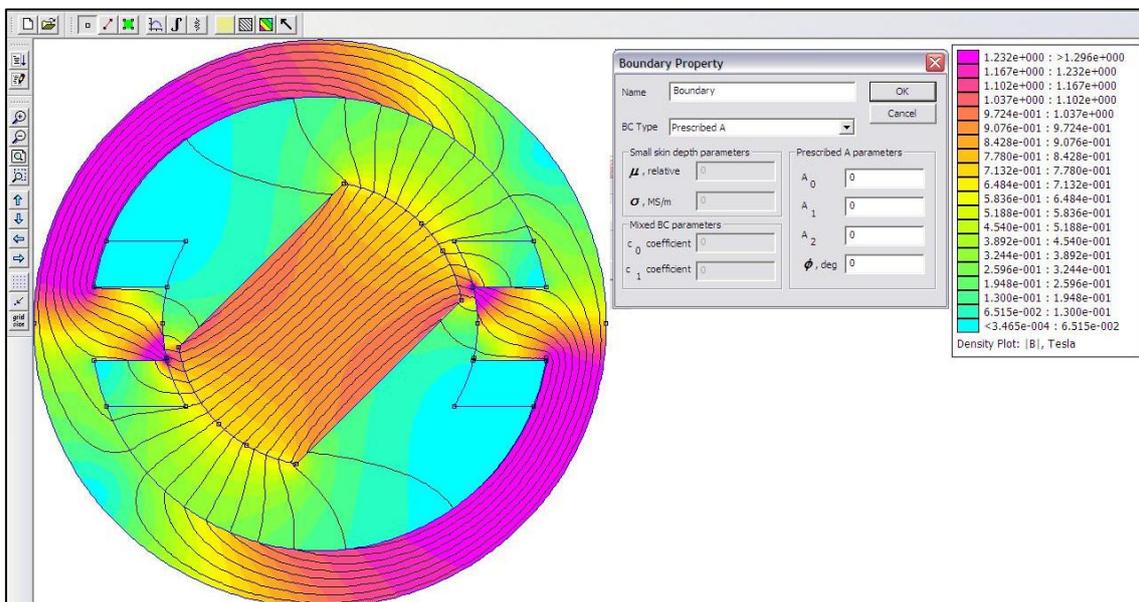


Figura 36 Condición de Dirichlet en la frontera del estator $A_0=A_1=A_2=0$ y $\Phi=0$

- Neumann (Small skin Depth)

$$\nabla^2 y = 0$$

$$\frac{\partial y(x)}{\partial x} = f(x) \quad \forall x \in \partial\Omega \quad (3.1.3- 4)$$

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

Se define el valor de las derivadas parciales de los potenciales (\mathbf{A} o V) en el contorno. En problemas magnéticos, la condición homogénea de Neumann $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} = 0$ es definida para obligar al flujo a formar 90° con el contorno. Esta condición es consistente con una interfaz de material muy permeable.

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} + \left(\frac{1+j}{\delta}\right) \mathbf{A} = 0 \quad (3.1.3- 5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} + \left(\frac{1+j}{\delta}\right) \mathbf{A} = 0 \quad \left| \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_r \mu_0 \sigma}} \quad \right| \quad \begin{array}{l} \omega = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} = 0 \end{array}$$

- Robin (Mixed)

$$a\mathbf{u}(x) + b \frac{\partial \mathbf{u}(x)}{\partial \mathbf{n}} = f(x) \quad (3.1.3- 6)$$

Es una combinación lineal de los valores de la función y de su derivada en el contorno. Es una mezcla entre las condiciones de Dirichlet y de Neumann del potencial \mathbf{A} y su derivada normal en el contorno.

$$\left(\frac{1}{\mu_r \mu_0}\right) \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} + c_1 \mathbf{A} + c_0^{-1} = 0 \quad \rightarrow [c_1 = 0] \quad \rightarrow \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} + \mu_r \mu_0 c_0^{-1} = 0 \quad (3.1.3- 7)$$

Esta condición permite a un dominio comportarse como un dominio sin frontera (es una condición típica para radiaciones). Como se ha visto, si la constante $c_1 = 0$, c_0 nos indica cuan permeable es el contorno. Los casos extremos (cero e infinito) representan la total permeabilidad de la frontera (líneas de campo van al infinito):

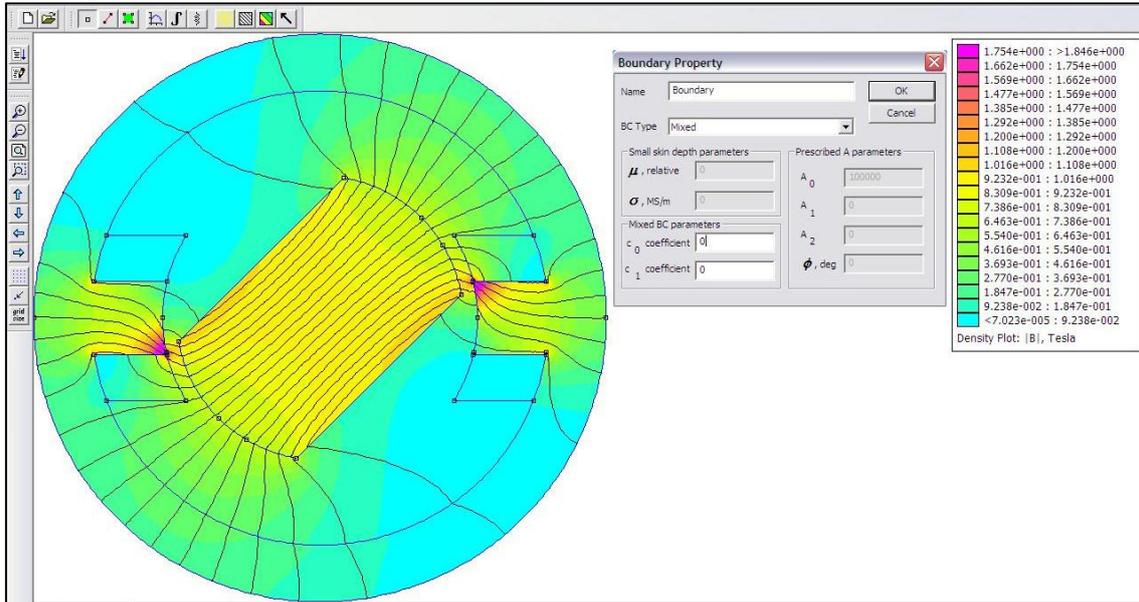


Figura 37. Condición de Robin con $c_0=0$. El contorno no influye

y la total impermeabilidad de la frontera (el flujo no traspasa las fronteras):

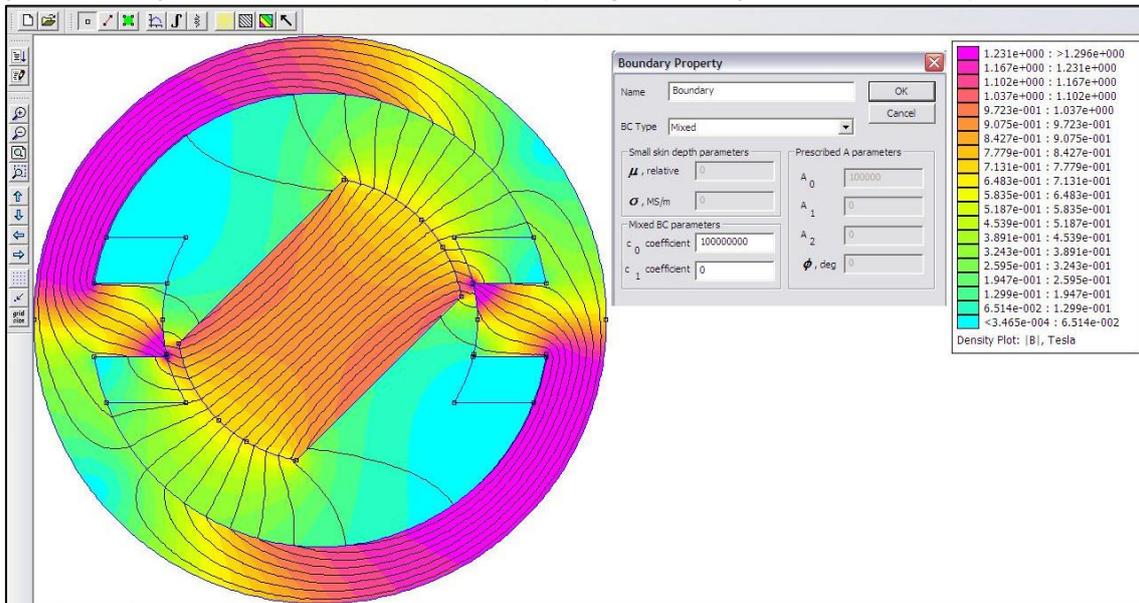


Figura 38. Condición de Robin con c_0 tendiendo a infinito. Flujo contenido en el dominio

- Periódicas

Establece relaciones de igualdad entre dos contorno. No serán utilizadas en el desarrollo del proyecto.

- Antiperiódicas

También une dos contornos, sin embargo les otorga signos opuestos a las magnitudes en la frontera. Tampoco serán utilizados en el desarrollo del proyecto.

3.2. LUA

3.2.1. Descripción



Lua es un lenguaje de programación ligero y rápido, bastante potente. Es un lenguaje gratuito, abierto al público, desarrollado en Brasil (1993) por Roberto Leruslimschy, Waldemar Celes y Luiz Henrique de Figueiredo.

Lua está escrito dinámicamente, ejecutándose mediante la interpretación de código de bytes de un equipo virtual basado en registros, y posee una gestión automática de memoria.

La extensión de lenguaje *Lua* ha sido usada para añadir funcionalidades de programación y procesado a *FEMM*. La interfaz interactiva de *FEMM* puede ejecutar archivos de extensión *.lua* a través de la opción *Open Lua Script*, o puede, directamente, ejecutar líneas de código a través de *Lua Console Window*.



Figura 39. Barra de comandos para ejecutar Lua

Lua es un lenguaje de programación completo y descriptado. El código fuente y documentación detallada puede ser obtenida a través de su página web [8]. Los archivos *.lua* son líneas de texto que se puede editar con cualquier editor de texto, por ejemplo *Notepad ++*, *Bloc de Notas* o similares.

La versión que incorpora *FEMM 4.2* es la *Lua 4.0*.

```
C:\Documents and Settings\alumno\Escritorio\VPFC\Motor_Imanes\scripts\Motor_Imanes_geo_mat_cir.lua - Notepad++
Archivo  Editar  Buscar  Vista  Codificación  Lenguaje  Configuración  Macro  Ejecutar  Plugins  Ventana  ?
Motor_Imanes.txt  Motor_Imanes_geo_mat_cir.lua  Motor_Imanes_main.lua  Motor_Imanes_mod.lua  Motor_Imanes_solve.lua
1  --Construcción de la Geometría, Materiales, BC y circuitos usando comandos de LUA-----
2
3  newdocument(0)
4  mi_probdef(0,"millimeters","planar",1E-8,250,30)
5  mi_saveas("../geometry/Motor_Iman Perm.fem")
6
7  --Creación de los materiales-----
8
9  mi_getmaterial("Air")
10 mi_getmaterial("Pure Iron")
11 mi_getmaterial("18 SWG")
```

Figura 40. Ejemplo de programación de FEMM usando Lua a través de Notepad ++

3.2.2. Funcionalidades

FEMM 4.2 permite ejecutar las mismas operaciones y funcionalidades del preprocesador y el postprocesador a través de comando escritos en lenguaje *Lua*:

Ejemplo de comandos del Pre-procesador
<p>3.3.1 Object Add/Remove Commands</p> <ul style="list-style-type: none">• <code>mi_addnode (x, y)</code> Add a new node at x,y• <code>mi_addsegment (x1, y1, x2, y2)</code> Add a new line segment from node closest to (x1,y1) to node closest to (x2,y2)• <code>mi_addblocklabel (x, y)</code> Add a new block label at (x,y)• <code>mi_addarc (x1, y1, x2, y2, angle, maxseg)</code> Add a new arc segment from the nearest node to (x1,y1) to the nearest node to (x2,y2) with angle 'angle' divided into 'maxseg' segments.• <code>mi_deleteselected</code> Delete all selected objects.• <code>mi_deleteselectednodes</code> Delete selected nodes.• <code>mi_deleteselectedlabels</code> Delete selected block labels.• <code>mi_deleteselectedsegments</code> Delete selected segments.• <code>mi_deleteselectedarcsegments</code> Delete selects arcs.
Ejemplo de comandos del Post-Procesador
<p>3.4.5 Miscellaneous</p> <ul style="list-style-type: none">• <code>mo_close()</code> Closes the current post-processor instance.• <code>mo_refreshview()</code> Redraws the current view.• <code>mo_reload()</code> Reloads the solution from disk.• <code>mo_savebitmap("filename")</code> saves a bitmapped screen shot of the current view to the file specified by "filename". Note that if you use a path you must use two backslashes (e.g. "c:\\temp\\myfemmfile.fem"). If the file name contains a space (e.g. file names like c:\program files\stuff) you must enclose the file name in (extra) quotes by using a \" sequence. For example: <code>mo_save_bitmap(\"c:\\temp\\screenshot.bmp\")</code>

También permite, mediante el lenguaje de programación trabajar con:

- Funciones matemáticas
- Parámetros

```
243  theta_med=asin(a_ext/2/Rr_ext)
244  d=Rr_ext*cos(theta_med)
245  h=Rr_ext-d
246  r=sqrt((a_ext/2+0.5)^2+(d-b-0.5)^2)
247  theta_med_int=asin(a_ext/2/r)
```

Figura 41. Líneas de códigos con parámetros y funciones matemáticas

- Manipulación de archivos
- Comentarios en líneas de código
- Bucles y funciones sencillas.

```
268 for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do
269   angle=ang*pi/180
270   x1=((Rr_ext+0.5)*cos(pi/2+theta_med+angle))
271   y1=((Rr_ext+0.5)*sin(pi/2+theta_med+angle))
272   x2=(r*cos(pi/2-theta_med_int+angle))
273   y2=(r*sin(pi/2-theta_med_int+angle))
274   mi_selectrectangle(x1,y1,x2,y2,4)
275   mi_copyrotate(0,0,copyangle_pol,copies_pol,4)
276   mi_clearselected()
277 end
278 switch=0
279 for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do
280   angle=pi/2+ang*pi/180
281   for i = 1, ni_pol, 1 do
282     x_pos=Rr_ext*cos(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
283     y_pos=Rr_ext*sin(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
284     mi_selectarcsegment(x_pos,y_pos)
285     if i==1 and ang==0 then
286       mi_clearselected()
287     elseif ang==90 or ang==270 then
```

Figura 42. Líneas de código con bucles sencillos, parametrizados y comentarios de texto

3.3. Resumen. Ventajas y Limitaciones

Una vez expuesto las herramientas de simulación que se utilizarán en el desarrollo del proyecto, se hará un pequeño resumen de las ventajas y limitaciones que aportan y que justificarán las elecciones realizadas durante el desarrollo del mismo.

3.3.1. FEMM 4.2

- Ventajas
 - Herramienta gratuita.
 - Cubre sobradamente las necesidades de procesamiento de datos.
 - Permite el análisis de geometrías relativamente complejas.
 - Permite la importación de imágenes
 - Permite la importación de datos en archivos .txt
 - Permite el uso de *Lua*
 - Permite la construcción, análisis, obtención de datos y modificación del modelo a través del *Lua*.
- Limitaciones
 - Construcción de geometría muy deficiente e incómoda. No posee elementos de construcción de geometrías sencillas.
 - No permite construir circunferencias. Se debe construir como suma de dos arcos de 180°.
 - No permite acotar/parametrizar geometrías.
 - La intersección de curvas y rectas provoca ruptura entre ellas, apareciendo puntos y curvas que previamente no existían. Esto supone un gran problema a la hora de modificar geometrías, construir mediante intersección o seleccionar puntos y curvas (hay que tener en cuenta que una circunferencia, por defecto en el programa, ya tiene dos puntos y dos curvas).

- Importación/exportación de datos ineficaz para realizar cambios en el modelo: la geometría se importa sin mantener las etiquetas, lo que hace muy tedioso el colocarlas en modelos relativamente complejos (múltiples elementos similares en el caso de un devanado).
- No soporta bien las tangencias en el mallado de elementos finitos.
- No permite simulaciones de máquinas de flujo axial.
- Para un mallado de puntos elevados (geometrías relativamente complejas), el procesador es lento.

3.3.2. *Lua 4.0*

- Ventajas
 - Herramienta gratuita.
 - Permite trabajar sin la interfaz de *FEMM*
 - Permite parametrizar los modelos, lo que lo hace muy atractivo a la hora de construir modelos y estudiar influencia de parámetros.
 - Permite crear estructuras que analicen y modifiquen el modelo de forma automática.
 - Permite introducir operaciones matemáticas que aportan precisión.
 - Permite obtener datos y reutilizarlos en operaciones posteriores.
- Limitaciones
 - No se puede analizar previamente los errores de escritura de código.
 - No indica los errores de código.
 - Las leyendas de densidades de flujo hay que acotarlas obligatoriamente (a veces interesa que se autoajusten).
 - No se pueden seleccionar elementos a través de nombres auxiliares. Es decir, para seleccionar un elemento geométrico (punto por ejemplo), no se puede nombrar (e.g “Seleccionar P1”) para su selección. Deben ser dadas sus coordenadas.

3.4. Metodología

3.4.1. Descripción

Para el desarrollo del proyecto se ha creado una metodología de trabajo en la elaboración de modelos.

Después de familiarizarse con el software y debido a las limitaciones de la interfaz para introducir variaciones en los modelos, se optó por crear una metodología de trabajo basada en la programación en *Lua*. Esta consiste en:

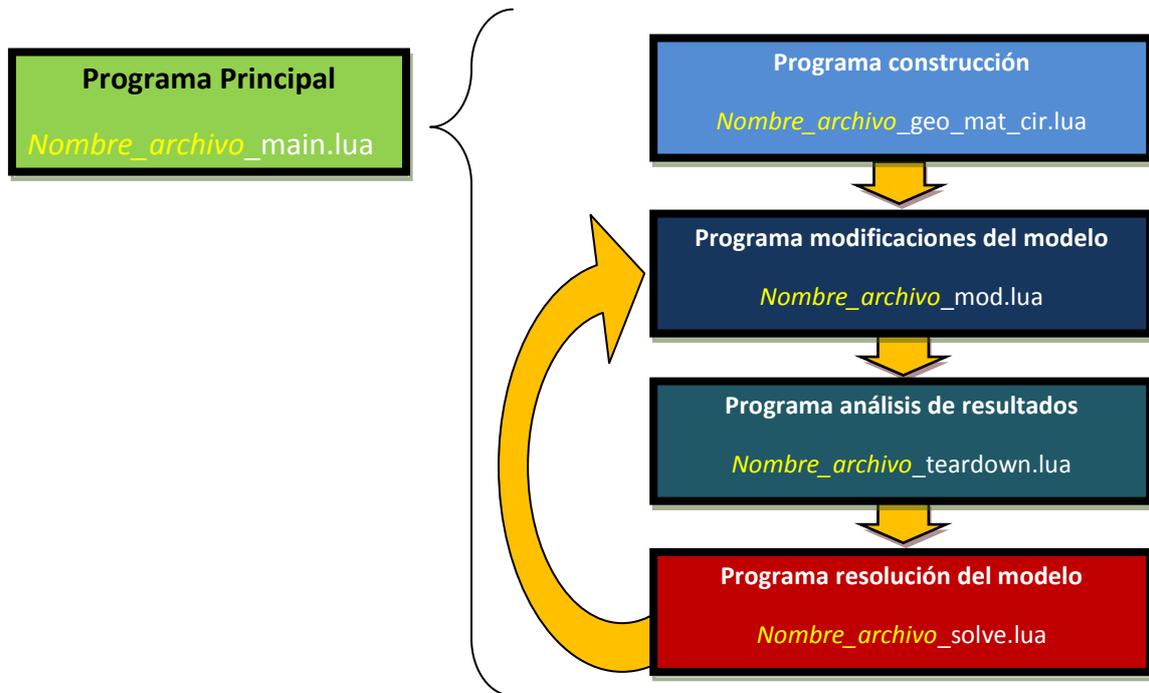
- Módulo principal
- Módulo que construye el modelo
- Módulo que malla y analiza el modelo
- Módulo que analiza los resultados

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

- Módulo que modifica el modelo

Cada uno de estos programas lleva asociado un archivo *.lua*. La estructura por bloques sería la siguiente:



A su vez cada bloque tiene una estructura interna que se repite en esencia en los diferentes ejemplos modelados.

- Nombre_archivo_main.lua: Es el módulo principal. En él se definen los parámetros para las modificaciones del modelo, número de pasos, tiempo, valores iniciales de los contadores. Abre el archivo de texto para escribir los resultados obtenidos y lo cierra al acabar el programa.

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```

1  -- main script Motor_Imanes Cálculo del Par en 360° con las corrientes del estator fijas
2
3  dofile("Motor_Imanes_geo_mat_cir.lua")
4
5  omega_rotor=60--[rpm]
6
7  -- initialization
8
9  t = 0.0
10 theta_total=0
11 file handle = openfile("Motor_Imanes.txt", "w")
12 n_steps = 50
13 ifig = 0
14 T=60/omega_rotor--[s]
15 Dt=T/n_steps
16
17 -- main loop
18 for k = 1,n_steps,1 do
19     t=0.0+(k-1)*Dt
20     dofile("Motor_Imanes_mod.lua")
21     dofile("Motor_Imanes_solve.lua")
22     dofile("Motor_Imanes_teardown.lua")
23 end
24
25 closefile(file_handle)

```

Figura 43. Ejemplo y esquema del módulo principal

- Nombre archivo geo mat cir.lua: Es el módulo de construcción del modelo. Puede actuar simplemente cargando un modelo ya existente, o generando uno completo. En el segundo caso su esquema sería el siguiente:

Creación del documento	<ul style="list-style-type: none"> - Crear documento - Definición del problema - Guardar en directorio
Creación de materiales	<ul style="list-style-type: none"> - Importar materiales de la librería - Aire, Hierro, cobre, imanes permanentes...
Creación de las condiciones de contorno	<ul style="list-style-type: none"> - Condiciones de Dirichlet de impermeabilidad de flujo.
Creación de circuitos	<ul style="list-style-type: none"> - Creación de intensidades senoidales desfasadas 120° en función del parámetro t - Creación de los circuitos. Asignación de las intensidades (positivas y negativas)
Construcción del estator	<ul style="list-style-type: none"> - Circunferencia interior - Circunferencia exterior - Creación del primer slot - Creación del resto en función de parámetros
Asignación de las CC.	<ul style="list-style-type: none"> - Sobre circunferencia exterior del estator

- Nombre archivo mod.lua: Es el módulo de modificación de geometría. Una vez construido el modelo, podemos modificar las intensidades de las corrientes del estator y/o realizar un giro del rotor. Este giro viene parametrizado en función del número de pasos que hayamos definido en el archivo principal, a través de un ángulo, que puede servir tanto para variable de la intensidad como para rotación del rotor.

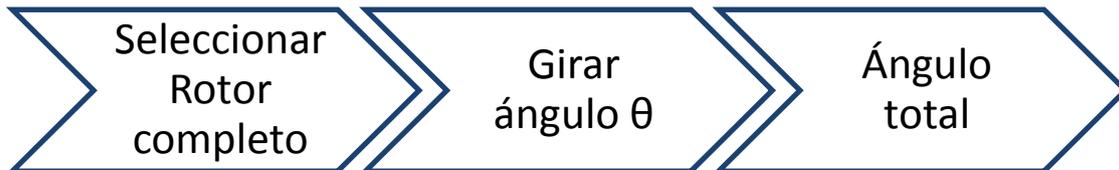


Figura 46. Esquema giro del rotor



Figura 47. Esquema variación de corrientes estator

- Nombre archivo solver.lua: Este módulo realiza el mallado y ejecuta el *solver*.
- Nombre archivo teardown.lua: Se analiza la solución obtenida. Se representan los resultados y se analizan análisis lineales e integrales. Se obtiene un archivo *.bmp* de los resultados representados y se escribe en el fichero *.txt* las magnitudes que nos interesan:

Obtención de imágenes
<ul style="list-style-type: none">• Representar densidad de campo magnético B• Características de la representación (puntos, líneas de flujo, zoom...)• Guardar imagen como Mapa de Bits en un archivo "<i>Nombre_archivoifig.bmp</i>", siendo <i>ifig</i> un índice que se actualiza en cada iteración.
Obtención de magnitudes
<ul style="list-style-type: none">• Seleccionar líneas y realizar análisis en 2D e integrales de superficie• Seleccionar regiones del modelo y realizar análisis volumétricos (Par, fuerzas..)• Escribir magnitudes en archivo "<i>Nombre_archivo.txt</i>" abierto en el módulo principal.

Figura 48. Esquema del módulo de análisis de resultados

3.4.2. Ventajas y logros

Esta metodología de trabajo proporciona enormes ventajas a la hora de realizar pruebas, variar diseños y obtener elementos visuales.

Esta metodología estructurada, permite crear fácilmente nuevos programas, ya que, al repetirse la estructura, generalmente solo hay que cambiar aspectos geométricos y modificar los datos que queremos obtener, esto último tremendamente sencillo.

Queda notablemente simplificada la creación de geometrías axilsimétricas, permitiendo que variando únicamente parámetros como el número de imanes, de ranuras o la intensidad de los circuitos, sea posible evaluar diferentes configuraciones.

Permite, además, realizar análisis para un ciclo eléctrico completo o para un ciclo mecánico completo. Este análisis se hace a través del conjunto de resultados magnetostáticos obtenidos. Posteriormente es posible crear animaciones con las imágenes obtenidas y observar la evolución de la inducción magnética o de las magnitudes obtenidas.

Por la estructura de esta metodología, se pueden hacer análisis con más pasos intermedios o con menos tan solo con modificar un parámetro. Es posible además expresarlo en función del tiempo, pudiendo ser analizado el ciclo eléctrico con mayor rigurosidad.

Es también destacable el hecho de poder crear una biblioteca de elementos de construcción, como la forma de las ranuras del estator, o la forma de los imanes. Se pueden crear diferentes modelos e incorporarlos a las simulaciones copiando las líneas de código que los definen.

4. MÁQUINA SÍNCRONA DE IMANES PERMANENTES

4.1. Introducción

4.1.1. Máquinas eléctricas

- Definición

Se entiende por máquina eléctrica al conjunto de mecanismos capaces de generar, aprovechar o transformar la energía eléctrica.

- Clasificación

Según su movimiento en [9]:

- Estáticas: Son los llamados transformadores. Permiten aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna (o continua), manteniendo la potencia (idealmente). No hay movimiento relativo de piezas constitutivas.

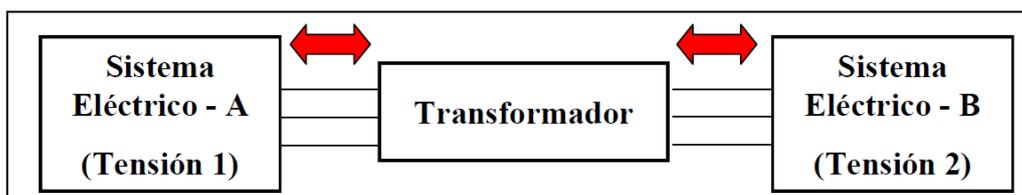


Figura 49. Esquema transformadores eléctricos

- Rotativas: Si la máquina convierte energía mecánica en energía eléctrica se les denomina *generador*. Si es al revés, generar energía mecánica a partir de energía eléctrica se les denomina *motor*. Esta relación se conoce con *Principio de conservación de la energía electromecánica*. Es adecuado decir pues que son máquinas reversibles. Hay un movimiento relativo entre el *rotor* (que rota) y el *estator* (fijo), de ahí que se llamen rotativas.

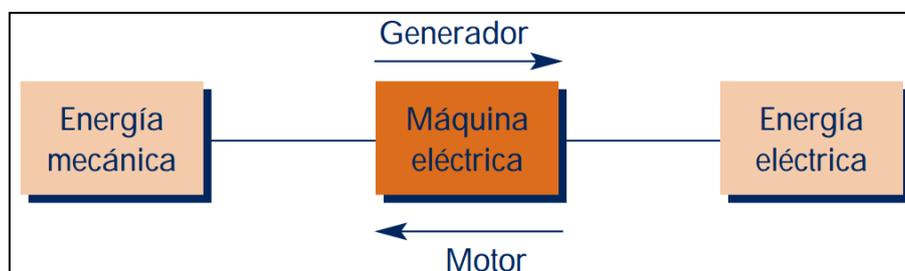


Figura 50. Esquema de funcionamiento de una máquina rotativa

Las máquinas rotativas son las que este proyecto aborda. Una clasificación general sería la siguiente:

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

Máquina eléctrica \ Tipo de corriente	Corriente continua	Corriente alterna
Generadores	Dinamo (con excitación) <ul style="list-style-type: none"> Independiente Serie Shunt o derivación Compound 	Alternador <ul style="list-style-type: none"> Monofásico Trifásico Polos lisos Polos salientes
Motores	Motor (con excitación) <ul style="list-style-type: none"> Independiente Serie Shunt o derivación Compound 	<ul style="list-style-type: none"> Monofásicos <ul style="list-style-type: none"> Inducción <ul style="list-style-type: none"> Jaula <ul style="list-style-type: none"> Fase partida Condensador Espira de sombra Rotor devanado <ul style="list-style-type: none"> Repulsión Repulsión en arranque Repulsión-inducción Síncrono <ul style="list-style-type: none"> Histéresis Reluctancia Imán permanente Polifásicos <ul style="list-style-type: none"> Inducción <ul style="list-style-type: none"> Jaula de ardilla Rotor devanado Universales <ul style="list-style-type: none"> Síncronos

Figura 51. Clasificación general de las máquinas rotativas

- Constitución general de la máquinas rotativas

En general, las máquinas rotativas constan a grandes rasgos de los siguientes componentes:

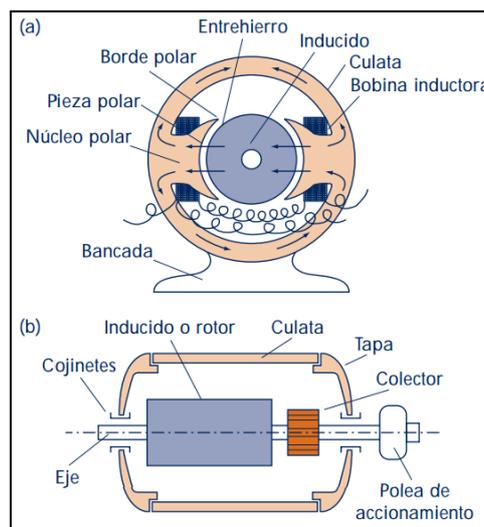


Figura 52. Partes constitutivas de las máquinas rotativas

- **Inductor:** Es el encargado de producir y conducir el flujo magnético. Generalmente es la parte fija de la máquina, llamada entonces *estator*. Consta de los siguientes elementos:

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

- Pieza polar: Sujeta la culata de la máquina, incluyendo el propio núcleo y su expansión
 - Núcleo: Parte del circuito magnético y en él se encuentran los devanados inductores.
 - Devanado inductor: Lo conforman el conjunto de espiras que producirá el flujo magnético al circular la corriente eléctrica
 - Expansión polar: Es la parte más ancha de la pieza polar y se encuentra próxima al inducido.
- **Inducido**: Es donde se produce la transformación de energía mecánica en eléctrica o viceversa. Generalmente parte móvil de la máquina, llamada en ese caso *rotor*. Consta de los siguientes elementos:
- Núcleo inducido: Cilindro de chapas magnéticas, construidas generalmente de acero laminado con un 2% de silicio para mejorar las pérdidas del circuito magnético. Se encuentra fijo en el eje de la máquina, descansando sobre unos cojinetes de apoyo. El rotor dispone de ranuras para alojar el devanado inducido.
 - Devanado inducido: Conectado al circuito exterior de la máquina a través de un colector, en él se produce la conversión energética. Normalmente el hilo de cobre utilizado para los devanados es electrolítico, con una resistividad de $0,017 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ a 20°C .

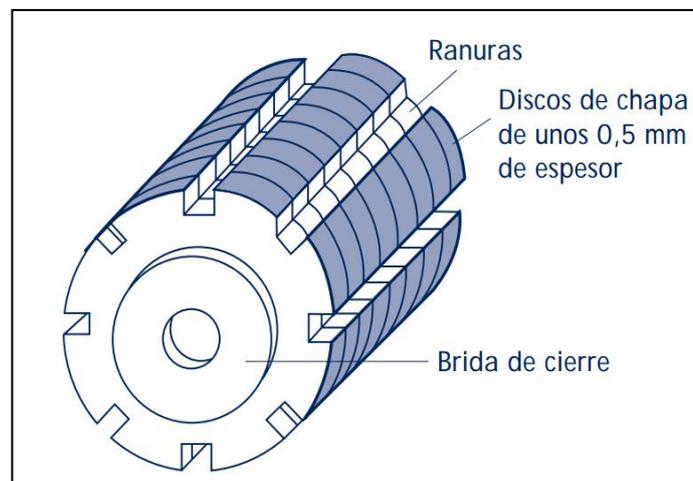


Figura 53. Rotor

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

- **Colector:** Conjunto de láminas de cobre (*delgas*), aisladas entre sí y conectadas a las secciones del devanado del inducido. Sobre ellas deslizan las escobillas.
- **Escobillas:** Generalmente de carbón o grafito, se hallan alojadas en un portaescobillas desde donde se deslizan sobre el colector y, mediante un conductor flexible, se unen a los bornes del inducido.

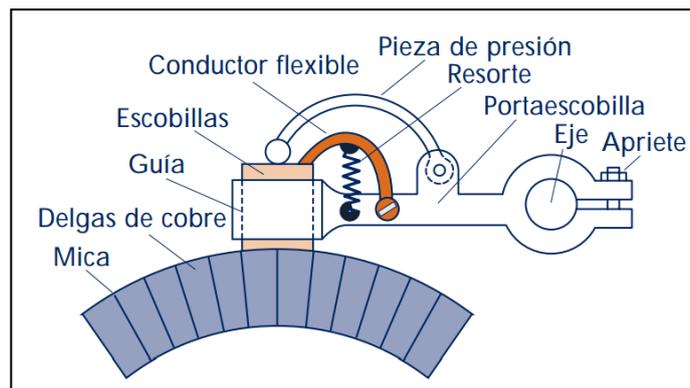


Figura 54. Escobillas

- **Culatas o Carcasas:** Es una envoltura de la máquina eléctrica y está hecha de material ferromagnético. Su misión es conducir el flujo creado por el devanado inductor. También se unen a ella los polos de la máquina.
- **Entrehierro:** Se denomina al espacio existente entre la parte fija y la parte móvil de la máquina, es decir, el rotor y las expansiones polares, para evitar el rozamiento entre ambos.
- **Cojinetes:** Sirven de apoyo al eje del rotor de la máquina.

4.1.2. Fundamentos de las máquinas de Corriente Alterna

- Campo magnético giratorio. Teorema de Ferraris

Si por los devanados [10] del estator circula un sistema trifásico de corrientes de igual magnitud y desfasadas 120° , se genera un campo magnético giratorio constante.

Es ampliamente conocida la demostración del campo magnético giratorio. Sea nuestro sistema de intensidades:

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

$$\begin{aligned}
 i_{aa'}(t) &= I \sin(\omega t) \\
 i_{bb'}(t) &= I \sin(\omega t - 120^\circ) \\
 i_{cc'}(t) &= I \sin(\omega t + 120^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{4.1.4- 1}$$

Las densidades de flujo magnético serán:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B}_{aa'}(t) &= B \sin(\omega t) \\
 \mathbf{B}_{bb'}(t) &= B \sin(\omega t - 120^\circ) \\
 \mathbf{B}_{cc'}(t) &= B \sin(\omega t + 120^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{4.1.4- 2}$$

Las direcciones de los campos vienen dadas por la regla de la mano derecha. En la siguiente figura se muestra la orientación de los campos magnéticos generados en un estator con tres bobinas desfasadas 120°:

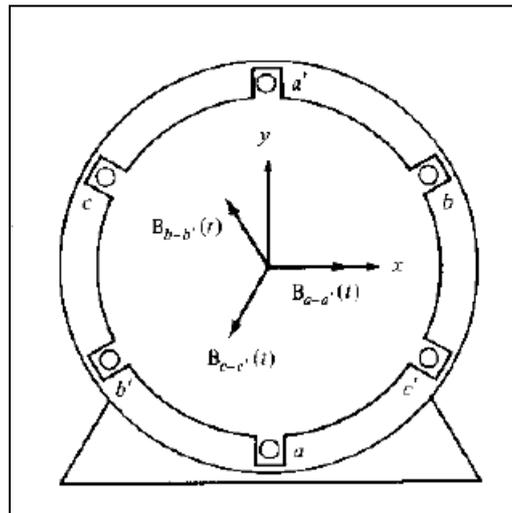


Figura 55. [10] Estator trifásico sencillo. Se asumen negativas las corriente con el superíndice ', salientes al plano del dibujo

La suma de los campos genera un campo resultante, \mathbf{B}_S , que gira a una velocidad ω .

$$\mathbf{B}_S(t) = \mathbf{B}_{aa'}(t) + \mathbf{B}_{bb'}(t) + \mathbf{B}_{cc'}(t) = \begin{cases} B_x(t) = 1.5B \cos(\omega t) \\ B_y(t) = 1.5B \sin(\omega t) \end{cases}
 \tag{4.1.4- 3}$$

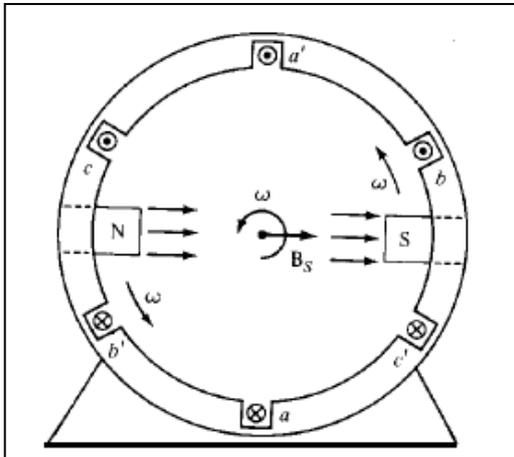


Figura 56. [10] Campo magnético giratorio en un estator representado como polo norte y polo sur.

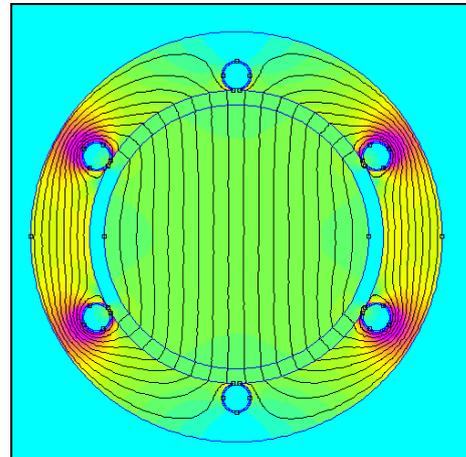


Figura 57. Representación en FEMM 4.2 del flujo magnético neto para un sistema trifásico de tres espiras

- Relación entre frecuencia eléctrica y rotación del campo. Número de polos

Como se ha visto, el campo magnético generado equivale a dos polos magnéticos que giran a una velocidad de rotación que llamaremos magnética, que equivale en un ciclo, a la frecuencia de la corriente eléctrica en hertzios. Para dos polos magnéticos:

$$f_e = f_m$$

$$\omega_e = \omega_m$$

Si se repite la secuencia trifásica más de una vez [10], se aumenta el número de polos magnéticos que se generan, en el caso de repetir la secuencia dos veces, aparecerán dos pares de polos norte y sur:

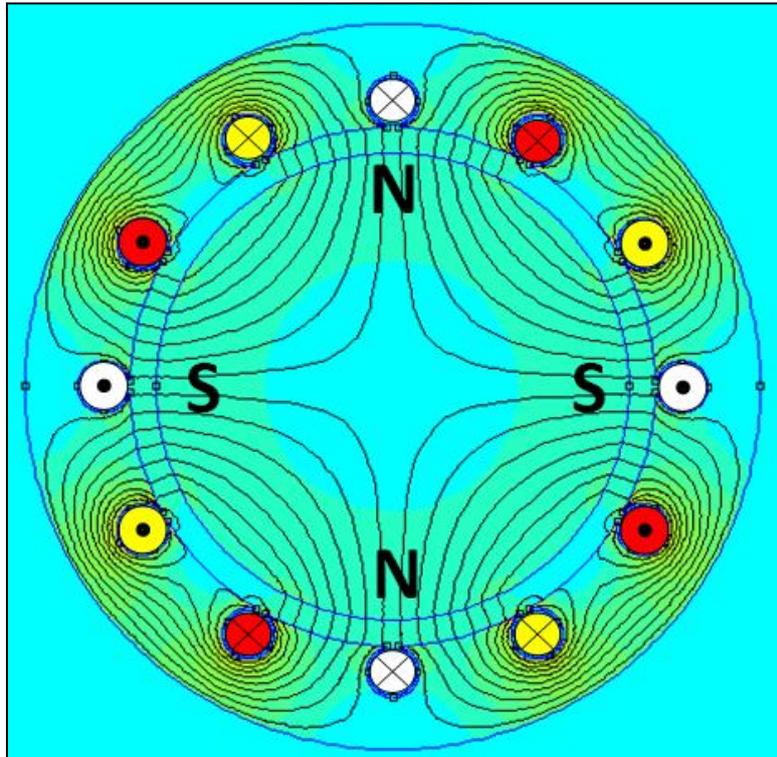


Figura 58. Estator trifásico elaborado en FEMM 4.2 con secuencia a-c'-b-a'-c-b' repetida dos veces. La fase a (blanco), b (roja), c (amarilla). Se observan los 4 polos que aparecen.

El ciclo eléctrico tiene 360° y el polo se repite cada media vuelta, por lo que la frecuencia eléctrica es el doble de la frecuencia mecánica de rotación. Es decir, para un mismo ciclo eléctrico, el campo gira dos veces más rápido.

Se puede establecer esta relación de forma general par un número p de polos:

$$\begin{aligned}\omega_e &= \frac{p}{2} \omega_m \quad [\text{rad/s}] \\ f_e &= \frac{p}{120} n_m \quad [\text{r.p.m.}] \quad \forall p = 2, 4, 6 \dots\end{aligned} \quad (4.1.4- 4)$$

- Fuerza electromotriz inducida

Como se vio en 2.2.2 *Significado físico de las ecuaciones. Leyes experimentales* un campo magnético giratorio, a través de la Ley de Faraday (2.2.2- 2), puede generar diferencias de tensiones en una espira, lo que genera una corriente que circula por ella si el circuito está cerrado.

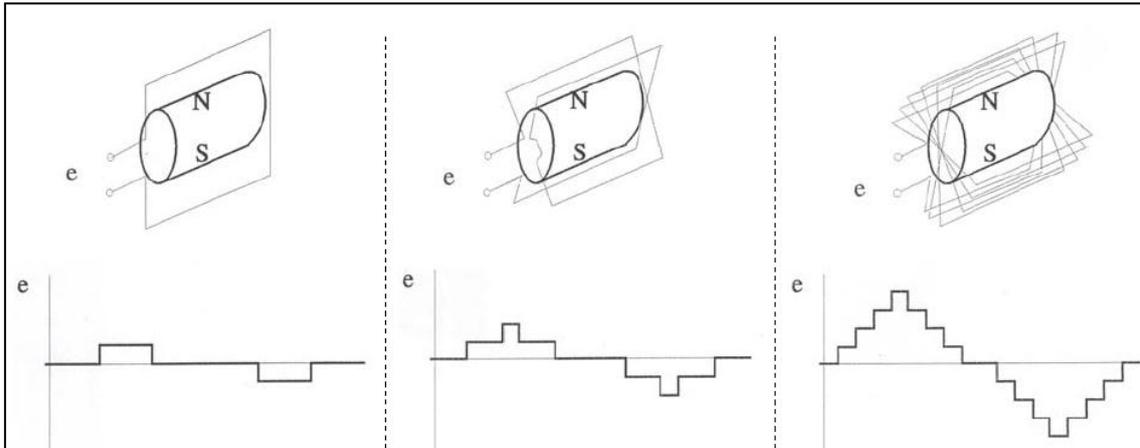


Figura 59. Fem inducida por un par de polos girando en el interior de un conductor: a) una espira, b) dos espiras, c) multiespira

Para un sistema trifásico con N número de bobinas por fase:

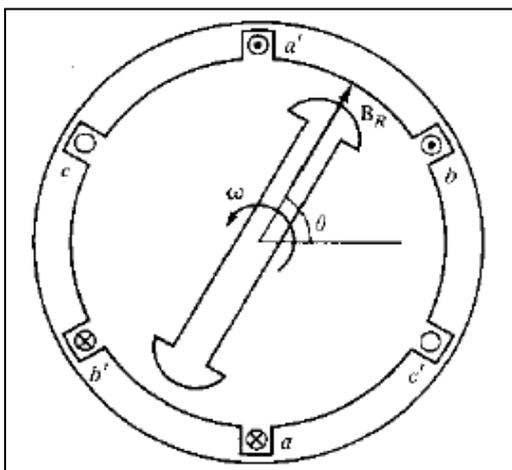


Figura 60. Campo magnético que gira en un estator bobinado

$$\begin{aligned}
 e_{aa'}(t) &= N\phi\omega \sin(\omega t) \\
 e_{bb'}(t) &= N\phi\omega \sin(\omega t - 120^\circ) \\
 e_{cc'}(t) &= N\phi\omega \sin(\omega t + 120^\circ)
 \end{aligned} \quad (4.1.4-5)$$

Cuando esto sucede, la corriente que se induce en las bobinas genera un campo magnético opuesto al que lo ha provocado generándose el fenómeno conocido como *reacción de inducido*, explicado más adelante.

- Par interno

Siempre que conviven dos campos magnéticos se genera un par que tiende a alinear esos campos, tal como se vio en 2.3.1 *Par, fuerza y energía potencial de un dipolo en un campo magnético*. En las máquinas síncronas eléctricas aparecen dos: uno generado por el rotor, y otro generado por el estator. Esta interacción de los campos produce el par interno de la máquina. El campo magnético neto de la máquina será:

$$\mathbf{B}_{neto} = \mathbf{B}_{rotor} + \mathbf{B}_{estator}$$

y el par magnético interno:

$$\tau = \mathbf{B}_{rotor} \times \mathbf{B}_{estator} = B_{rotor} B_{estator} \sin \gamma = B_{rotor} B_{neto} \sin \delta = \mathbf{B}_{rotor} \times \mathbf{B}_{neto}$$

La orientación de este par indica si la máquina funciona como generador o como motor. Para una corriente dada en un instante de tiempo en función de la posición relativa campo magnético obtendremos un par diferente:

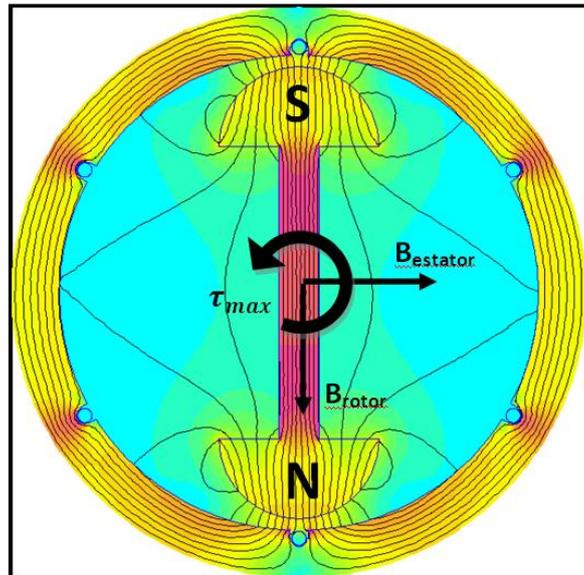


Figura 61. Par máximo para una máquina síncrona simplificada

- Balance energético

En la transformación energética, las máquinas eléctricas llevan asociadas cuatro grandes tipos de pérdidas energéticas:

- Pérdidas en el cobre del rotor y/o estator
- Pérdidas en el hierro
- Pérdidas mecánicas
- Pérdidas adicionales propias del diseño.

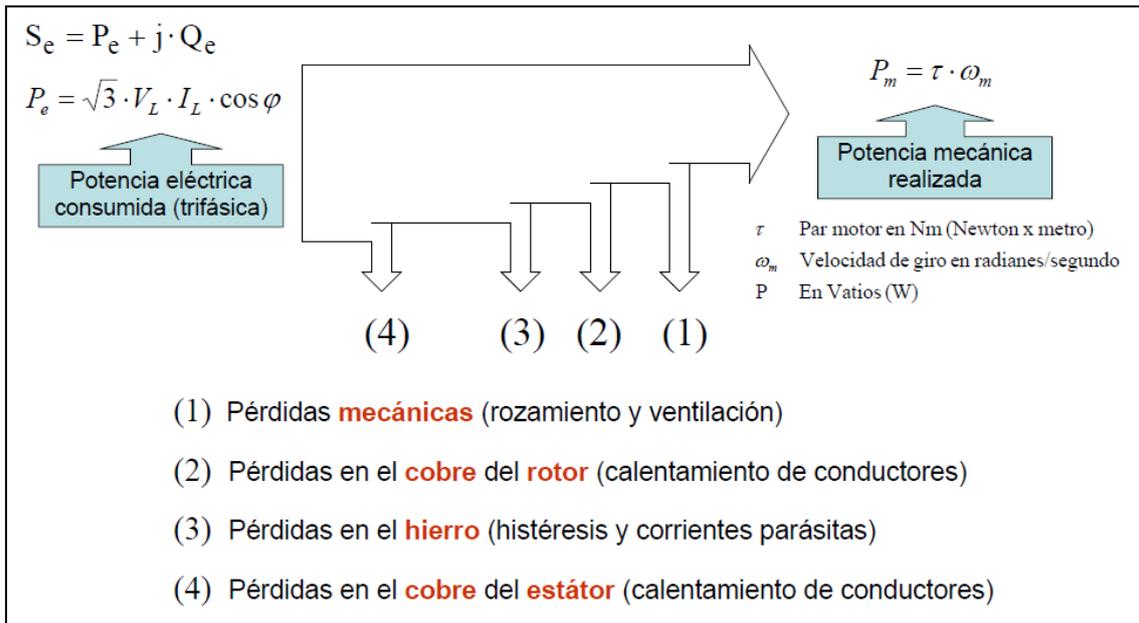


Figura 62. Balance energético de las máquinas rotativas de CA como motores

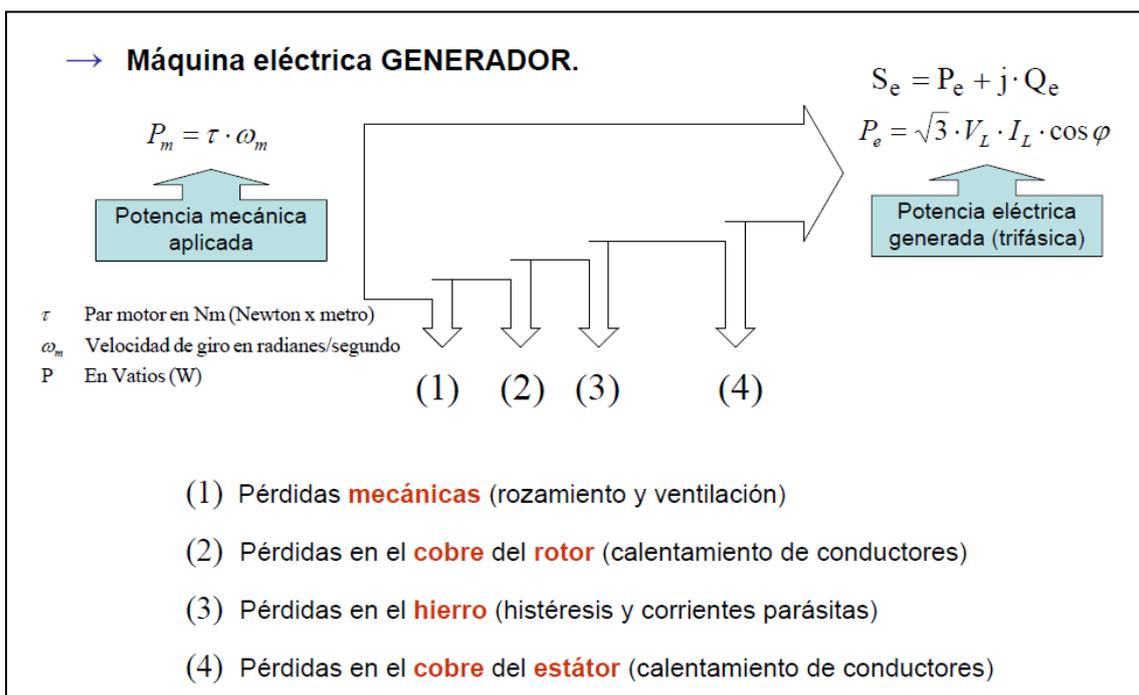


Figura 63. Balance energético de las máquinas rotativas de CA como generadores

4.1.3. Circuito magnético

Se designa [11] por circuito magnético a un volumen del espacio en el que existe un campo magnético y cuyas líneas de inducción, dentro de dicho volumen, son cerradas. Los elementos principales del circuito magnético son [12]:

- a) La fuerza magneto motriz \mathcal{F} (F.m.m): es aquella capaz de producir un flujo magnético entre dos puntos de un circuito magnético. Se deduce de la Ley

de Ampère (véase 2.2.2 *Significado físico de las ecuaciones. Leyes experimentales*). Para un bobinado de N espiras de intensidad i que enrolla un núcleo de material ferromagnético:

$$\mathcal{F} = \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = N \cdot i \quad (4.1.4- 6)$$

- b) Inducción del campo, B : Intensidad del campo magnético (véase 2.3.2 *Magnetización*). Equivalente a la densidad de campo magnético.
- c) Excitación, H : Excitación magnética por unidad de longitud del circuito magnético. Su cálculo se basa en la Ley de Ampère que establece que la circulación del vector H a través de un camino cerrado es igual al sumatorio de las corrientes que encierra dicha curva.
- d) Intensidad, I : Intensidad que aporta la fuente de alimentación a la bobina cuando es esta la que genera la *f.m.m.* Es la encargada de generar el campo magnético que origina el flujo en el núcleo del circuito
- e) Flujo, ϕ : Es la el producto vectorial de la inducción y el vector superficie. Cuantifica la cantidad de líneas de campo que atraviesan una superficie Se denomina *flujo disperso* o simplemente *dispersión* al flujo que no se concatena en el núcleo del circuito magnético, es decir, aquel flujo que circula por el exterior del núcleo magnético.

$$\phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \quad (4.1.4- 7)$$

- f) Reluctancia, \mathcal{R} . La reluctancia magnética de un material es la resistencia que éste posee al verse influenciado por un campo magnético. Depende de las características del material. Para un material de sección S , longitud l y permeabilidad magnética μ :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad (4.1.4- 8)$$

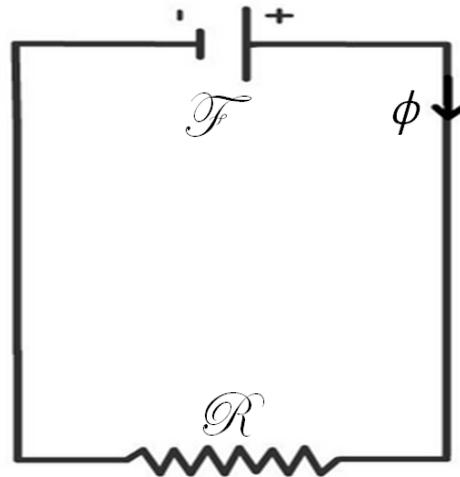


Figura 64. Circuito magnético de un núcleo ferromagnético eléctricamente excitado.

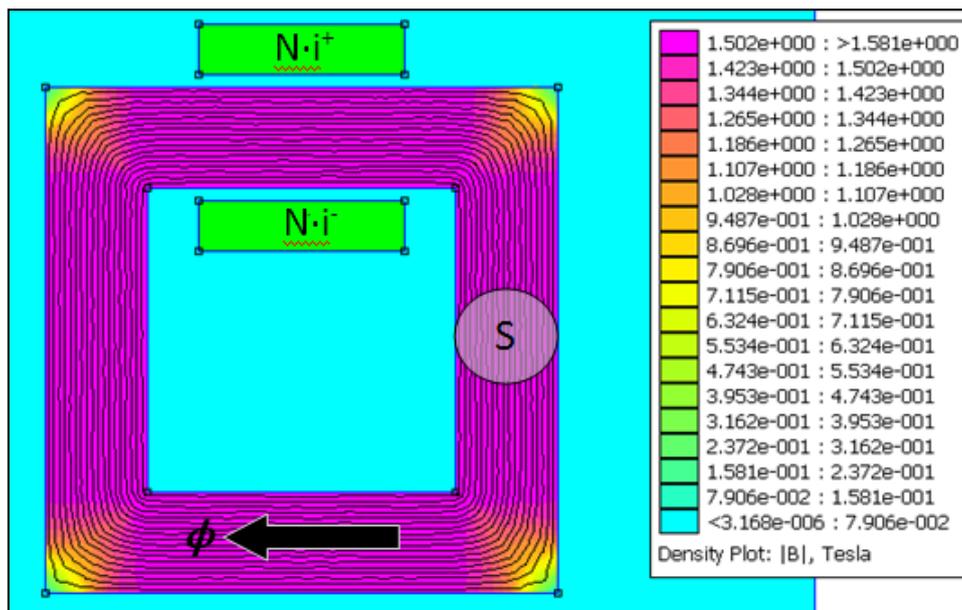


Figura 65. Densidad de campo B para un núcleo de hierro excitado con una bobina de N vueltas de intensidad i [A]

Es posible realizar una analogía entre las magnitudes de los circuitos eléctricos y magnéticos:

Circuito Magnético		Circuito Eléctrico	
\mathcal{F} [A-vuelta]	Fuerza magneto motriz	e [V]	Fuerza electro motriz
B [T]	Inducción magnética	J [A/m ²]	Densidad de flujo
H [A-v/m]	Excitación magnética	E [N/C]	Campo eléctrico
μ [N/A ²]	Permeabilidad	σ [S/m]	Conductividad
ϕ [Wb]	Flujo magnético	I	Corriente eléctrica
Ley de Hokinson	$\mathcal{F} = \phi \cdot \mathcal{R}$	Ley de Ohm	$v = i \cdot R$

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

Reluctancia	$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu \cdot S}$	Resistencia	$R = \frac{l}{\sigma \cdot S}$
Ley de Kirchhoff	$\sum_K \phi_K = 0$	Ley de Kirchhoff	$\sum_K i_K = 0$
Reluctancia en serie	$1/\mathcal{R}_T = \sum 1/\mathcal{R}$	Resistencias en Serie	$1/R_T = \sum 1/R$

El concepto de circuito magnético [10] tiene limitaciones, pero es una buena herramienta para calcular flujos y dimensionar elementos constructivos. Hay que tener en cuenta en estos cálculos aproximados:

- *Flujos de dispersión* no contabilizados
- La reluctancia se calcula en base a la longitud media y una superficie transversal del núcleo, lo cual es poco conveniente en las esquinas y geometrías puntiagudas.

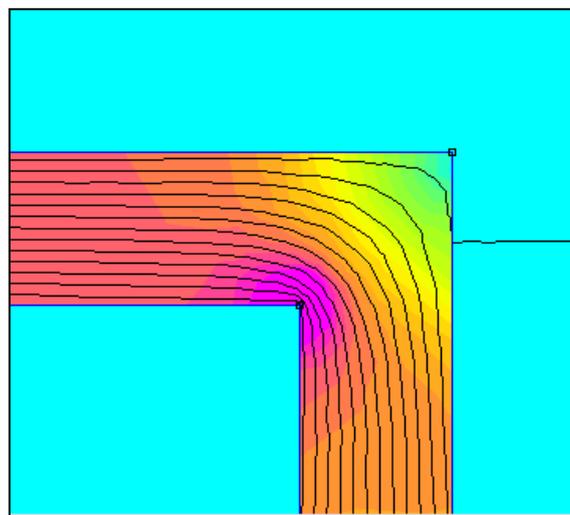


Figura 66. Efecto de las esquinas en la densidad de flujo magnético

- La permeabilidad como se vio en 2.3 *Comportamiento magnético de la materia* es no-lineal con el flujo que los atraviesa, si no que tiene un comportamiento determinado por la curva B-H.
- La presencia de entrehierros de aire en la trayectoria del flujo a lo largo del núcleo provoca que la superficie transversal efectiva en el aire es mayor que la del núcleo, ya que las líneas de flujo tienden a separarse. Se conoce como *efecto refrigerante* o *efecto de bordes*.

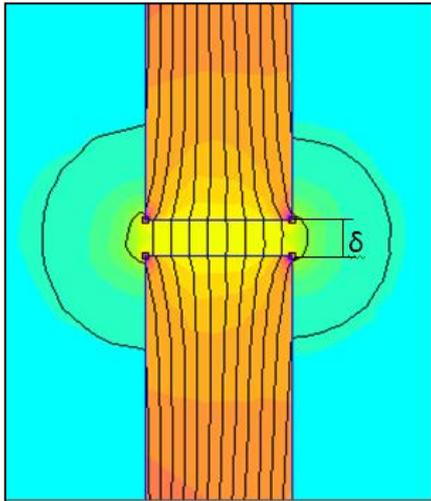


Figura 67. Efecto de refrigerancia de un campo magnético en un entrehierro

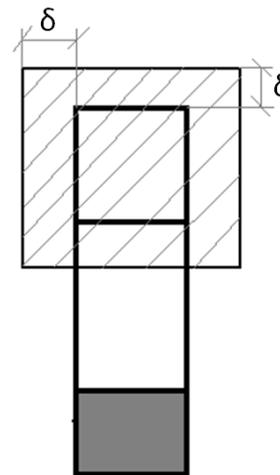


Figura 68. Corte transversal del entrehierro. Representación de la sección equivalente del entrehierro

Tal como se desarrolla en [11], la zona del entrehierro es una zona de baja permeabilidad, lo que provoca un aumento de la reluctancia. Si el entrehierro no es excesivamente grande, puede asemejarse la sección del entrehierro a una con un incremento, por cada lado, de aproximadamente de la longitud del mismo.

4.2. La máquina síncrona de imanes permanentes

4.2.1. Máquina síncrona. Generalidades

La máquina síncrona está englobada dentro de las máquinas rotativas. [13] Se caracterizan por girar siempre en perfecto sincronismo, es decir, el rotor gira a las mismas revoluciones que lo hace el campo.

Las máquinas síncronas suelen ser utilizadas como generadores y son las principales proveedoras de potencia eléctrica en la actualidad. En este trabajo no se abordan las configuraciones con electroimanes generados por bobinados, los más utilizados en la actualidad.

Existen monofásicas o polifásicas, en este proyecto se abordan únicamente las trifásicas.

El campo magnético rotórico es debido a bobinados embebidos en la armadura del rotor, alrededor de polos salientes, o por la colocación de imanes permanentes. Así es posible diferenciar dos grandes grupos según el creador de campo magnético del rotor:

- Excitación externa (electroimanes)
- Imanes permanentes

Estos dos grupos engloban a su vez dos tipos de rotores principales:

- Lisos (cilíndricos)

- De polos salientes

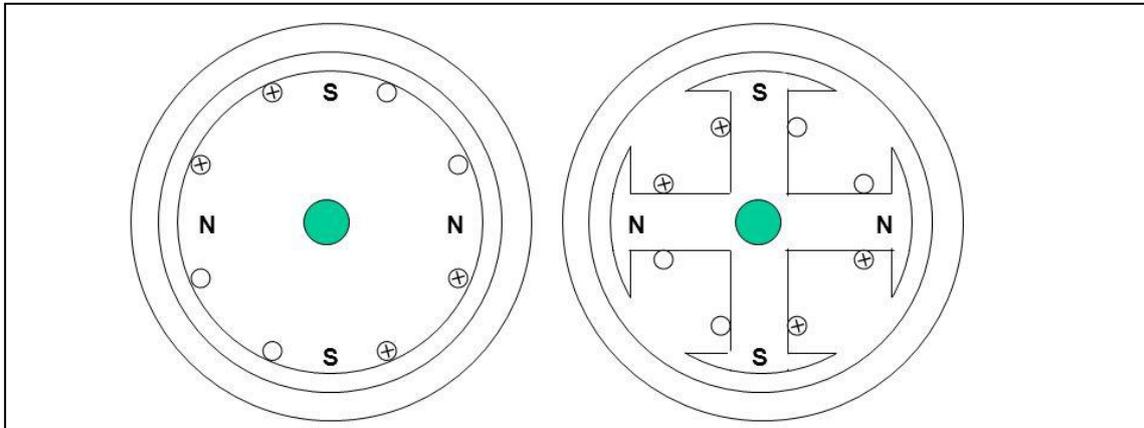


Figura 69. Configuración lisa y de polos salientes para rotor de 4 polos

En función de su operación, las máquinas tienen mayor número de polos o menor. Generalmente las para altas velocidades de giro se tienen 2 o 4 polos y para velocidades medias y bajas se tienen 4 o más polos.

4.2.2. Principios de funcionamiento

Pueden actuar como generador y como motor:

- Como generador

El principio de funcionamiento como generador se basa en la *fem* inducida que genera un campo magnético variable en una espira conductora. Como se vio en 4.1.2 *Fundamentos de las máquinas de Corriente Alterna*, si un rotor posee un campo magnético, ya sea por un electroimán o por imanes permanentes, y se fuerza a girar dentro de un estator bobinado, se inducirán corrientes en el devanado. La corriente que se induce, si giramos a velocidad constante el rotor, generará una fuerza electro motriz sinusoidal en los bornes de salida de cada espira.

El generador precisa de energía mecánica (que provoque el giro del rotor) y, en el caso de un electroimán, energía eléctrica a través de corriente continua. La energía mecánica, a través de la velocidad de giro, controla la frecuencia. La intensidad de la corriente en el electroimán controla la tensión de salida.

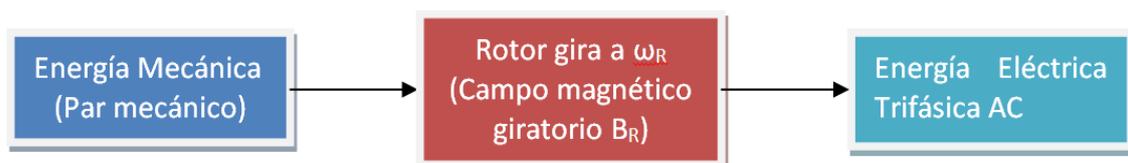


Figura 70. Esquema de la máquina síncrona como generador

- Como motor

Sea un devanado trifásico en el estator y un rotor con un campo magnético asociado (ya sea por electroimanes o por imanes permanentes) que conviven en el entorno de una máquina. Al aplicar una corriente trifásica en el devanado, se genera un campo magnético giratorio uniforme (véase 4.1.2 *Fundamentos de las máquinas de Corriente Alterna*). Al convivir dos campos magnéticos, se genera un par que tiende a alinearlos, provocando un giro en el rotor que tratará de alcanzar constantemente al campo magnético del estator. En par generado será función del ángulo que forman los campos magnéticos.

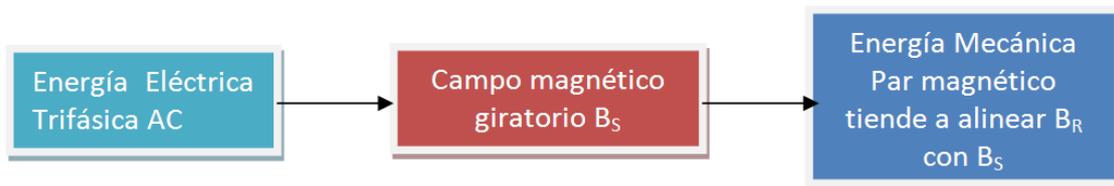


Figura 71. Esquema de la máquina síncrona como motor

4.2.3. Máquina síncrona de Imanes Permanentes

Las principales ventajas que presenta la máquina síncrona de Imanes Permanentes (PM) son:

- El volumen reducido
- Flujo prácticamente constante
- Elimina la necesidad de anillos rozantes
- Inexistencia de pérdidas por efecto Joule en el rotor
- Desaparece la necesidad de refrigerar del rotor

Las máquinas de imanes permanentes son extensivamente usadas en servomotores, accionamientos eléctricos para posicionamiento, robótica, máquinas herramienta, ascensores, etc. Existen máquinas de una potencia por encima de 1 MW por ejemplo para el accionamiento de submarinos. También es posible su aplicación en generación y bombeo a partir de energía solar fotovoltaica. Se han desarrollado ampliamente en aerogeneradores, cuyos diseños superan los 3 MW.

Según su construcción se clasifican en:

- De flujo radial: la más común de los diferentes tipos de máquinas de imanes permanentes que existen, por ello también se le puede conocer con el nombre de generador síncrono de imanes permanentes convencional. Se trata de un generador que tiene flujo radial en el entrehierro y flujo longitudinal en el estator. Mecánicamente tiene un funcionamiento parecido a la máquina síncrona. Los bobinados están dispuestos de la misma manera y en el rotor están dispuestos los imanes.

- De flujo axial: compuesto por dos discos que se encuentran situados en el exterior formando el rotor y en el interior se encuentra el estator. Los imanes permanentes están situados en la superficie de los discos rotóricos, de forma que crean un flujo cuya dirección es paralela al eje de giro.

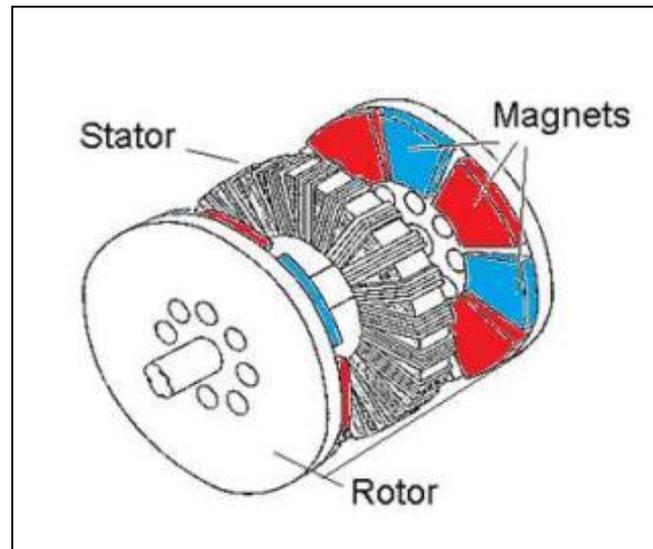


Figura 72. Configuración de flujo radial. Obtenido del Proyecto "GENERADOR DE FLUJO AXIAL ESTATÓRICO DE IMANES PERMANENTES"

Este proyecto aborda los de flujo radial. Los más utilizados como motores son [14]:

- Síncronos (*Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM*)

Tiene un campo magnético giratorio uniforme. Se utilizan para movimientos poco precisos a velocidades de giro constantes.

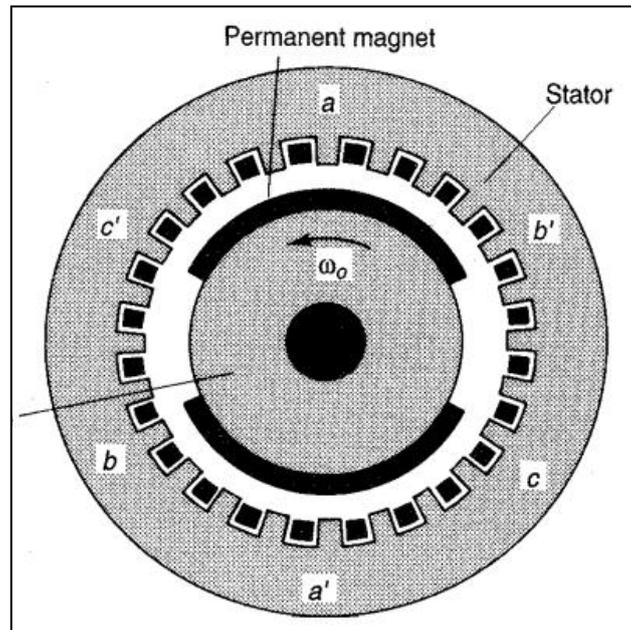


Figura 73. Esquema motor PMSM

- Motor de imán permanente conmutados o trapezoidales (BLDC Motors)

El rotor tiene dos imanes que cubren cada uno aproximadamente media circunferencia del perímetro del rotor y produciendo una densidad de flujo cuasirectangular.

El estator tiene un bobinado trifásico, donde los conductores de cada fase están distribuidos uniformemente en porciones de arcos de 60° .

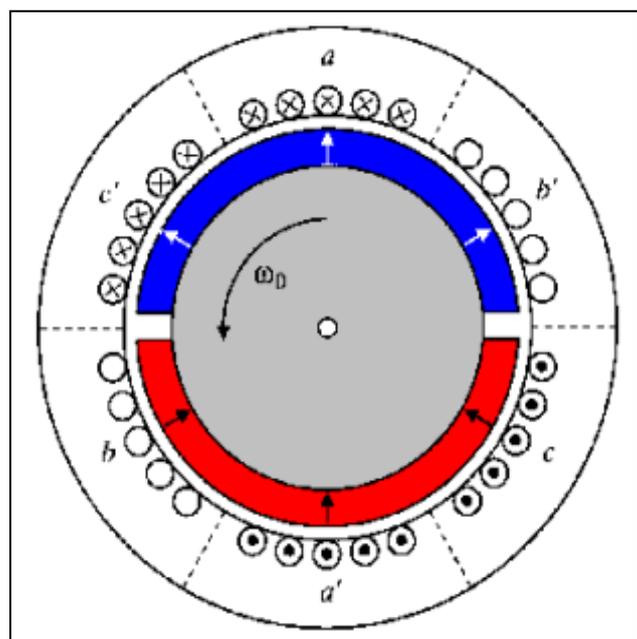


Figura 74. Esquema motor BLDC

- Motores paso a paso de imanes permanentes (Stepper Motors)

Básicamente estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator.

4.2.4. Constitución máquinas de flujo radial

- Configuraciones básicas

Según [15], las máquinas de flujo radial pueden adoptar tres formas básicas

- a) Estator y rotor cilíndricos: luego su entrehierro es uniforme (despreciando dispersiones). Es habitualmente empleada en máquinas síncronas rápidas.
- b) Estator cilíndrico y rotor de polos salientes: usualmente utilizada en las máquinas síncronas lentas.
- c) Estator de polos salientes y rotor cilíndrico: normalmente usada en las máquinas de corriente continua.

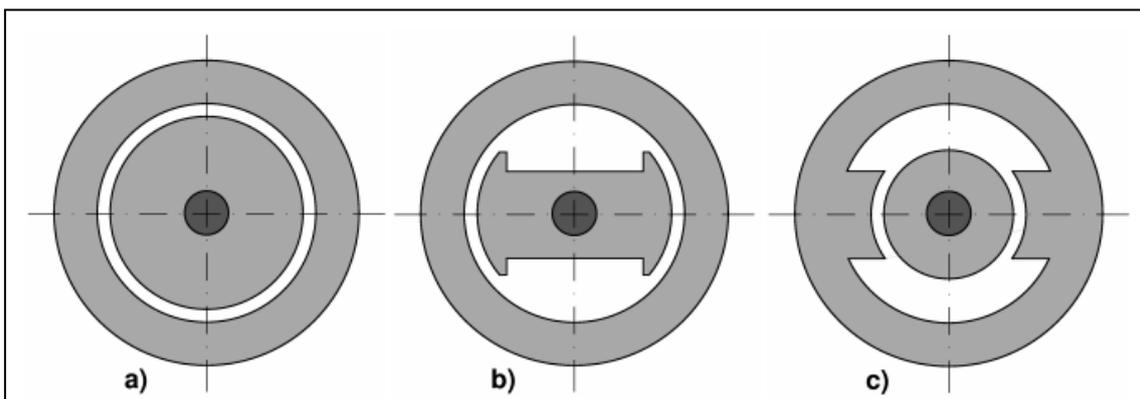


Figura 75. Configuraciones básicas de las máquinas rotativas

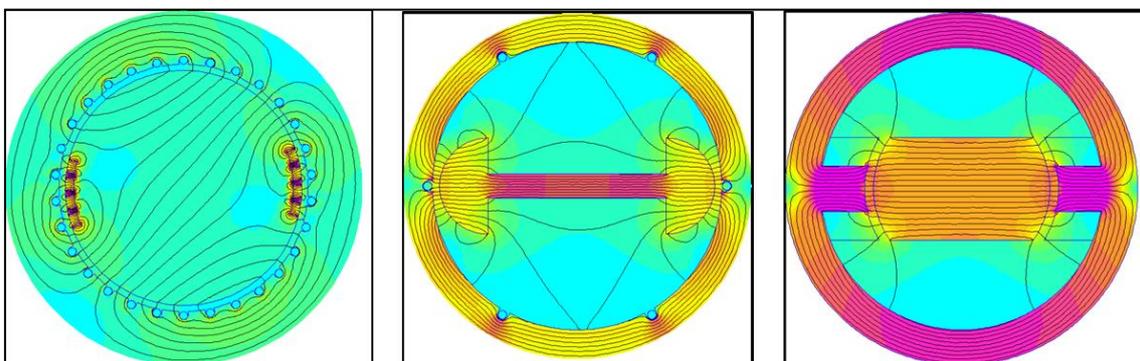


Figura 76. Simulaciones de las configuraciones básicas

- Polos salientes. Expansiones polares

El circuito magnético del rotor puede ser de polos salientes o completamente cilíndrico.

[13] Es aconsejable procurar que el inverso de la reluctancia (permeancia) varíe senoidalmente en el entrehierro de cara a generar una repartición senoidal del campo. Como el entrehierro no es constante se opta por cortar en bisel las expansiones polares o se tornean con un radio menor al de la superficie ideal rotórica.

- Ranuras del estator

[11] Las ranuras del estator tienen formas diversas según el tamaño y la tensión nominal de la máquina. Normalmente son semicerradas para reducir la longitud efectiva del entrehierro, reduciendo la reluctancia. En máquinas de alta tensión, se utilizan de tipo abierto de sección rectangular.

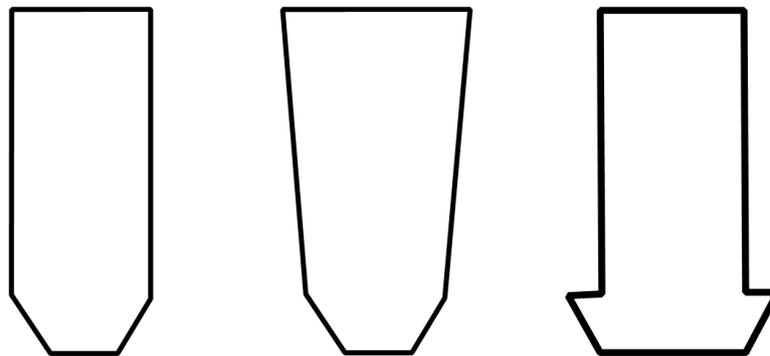


Figura 77. a) Semicerrada rectangular. b) Semicerrada trapezoidal. c) Rectangular abierta

Las ranuras semicerradas permiten introducir el bobinado hilo a hilo, mientras que en las abiertas permiten introducir la bobina completamente conformada.

Las ranuras están aisladas eléctricamente. Se cierran con una cuña de material aislante eléctricamente y poco permeable magnéticamente.

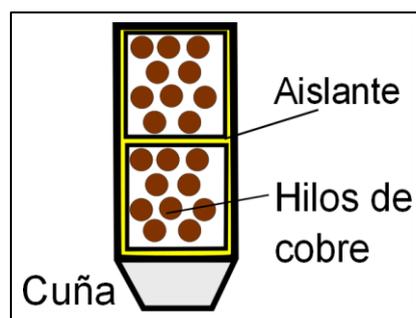


Figura 78. Esquema de devanado de doble capa

Es común también alejar la abertura de la ranura del estator.

- Disposición de imanes permanentes

Existen dos grandes disposiciones de imanes:

- Imanes montados en la superficie del rotor (Surface-mounted magnets): En este tipo de rotor [16], los imanes se van colocando sobre la superficie del mismo. Con este diseño se consigue la mayor densidad de flujo en el entrehierro y se aprovecha al máximo la energía de los imanes al estar colocados en la posición más cercana posible a los bobinados del estator.
- Imanes insertos en el rotor (Buried Magnets): Si los imanes están insertados en el rotor, quedan físicamente contenidos y protegidos contra la desmagnetización parcial ya que al estar más alejados del estator se producen menos pérdidas por corrientes de Foucault en los mismos y menos calentamiento por tanto. Sin embargo el espacio de hierro del rotor eliminado para insertar los imanes provoca que:
 - o No pueda considerarse que se tenga un entrehierro uniforme
 - o Aparece un efecto de saliencia
 - o Aparece una componente de reluctancia del par.

Otra desventaja es que al ser los imanes cuadrados no producen una densidad de flujo en el entrehierro menos senoidal que imanes superficiales curvos, lo que provoca fluctuaciones en el flujo magnético. Por ello, si son usados imanes interiores en vez de superficiales hay que colocar imanes con un volumen mayor para conseguir la misma potencia que con los superficiales.

Hay distintas formas de colocarlos pero las más usadas son en forma de "I", verticalmente y horizontalmente y en forma de "V".

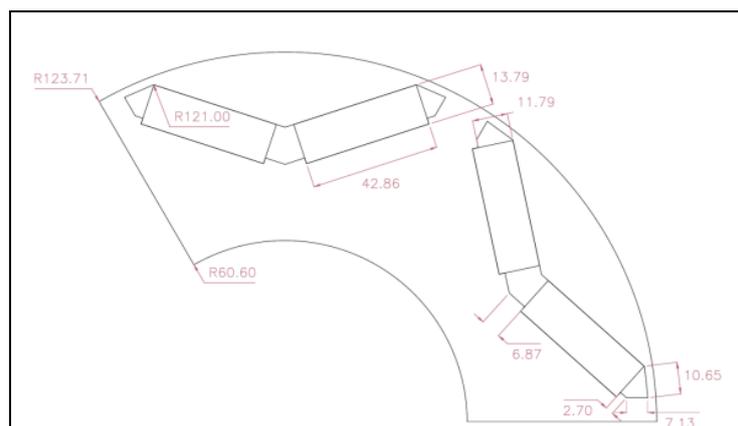


Figura 79. Imanes Interiores colocados en V. Extraído del Proyecto "Cálculo y reducción de pérdidas en máquinas de imanes permanentes"

4.2.5. Dispersiones de flujo

En un motor síncrono, la *fem* por fase, $e_{aa'}$, es distinta de la que se realmente se obtiene en los bornes de salida. Esto se debe a la dispersión del campo magnético en el estator y a la reacción de inducido. Estos efectos se pueden agrupar en:

1. *Reacción de inducido o reacción de armadura.*
2. *Dispersión de ranuras*
3. *Dispersión en las cabezas de dientes*
4. *Dispersión en cabezas de bobinas*
5. *Influencia de ranuras sobre el campo*
6. *Dispersión en el inductor o volante polar*

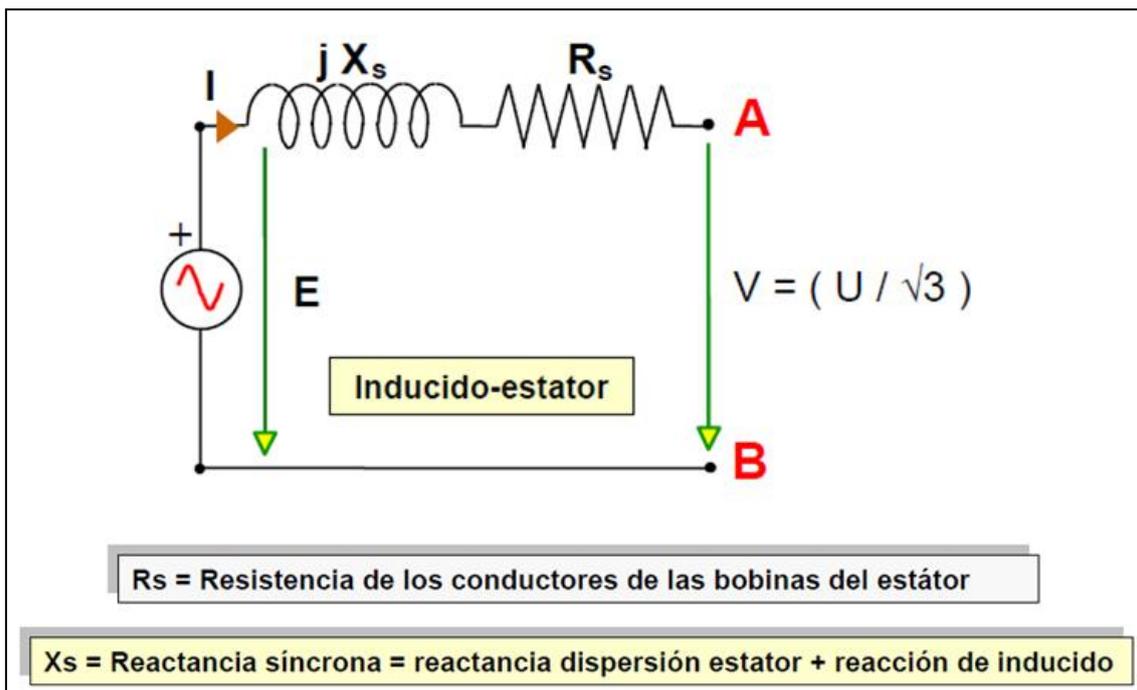


Figura 80. Circuito equivalente en vacío por fase. La diferencia como generador y motor es el sentido de la Intensidad.

- Reacción de inducido: se genera cuando se conecta carga al estator. El campo magnético genera un flujo de corriente en el estator. Este flujo de corriente trifásica inducida, genera por sí mismo un campo magnético en la máquina que distorsiona el generado por el rotor ya que se opone al campo del rotor y está desfasado 90° con la intensidad inducida.
- La dispersión de ranuras: fenómeno que mezcla la autoinducción generada por las corrientes del bobinado y la geometría de la ranura. La reactancia de dispersión de ranura tiene en cuenta solamente las líneas de flujo que se cierran dentro de la ranura misma concatenando los conductores que lo establecen. La dispersión de fmm generada por la circulación de corriente [17], crece desde el fondo de la ranura hasta el borde más próximo a la abertura de la ranura y constante en el entrehierro. En las siguientes imágenes se observa como la inducción magnética se concentra en la parte posterior de las ranuras. Esto se corresponde a un aumento de la dispersión en la parte anterior debido a la alta reluctancia del aire con respecto al

hierro. Es importante destacar que se representa el efecto aislado, es decir, las únicas fuentes de campo magnético son las provocadas por las corrientes embebidas.

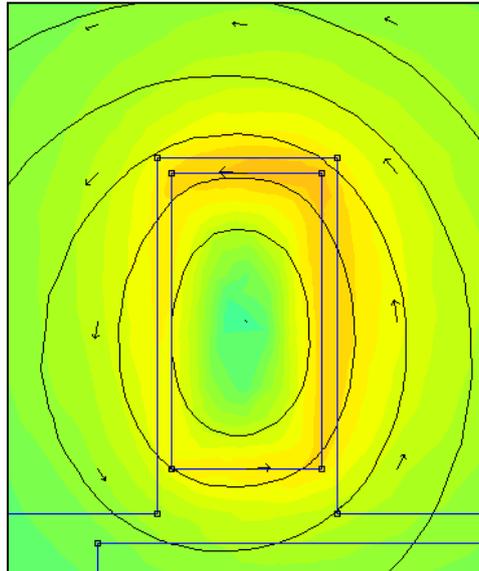


Figura 81. Flujo de dispersión del inducido de ranura

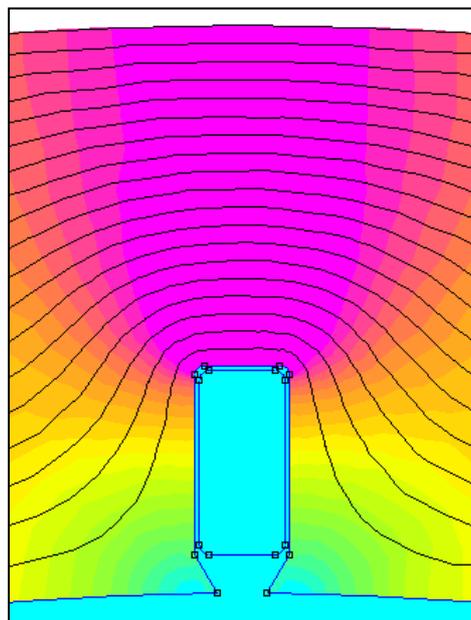


Figura 82. Dispersión de flujo para una ranura en material ferromagnético

[11] Despreciando la reluctancia del hierro frente a la del aire, el flujo de dispersión de ranura es proporcional a la corriente total de la ranura, aumenta con la profundidad de esta y es inversamente proporcional al ancho de la ranura. En el seno de un material ferromagnético, se amplifica

el efecto de concentración en la parte posterior, y se camufla el efecto de dispersión de flujo de líneas cerradas dentro de la ranura.

- Dispersión en las cabezas de dientes: [11] Fenómeno en el que el flujo producido por la corriente que circula por los conductores embebidos en las ranuras, cierra sus líneas de inducción por fuera de las ranuras

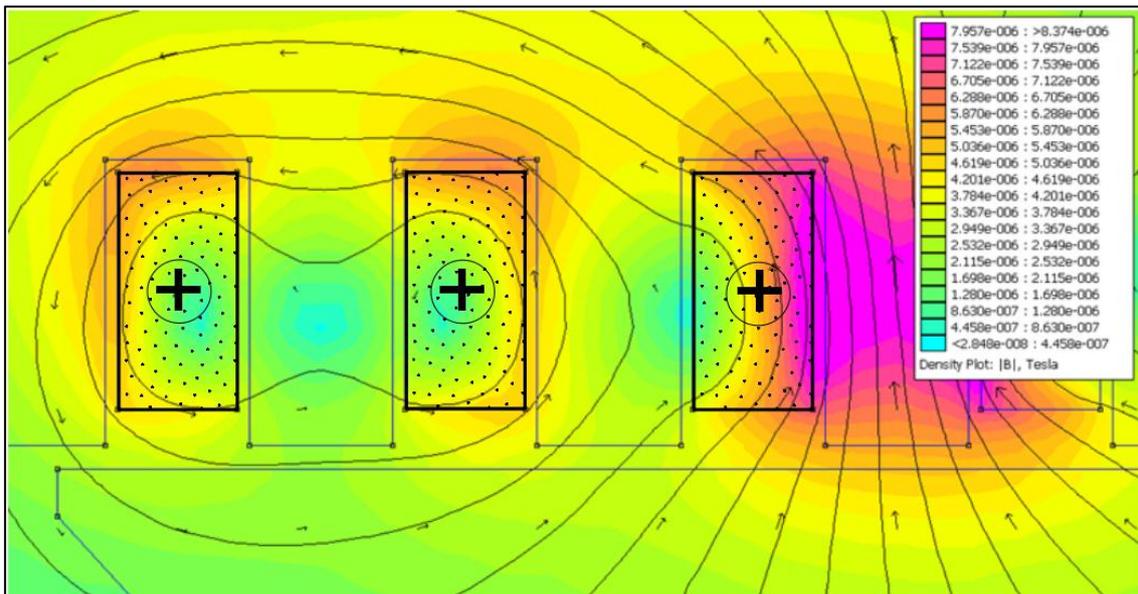


Figura 83. Flujos de dispersión del inducido, de cabeza de diente

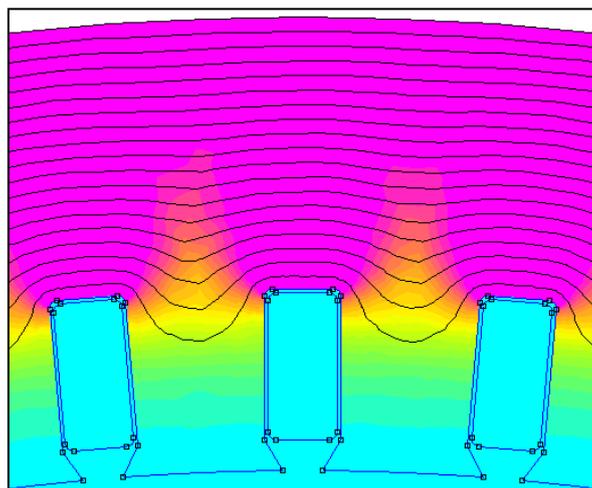


Figura 84. Distribución de la inducción magnética en material ferromagnético.

- Dispersión en las cabezas de bobina frontal: [11] El flujo que se dispersa fuera de las ranuras del inductor, a través de un camino casi enteramente en el aire.

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

- ***Influencia de ranuras sobre el campo:*** [17] Las líneas de campo inductor tienden a propagarse por el material ferromagnético. El flujo por las ranuras abiertas es en consecuencia menor que frente a las semiabiertas. Se produce un efecto de ensillamiento, o disminución de la densidad de campo magnético en la abertura de la ranura.

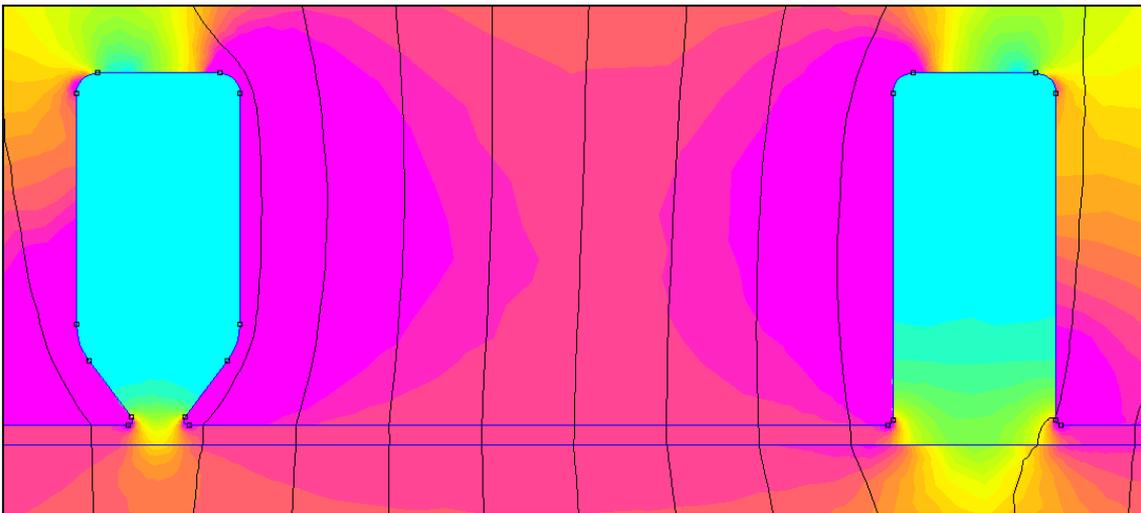


Figura 85. Influencia de la abertura de la ranura en la inducción magnética

Como se puede observar, en la ranura abierta se dispersa más la inducción magnética. Se produce una disminución de la inducción frente a la ranura abierta.

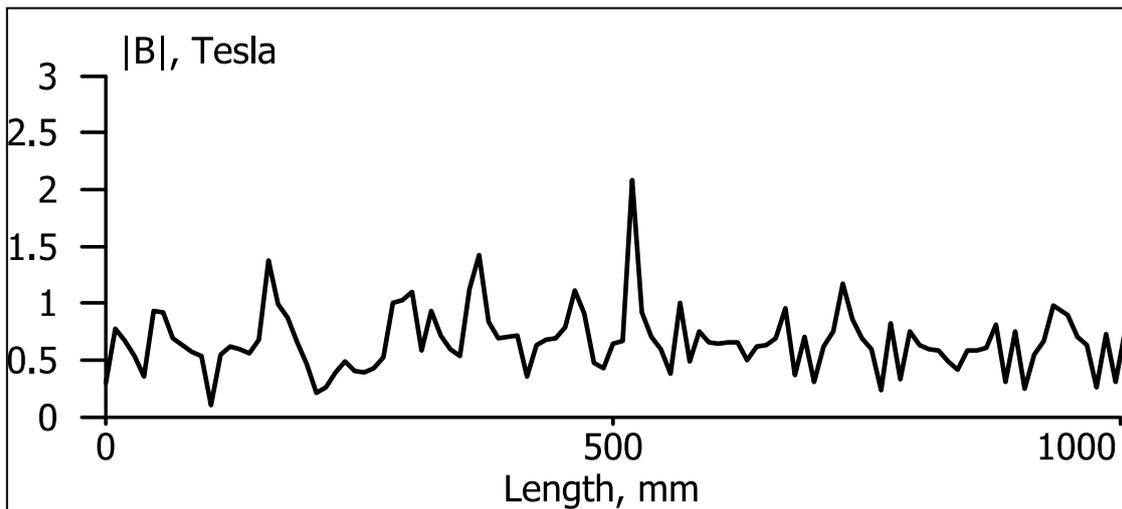


Figura 86. Distribución de inducción magnética que atraviesa el contorno de medio estator obtenida de FEMM 4.2. Se observan las irregularidades correspondientes a dispersiones de flujo

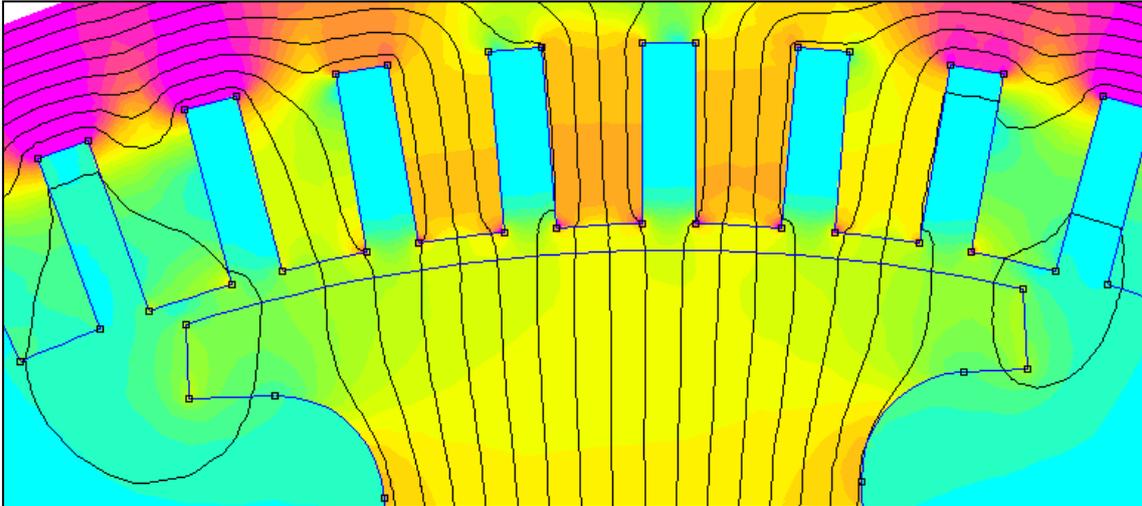


Figura 87. Formas que adquiere el campo de dispersión en función de la posición de las ranuras

- Dispersión en el inductor o volante polar: [17] La presencia de polos salientes lleva asociada una dispersión de flujo a través de los espacios interpolares. Ciertas líneas de campo parten de un polo y llegan a otro a través del entrehierro, aunque la mayoría van por el medio con menor reluctancia.

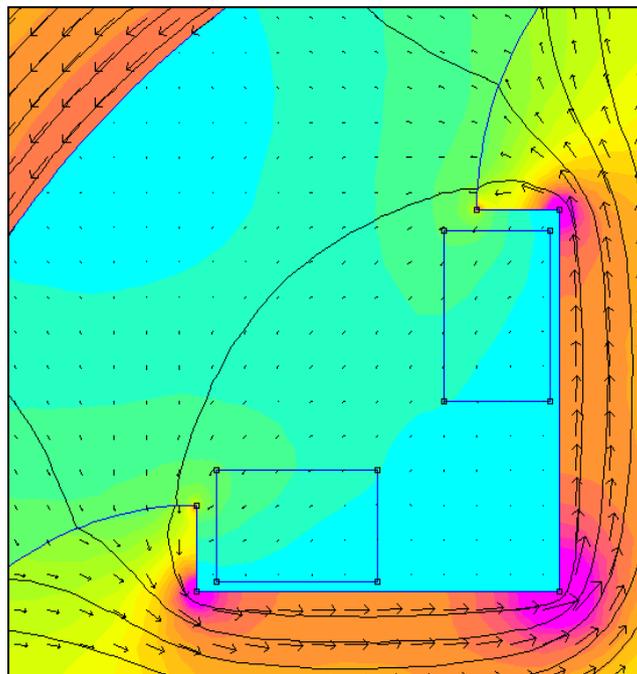


Figura 88. Dispersión en una rueda tetrapolar.

5. SIMULACIONES Y RESULTADOS

5.1. Programa

En la creación de este proyecto se han generado simulaciones del circuito magnético en máquinas síncronas de imanes permanentes. Se ha utilizado la metodología expuesta en el apartado 3.4 *Metodología* para generar diferentes opciones geométricas y para obtener discretizaciones magnetostáticas en un ciclo mecánico completo.

Para ello se han utiliza el programa *PMSM* que se adjunta en 9 *Anexos*. A continuación se expone la secuencia de ejecución y las diferentes opciones que permiten los programas:

1. PMSM_main.lua

- Permite seleccionar la velocidad mecánica del rotor en rpm, para hacer una representación temporal si desea.
- Permite escoger el número de iteraciones
- Se selecciona el fichero de datos principal.

2. PMSM_geo_mat_cir.lua

Primero se define el problema y seleccionamos el fichero en el que se va a guardar:

```
--Construcción de la Geometría, Materiales, BC y circuitos usando comandos de LUA-----  
-----  
--Definición del problema  
dofile("../scripts/problem_def.lua")  
mi_saveas("../geometry/PMSM_C.fem")
```

A continuación se ejecuta el archivo de creación de materiales, es decir, importar de la librería del software todos los materiales necesarios del modelo:

```
--Creación de los materiales-----  
dofile("../scripts/material_creation.lua")
```

Seguidamente se crean las condiciones de contorno:

```
--Creación de las condiciones de Contorno-----  
dofile("../scripts/BC_creation.lua")
```

El siguiente paso es crear los circuitos. Se define la amplitud máxima de la corriente de línea y el número de vueltas por cada ranura, es decir el número de alambres que atraviesan la sección de ranura. Este número se escoge tras un análisis cualitativo de calibre del cable escogido, la tensión máxima aplicable y el área de la sección de la ranura:

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
--Creación de los circuitos-----  
--Ver tabla de cableado  
I_s = 0.5387  
N=366  
dofile("../scripts/circuits_creation.lua")
```

Se continúa con la construcción del estator definiendo sus radios interiores, exteriores y el entrehierro:

```
--Construcción de la circunferencia Interior Estátor. Problema plano en mm-----  
Entrehierro=5  
Re_int=300  
Re_ext=450  
dofile("../scripts/stator.lua")
```

Una vez construido el cuerpo del estator se dispone de varias opciones de construcción de las ranuras del estator.

- Trapezoidales/rectangulares o circulares.
- Número de ranuras.
- Tamaño del área que envuelve el cableado. Se define el radio en el caso de que sea circular, o los semilados inferiores y superiores para mazos trapezoidales (el caso rectangular es una particularización del caso trapezoidal).
- Espesor del aislamiento del mazo.
- Semilado de la abertura de ranura al entrehierro. Se puede definir como parámetro o en función de parámetros anteriores.
- Profundidades de la ranura. Se definen el alejamiento de la ranura al entrehierro, la profundidad de la cuña y la profundidad total.
- Radios de las esquinas. Los radios del mazo de cables se deja en función de valores anteriores para conseguir un área de sección del mazo deseada (en el imagen el área es de 300 mm²).

```
--Creación Slot del stator -----  
-----  
var=1 --1:Trapezoidales/rectangulares, 2: Circulares  
ns_est=36 --Número de slots en el estátor  
--Parámetros Bobinado y ranura  
r_cable=10 --Radio bobinado dentro del slot  
b_inf_bob=7  
b_sup_bob=7 --Escoger igual para ranuras rectangulares  
t=1 --Aislamiento  
a=2.5 --Semilado Abertura ranura semicerrada.  
--a=b_inf_bob=b_inf_bob+t --Semilado Abertura ranura abierta  
h1=1 --Margen ranura/estátor  
h2=7 --Profundidad cuña  
h5=31 --Profundidad total  
--Para que el área de la sección de ranura por donde va la corriente sea de 300mm^2 en el caso re  
r1=sqrt(((h5-h2-2*t)*2*b_inf_bob-300)/pi)  
r2=3*t  
r3=t  
dofile("../scripts/slots_stator.lua")
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

Construido el estator, se asignan las condiciones de contorno al exterior del mismo:

```
--Asignacion de BC-----  
dofile("../scripts/BC_assignment.lua")
```

Se asigna el material al entrehierro y al estator:

```
--Asignacion de Materiales-----  
dofile("../scripts/material_assignment.lua")
```

Se asignan los circuitos a las ranuras. El programa está diseñado para un estator de un par de polos. Dentro de este programa hay que seleccionar el material (importado de la librería anteriormente) y el calibre del cableado. La intensidad de línea y el número de vueltas por ranura, ya se definieron anteriormente.

```
--Asignacion de Circuitos-----  
dofile("../scripts/circuits_assignment.lua")
```

Se construye a continuación la circunferencia exterior del rotor. Solo la exterior para poder utilizar el origen de coordenadas como herramienta de construcción.

```
--Construcción Rotor-----  
dofile("../scripts/rotor_ext.lua")
```

Se ejecuta alguna de las diferentes opciones de construcción de los imanes del rotor. Existen cuatro opciones:

- Incrustados en la superficie definiendo la separación entre ellos.
- Incrustados en la superficie, definiendo la separación entre ellos y sin material rotórico entre ellos.
- Incrustados en la superficie y en forma de arco de circunferencia, con arco variable
- Sobre la superficie, con forma rectangular, definiendo un espacio entre polos, y distribuyendo el número de imanes de polos en el espacio restante.

Se definen los parámetros geométricos de los imanes: ancho (inferior y superior) y profundidad para los trapezoidales/rectangulares, arco que ocupa en la superficie y profundidad respecto a la superficie en el extremo (en función de este parámetro se calcula el arco del imán).

Se define el número de pares de polos, el número de imanes por polo y las tolerancias.

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
--Construcción imanes
a_ext=60 --Anchura iman dentro del rotor
a_int=60 --Anchura iman borde del rotor
b=12 --profundidad desde punto más interno.
p=1 --Número de pares de polos
ni_pol=12 --Número de imanes por cada Polo
s=1 --Parámetro de separación entre imanes
-- dofile("../scripts/iman.es.lua")
-- dofile("../scripts/iman.es_sup_rect.lua")
delta=2 --diferencia del extremo
gam=60*pi/180 --Ángulo que ocupa el imán en la super
-- dofile("../scripts/iman.es_sup.lua")
tol=30/2
dofile("../scripts/iman.es_sup_rectB.lua")
```

Por último, una vez construido todos los elementos del rotor, se termina de definir el cuerpo interior del mismo. Las geometrías internas posibles son:

- Rotor cilíndrico con espesor. Se define un radio interior.
- Rotor cilíndrico con espesor y brazos en dirección radial. Se define el espesor de los brazos y entre circunferencias, el número de brazos y el radio interior:

```
--Construcción detalles rotor
-- E=100
-- R3=100
-- nb=4
Rr_int=100
-- dofile("../scripts/rotor.lua")
dofile("../scripts/rotor_simple.lua")

mi_addblocklabel(0,Rr_int+1) --Etiqueta del Rotor
mi_selectlabel(0,Rr_int+1)
mi_setblockprop("Pure Iron", 1)
```

3. PMSM_mod.lua

Selecciona todos los elementos interiores al estator y los rota un ángulo $dtheta$ que se obtiene en función del número de pasos de la simulación.

Actualiza el valor del ángulo total girado

4. PMSM_solve.lua

- Malla el modelo
- Ejecuta *fkern.exe* para resolver el problema

5. PMSM_teardown.lua

Una vez realizado el análisis, en primer lugar se obtienen la imagen de la densidad de corriente, se ocultan los puntos de construcción y se actualiza el índice de figuras.

Se guarda la primera imagen con su índice actualizado y se genera la imagen de densidad de campo magnético y se guarda con su índice actualizado:

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
mo_showdensityplot(1,0,'0.644804670068601','0','jmag')           -- Obtain Image
mo_hidepoints()
mo_shownames(0)
ifig = ifig + 1

mo_savebitmap(format("../bmps/PMSM_C/PMSM_denJ%1$d.bmp",ifig))  -- Save Image

mo_showdensityplot(1,0,'2.15','1.3398584319791e-005','bmag')    -- Obtain Image

mo_savebitmap(format("../bmps/PMSM_C/PMSM_C%1$d.bmp",ifig))    -- Save Image
```

A continuación se selecciona el rotor al completo, cuerpo e imanes, y se integra la densidad magnética en ese volumen y se calcula el par respecto al origen que experimenta.

```
mo_selectblock(0,Rr_int+1)
for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do           --Primeros imanes de cada polo
    angle=(pi/2+theta_t*pi/180)+ang*pi/180
    for i = 1, ni_pol, 1 do                                   --Imanes de cada polo
        x_pos=(Rr_ext-b/2)*cos(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        y_pos=(Rr_ext-b/2)*sin(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        mo_selectblock(x_pos,y_pos)                         --Seleccionar etiqueta
    end
end
Bx=mo_blockintegral(8)
By=mo_blockintegral(9)
Torque=mo_blockintegral(22)
```

Después se procede a obtener la distribución de inducción magnética que atraviesa una espira y su integral superficial, obteniéndose el flujo que atraviesa una fase. Los resultados se guardan como imagen y como archivo de texto.

```
mo_seteditmode("contour")
mo_addcontour(0,Re_int)
mo_addcontour(0,-Re_int)
B_n=mo_lineintegral(0)
mo_makeplot(2,200,format("/PMSM_C/B_espira/PMSM_C_espira%1$d.txt",ifig),0)
mo_makeplot(1,200,format("../bmps/PMSM_C/Otros/PMSM_C_espira%1$d.emf",ifig))
mo_clearcontour()
```

Seguidamente se procede de forma similar, pero el contorno definido es ahora el correspondiente al radio interior del estator.

```
mo_seteditmode("contour")
mo_selectpoint(-Re_int,0)
mo_selectpoint(Re_int,0)
mo_bendcontour(180,0.5)
mo_selectpoint(Re_int,0)
mo_selectpoint(-Re_int,0)
mo_bendcontour(180,0.5)
mo_makeplot(2,200,format("/PMSM_C/Frontera/Front_est%1$d.txt",ifig),0)
mo_makeplot(1,200,format("../bmps/PMSM_C/Otros/PMSM_Distr_B_Front_est%1$d.emf",ifig))
mo_clearcontour()
```

Además se obtienen las características de los circuitos. Es menos importante este resultado para rotaciones mecánicas.

```
Ia, Va, fluxa=mo_getcircuitproperties("A+")  
Ib, Vb, fluxb=mo_getcircuitproperties("B+")  
Ic, Vc, fluxc=mo_getcircuitproperties("C+")
```

Por último, se almacenan todos los resultados obtenidos en el archivo de texto principal.

```
fwrite (file_handle, "Flujo[Wb]: ",B_n, " Par Rotor[N?m]: ",Torque, " tiempo[s]: "  
    ,t, " theta[?]: ",theta_t, " Bx_t: ",Bx, " By_t: ",By, " Intensidad[A]:Ia: "  
    ,Ia, " Ib: ",Ib, " Ic: ",Ic, " Tensiones[V]:va: ",Va, " vb: ",vb, " vc: ",Vc,"\n")
```

5.2. Estator

5.2.1. Espesores

Es importante contemplar el espesor del estator para evitar la saturación del mismo.

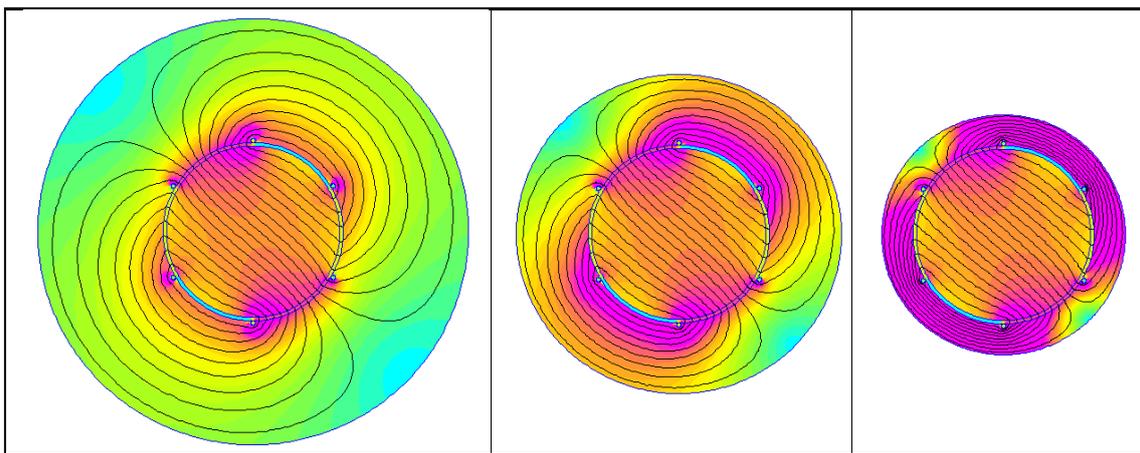


Figura 89. Distribución de inducción magnética para distintos espesores de estator

Como se observa en la imagen anterior, una disminución del espesor del estator provoca una mayor concentración de líneas de campo.

5.2.2. Entrehierro

El dimensionamiento del entrehierro también tiene efectos considerables en las dispersiones de flujo. En la siguiente imagen se observa como influye el entrehierro en la densidad de inducción magnética.

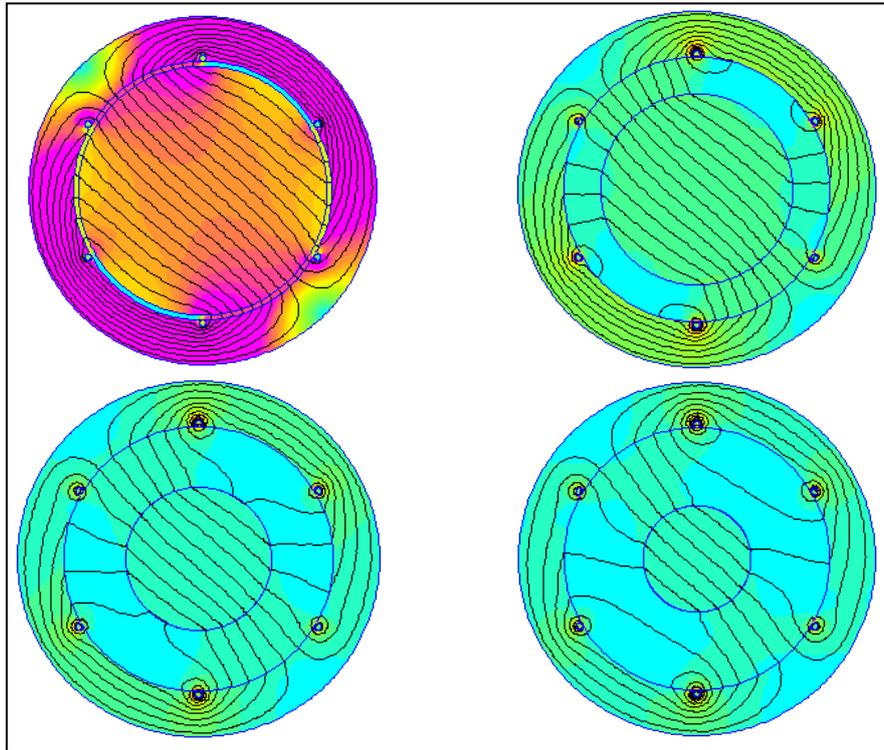


Figura 90. Distribución de inducción magnética para distintos espesores de entrehierro

Se observa como un aumento del entrehierro perjudica notablemente el flujo magnético, afectando más cuanto menor sea este originalmente.

5.2.3. Ranuras

Como se vio en el capítulo anterior, la forma de las ranuras tiene una importancia notable en las dispersiones de flujo. En programa realizado permite construir diferentes geometrías, en función de varios parámetros.

Las ranuras la componen tres grandes espacios:

- Contorno exterior
- Mazo de cables (contorno interior)
- Elementos no magnéticos (Aislamiento eléctrico exterior, cuña, separación del entrehierro)

Por sencillez, el aislamiento entre el mazo y la pared de la ranura, es simplemente un espacio de aire. A efectos cualitativos y cuantitativos de campo magnético es una solución adecuada. Al igual ocurre con la cuña, que no se representa ni se separa el espacio que ocupa, ya que supone introducir innecesariamente puntos en el mallado.

En ensayos preliminares se han manejado geometrías sencillas tales como círculos o rectángulos, sin introducir aislamientos ni redondear las esquinas. Para las

simulaciones finales se han contemplado los siguientes tipos de ranuras en función de la geometría de sus secciones:

- Bobinado circular con ranura rectangular:

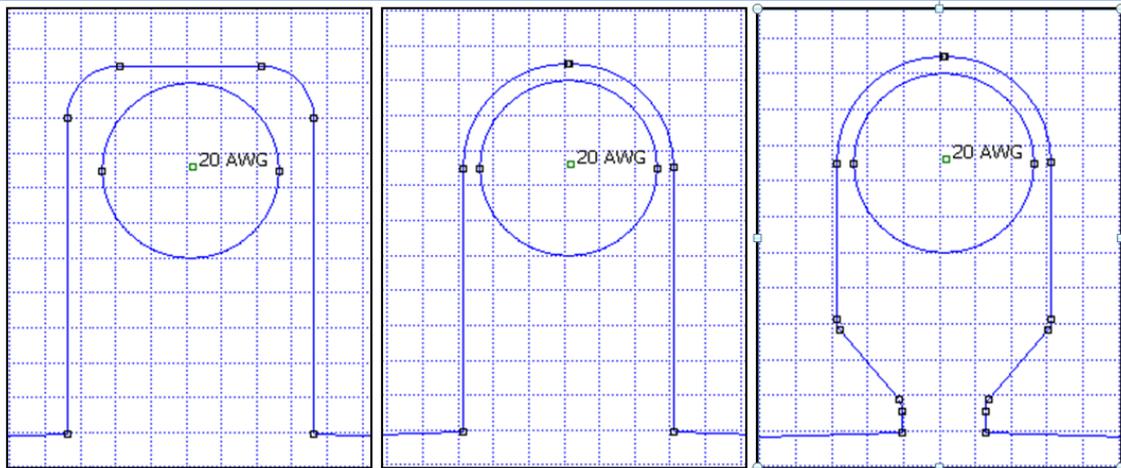


Figura 91. Diferentes configuraciones de ranuras de bobinado circular.

- Bobinado trapecoidal:

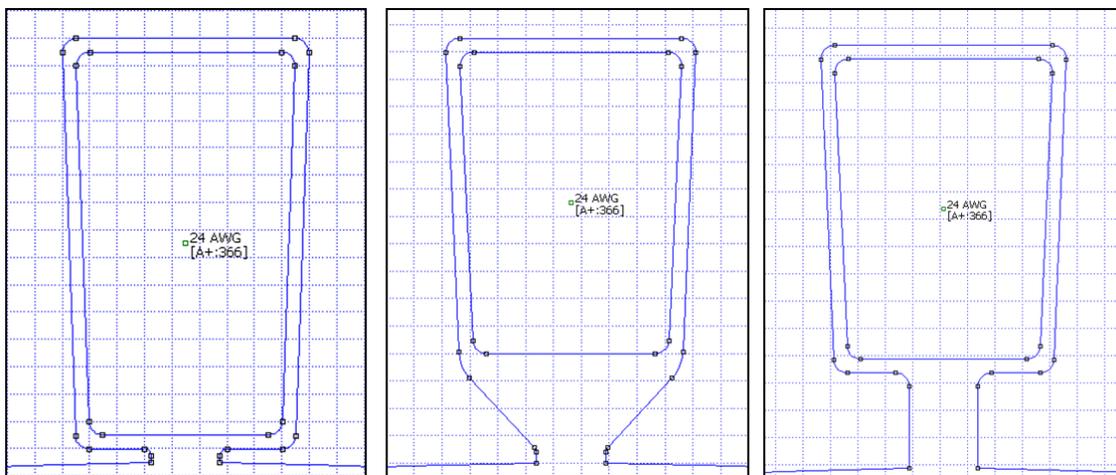


Figura 92. Diferentes configuraciones de ranuras trapecoidales

- Bobinado rectangular:

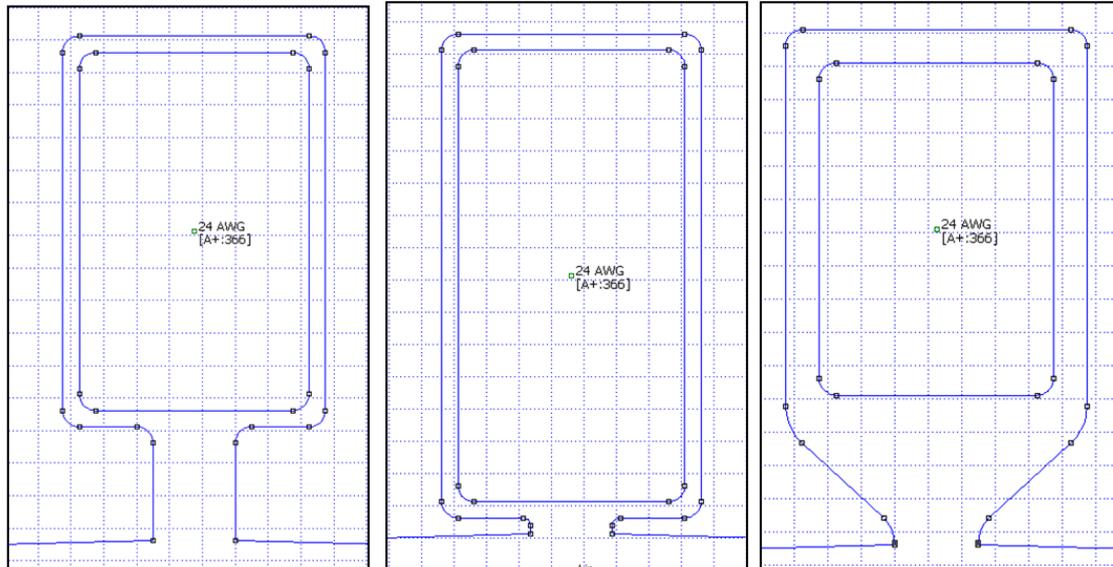


Figura 93. Diferentes configuraciones de ranuras rectangulares

De todas las posibles configuraciones hemos escogido la siguiente:

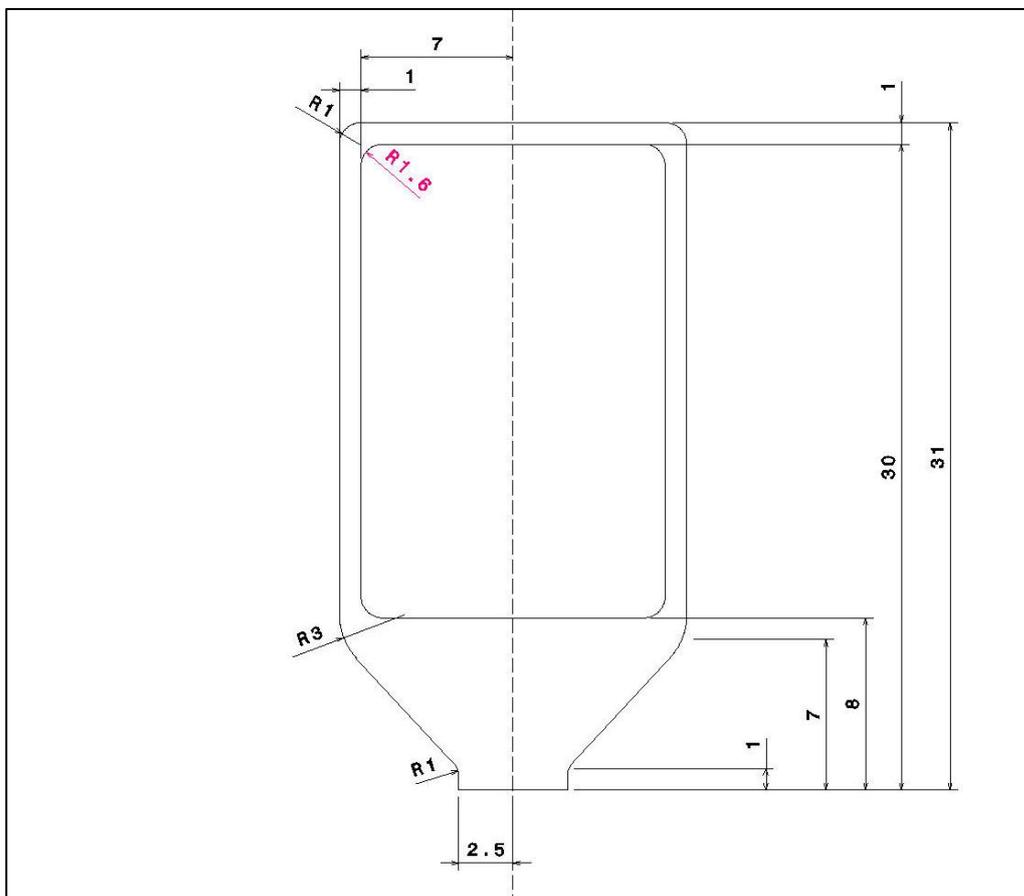


Figura 94. Geometría de la ranura de simulación en mm. Obtenida de CATIA v5

El radio interior está aproximado. Realmente se ha definido en función de otros parámetros de manera que el área interior, por donde va el devanado, sea de 300mm^2 . Es calculado según la fórmula:

$$r_{devanado} = \sqrt{\frac{(h_{devanda} \cdot b_{devando}) - 300}{\pi}} \cong 1,5957 \quad (5.2.3- 1)$$

5.2.4. Circuitos y cableado

En el capítulo 3.1.2 *Interfaz* se describía la asignación de circuitos en *FEMM 4.2*. Para obtener resultados cuantitativos, pero incluso para obtener valores cualitativos cercanos a la realidad, es importante realizar una asignación adecuada del calibre del cable y la intensidad que lo recorre.

Se ha escogido el Cobre como material del cableado. Para este material el programa oferta los calibres de normativa americana *AWG* desde el 10 hasta el 32.

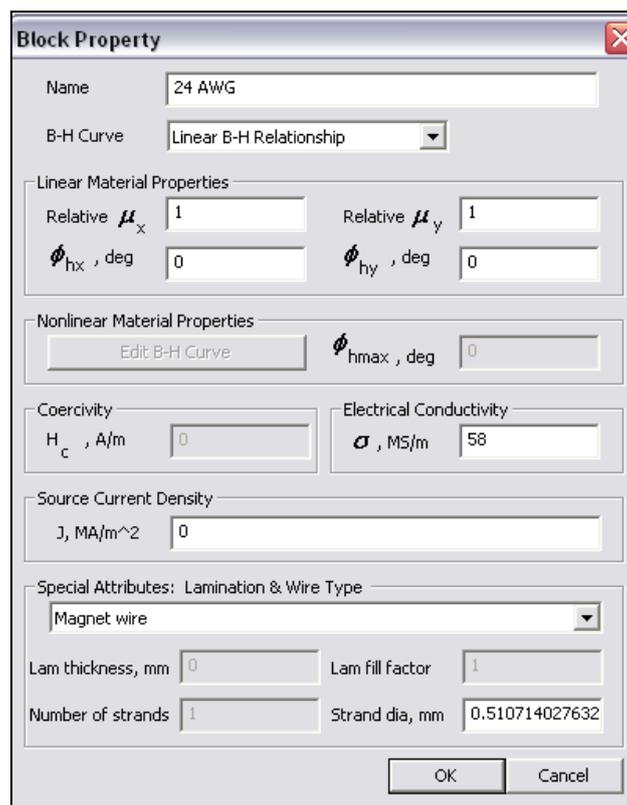


Figura 95. Propiedades magnéticas de Cobre calibre AWG 24

En primer lugar se ha elaborado una tabla con las propiedades de las posibles opciones basándonos en las normativas vigentes de *AWG*:

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

AWG	Diámetro [mils]	Diámetro [mm]	Resistencia [Ω /mm]	Tasa de Intensidad [A]	Máxima Intensidad [A]
10	101.90000	2.58810	3.28E-06	13.84400	20.76500
12	80.80700	2.05250	5.21E-06	8.70640	13.06000
14	64.08300	1.62770	8.29E-06	5.47550	8.21320
16	50.82000	1.29080	1.32E-05	3.44360	5.16540
18	40.30200	1.02370	2.09E-05	2.16570	3.24850
20	31.96100	0.81180	3.33E-05	1.36200	2.04300
22	25.34600	0.64380	5.30E-05	0.85660	1.28490
24	20.10100	0.51060	8.42E-05	0.53870	0.80810
26	15.94000	0.40490	1.34E-04	0.33880	0.50820
28	12.64100	0.32110	2.13E-04	0.21310	0.31960
30	10.02500	0.25460	3.39E-04	0.13400	0.20100
32	7.95030	0.20190	5.38E-04	0.08430	0.12640

A continuación se estudian las propiedades geométricas de los diferentes calibres en motor que se modela. Para un área determinada solo pueden pasar un número máximo de alambres. Se estima ese número dividiendo el área de bobinado, que se ha definido, entre el área de la sección del calibre y se aproxima al entero menor, para compensar en cierta medida los aislamientos con resinas de los cables.

Además se estima la longitud de una espira correspondiente a una fase, es decir, el perímetro interior del estator más dos veces la profundidad definida en el problema. Con esta longitud se puede calcular la resistencia eléctrica de una espira.

AWG	Longitud de una espira [mm]	Sección del alambre [mm ²]	Resistencia eléctrica espira [Ω]	Área de cableado en la ranura [mm ²]	Número de alambres por ranura	Intensidad total en la ranura [A]
10	2248.88889	21.04321	0.00737	300.0	14	193.81600
12	2248.88889	13.23476	0.01172	300.0	22	191.54080
14	2248.88889	8.32336	0.01863	300.0	36	197.11800
16	2248.88889	5.23441	0.02963	300.0	57	196.28520
18	2248.88889	3.29227	0.04711	300.0	91	197.07870
20	2248.88889	2.07037	0.07491	300.0	144	196.12800
22	2248.88889	1.30212	0.11911	300.0	230	197.01800
24	2248.88889	0.81905	0.18939	300.0	366	197.16420
26	2248.88889	0.51505	0.30114	300.0	582	197.18160
28	2248.88889	0.32391	0.47883	300.0	926	197.33060
30	2248.88889	0.20364	0.76136	300.0	1473	197.38200
32	2248.88889	0.12806	1.21062	300.0	2342	197.43060

Se observa como la intensidad total de la ranura es muy parecida para todos los calibres (hay que considerar que se ha aproximado el número de alambres). Sin embargo, es común que el control de un motor se realice a través del voltaje entre los bornes, es decir, en función de la tensión de línea. Así pues se estudia cuantas espiras (vueltas) son necesarias, siendo la intensidad de línea igual la tasa de intensidad, para alcanzar una tensión de línea determinada. Sabiendo el número de espiras necesario y

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

teniendo en cuenta que cada espira atraviesa dos ranuras, podemos calcular las ranuras necesarias por fase:

AWG	Tasa de Intensidad [A]	Tensión de línea [V]	Resistencia eléctrica espira [Ω]	Número de alambres por ranura	Número de espiras necesarias	Número de ranuras necesarias	Intensidad total en la ranura [A]
10	13.84400	220.00000	0.00737	14	2157.00000	309.00000	193.81600
12	8.70640	220.00000	0.01172	22	2157.00000	197.00000	191.54080
14	5.47550	220.00000	0.01863	36	2157.00000	120.00000	197.11800
16	3.44360	220.00000	0.02963	57	2157.00000	76.00000	196.28520
18	2.16570	220.00000	0.04711	91	2157.00000	48.00000	197.07870
20	1.36200	220.00000	0.07491	144	2157.00000	30.00000	196.12800
22	0.85660	220.00000	0.11911	230	2157.00000	19.00000	197.01800
24	0.53870	220.00000	0.18939	366	2157.00000	12.00000	197.16420
26	0.33880	220.00000	0.30114	582	2157.00000	8.00000	197.18160
28	0.21310	220.00000	0.47883	926	2157.00000	5.00000	197.33060
30	0.13400	220.00000	0.76136	1473	2157.00000	3.00000	197.38200
32	0.08430	220.00000	1.21062	2342	2156.00000	2.00000	197.43060

Existen múltiples soluciones de diseño, pero se ha optado por una solución que no implicase más de 36 ranuras en total, es decir, 12 por fase. Se aceptaban soluciones menores pero no mayores. Otra forma de proceder hubiese sido fijar las ranuras. Se ha optado por la primera forma seleccionando:

- *Cu* AWG 24, 366 vueltas por ranura e intensidad de línea 0.53870 Amperios

5.2.5. Simulación y resultados

Se ha simulado el comportamiento del estator sobre el rotor sin los imanes, para obtener y evaluar las propiedades magnéticas del estator. Las características geométricas y eléctricas son:

Radio Exterior Estator	450 mm
Radio Interior Estator	300 mm
Profundidad	180 mm
Entrehierro (sin imanes)	≈65 mm
Radio interior rotor	100 mm
Pares de polos	1
Ranuras por fase	12
Alambres por ranura	366
Intensidad por alambre	0.5387 A
Alambre	Cu AGW 24
Cuerpo Magnético	Hierro Puro

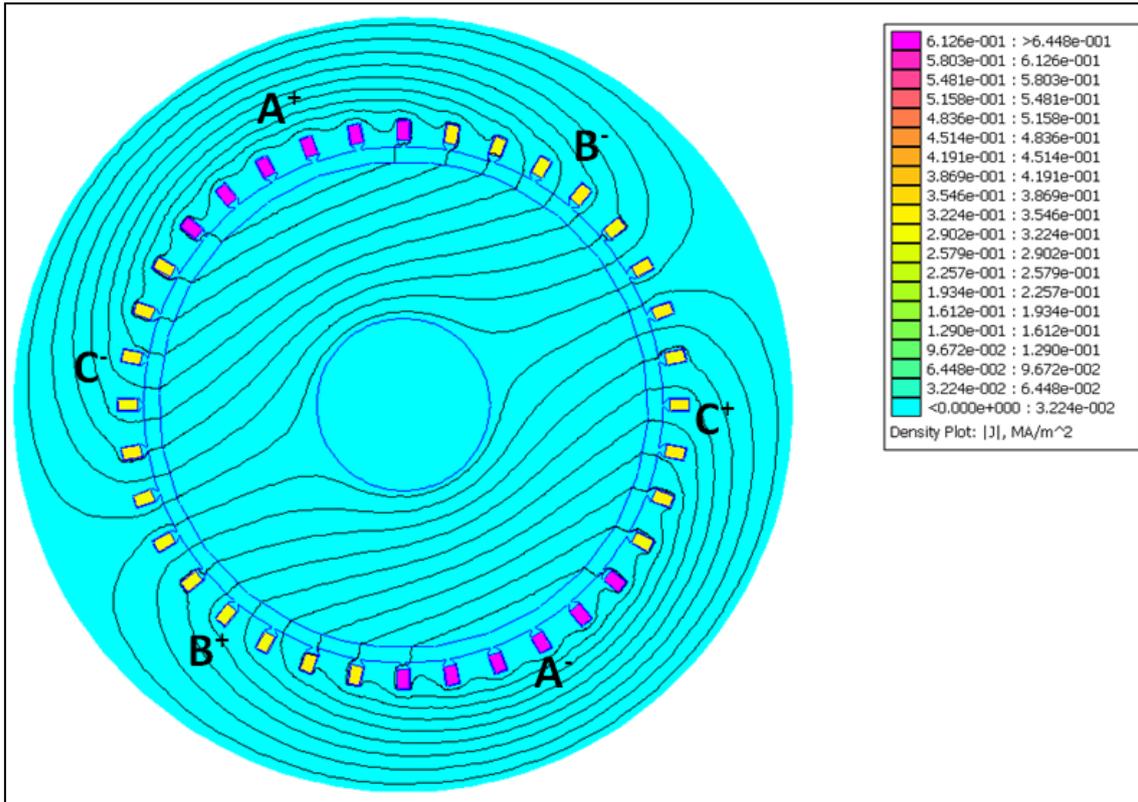


Figura 96. Densidad de corriente y líneas de inducción magnética. La fase A está en amplitud máxima

Por la asignación de los circuitos y el estado fasorial en el que se han definido, como se observa en la figura anterior, el campo magnético generado por el estator tiene las siguientes características, integrando en el cuerpo rotórico (de hierro puro):

B_x	0.00328894 [T·m ³]
B_y	0.00154256 [T·m ³]
$ B $	0.00363271 [T·m ³]
θ	25,127 [°]
I_A	0.5387 [A]
I_B	-0.26935 [A]
I_C	0.26935 [A]

Se genera un campo magnético tal como se ha desarrollado en capítulos anteriores. La densidad de campo magnético generada no supera en ningún momento los valores de saturación del estator que, como se ha dicho previamente, se aproxima en 2,15 T, como se puede ver en la representación de la densidad de campo magnético:

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

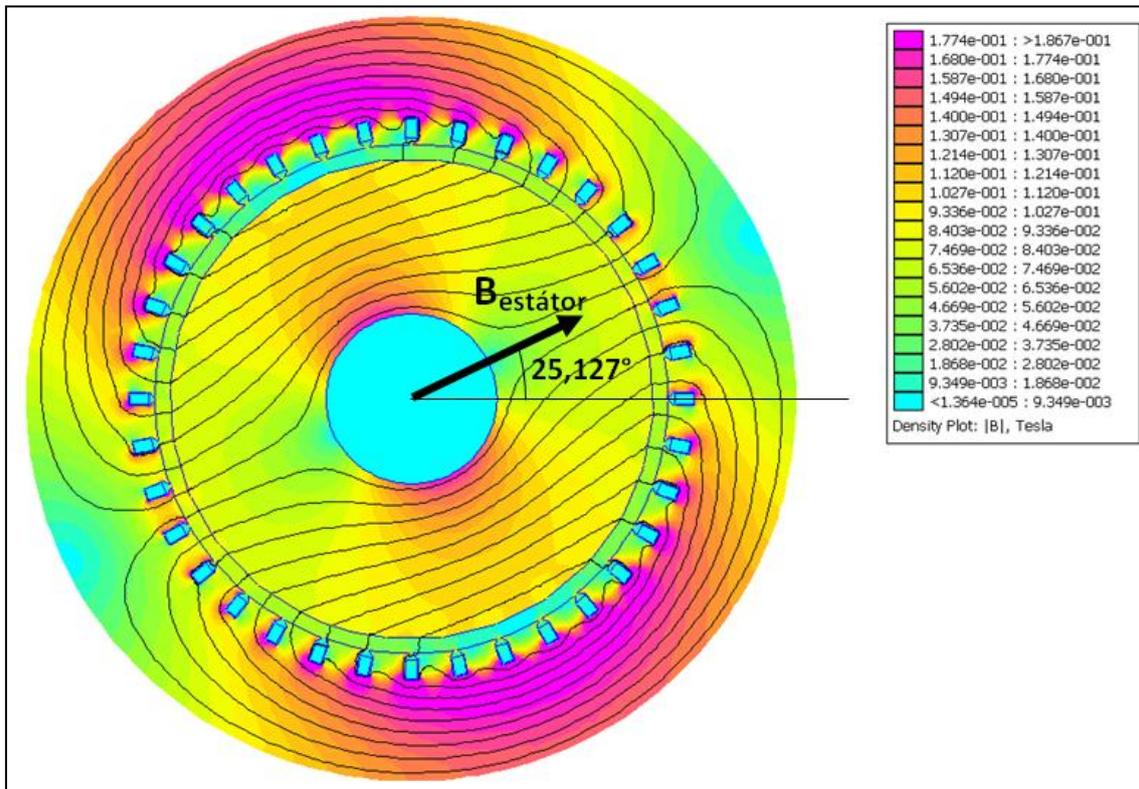


Figura 97. Inducción magnética inducida por corrientes estáticas

A continuación se exponen gráficas correspondientes a distribuciones de densidad de campo y de flujo magnético para diferentes áreas.

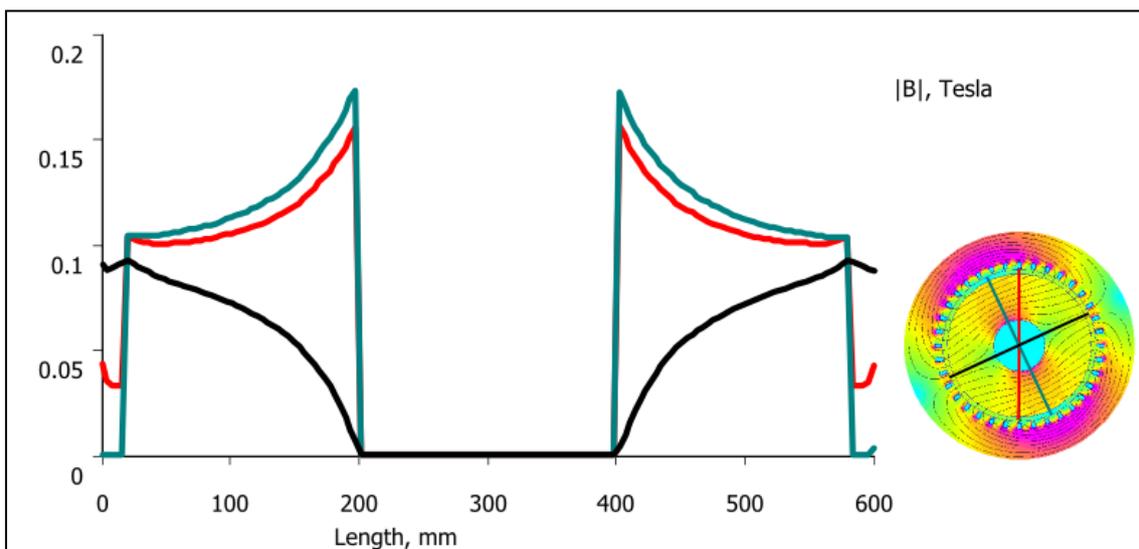


Figura 98. Densidad de corriente a lo largo de tres superficies diferentes: (roja) Entre ranuras de la Fase A, (aguamarina) perpendicular al campo, (negro) en línea con el campo

En las tres superficies analizadas, que excluyen el estator, podemos observar como el valor drásticamente cambia a prácticamente cero en el centro del rotor donde

no hay material ferromagnético. Este resultado es coherente, como también lo es que sea la superficie perpendicular al campo la que presente el mayor valor de densidad de corriente, al concentrarse este alrededor del hueco del eje. Este comportamiento se asemeja al de un concentrador de tensiones en forma de orificio. Se observa pues que orificios internos en el rotor provocan concentraciones de campo magnético sobre ellos en la dirección perpendicular del campo.

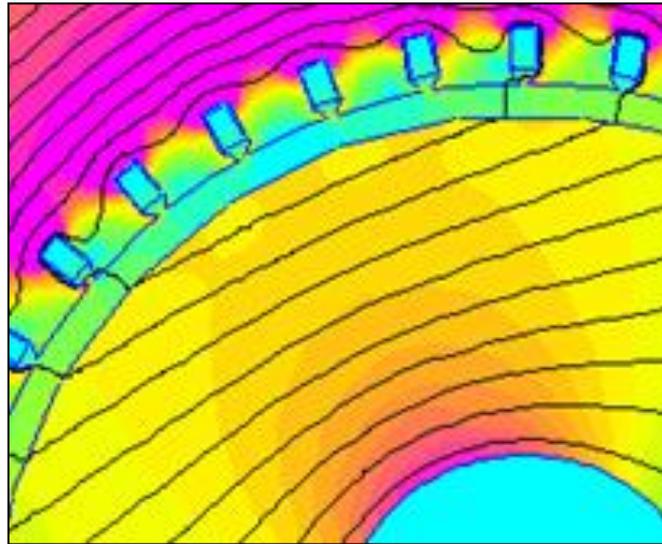


Figura 99. Detalle de la concentración de inducción magnética en el rotor

Cabe destacar también, la caída de densidad magnética en el entrehierro conforme la superficie es más perpendicular. De hecho, en el caso perpendicular no hay líneas de corrientes que atraviesen el entrehierro y, en el caso alineado, el valor de densidad magnética es la más elevada. Es debido a que en el primer caso las líneas de campo son paralelas a la superficie del rotor y en el segundo son perpendiculares aunque, como se observa, se concentran más en cerca del entrehierro y se dispersan para “rodear” el orificio central.

A continuación se representa la distribución de flujo que atraviesa las mismas superficies.

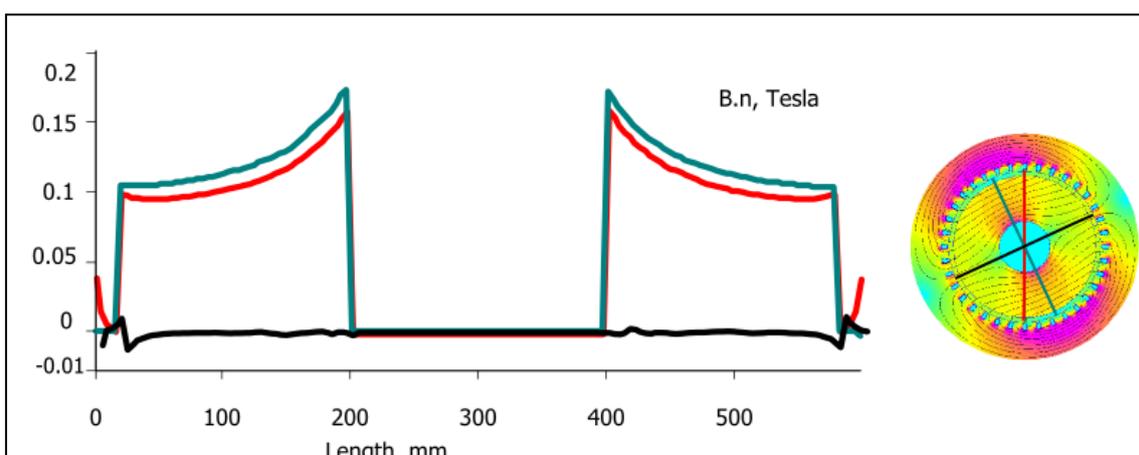


Figura 100. Distribución de flujo magnético expresado en tesla por unidad de superficie

Se tiene un comportamiento similar, aunque al intervenir el ángulo de incidencia de las líneas de campo, observamos como la superficie alineada con el flujo, salvo ínfimas oscilaciones, es prácticamente nula. Se observa como hay un repunte en

la superficie roja al llegar al estator, propia de las dispersiones de flujo entre ranuras y entrehierro.

5.3. Rotor

5.3.1. Geometría del cuerpo rotórico

Como se planteó en la *Figura 75. Configuraciones básicas de las máquinas rotativas* hay varias configuraciones para el cuerpo rotórico. Partiendo de la base de que es necesario un eje de giro, se han considerado dos configuraciones principalmente:

- Rotor cilíndrico con espesor y brazos en dirección radial

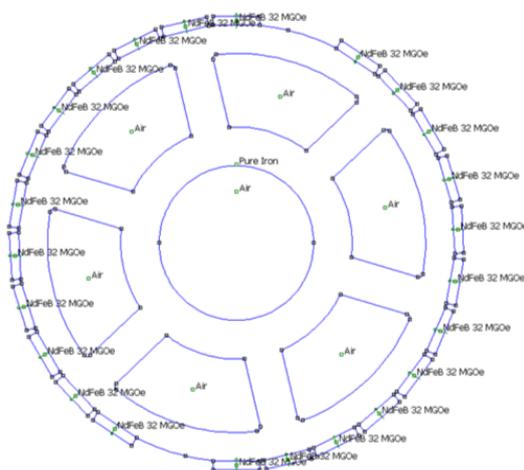


Figura 101. Rotor de 6 brazos y espesor de 50 mm

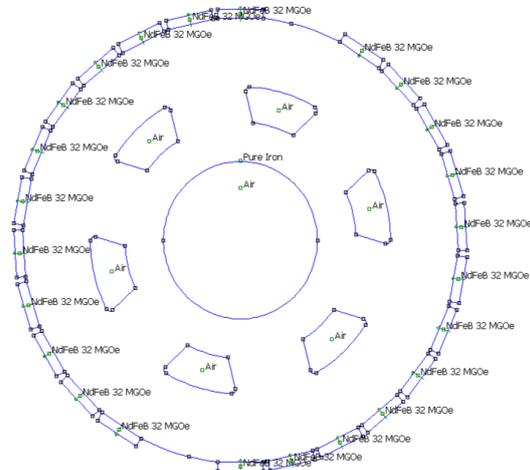


Figura 102. Rotor de 6 brazos y espesor 100 mm

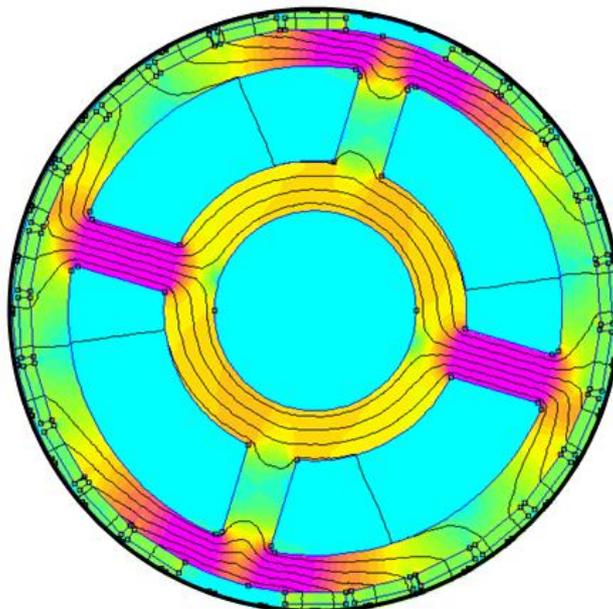


Figura 103. Entrehierro, imanes rectangulares en la superficie y rotor de cuatro brazos para un par de polos

Este modelo genera mayores concentraciones de campo en el rotor. Desde un punto de vista computacional, aumenta notablemente la cantidad de elementos del mallado.

- Rotor cilíndrico

Es interesante desde un punto de vista de análisis cualitativo porque es la geometría que menos perturba la uniformidad del campo.

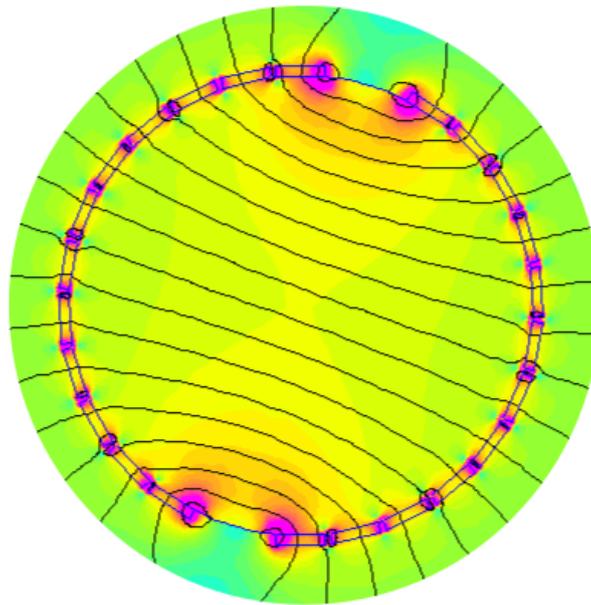


Figura 104. Rotor cilíndrico con 2 polos de imanes superficiales

No tiene en cuenta el eje mecánico de rotación, por eso es descartado en análisis posteriores.

- Rotor cilíndrico con radio interior

Este modelo es el elegido para realizar los análisis. Es realista y por su sencillez y porque en el caso de un solo polo magnético con las dimensiones de motor escogidas, sería innecesario elegir el modelo de brazos radiales.

5.3.2. Disposición de imanes

Respecto a la disposición de imanes han sido barajadas varias opciones:

- Incrustados en la superficie
 - Definiendo la separación entre ellos.

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

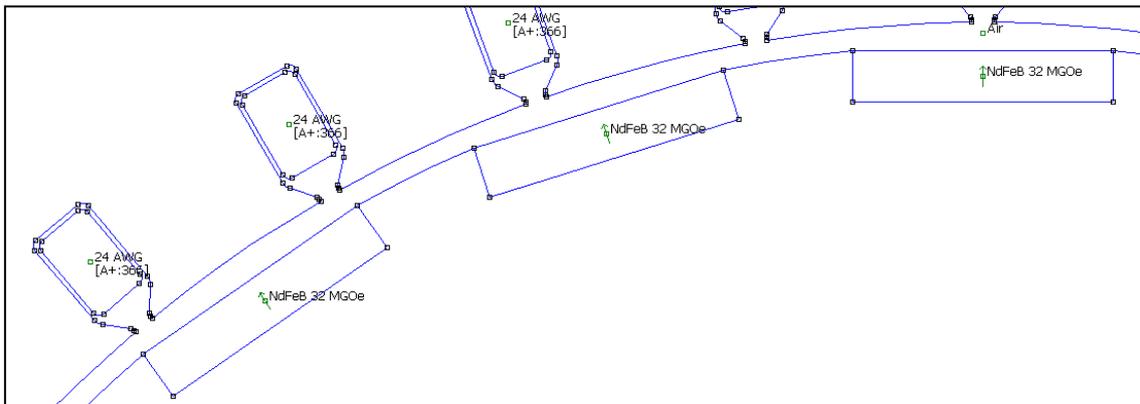


Figura 105. Imanes embebidos en la superficie del rotor. La separación entre ellos está definida por un parámetro

- Definiendo la separación entre ellos y sin material rotórico entre ellos.

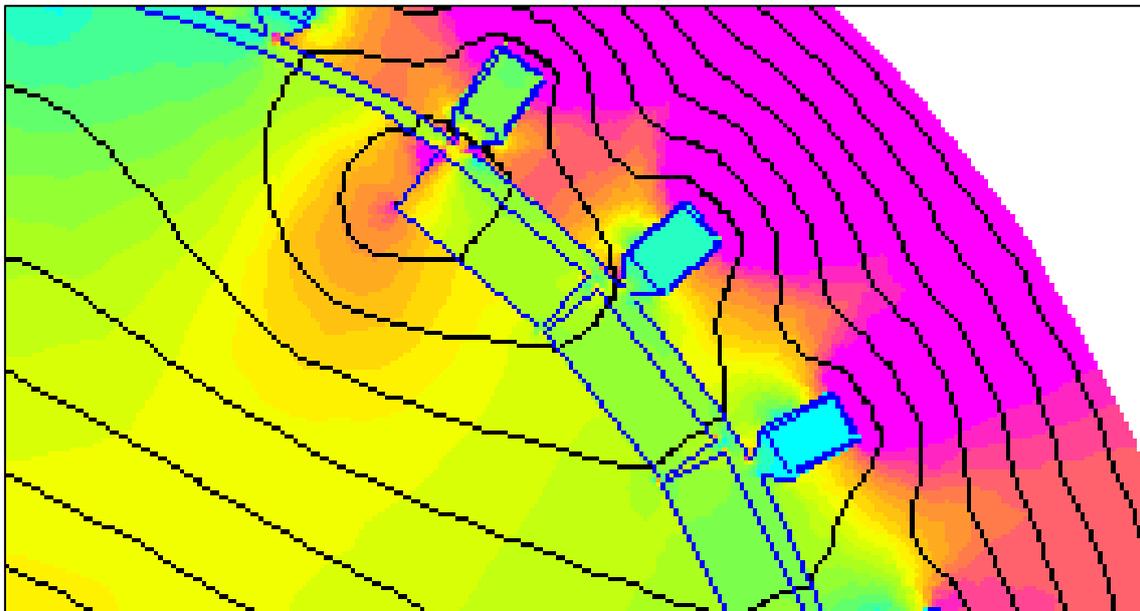


Figura 106. Imanes incrustados en la superficie, con separación interior. Obsérvese la concentración de campo magnético en el último imán del polo

- En forma de arco de circunferencia, con arco variable.

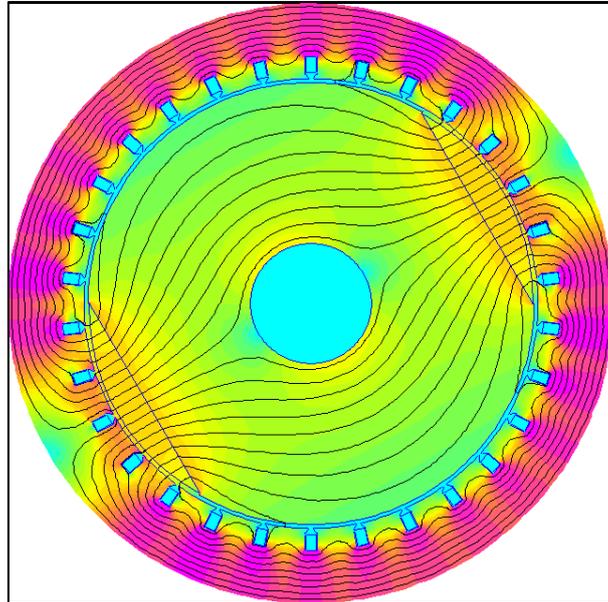


Figura 107. Simulación del campo generado por un rotor con dos polos de imanes en forma de arco

Hay que destacar que este tipo de configuración, al intraducirles una pequeña variación del arco, se contribuye a unificar el flujo y a disminuir las dispersiones en el entrehierro

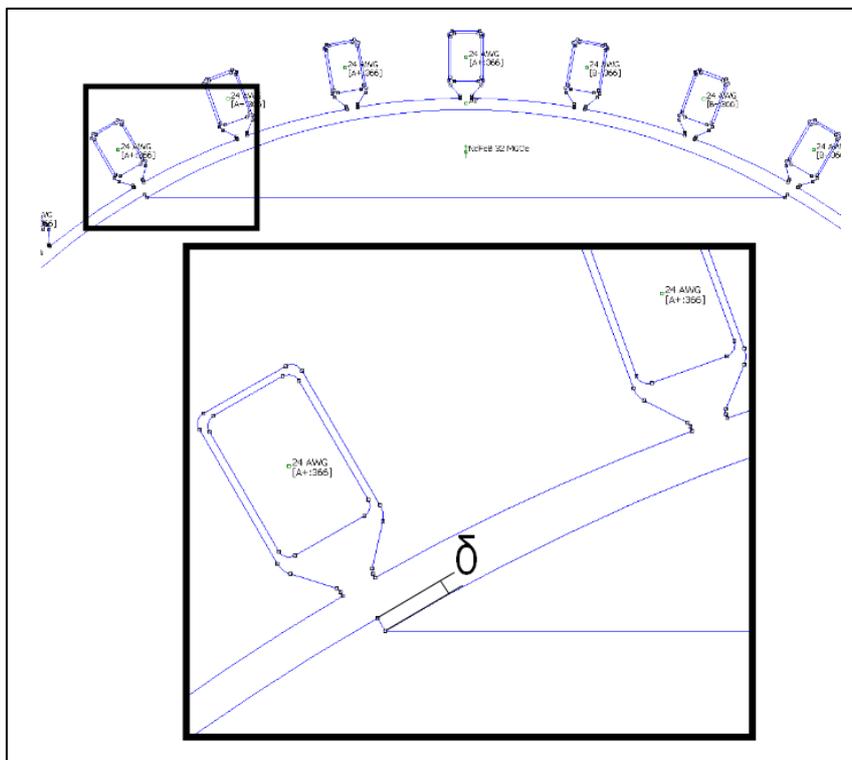


Figura 108. Polo de un solo imán en forma de arco de circunferencia y detalle de la diferencia de arco

- Sobre la superficie

Con forma rectangular, definiendo un espacio entre polos, y distribuyendo el número de imanes de polos en el espacio restante. Se ha escogido este porque normalmente es fácil de construir, al no ser necesario mecanizar el rotor, ya que simplemente consiste en ir colocando los imanes sobre un rotor cilíndrico dejando un espacio entre polos, con adhesivo.

Si es cierto que no se ha modelado la geometría de los imanes en detalle. Este es un factor de diseño relevante, pero no ha sido contemplado en este estudio.

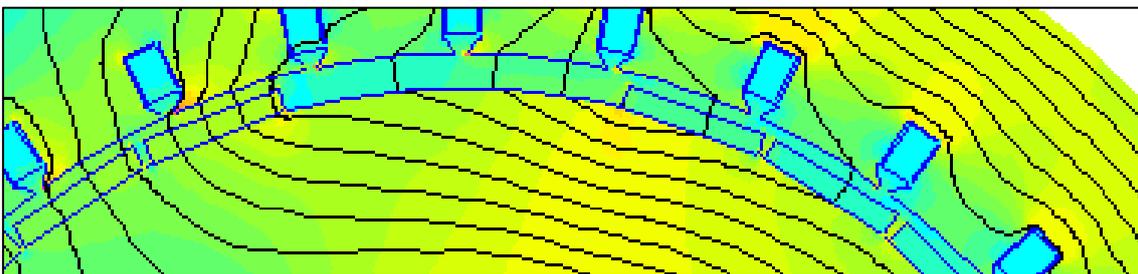


Figura 109. Detalle de imanes sobre superficie: separación entre polos

5.3.3. Simulación y Resultados

Se ha simulado el comportamiento del rotor dentro del estator del apartado anterior, pero sin que circulen corrientes por el devanado estático. Se pretende evaluar las propiedades magnéticas del rotor. Las características geométricas, eléctricas y los materiales son:

Radio Exterior Estator	450 mm
Radio Interior Estator	300 mm
Profundidad	180 mm
Radio interior rotor	100 mm
Pares de polos	1
Ranuras por fase	12
Alambres por ranura	366
Intensidad por alambre	0 A
Alambre	Cu AGW 24
Cuerpo Magnético	Hierro Puro

Ancho imanes	60 mm
Altura Imanes	12 mm
Profundidad	180 mm
Entrehierro (con imanes)	5 mm
Radio interior rotor	100 mm
Pares de polos	1
Imanes por polo	12
Angulo entre polos	15°
Imán	NdFeB 32 MGOe
Cuerpo Magnético	Hierro Puro

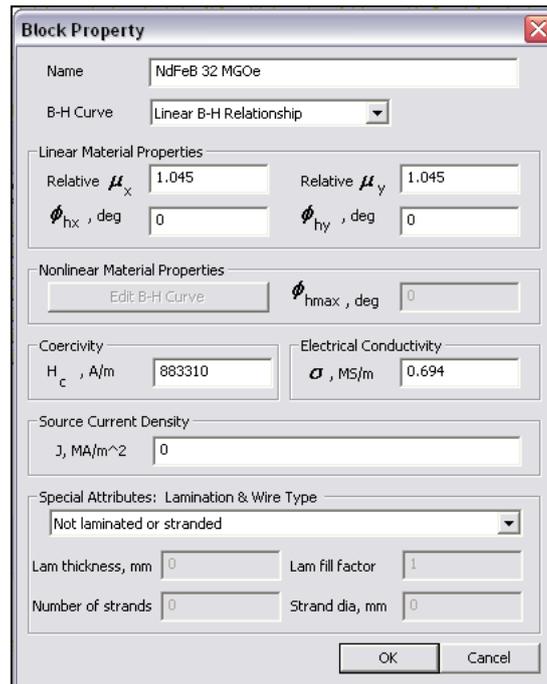


Figura 110. Propiedades del NdFeB 32 MGOe

Por la asignación de los imanes, su tamaño, su número, configuración y distribución, el campo magnético generado por el rotor tiene las siguientes características integrando en el cuerpo rotórico (de hierro puro):

B_x	-0.0333046 [T·m ³]
B_y	0.00993241 [T·m ³]
$ B $	0.034754124 [T·m ³]
θ	163.3938739 [°]

El campo magnético generado fluye por rotor y estator sin superar la inducción magnética de saturación del hierro. Se concentra en las zonas perpendiculares al campo en el estator principalmente, lo cual es significativo porque el diseño del rotor afectará a las decisiones acerca del espesor del estator.

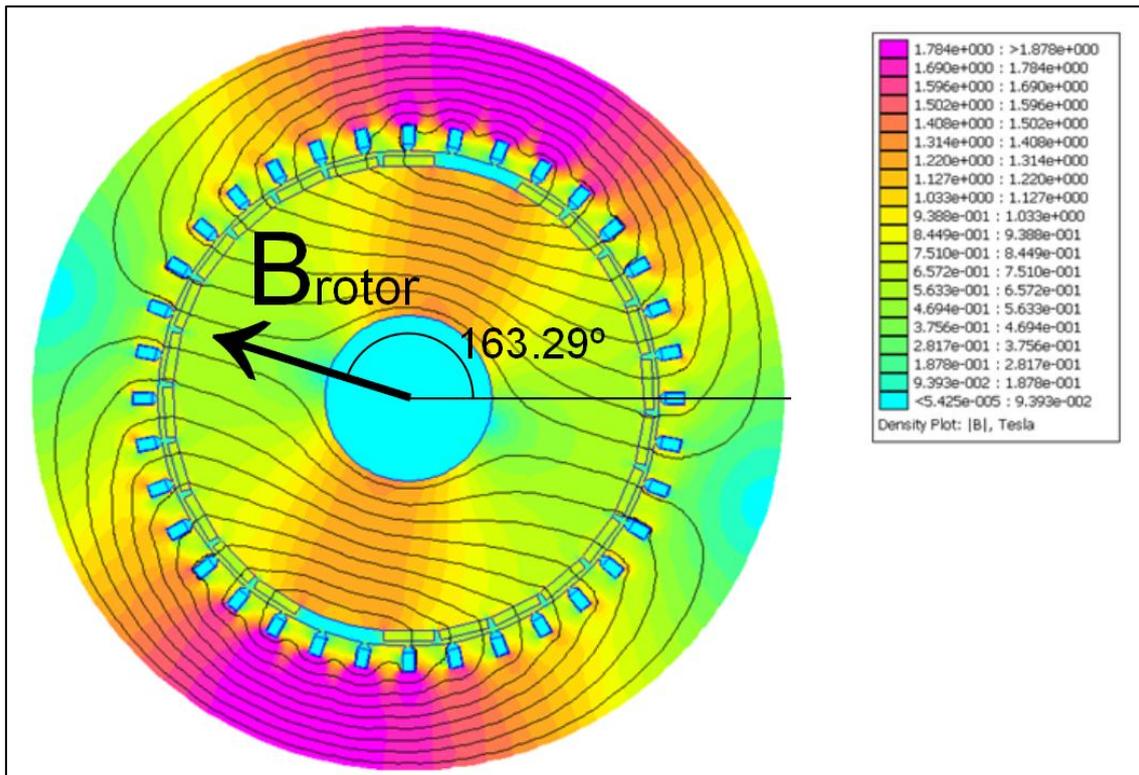


Figura 111. Inducción magnética generada por un par de polos de imanes permanentes

En la dirección transversal se incrementa notablemente la densidad de campo. Esto se debe a dos causas principales. Una de ellas, la reducción del volumen por la presencia del orificio central. Otra es el mayor número de líneas de campo, ya que las líneas de campo que se generan en los imanes más cercanos a los extremos de los polos, se cierran antes. Es decir, conforme nos acercamos al centro del polo, las líneas de campo de los imanes centrales se distribuyen en mayor volumen de estator y rotor. En la imagen siguiente se muestra este fenómeno. Destacar como cualitativamente se observan líneas de campo que unen los imanes de cada polo, y cerca del extremo estas líneas se cierran rápidamente (son curvas más cortas).

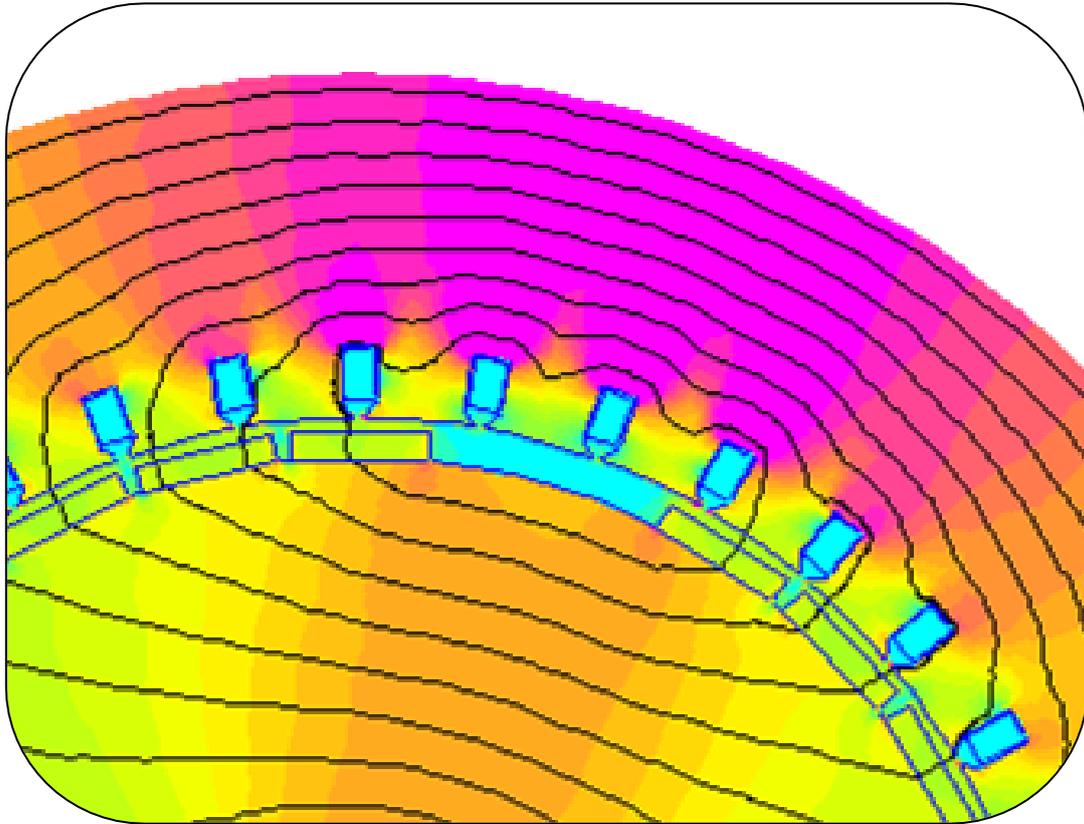


Figura 112. Detalle sobre la distribución de líneas de campo

A continuación se exponen gráficas correspondientes a distribuciones de densidad de campo y de flujo magnético para diferentes áreas.

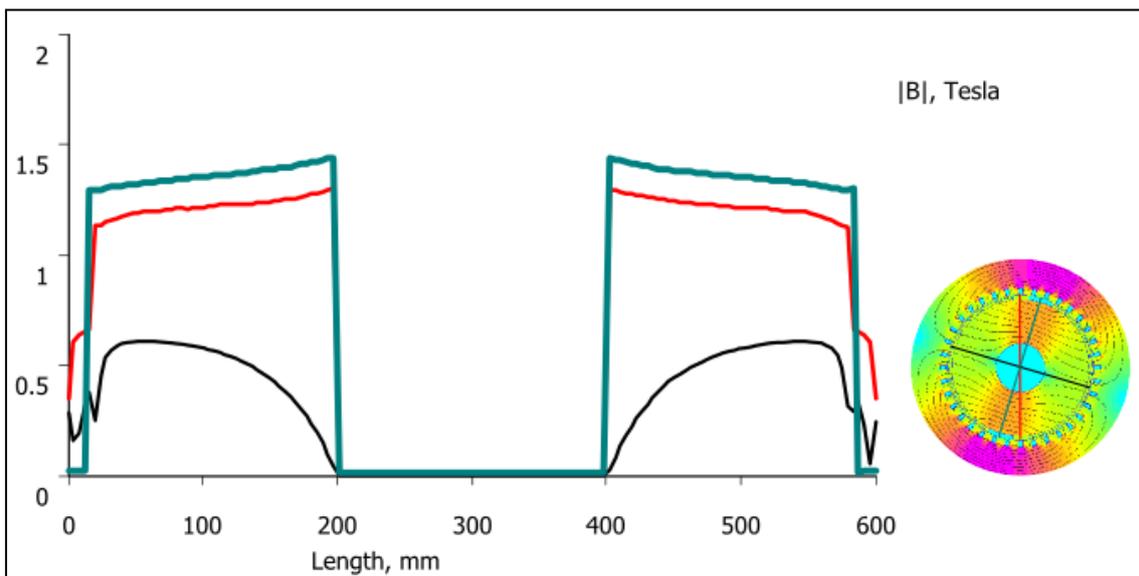


Figura 113. Densidad de corriente a lo largo de tres superficies diferentes: (roja) Entre ranuras de la Fase A, (azul) perpendicular al campo, (negro) en línea con el campo

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

Al igual que en el caso del estator, el campo generado es prácticamente nulo en el interior del rotor, en la zona que no hay material magnético. Coherentemente se observa como los máximos valores de densidad magnética se encuentran en los bordes del agujero del eje, para la dirección transversal al campo generado. La evolución en el entrehierro es variable, pero se comporta similarmente al caso del estator.

Un hecho destacable es que el rotor genera un campo más uniforme en el mismo rotor, que el que genera el estator. Esto se debe principalmente a que la distribución de imanes cubriendo casi la totalidad del perímetro, ayuda a la uniformidad del campo, pero como se señaló anteriormente, genera altas concentraciones de campo en el estator.

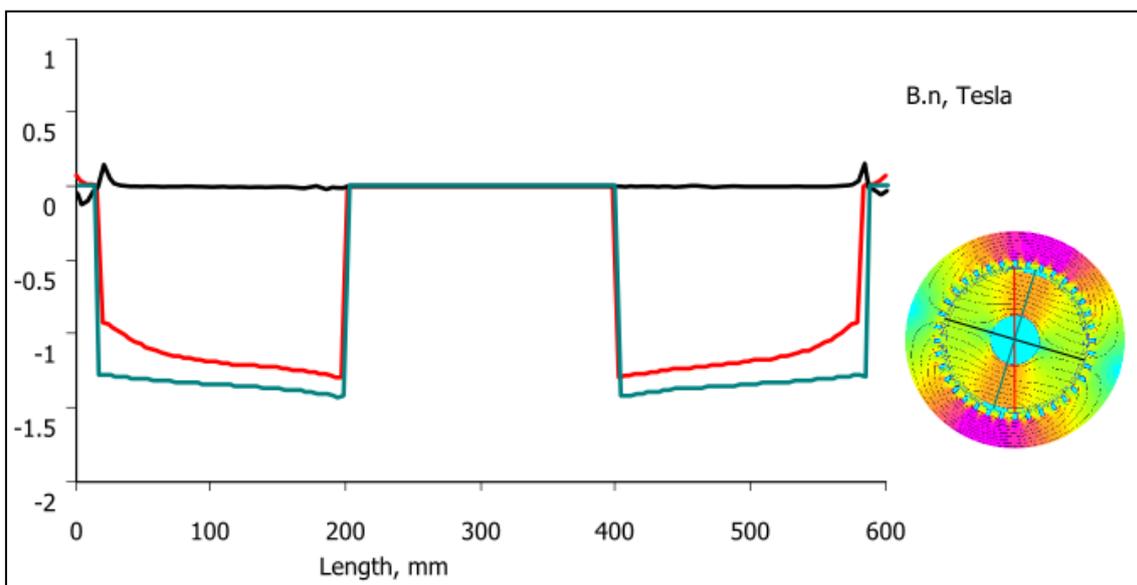


Figura 114. Distribución de flujo magnético para varias áreas

Respecto al flujo que atraviesa las superficies que se muestran en la figura, se observa un comportamiento similar al caso del estator. La principal diferencia, es que el flujo magnético tiene sentido opuesto, de ahí el resultado negativo. Este signo es una convención, y el programa interpreta esta dirección como la negativa. Coherentemente, el flujo en dirección del campo es prácticamente nulo y es máximo en la dirección perpendicular.

Cabe destacar que en el cuerpo rotórico el flujo es mucho más uniforme que en el caso del estator, aunque siga apareciendo un mayor flujo cerca del agujero por la concentración de densidad de flujo.

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

5.4. Máquina síncrona de imanes permanentes

5.4.1. Características

En este apartado, se han aunado el estator y el rotor. Se ha simulado el estator recorrido por una corriente, en las mismas condiciones que en su apartado correspondiente, y el rotor de imanes permanentes del apartado anterior. Se han realizado iteraciones manteniendo invariable el campo del estator y girando la geometría del rotor. El objetivo es analizar como se comporta el circuito magnético en función de las posiciones relativas de los campos. Se analizado un total de 120 puntos.

El modelo utilizado ha sido:

Radio Exterior Estator	450 mm
Radio Interior Estator	300 mm
Profundidad	180 mm
Radio interior rotor	100 mm
Pares de polos	1
Ranuras por fase	12
Alambres por ranura	366
Intensidad por alambre	0.5387 A
Alambre	Cu AGW 24
Cuerpo Magnético	Hierro Puro

Ancho imanes	60 mm
Altura Imanes	12 mm
Profundidad	180 mm
Entrehierro (con imanes)	5 mm
Radio interior rotor	100 mm
Pares de polos	1
Imanes por polo	12
Angulo entre polos	15°
Imán	NdFeB 32 MGOe
Cuerpo Magnético	Hierro Puro

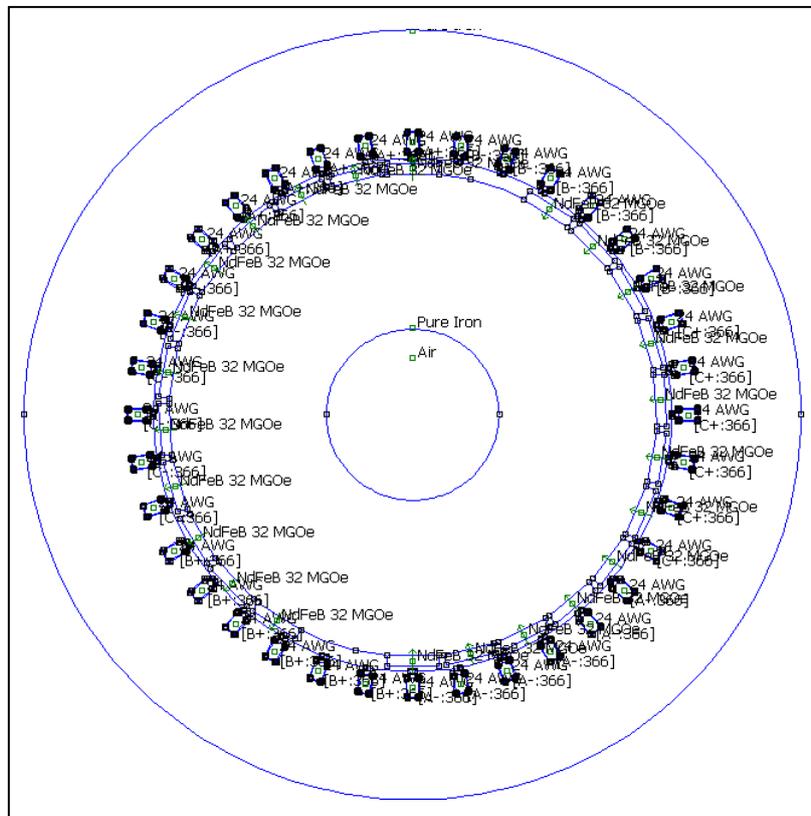


Figura 115. Modelado de la máquina en FEMM 4.2

5.4.2. Simulación

En cuanto a la densidad de corriente, siempre es la misma, y es idéntica al caso estudiado anteriormente. Esto es importante porque al ser un análisis estático, no se está teniendo en cuenta la *reacción de inducido*. En un análisis dinámico, aparecería este efecto.

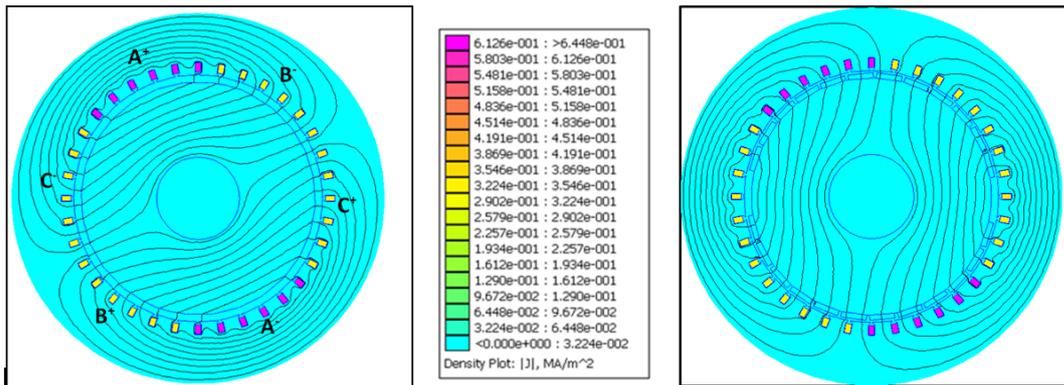


Figura 116. Densidad de corriente para distintas posiciones relativas del rotor

La distribución de campo magnético se observa en la figura siguiente:

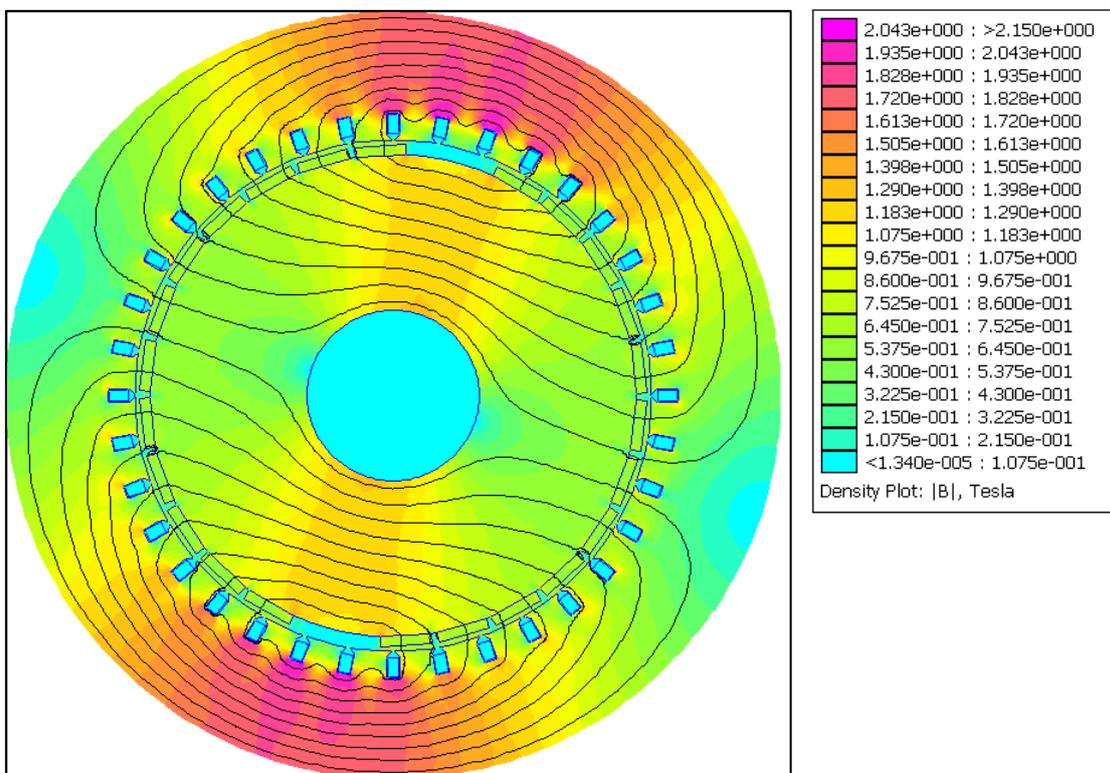


Figura 117. Distribución de campo magnético

Como se puede observar, el campo magnético por el rotor caracteriza el campo magnético general. Es también destacable la superposición de las densidades de

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

campo, obteniéndose mayores densidades de campo en las zonas del estator perpendicular al campo total. En la imagen se observa como se alcanzan densidades cercanas a la de saturación. En otras posiciones relativas, en algunos puntos, se superan.

Se han generado archivos *.gift* con las soluciones, aquí se muestran con ciertas imágenes la evolución de la simulación:

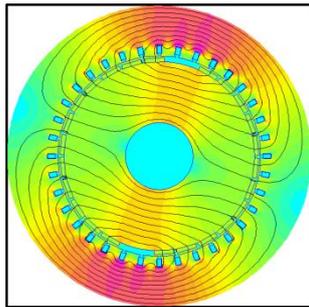


Figura 118. $\theta_{rotor}=166.4^\circ$

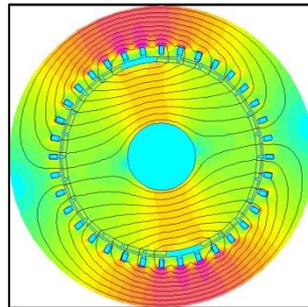


Figura 119. $\theta_{rotor}=190.4^\circ$

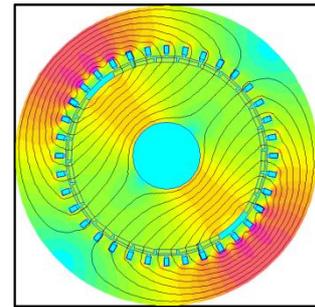


Figura 120. $\theta_{rotor}= 223.4^\circ$

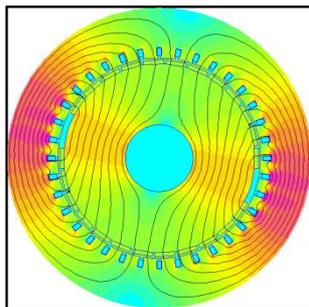


Figura 121. $\theta_{rotor}= 253.4^\circ$

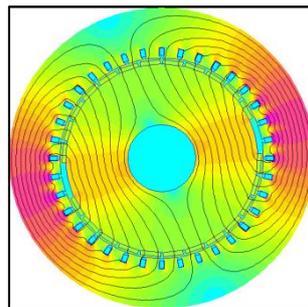


Figura 122. $\theta_{rotor}= 283.4^\circ$

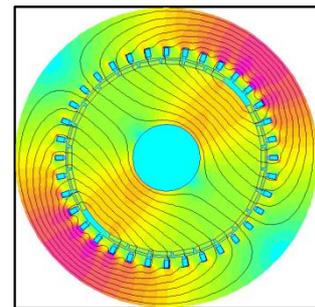


Figura 123. $\theta_{rotor}= 313.4^\circ$

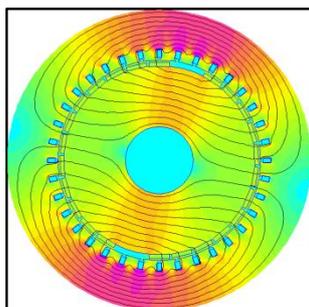


Figura 124. $\theta_{rotor}= 343.4^\circ$

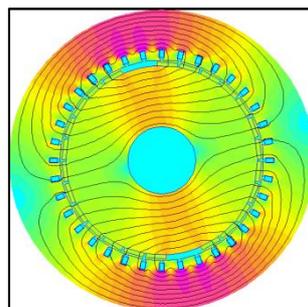


Figura 125. $\theta_{rotor}=13.4^\circ$

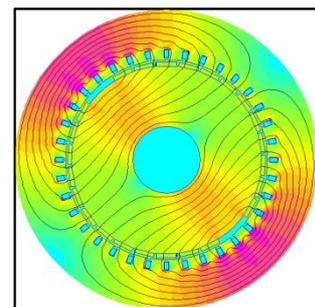


Figura 126. $\theta_{rotor}=43.4^\circ$

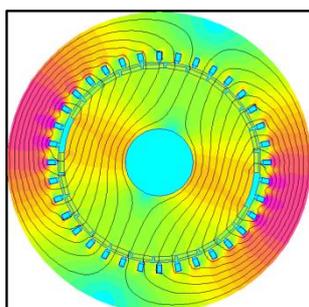


Figura 127. $\theta_{rotor}=73.4^\circ$

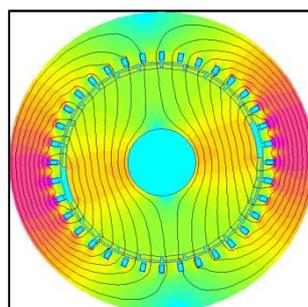


Figura 128. $\theta_{rotor}=103.4^\circ$

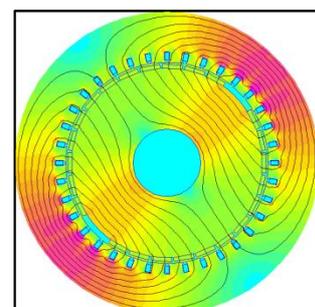


Figura 129. $\theta_{rotor}=133.4^\circ$

5.4.3. Resultados

Para cada instante de la simulación, han sido calculadas las mismas magnitudes. Al ser análisis estáticos, no se representa una evolución temporal real, pero podemos analizar el efecto de las posiciones relativas de rotor y estator en las magnitudes de la máquina, así como analizar sus valores máximos y mínimos.

- Flujo:

Se ha calculado el flujo magnético que atraviesa el área encerrada entre las primeras ranuras de la fase A.

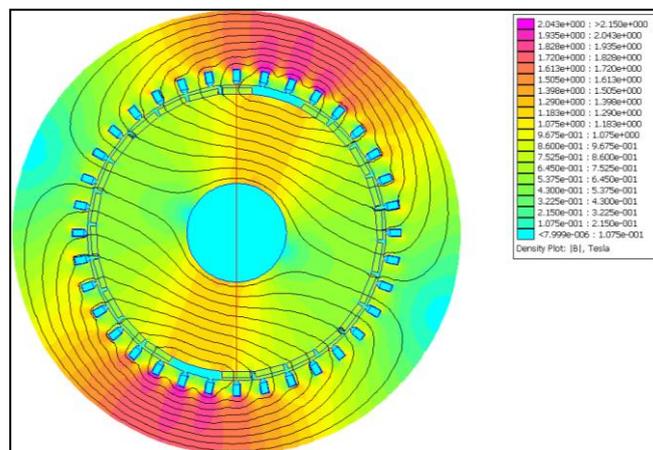


Figura 130. Contorno para integrales de superficie en la simulación

Los resultados de flujo obtenidos son:

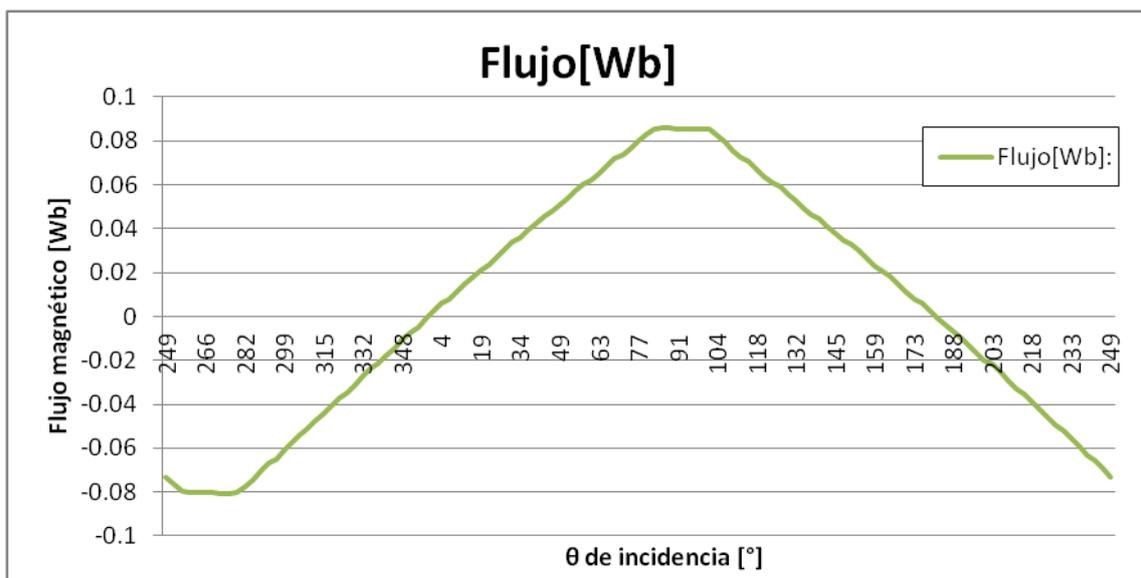


Figura 131. Flujo magnético frente a ángulo de incidencia de campo total

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

La evolución del flujo es prácticamente lineal, aunque existen pequeñas fluctuaciones que afectarían a otras magnitudes de manera más significativa. Se observa que hay dos picos (uno positivo y uno negativo) correspondiente a las posiciones en las que el campo atraviesa perpendicularmente. Un detalle importante es que estos picos son constantes en valores anteriores y posteriores. Esto es debido a que la concentración de campo es prácticamente constante. En el resto de puntos existe un acoplamiento entre campo magnético de rotor y estator en el que predomina el rotor.

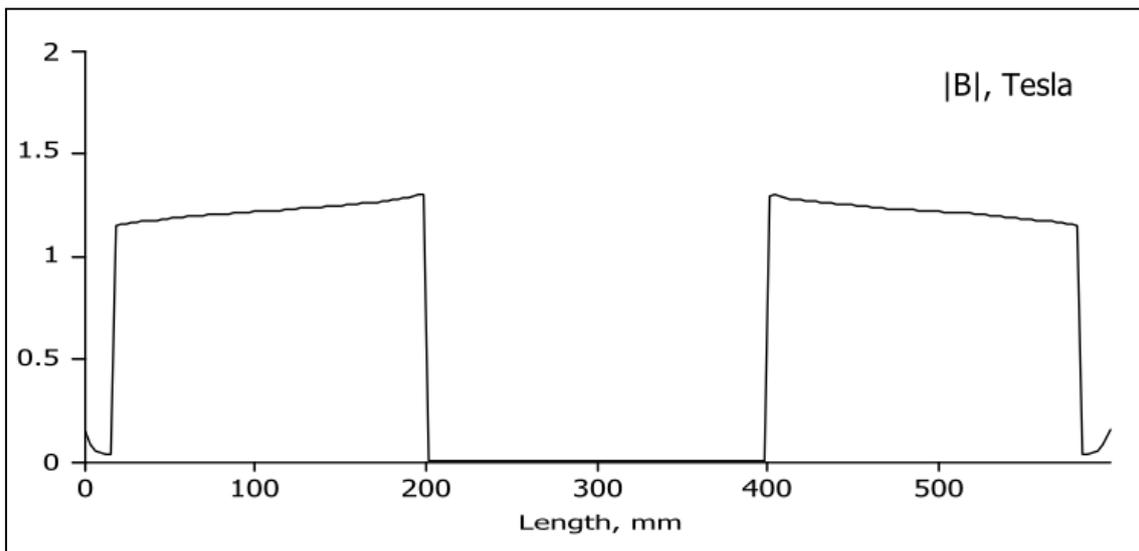


Figura 132. Distribución de campo magnético

- Inducción magnética, B :

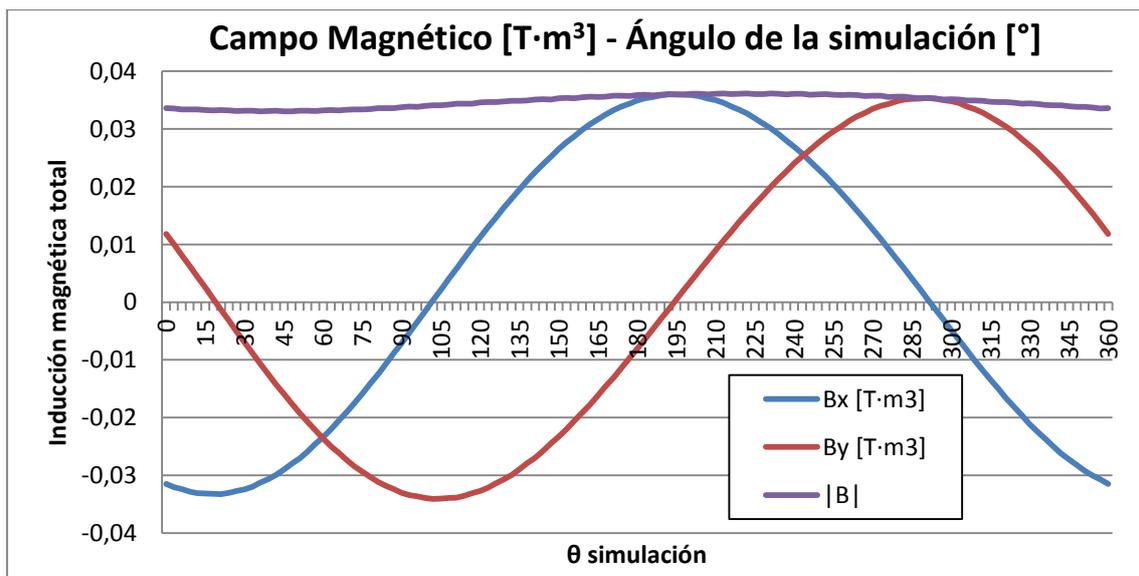


Figura 133. Inducción magnética total en el rotor en un giro mecánico completo

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

La figura anterior muestra el campo magnético B total en el rotor incluyendo los imanes, con sus componentes vertical y horizontal. Como se observa, la evolución de las componentes es prácticamente sinusoidal, desfasada 90 grados. Es destacable que el campo magnético total es prácticamente constante, aunque también presenta un comportamiento sinusoidal con fluctuaciones. Este fenómeno se analizará más adelante.

Con las componentes vertical y horizontal podemos representar la orientación del campo total generado:

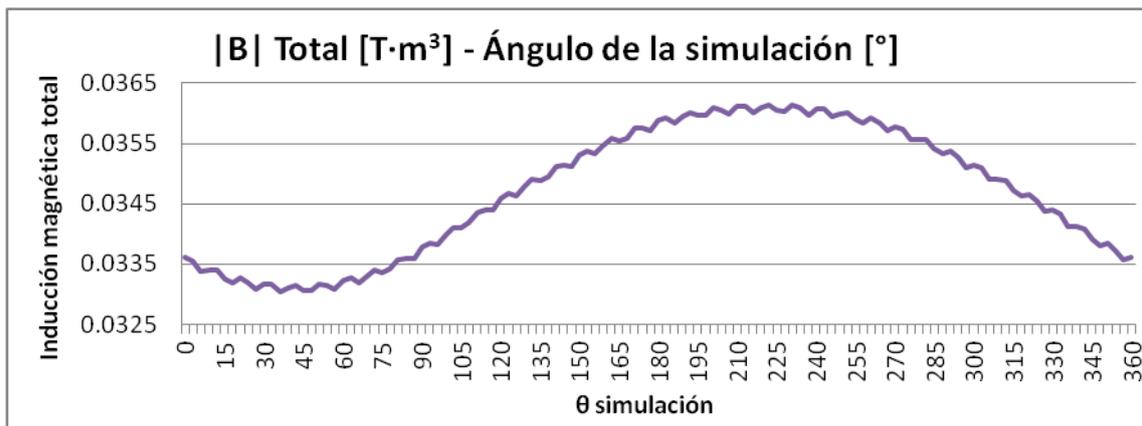


Figura 134. Campo magnético total en el rotor en un ciclo mecánico

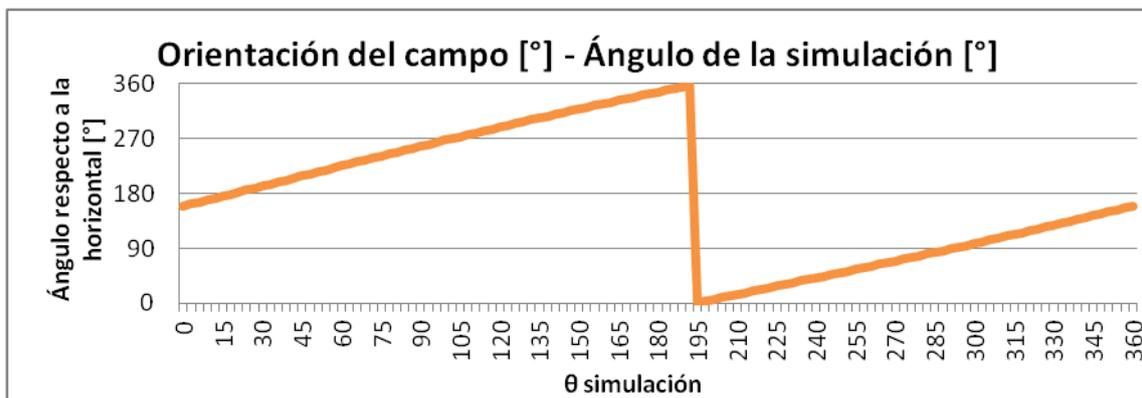


Figura 135. Orientación del campo magnético total en el rotor respecto a la horizontal

Se destaca el efecto de las dispersiones de flujo en las fluctuaciones del campo magnético, aunque en valor promedio sigue una evolución sinusoidal.

Los valores máximos de campo se obtienen cuando se orientan el campo rotórico y estatórico. En las siguientes figuras se aprecia la influencia de ambos campos:

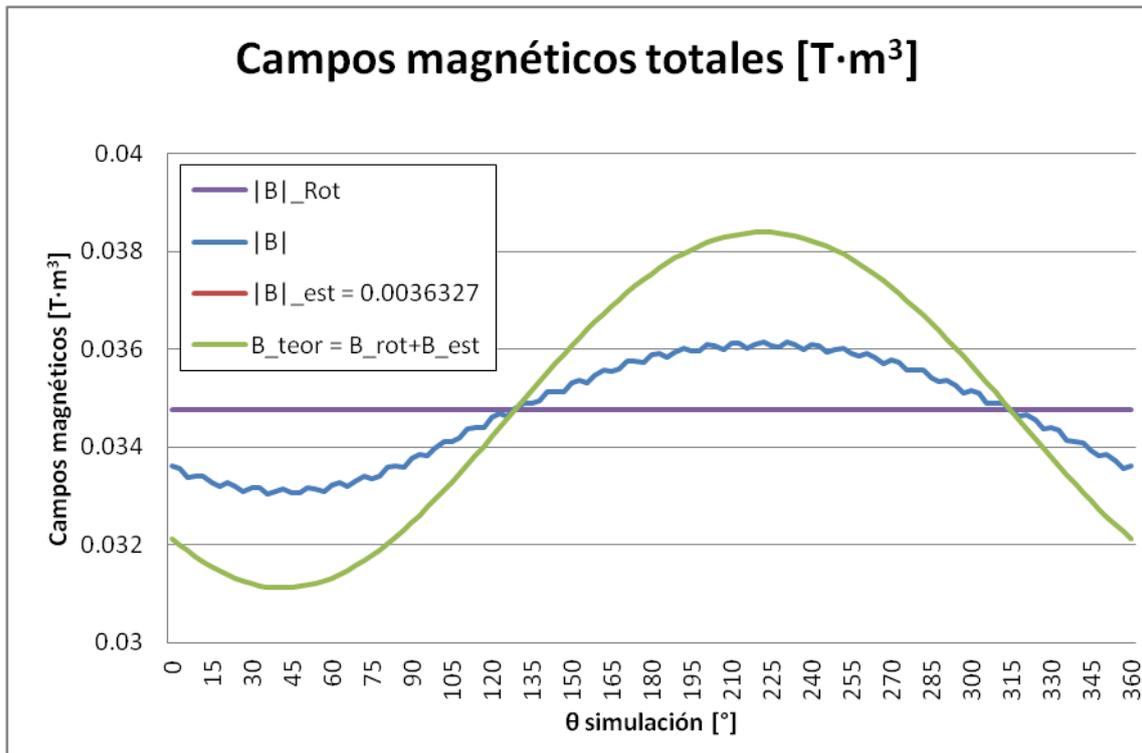


Figura 136. Participación del campo magnético rotórico y estatórico en el total

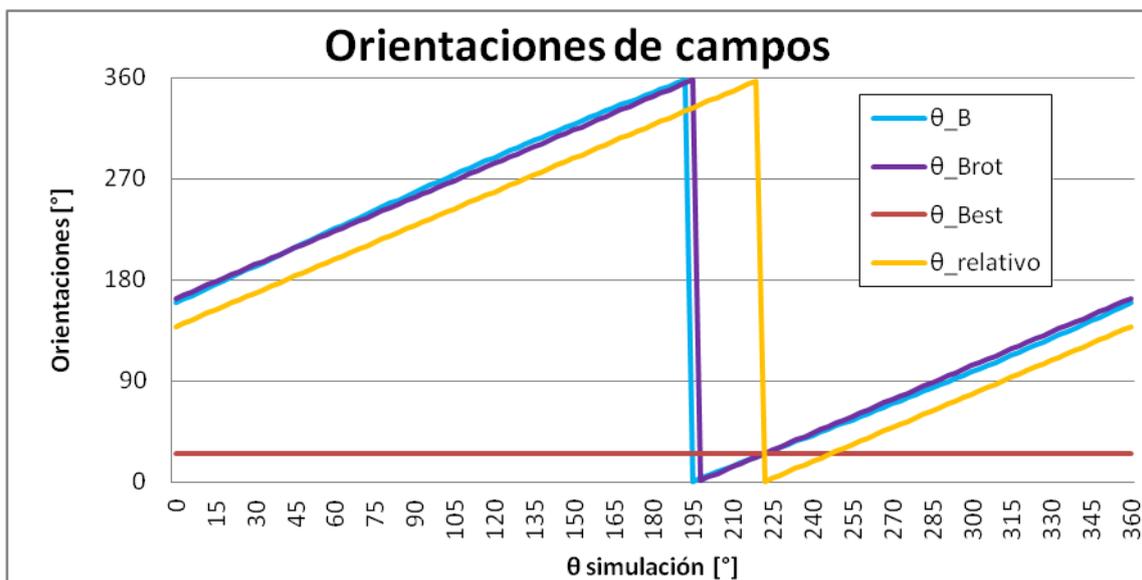


Figura 137. Orientaciones de campos magnéticos constitutivos

Como se puede observar en la *Figura 136*, el campo rotórico es el dominante. El campo real generado oscila en torno a él, con fluctuaciones propias de las dispersiones de flujos entre ranuras e imanes. La oscilación sinusoidal se debe a la influencia del estator, de valor mucho menor (por eso no es representado) constante. En función de la orientación relativa, el campo magnético total aumenta o disminuye. Cuando los campos están alineados se alcanzan los valores máximos y mínimos,

mientras que cuando son perpendiculares el valor se corresponde al del campo rotórico y apenas se ve influenciado por el del estator. Esto se debe a que uno es mucho mayor que el otro, de no ser así los resultados tendrían una presencia mayor del campo estatórico.

El resultado real difiere del teórico, ya que en el último no se están teniendo en cuenta las interacciones entre rotor y estator cuando ambos generan campo. Cuando actúan conjuntamente, es el estator el que absorbe, en mayor medida que el rotor, el incremento de densidad de campo que se produce. También ocurre que los modelos al coexistir no interaccionan bajo un principio de superposición directo.

Por último se observa como el estator produce una leve desorientación en la orientación del campo rotórico.

- Par mecánico:

Para cada simulación ha sido calculado el Par mecánico que se ejerce por el global de cuerpo rotórico (incluido los imanes) respecto al origen.

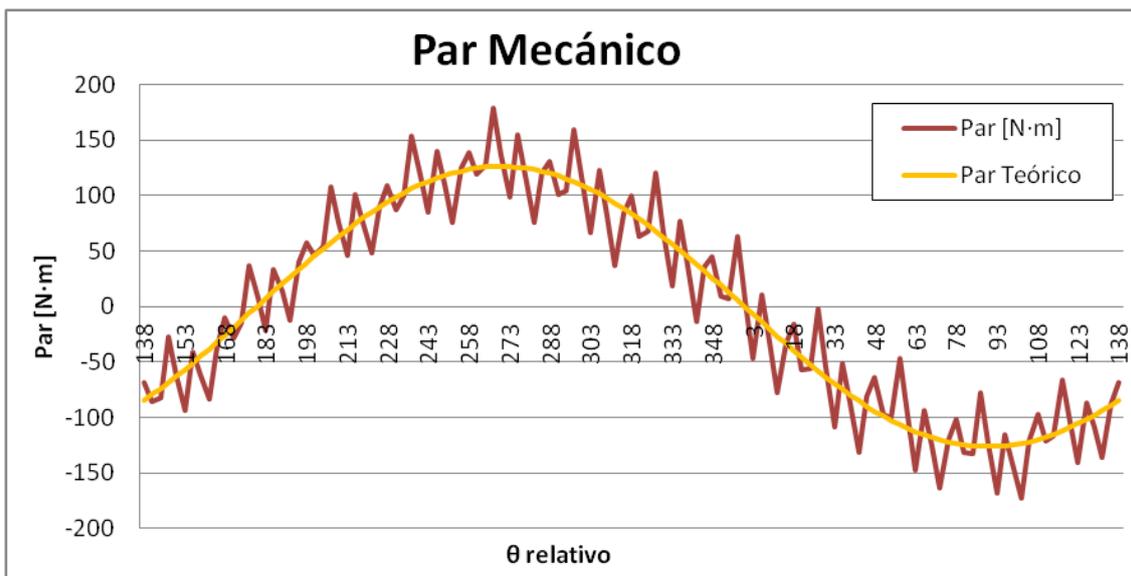


Figura 138. Par Mecánico

Se observa una tendencia sinusoidal con oscilaciones. Estas oscilaciones se deben a las variaciones del flujo en función de las posiciones relativas de rotor y estator. Como se observa, las oscilaciones se producen a la variación teórica del par en función de la posición relativa del rotor y el estator. Sin embargo, lo que se observa es que los valores máximos y mínimos de par no se producen en las posiciones teóricas relativas, es decir 270° y 90° , sino que debido a las oscilaciones se producen en otros valores en torno a esos puntos. Se pueden observar que las oscilaciones se repiten, lo cual indica a pensar que la posición relativa se repite. Se tiene una composición de armónicos sobre la solución sinusoidal teórica.

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

5.5. Conclusiones

Los resultados del motor simulado son:

Radio Exterior Estator	450 mm
Radio Interior Estator	300 mm
Profundidad	180 mm
Radio interior rotor	100 mm
Pares de polos	1
Ranuras por fase	12
Alambres por ranura	366
Intensidad por alambre	0.5387 A
Alambre	Cu AGW 24
Cuerpo Magnético	Hierro Puro

Ancho imanes	60 mm
Altura Imanes	12 mm
Profundidad	180 mm
Entrehierro (con imanes)	5 mm
Radio interior rotor	100 mm
Pares de polos	1
Imanes por polo	12
Angulo entre polos	15°
Imán	NdFeB 32 MGOe
Cuerpo Magnético	Hierro Puro

Magnitud	
Flujo máximo	0.085893103 Wb
Flujo mínimo	-0.080829083 Wb
Densidad de campo máxima. Estator	>2.15 T
Densidad de campo máxima. Rotor	1.613 T
Par máximo	178.7821551 N·m
Par mínimo	-172.0950573 N·m
B rotor	0.034754124 T·m ³
B estator	0.003632713 T·m ³

θ relativo	
	327.266623°
	162.266623°
	327.266623°
	324.266623°
	267.266623°
	102.266623°
	-
	-

6. MOTOR ALTERNATIVO

6.1. Objetivos y Justificación

En este capítulo se busca analizar la viabilidad de motores alternativos cuyo funcionamiento se base en el uso exclusivo de imanes permanentes y usar la energía que se origina entre dipolos magnéticos para producir movimiento.

Tal como se desarrolla en el *Capítulo 2: Origen y Fundamentos del Electromagnetismo*, no es descabellado obtener energía del electromagnetismo. Se demostró en primer lugar que bajo la teoría de la relatividad, el campo magnético es inherente a la naturaleza de la materia. Después se mostró la existencia de pares magnéticos en todas las estructuras moleculares y como el conjunto de ellas conformaban los imanes permanentes.

Por lo tanto los fundamentos que promueven esta búsqueda son:

- La energía electromagnética se produce como consecuencia de un efecto relativista. La invarianza de la carga y que la velocidad de la luz sea finita son la base de su origen.
- Las moléculas son cargas eléctricas que orbitan entre sí y por lo tanto se producen campos electromagnéticos, los conocidos como pares moleculares.
- Un imán consiste en la orientación a nivel macroscópico de pares magnéticos microscópicos, superponiéndose los campos a nivel molecular en un campo global.

Un análisis de estos fundamentos, y la experiencia con la naturaleza e interacción entre imanes, permite entender que la energía de un imán es propia de su estructura molecular, como las fuerzas nucleares o las gravitatorias. Aportando energía somos capaces de orientar la estructura molecular, pero la fuente energética se encuentra en las interacciones moleculares de los pares magnéticos.

6.2. Pruebas de concepto

A pesar de la amplia existencia de patentes y diseños de motores de imanes permanentes, es muy escasa la bibliografía que desmienta con argumentos académicos este tipo de motores, como escasa es los diseños o patentes que justifiquen en términos cuantitativos sus resultados y sus limitaciones.

Se pueden realizar sencillas pruebas de concepto con imanes corrientes, en los que se puede comprobar que se genera movimiento a partir de ciertas posiciones relativas. Si acercamos dos imanes por polos similares observaremos su repulsión, o si dejamos caer uno sobre otro, como el campo magnético vence la fuerza de la gravedad. Es indudable que se están compensando fuerzas y que los movimientos que se generan entre imanes son reales.

Realizando estas pruebas de conceptos se puede intuir que el principal problema es que, para que se produzcan estas interacciones, hay que llevar los imanes a posiciones relativas adecuadas, y para ello hay que invertir energía. Por lo tanto, sería interesante que en un balance energético, se obtuviese más energía una vez alcanzada las posiciones relativas deseadas que la invertida en llevarlas a esas posiciones.

6.3. Análisis de posiciones relativas

Supongamos dos imanes rectangulares idénticos en dimensiones y composición.

En primer lugar simularemos las posiciones relativas entre los imanes de un movimiento paralelo a través de su cara mayor, estando los campos enfrentados. Dejando uno fijo y trasladando el otro analizaremos las interacciones que se producen a través de calcular las fuerzas magnéticas generadas.

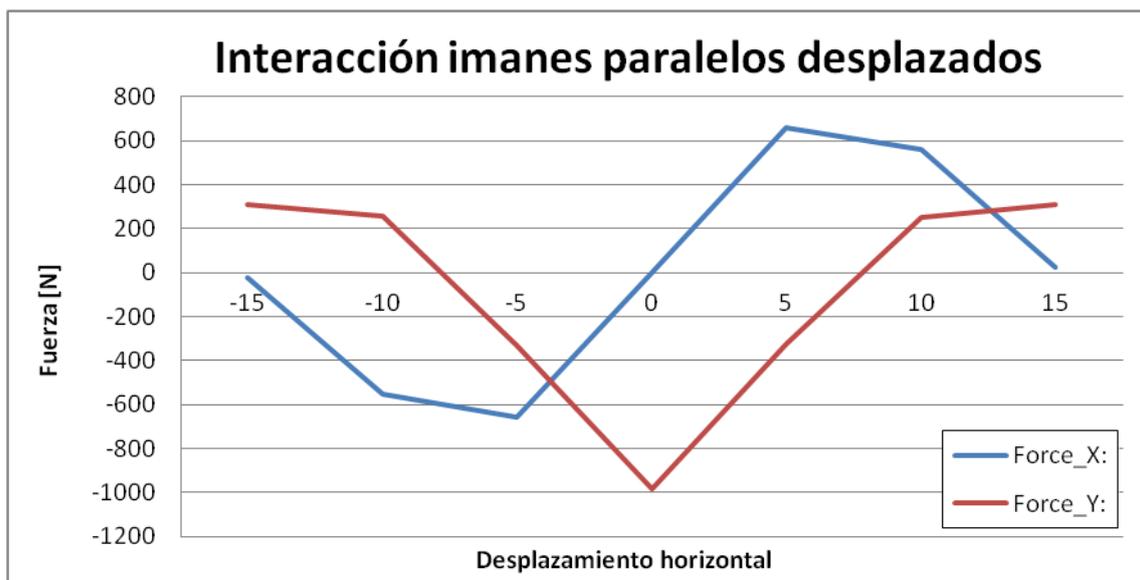


Figura 139. Interacción entre imanes enfrentados desplazados paralelamente

Estos resultados son de poco valor, pero muestran la simetría respecto a la posición central. También se observa cómo a partir de cierta distancia, la repulsión vertical se acentúa.

A continuación se realizó la misma prueba pero cubriendo todas las caras excepto la enfrentada de hierro puro. El resultado fue el siguiente:

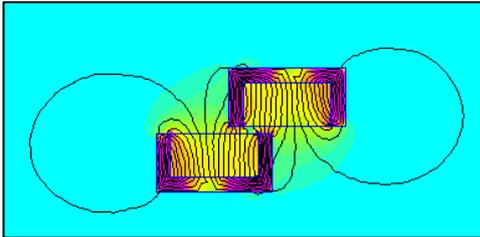


Figura 140. Imagen de la simulación



Figura 141. Interacciones entre imanes enfrentados, desplazados paralelamente, parcialmente apantallados

Es relevante destacar que al recubrir los imanes con hierro puro, las fuerzas de repulsión se han incrementado. Podríamos decir que hay menos dispersión del flujo y por lo tanto, la interacción entre los imanes es mayor. Cualitativamente el resultado no es sorprendente.

Visto estos ejemplos sencillos nada reveladores, se plantea apantallar parcialmente los imanes pero de manera asimétrica y se cambia la orientación de los campos, en vez de enfrentados se modelan paralelos y opuestos. Se espera que haya poca interacción debido al apantallamiento en primer lugar, pero principalmente se busca que se produzca asimetría respecto a la posición central

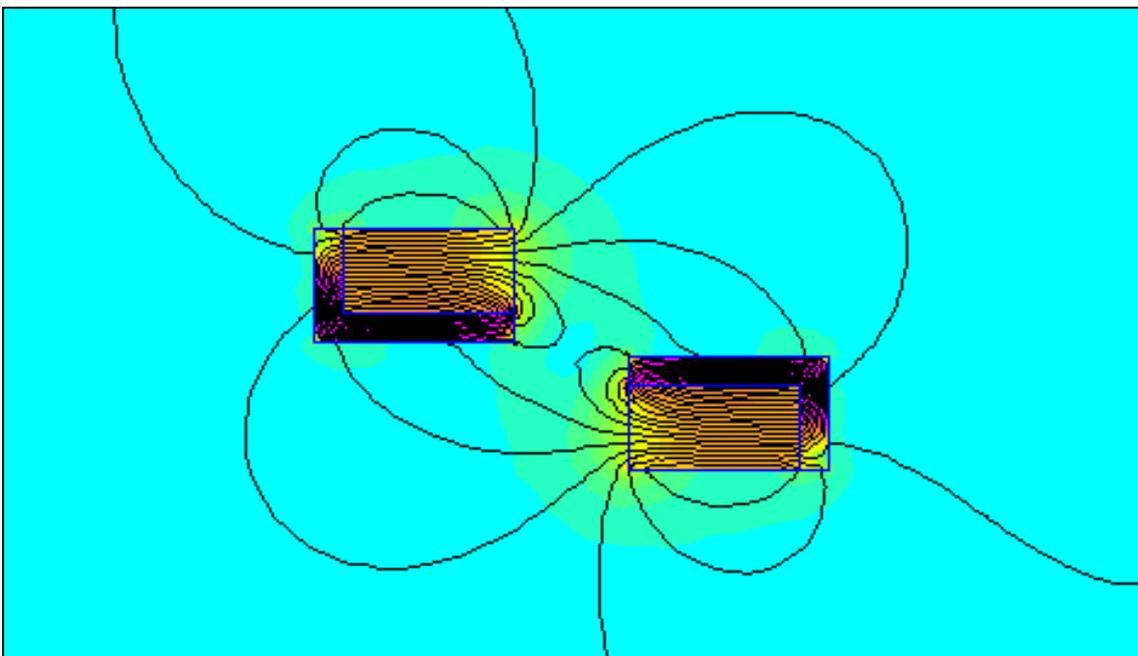


Figura 142. Imanes paralelos, apantallados parcialmente

Realizando una simulación como las anteriores obtenemos los siguientes resultados:

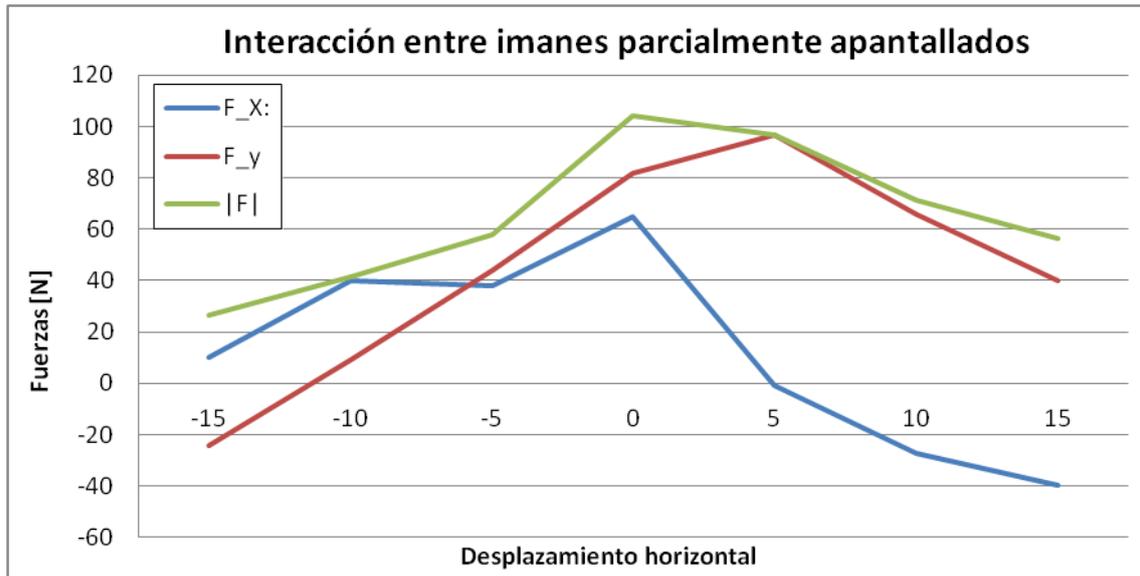


Figura 143. Interacción entre imanes paralelos asimétricamente apantallados

En la figura anterior pueden observarse resultados interesantes. En primer lugar existe asimetría respecto a la posición central en las fuerzas horizontales como verticales. Se puede observar como existe más interacción para posiciones positivas, es decir cuando las caras no están apantalladas. Esto no significa que la mayor interacción se produzca entre las caras, de hecho se produce entre los apantallamientos, en las esquinas. También es interesante observar como la repulsión horizontal en las posiciones negativas es prácticamente nula y que, a diferencia de los casos anteriores, se produce atracción vertical en casi todos los puntos estudiados. Esto es debido principalmente al apantallamiento.

Tras esta prueba se plantean varias cuestiones:

- En un movimiento continuo se podría utilizar las trayectorias de los movimientos como restricciones de las fuerzas que no sean interesantes aprovechar.
- La geometría influye notablemente en las interacciones.
- La inclinación relativa es un parámetro no contemplado que podría incrementar el desequilibrio de fuerzas.
- El apantallamiento produce un efecto conductor y potenciador del campo magnético, es posible por lo tanto que el mismo apantallamiento interaccione más que el propio imán. Además el apantallamiento equivale a un imán de sentido opuesto cualitativamente.

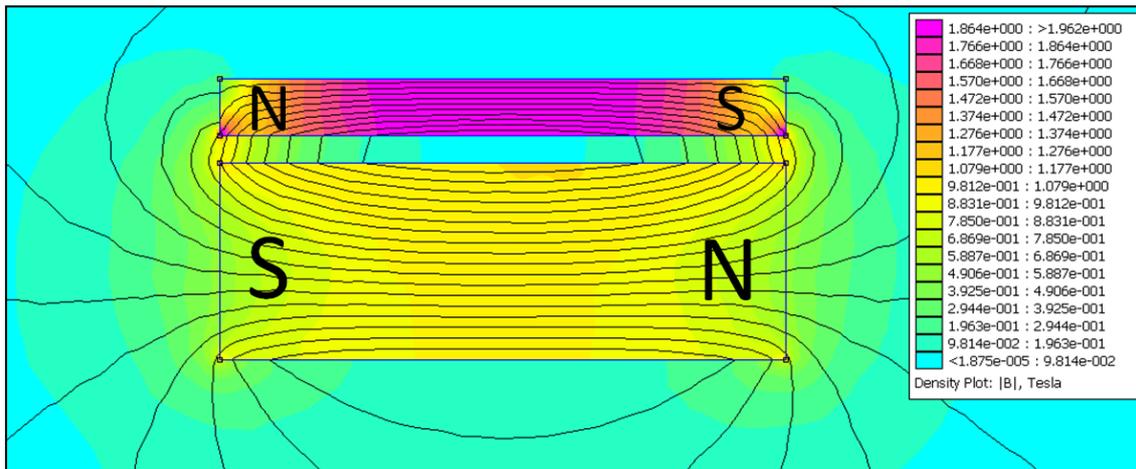


Figura 144. Imán NdFeB 32 MGOe con placa de hierro puro

6.4. Prueba de concepto de motor experimental

Tras las consideraciones de los apartados anteriores se planteó un modelo de motor con rotor y estator, compuesto por imanes en el rotor y estator únicamente. Se analizaría el ciclo mecánico completo simulando las interacciones que se producirían y calculando el par generado. Se busca encontrar un par mecánico total positivo en el ciclo, de manera que una vez iniciado el ciclo se obtuviese energía del sistema.

6.4.1. Programa

Se ha creado un programa siguiendo la misma estructura que en los capítulos anteriores. Se ha parametrizado la geometría de los imanes, su orientación respecto a la horizontal y la geometría y configuración del apantallamiento.

6.4.2. Modelo

Se ha generado un modelo sencillo cuya geometría está constituida por:

Radio Exterior Estator	430 mm
Radio Interior Estator	300 mm
Profundidad	180 mm
Entrehierro	1 mm
Imanes rotor	2
Imanes estator	2
Inclinación	15°

Ancho imanes	30 mm
Altura Imanes	10 mm
Profundidad	180 mm
Pantalla	5 mm
Cuerpo No magnético	316 Stainless Steel
Imán	NdFeB 32 MGOe
Apantallamiento	Hierro Puro

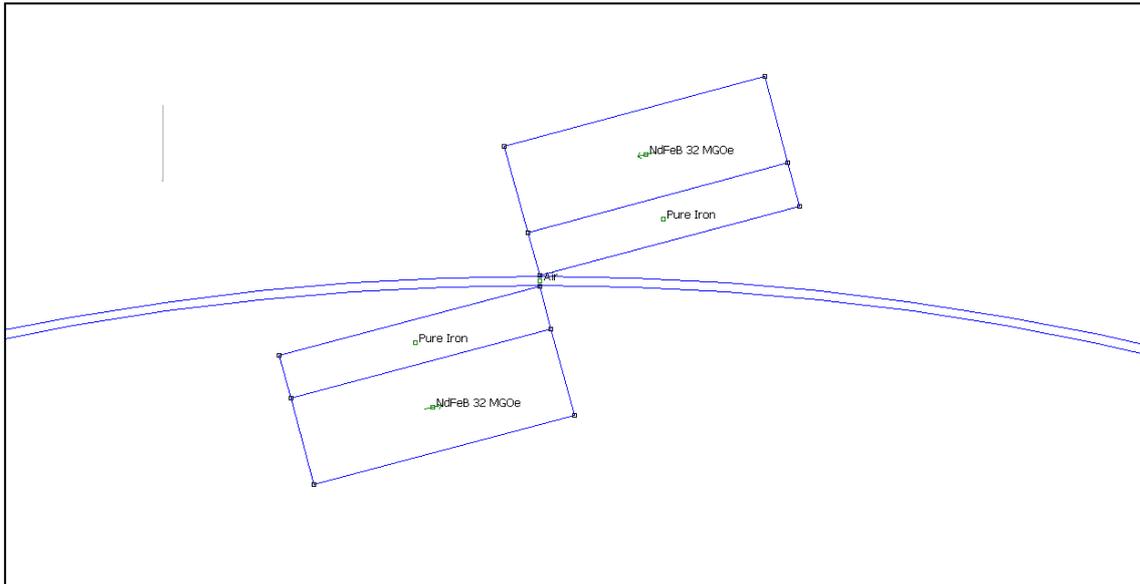


Figura 145. Detalle de posición relativa inicial de los imanes

Obsérvese la orientación enfrentada de los campos magnéticos. Se ha aislado únicamente la cara enfrentada de los imanes. Se han creado los imanes por pares, en posiciones opuestas con la idea de contrarrestar las fuerzas normales a la superficie, y se duplican las tangenciales a la misma.

Se supone que el giro es contrario a las agujas del reloj y se parte de la situación que se muestra en la figura anterior.

6.4.3. Simulación y resultados

Se han simulado cincuenta posiciones dentro de un ciclo mecánico completo obteniéndose el campo magnético generado y calculando el par del rotor incluyendo los imanes en él y sus aislamientos respecto al origen de coordenadas.

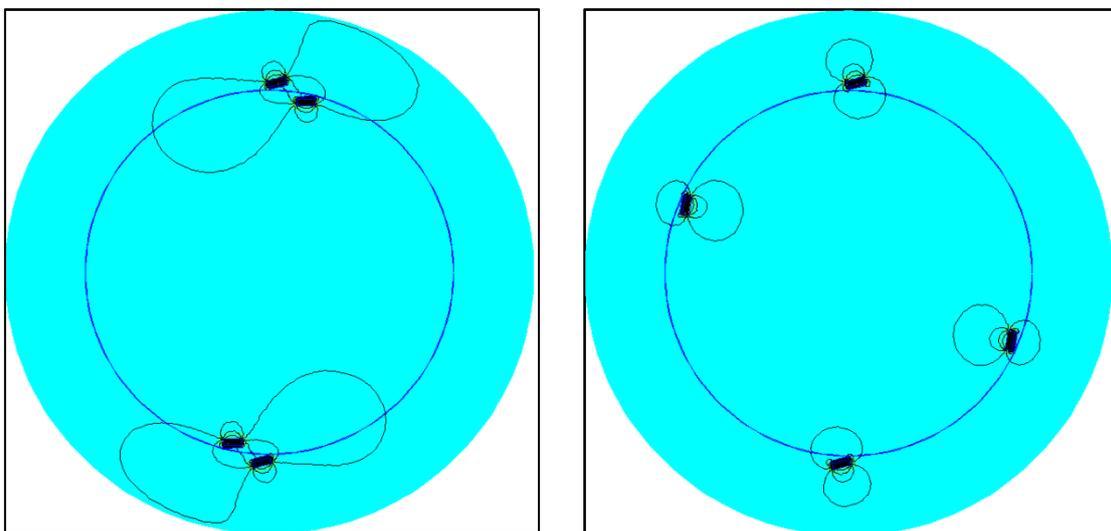


Figura 146. Distribuciones de campo magnético para distintas posiciones de la simulación

Los resultados de par obtenidos se reflejan en el siguiente gráfico



Figura 147. Par mecánico para dos pares de imanes en un ciclo completo

Como es posible observar, se obtienen resultados bastante interesantes. En un ciclo completo se obtiene dos picos de par positivos a las posiciones previas al enfrentamiento entre imanes. Eso significa que la atracción previa es lo que produce los picos de par, no la repulsión al enfrentarse las caras.

Este resultado no se reproduce con exactitud al aumentar el número de imanes. Es importante destacar que al aumentar el número de imanes las interacciones entre ellos se producen de forma circunferencial, no sólo radialmente. Sin embargo, basándonos únicamente en esta prueba de concepto, se podría obtener energía de este motor. Se puede intuir que dado que el par se produce debido a las posiciones relativas, la potencia que se obtendría dependerá de la velocidad de giro a la que se encuentre.

7. CONCLUSIONES

7.1. Valoración del proyecto y de los resultados

En el Proyecto se ha hecho un recorrido completo desde las bases teóricas y físicas del electromagnetismo hasta posibles líneas de investigación futuras. Este Proyecto permite obtener una visión global de la máquina eléctrica, una visión particular de la máquina de imanes permanentes, sus complejidades electromagnéticas, y un esbozo de posibles máquinas de imanes. Los hitos del proyecto más destacables son:

- Se ha documentado y desarrollado rigurosamente la naturaleza del electromagnetismo.
- Se han creado herramientas de diseño con modelos informático.
- Se ha creado una metodología de trabajo para la creación de simulaciones.
- Se han creado herramientas para construir elementos animados que permiten visualizar el comportamiento dinámico aproximado del circuito magnético de las máquinas eléctricas y de conceptos teóricos.
- Se han reproducido virtualmente los conceptos teóricos más importantes de las máquinas eléctricas (en particular de las máquinas síncronas)
- Se han reproducido y analizado los comportamientos y problemas comunes del circuito magnético
- Se ha simulado un motor de imanes permanentes y analizado su circuito magnético.
- Se ha demostrado la viabilidad teórica de motores alternativos de imanes permanentes y se ha simulado una prueba de concepto con resultado positivo.

Es destacable que el proyecto permite visualizar y analizar con claridad el circuito magnético que comúnmente es una tarea compleja debido a la dificultad de visualizar campos potenciales.

Debido a la metodología de trabajo, los desarrollos informáticos y los programas elaborados pueden seguir siendo utilizados para proyectos futuros.

La parametrización de los modelos permite crear y simular los modelos que se deseen con facilidad, dentro de los límites de diseño contemplados.

Los resultados del motor de imanes permanentes simulado son realistas y coherentes con los resultados teóricos. Se observan claramente los efectos disipativos, las fluctuaciones y oscilaciones de las magnitudes, así como efectos de saturación, superposición e influencias geométricas.

Los resultados del motor alternativo, como prueba conceptual, son muy interesantes. Es importante valorar que los resultados obtenidos en términos de par son insignificantes, pero también es importante destacar que no se ha estudiado el dimensionamiento de estos posibles diseños, ni los parámetros de los mismos.

Sin embargo, es un resultado que invita al optimismo por varias razones: por un lado, se ha estudiado un modelo con elementos que pueden ser multiplicados en el espacio, no solo disponiendo mayor número de imanes circunferencialmente, también pudiendo crear disposiciones concéntricas (aunque habría que estudiarlo). Por otro lado, se ha visto que la clave del funcionamiento es la creación de descompensaciones de fuerzas desfavorables en un movimiento. Estas descompensaciones se han creado apantallando y modificado la distribución simétrica del campo. No se han contemplado, y se podría hacer, crear descompensaciones por la posición relativa de los imanes, variando su tamaño, variando su posición relativa en las tres dimensiones o la forma de los mismos.

Sin embargo, a pesar de demostrarse que son viables teóricamente y que exista más de una patente, es posible que el principal hándicap de estos motores sea el control de los mismos y encontrar el diseño adecuado para obtener potencias prácticas. Aun así, el mero hecho de poder obtener energía alternativa a través de la creación de imanes permanentes (que requiere alta energía pero baja potencia) es una perspectiva ilusionante.

7.2. Conocimientos adquiridos

- Se han adquirido conocimientos teóricos físicos, introduciéndose en la teoría de la relatividad y la física cuántica.
- Se han entendido y afianzado conceptos electromagnéticos y de teoría de campos.
- Se ha aprendido el programa *FEMM 4.2*.
- Se ha aprendido el lenguaje de programación *Lua*.
- Se han aprendido la influencia y naturaleza del diseño de las máquinas eléctricas.
- Se ha aprendido el sistema de calibración de cables.
- Se han comprendido los efectos de saturación y apantallamiento electromagnético. Se han descubierto con claridad las relaciones del diseño con las magnitudes magnéticas y las relaciones entre ellas.

7.3. Aplicaciones del proyecto

El proyecto tiene varias aplicaciones derivadas de su desarrollo:

- Puede servir como base para desarrollar estudios de motores de imanes permanentes.
- Puede utilizarse para estimar o comprobar diseños de máquinas eléctricas de imanes permanentes.
- Es posible usar los resultados obtenidos para docencia, facilitando la visualización del circuito magnético.
- Pueden utilizarse los programas desarrollados como herramientas pedagógicas para que se experimente y compruebe los comportamientos de máquinas eléctricas.
- Al haberse realizado todo en programas gratuitos, cualquiera puede reproducir y mejorar los programas y simulaciones, incluso crear nuevas.
- Puede servir como base para proyectos de investigación de motores alternativos de imanes permanentes.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. S. Navarro, Electromagnetismo, Madrid: García Montoro Editores, S.L.
- [2] J. Tovar Pescador y J. Hernández Álvaro, Fundamentos de física: Electricidad y magnetismo.
- [3] P. Pavlov y F. Jojlov, Física del estado sólido.
- [4] M. Rodríguez Danta, A. González Fernández y C. Bellver Cebreros, Campos electromagnéticos, Sevilla: Secretariado de publicaciones de la universidad de Sevilla, 1999.
- [5] H. E. White, Introducción a la física atómica y nuclear.
- [6] E. Larrea Bellod, Teorías sobre el origen de la luz y el campo electromagnético.
- [7] D. Meeker, «User's Manual FEMM 4.2,» 2013.
- [8] P. Rio, «Lua,» [En línea]. Available: <http://www.lua.org/>.
- [9] «McGraw-Hill,» [En línea]. Available: <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448127641.pdf>.
- [10] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, Bogotá: McGraw-Hill Latinoamérica, S.A, 1987.
- [11] M. Cortés Cherta, J. Corrales Martín y A. Enseñat Badía, Teoría general de máquinas eléctricas, Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 1991.
- [12] D. d. T. Electrónica, «Universidad de Vigo,» [En línea]. Available: http://webs.uvigo.es/quintans/recursos/Web_electromagnetismo/electromagnetismo_circuitosmagneticos.htm.
- [13] F. Moeller, E. Kübler y T. Werr, Electrotécnia general y aplicada: Máquinas de corriente continua y alterna, vol. Máquinas de corriente continua y alterna (incluso transformadores), Barcelona-Madrid: Editorial Labor, S.A, 1969.
- [14] «Universidad de Valencia,» 2008/2009. [En línea]. Available: <http://www.uv.es/emaset/iep00/descargas/motores-Sincronos-0809>.
- [15] M. Á. Rodríguez Pozueta, «Universidad de Cantabria,» [En línea]. Available: <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/constitucion%20maq%20elec%20cam>

inos.pdf.

- [16] J. Sola Sanz, Cálculo y reducción de pérdidas en máquinas de imanes permanentes, Navarra: Universidad de Navarra, 2012.
- [17] A. Königslöw y J. Corrales Martín, La escuela del técnico electricista: Teoría, cálculo y construcción de las Máquinas de corriente alterna síncrona, Barcelona-Madrid: Editorial Labor, S.A, 1965.
- [18] W. H. Hayt, Teoría electromagnética.
- [19] C. Von Dobbeler, Electrotécnica general y aplica: Construcción y cálculos de resistencia de las máquinas eléctricas, vol. III, Barcelona-Madrid: Editorial Labor, S.A, 1960.

9. ANEXOS

- **PMSM_main.lua**

```
-- main script Motor_Imanes Cálculo del Par en 360° con las corrientes
del estátor fijas

dofile("PMSM_geo_mat_cir.lua")

omega_r=60 --[rpm]

-- initialization

t = 0.0
theta_t=theta_s
file_handle = openfile("PMSM_B.txt", "w")
n_steps = 120
ifig = 0
T=60/omega_r --[s]
Dt=T/n_steps

-- main loop
for k = 1,n_steps,1 do
    t=0.0+(k-1)*Dt
    dofile("PMSM_mod.lua")
    dofile("../scripts/solve.lua")
    dofile("PMSM_teardown.lua")
end

closefile(file_handle)
```

- **PMSM_geo_mat_cir.lua**

```
--Construcción de la Geometría, Materiales, BC y circuitos usando
comandos de LUA-----
-----

--Definición del problema
dofile("../scripts/problem_def.lua")
mi_saveas("../geometry/PMSM_C.fem")

--Creación de los materiales-----
-----
dofile("../scripts/material_creation.lua")

--Creación de las condiciones de Contorno-----
-----
dofile("../scripts/BC_creation.lua")

--Creación de los circuitos-----
-----
--Ver tabla de cableado
I_s = 0.5387
--I_s=0.0
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
N=366
dofile("../scripts/circuits_creation.lua")

--Construcción de la circunferencia Interior Estátor. Problema plano
en mm-----
Entrehierro=5
Re_int=300
Re_ext=450
dofile("../scripts/stator.lua")

--Creación Slot del stator -----
-----
var=1 --
1:Trapezoidales/rectangulares, 2: Circulares
ns_est=36 --Número de slots en el estátor
--Parámetros Bobinado y ranura
r_cable=10 --Radio bobinado dentro del slot
b_inf_bob=7
b_sup_bob=7 --Escoger igual para ranuras rectangulares
t=1 --Aislamiento
a=2.5 --Semilado Abertura ranura semicerrada.
--a=b_inf_bob=b_inf_bob+t --Semilado Abertura ranura abierta
h1=1 --Margen ranura/estátor
h2=7 --Profundidad cuña
h5=31 --Profundidad total
--Para que el área de la sección de ranura por donde va la corriente
sea de 300mm^2 en el caso rectangular:
r1=sqrt(((h5-h2-2*t)*2*b_inf_bob-300)/pi)
r2=3*t
r3=t

dofile("../scripts/slots_stator.lua")

--Asignacion de BC-----
-----
dofile("../scripts/BC_assignment.lua")

--Asignacion de Materiales-----
-----
dofile("../scripts/material_assignment.lua")

--Asignacion de Circuitos-----
-----
dofile("../scripts/circuits_assignment.lua")

--Construcción Rotor
dofile("../scripts/rotor_ext.lua")

--Construcción imanes
a_ext=60 --Anchura iman dentro del rotor
a_int=60 --Anchura iman borde del rotor
b=12 --profundidad desde punto más interno.
p=1 --Número de pares de polos
ni_pol=12 --Número de imanes por cada Polo
s=1 --Parámetro de separación entre imanes
-- dofile("../scripts/iman.es.lua")
-- dofile("../scripts/iman.es_sup_rect.lua")
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
delta=2                                --diferencia del extremo
gam=60*pi/180                          --Ángulo que ocupa el imán en la superficie
-- dofile("../scripts/imanes_sup.lua")
tol=30/2
dofile("../scripts/imanes_sup_rectB.lua")
--Construcción detalles rotor
-- E=100
-- R3=100
-- nb=4
Rr_int=100
-- dofile("../scripts/rotor.lua")
dofile("../scripts/rotor_simple.lua")

mi_addblocklabel(0,Rr_int+1)            --Etiqueta del Rotor
mi_selectlabel(0,Rr_int+1)
mi_setblockprop("Pure Iron", 1)

mi_zoomnatural()
```

- **PMSM_mod.lua**

```
mi_selectcircle(0,0,Rr_ext+Entrehierro/3,4)
dtheta=omega_r*6*Dt -- [rev/min*360uu/60s*s]
mi_moverotate(0,0,dtheta,4)
mi_clearselected()
theta_t=theta_t+dtheta
```

- **PMSM_tardown.lua**

```
mo_showdensityplot(1,0,'0.644804670068601','0','jmag') -- Obtain Image
mo_hidepoints()
mo_shownames(0)
ifig = ifig + 1

mo_savebitmap(format("../bmps/PMSM_C/PMSM_denJ%1$d.bmp",ifig)) --Save
Image

mo_showdensityplot(1,0,'2.15','1.3398584319791e-005','bmag') --Obtain
Image

mo_savebitmap(format("../bmps/PMSM_C/PMSM_C%1$d.bmp",ifig)) --Save
Image

mo_selectblock(0,Rr_int+1)
for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do --Primeros imanes
de cada polo
    angle=(pi/2+theta_t*pi/180)+ang*pi/180
    for i = 1, ni_pol, 1 do --Imanes de cada polo
        x_pos=(Rr_ext-b/2)*cos(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        y_pos=(Rr_ext-b/2)*sin(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        mo_selectblock(x_pos,y_pos) --Seleccionar etiqueta
    end
```

```
end
Bx=mo_blockintegral(8)
By=mo_blockintegral(9)
Torque=mo_blockintegral(22)

mo_seteditmode("contour")
mo_addcontour(0,Re_int)
mo_addcontour(0,-Re_int)
B_n=mo_lineintegral(0)
mo_makeplot(2,200,format("/PMSM_C/B_espira/PMSM_C_espira%1$d.txt",ifig),0)
mo_makeplot(1,200,format("../bmps/PMSM_C/Otros/PMSM_C_espira%1$d.emf",ifig))
mo_clearcontour()

mo_seteditmode("contour")
mo_selectpoint(-Re_int,0)
mo_selectpoint(Re_int,0)
mo_bendcontour(180,0.5)
mo_selectpoint(Re_int,0)
mo_selectpoint(-Re_int,0)
mo_bendcontour(180,0.5)
mo_makeplot(2,200,format("/PMSM_C/Frontera/Front_est%1$d.txt",ifig),0)
mo_makeplot(1,200,format("../bmps/PMSM_C/Otros/PMSM_Distr_B_Front_est%1$d.emf",ifig))
mo_clearcontour()

Ia, Va, fluxa=mo_getcircuitproperties("A+")
Ib, Vb, fluxb=mo_getcircuitproperties("B+")
Ic, Vc, fluxc=mo_getcircuitproperties("C+")

write (file_handle, "Flujo[Wb]: ",B_n, " Par Rotor[N?m]: ",Torque,"
tiempo[s]: ",t," theta[?]: ",theta_t," Bx_t: ",Bx," By_t: ",By,"
Intensidad[A]:Ia: ",Ia," Ib: ",Ib," Ic: ",Ic," Tensiones[V]:va: ",Va,"
vb: ",Vb," vc: ",Vc,"\n")
```

- **BC_creation.lua**

```
-----
--Creación de las condiciones de Contorno-----
-----
mi_addboundprop("BC", 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
```

- **BC_assignment.lua**

```
-----
--Asignacion de BC-----
-----
mi_selectarcsegment(0,Re_ext) --Seleccionar
Semicircunferencia superior externa del estator
mi_selectarcsegment(0,-Re_ext) --Seleccionar
Semicircunferencia inferior externa del estator
mi_setarcsegmentprop(2, "BC", 1) --Aplicar BC
```

```
mi_clearselected()
```

- **circuits_creation.lua**

```
-----  
-- --Creación de los circuitos-----  
-----  
theta_s = pi/2  
i_sa = I_s*sin(theta_s-0*pi*2/3)  
i_sb = I_s*sin(theta_s-1*pi*2/3)  
i_sc = I_s*sin(theta_s-2*pi*2/3)  
  
mi_addcircprop("A+", i_sa, 1)  
mi_addcircprop("A-", -i_sa, 1)  
mi_addcircprop("B+", i_sb, 1)  
mi_addcircprop("B-", -i_sb, 1)  
mi_addcircprop("C+", i_sc, 1)  
mi_addcircprop("C-", -i_sc, 1)
```

- **circuits_assignment.lua**

```
-----  
--Asignacion de Circuitos-----  
-----  
Rs=Re_int+cdg_y  
  
for k = 1, ns_est, 1 do  
  
angle=pi/2+(k-1)*copyangle*pi/180  
--angle_plus=angle+r_cable/2/Re_int  
--angle_minus=angle-r_cable/2/Re_int  
x_pos=Rs*cos(angle)  
y_pos=Rs*sin(angle)  
  
mi_selectlabel(x_pos,y_pos)  
  
if k<=ns_est/6 then  
mi_setblockprop("24 AWG", 1,0,"A+",0,0, N)  
mi_clearselected()  
  
if k~=1 then  
mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle),Re_int*sin(angle)) --Para  
Trapezios, Rectángulos  
--mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle_plus),Re_int*sin(angle_plus)) -  
--Para seleccionar arco circunferencia inferior  
--mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle_minus),Re_int*sin(angle_minus))  
--Para seleccionar arco circunferencia superior  
mi_deleteselected()  
end  
end  
  
if k<=(2*ns_est/6) and k>(ns_est/6) then  
mi_setblockprop("24 AWG", 1,0, "C-",0,0, N)
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
mi_clearselected()

mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle),Re_int*sin(angle))      --Para
Trapecios, Rectángulos
--mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle_plus),Re_int*sin(angle_plus)) -
-Para seleccionar arco circunferencia inferior
--mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle_minus),Re_int*sin(angle_minus))
--Para seleccionar arco circunferencia superior
mi_deletesselected()

end

if k<=(3*ns_est/6) and k>(2*ns_est/6) then
mi_setblockprop("24 AWG", 1,0, "B+",0,0, N)
mi_clearselected()

mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle),Re_int*sin(angle))      --Para
Trapecios, Rectángulos
--mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle_plus),Re_int*sin(angle_plus)) -
-Para seleccionar arco circunferencia inferior
--mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle_minus),Re_int*sin(angle_minus))
--Para seleccionar arco circunferencia superior
mi_deletesselected()

end

if k<=(4*ns_est/6) and k>(3*ns_est/6) then
mi_setblockprop("24 AWG", 1,0, "A-",0,0, N)
mi_clearselected()

mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle),Re_int*sin(angle))      --Para
Trapecios, Rectángulos
--mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle_plus),Re_int*sin(angle_plus)) -
-Para seleccionar arco circunferencia inferior
--mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle_minus),Re_int*sin(angle_minus))
--Para seleccionar arco circunferencia superior
mi_deletesselected()

end

if k<=(5*ns_est/6) and k>(4*ns_est/6) then
mi_setblockprop("24 AWG", 1,0, "C+",0,0, N)
mi_clearselected()

mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle),Re_int*sin(angle))      --Para
Trapecios, Rectángulos
--mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle_plus),Re_int*sin(angle_plus)) -
-Para seleccionar arco circunferencia inferior
--mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle_minus),Re_int*sin(angle_minus))
--Para seleccionar arco circunferencia superior
mi_deletesselected()

end

if k<=(6*ns_est/6) and k>(5*ns_est/6) then
mi_setblockprop("24 AWG", 1,0, "B-",0,0, N)
mi_clearselected()
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle),Re_int*sin(angle))      --Para
Trapezios, Rectángulos
--mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle_plus),Re_int*sin(angle_plus)) -
--Para seleccionar arco circunferencia inferior
--mi_selectarcsegment(Re_int*cos(angle_minus),Re_int*sin(angle_minus))
--Para seleccionar arco circunferencia superior
mi_deletesselected()

end
mi_clearselected()

end
```

- **material_creation.lua**

```
-----
--Creación de los materiales-----
-----
mi_getmaterial("Air")
mi_getmaterial("Pure Iron")
mi_getmaterial("10 AWG")
mi_getmaterial("12 AWG")
mi_getmaterial("14 AWG")
mi_getmaterial("16 AWG")
mi_getmaterial("18 AWG")
mi_getmaterial("18 SWG")
mi_getmaterial("20 AWG")
mi_getmaterial("22 AWG")
mi_getmaterial("24 AWG")
mi_getmaterial("316 Stainless Steel")
mi_getmaterial("NdFeB 32 MGOe")
```

- **material_assignment.lua**

```
-----
--Asignacion de Materiales-----
-----
mi_selectlabel(0,(Re_ext-1))      --Seleccionar etiqueta estator
mi_setblockprop("Pure Iron", 1)  --Definirla de Material magnetico
mi_clearselected()

mi_addblocklabel(0,Re_int-Entrehierro/2)      --Defino etiqueta del
entrehierro
mi_selectlabel(0,Re_int-Entrehierro/2)      --Seleccionar
etiqueta entrehierro
mi_setblockprop("Air", 1)      --Definirla de Aire
mi_clearselected()
```

- **Problem_def.lua**

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
--Construcción de la Geometría, Materiales, BC y circuitos usando
comandos de LUA-----
-----
newdocument(0)
mi_probdef(0,"millimeters","planar",1E-8,180,30)
--mi_saveas("../geometry/stator.fem")
```

- **imanes.lua**

```
-----
--Creación Imanes Rotor -----
-----
--Creación Primer Iman
-- a_ext=20          --Anchura iman dentro del rotor
-- a_int=20         --Anchura iman borde del rotor
-- b=10            --profundidad desde punto más interno.

--Defino el iman sobre el (0,0)
mi_addnode(-a_ext/2,b/2)          --Punto izquierda Superior iman
mi_addnode(a_ext/2,b/2)          --Punto derecha Superior iman
mi_addnode(-a_int/2,-b/2)        --Punto izquierda Inferior iman
mi_addnode(a_int/2,-b/2)         --Punto derecha Inferior iman
mi_addsegment(-a_ext/2,b/2,a_ext/2,b/2)    --Segmento superior
mi_addsegment(-a_ext/2,b/2,-a_int/2,-b/2)  --Segmento izquierdo
mi_addsegment(a_ext/2,b/2,a_int/2,-b/2)    --Segmento derecho
mi_addsegment(-a_int/2,-b/2,a_int/2,-b/2)  --Segmento inferior

mi_addblocklabel(0,0)           --Etiqueta en el centro
mi_selectlabel(0,0)
mi_setblockprop("NdFeB 32 MGOe", 1,0,"",90,0,0)
mi_clearselected()
mi_selectrectangle(-a_ext/2,b/2,a_ext/2,-b/2,4)  --Selecciono el iman
para llevarmelo al estátor

theta_med=asin(a_ext/2/Rr_ext)
d=Rr_ext*cos(theta_med)
h=Rr_ext-d
r=sqrt((a_ext/2+0.5)^2+(d-b-0.5)^2)
theta_med_int=asin(a_ext/2/r)

mi_movetranslate(0,(d-b/2),4)  --Lo subo para que los puntos
exteriores coincidan con el borde exterior

mi_selectarcsegment(0,Rr_ext)  --Selecciono el segmento que sobra
mi_deletesegment(0,Rr_ext)    --Elimino segmento que sobra

--Creación de los demás imanes
--p=1          --Número de pares de polos
--ni_pol=4    --Número de imanes por cada Polo
copies_ini=(2*p-1)
copyangle_ini=360/2/p          --Ángulo entre imanes iniciales
copies_pol=ni_pol-1          --Numero de copias por polos
--s=1         --Parámetro de separación entre imanes
copyangle_pol=(theta_med*(2+1/s))*180/pi  --Ángulo (°en
funciones de femm) entre imanes consecutivos polo
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
mi_selectrectangle(-a_ext/2,d,a_ext/2,d-b,4)           --Seleciono el
iman para copiarlo
mi_copyrotate(0,0,copyangle_ini,copies_ini,4)        --Copiar el iman
en el rotor

mi_clearselected()

for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do
  angle=ang*pi/180
  x1=((Rr_ext+0.5)*cos(pi/2+theta_med+angle+0.008))
  y1=((Rr_ext+0.5)*sin(pi/2+theta_med+angle+0.008))
  x2=(r*cos(pi/2-theta_med_int+angle-0.008))
  y2=(r*sin(pi/2-theta_med_int+angle-0.008))
  mi_selectrectangle(x1,y1,x2,y2,4)                   --Seleciono el
iman inicial del polo para copiarlo
  mi_copyrotate(0,0,copyangle_pol,copies_pol,4)      --Copiar el
iman en el rotor

  mi_clearselected()

end
switch=0                                             --Interruptor ficticio. En 1 sirve
para cambiar polaridad. En 0 para no cambiar.
for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do  --Para los
primeros imanes de cada polo
  angle=pi/2+ang*pi/180
  for i = 1, ni_pol, 1 do                            --Para cada iman de cada polo
    x_pos=Rr_ext*cos(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
    y_pos=Rr_ext*sin(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
    mi_selectarcsegment(x_pos,y_pos)                 --
Seleccionar arco circunferencia que sobra
    if i==1 and ang==0 then
      mi_clearselected()
    elseif ang==90 or ang==270 then
      mi_deleteselected()
      mi_clearselected()
      mi_selectarcsegment(x_pos,y_pos)
      mi_deleteselected()
      mi_clearselected()
    else
      mi_deleteselected()
      mi_clearselected()
    end
    mi_selectlabel(x_pos,y_pos)
    if switch==1 then
      mi_setblockprop("NdFeB 32 MGOe", 1,0,"",90+(ang+(i-
1)*copyangle_pol)-180,0,0)
    end
    mi_clearselected()
  end
end
if switch==0 then
  switch=switch+1
else
  switch=switch-1
end
end
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

mi_zoomnatural()

- **imanes_sup.lua**

```
-----
--Creación Imanes Rotor -----
-----
--Creación Primer Iman
-- delta=1                --diferencia del extremo
-- gam=60*pi/180          --Ángulo que ocupa el imán en la superficie

A=(Rr_ext-delta)
R1=(Rr_ext^2+A^2-2*Rr_ext*A*cos(gam/2))/2/(Rr_ext-A*cos(gam/2))
gam1=2*asin(A*sin(gam/2)/R1)
O1=Rr_ext-R1

--Defino el iman sobre el (0,0)
mi_addnode(Rr_ext*sin(gam/2),Rr_ext*cos(gam/2)) --
Punto Derecha Pos iman sobre rotor
mi_addnode(0,0)
--Punto origen
mi_addnode(-Rr_ext*sin(gam/2),Rr_ext*cos(gam/2)) --
Punto Derecha Pos iman sobre rotor

mi_addsegment(Rr_ext*sin(gam/2),Rr_ext*cos(gam/2),0,0)
--Segmento superior
mi_addsegment(-Rr_ext*sin(gam/2),Rr_ext*cos(gam/2),0,0)
--Segmento superior

mi_addnode((Rr_ext-delta)*sin(gam/2),(Rr_ext-delta)*cos(gam/2))
--Punto Derecha Pos iman sobre rotor
mi_addnode(-(Rr_ext-delta)*sin(gam/2),(Rr_ext-delta)*cos(gam/2))
--Punto Derecha Pos iman sobre rotor

mi_addarc((Rr_ext-delta)*sin(gam/2),(Rr_ext-delta)*cos(gam/2),-
(Rr_ext-delta)*sin(gam/2),(Rr_ext-delta)*cos(gam/2),(gam1*180/pi-
0.5),2)
mi_addsegment((Rr_ext-delta)*sin(gam/2),(Rr_ext-delta)*cos(gam/2),-
(Rr_ext-delta)*sin(gam/2),(Rr_ext-delta)*cos(gam/2))

mi_selectarcsegment(0,Rr_ext)
mi_deleteselected()
mi_selectnode(0,0)
mi_deleteselected()

d=Rr_ext*cos(gam/2)
h=Rr_ext-d

mi_addblocklabel(0,Rr_ext-h/2) --Etiqueta en el centro
mi_selectlabel(0,Rr_ext-h/2)
mi_setblockprop("NdFeB 32 MGOe",1,0,"",90,0,0)
mi_clearselected()

--Creación de los demás imanes
--p=1                --Número de pares de polos
--ni_pol=1           --Número de imanes por cada Polo
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
copies_ini=(2*p-1)
copyangle_ini=360/2/p          --Ángulo entre imanes iniciales
copies_pol=ni_pol-1           --Numero de copias por polos
copyangle_pol=gam*180/pi      --Ángulo (°en funciones de femm)
entre imanes consecutivos polo

mi_selectcircle(0,0,Rr_ext,4)   --Seleciono el iman para copiarlo
mi_copyrotate(0,0,copyangle_ini,copies_ini,4)      --Copiar el iman
en el rotor

mi_clearselected()

for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do
    angle=ang*pi/180
    x1=(O1*cos(pi/2+angle))
    y1=(O1*sin(pi/2+angle))
    mi_selectcircle(x1,y1,R1,4)   --Seleciono el iman inicial del
polo para copiarlo
    mi_copyrotate(0,0,copyangle_pol,copies_pol,4)   --Copiar el
iman en el rotor

    mi_clearselected()
end
switch=0                       --Interruptor ficticio. En 1 sirve
para cambiar polaridad. En 0 para no cambiar.
for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do   --Para los
primeros imanes de cada polo
    angle=pi/2+ang*pi/180
    for i = 1, ni_pol, 1 do   --Para cada iman de cada polo
        x_pos=Rr_ext*cos(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        y_pos=Rr_ext*sin(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        mi_selectarcsegment(x_pos,y_pos)           --
Seleccionar arco circunferencia que sobra
        if ang==90 or ang==270 then
            mi_deleteselected()
            mi_clearselected()
            mi_selectarcsegment(x_pos,y_pos)
            mi_deleteselected()
            mi_clearselected()
        else
            mi_deleteselected()
            mi_clearselected()
        end
        mi_selectlabel(x_pos,y_pos)
        if switch==1 then
            mi_setblockprop("NdFeB 32 MGOe", 1,0,"",90+(ang+(i-
1)*copyangle_pol)-180,0,0)
        end
        mi_clearselected()
    end
    if switch==0 then
        switch=switch+1
    else
        switch=switch-1
    end
end
end
```

- **imanes_sup_rect.lua**

```
-----  
--Creación Imanes Rotor -----  
-----  
--Creación Primer Iman  
-- a_ext=20 --Anchura iman dentro del rotor  
-- a_int=20 --Anchura iman borde del rotor  
-- b=10 --profundidad desde punto más interno.  
tol=0.1  
  
--Defino el iman sobre el (0,0)  
mi_addnode(-a_ext/2,b/2) --Punto izquierda Superior iman  
mi_addnode(a_ext/2,b/2) --Punto derecha Superior iman  
mi_addnode(-a_int/2,-b/2) --Punto izquierda Inferior iman  
mi_addnode(a_int/2,-b/2) --Punto derecha Inferior iman  
mi_addsegment(-a_ext/2,b/2,a_ext/2,b/2) --Segmento superior  
mi_addsegment(-a_ext/2,b/2,-a_int/2,-b/2) --Segmento izquierdo  
mi_addsegment(a_ext/2,b/2,a_int/2,-b/2) --Segmento derecho  
mi_addsegment(-a_int/2,-b/2,a_int/2,-b/2) --Segmento inferior  
  
mi_addblocklabel(0,0) --Etiqueta en el centro  
mi_selectlabel(0,0)  
mi_setblockprop("NdFeB 32 MGOe", 1,0,"",90,0,0)  
mi_clearselected()  
mi_selectrectangle(-a_ext/2,b/2,a_ext/2,-b/2,4) --Selecciono el iman  
para llevarmelo a superficie rotor  
  
theta_med=asin(a_ext/2/Rr_ext)  
d=Rr_ext*cos(theta_med)  
h=Rr_ext-d  
r=sqrt((a_ext/2)^2+(d-b)^2)  
theta_med_int=asin(a_ext/2/r)  
  
mi_movetranslate(0,(d-b/2),4) --Lo subo para que los puntos  
exteriores coincidan con el borde exterior  
  
mi_selectarcsegment(0,Rr_ext) --Selecciono el segmento que sobra  
mi_deletesegment(0,Rr_ext) --Elimino segmento que sobra  
  
--Creación de los demás imanes  
--p=1 --Número de pares de polos  
--ni_pol=4 --Número de imanes por cada Polo  
copies_ini=(2*p-1)  
copyangle_ini=360/2/p --Ángulo entre imanes iniciales  
copies_pol=ni_pol-1 --Numero de copias por polos  
copyangle_pol=(2*theta_med_int*180/pi+tol) --Ángulo (°en funciones de  
femm) entre imanes consecutivos polo  
  
mi_selectrectangle(-a_ext/2,d,a_ext/2,d-b,4) --Selecciono el  
iman para copiarlo  
mi_copyrotate(0,0,copyangle_ini,copies_ini,4) --Copiar el iman  
en el rotor  
  
mi_clearselected()
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do
    angle=ang*pi/180
    x1=((Rr_ext+0.5)*cos(pi/2+theta_med+angle+0.008))
    y1=((Rr_ext+0.5)*sin(pi/2+theta_med+angle+0.008))
    x2=(r*cos(pi/2-theta_med_int+angle-0.008))
    y2=(r*sin(pi/2-theta_med_int+angle-0.008))
    mi_selectrectangle(x1,y1,x2,y2,4)    --Selecciono el iman inicial
del polo para copiarlo
    mi_copyrotate(0,0,copyangle_pol,copies_pol,4)    --Copiar el
iman en el rotor

    mi_clearselected()
end
switch=0 --Interruptor ficticio. En 1 sirve para cambiar polaridad.
En 0 para no cambiar.
for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do    --Para los
primeros imanes de cada polo
    angle=pi/2+ang*pi/180
    for i = 1, ni_pol, 1 do    --Para cada iman de cada polo
        x_pos=Rr_ext*cos(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        y_pos=Rr_ext*sin(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        mi_selectarcsegment(x_pos,y_pos)    --
Seleccionar arco circunferencia que sobra
        if i==1 and ang==0 then
            mi_clearselected()
        elseif ang==90 or ang==270 then
            mi_deleteselected()
            mi_clearselected()
            mi_selectarcsegment(x_pos,y_pos)
            mi_deleteselected()
            mi_clearselected()
        else
            mi_deleteselected()
            mi_clearselected()
        end
        mi_selectlabel(x_pos,y_pos)
        if switch==1 then
            mi_setblockprop("NdFeB 32 MGOe", 1,0,"",90+(ang+(i-
1)*copyangle_pol)-180,0,0)
        end
        mi_clearselected()
    end
    if switch==0 then
        switch=switch+1
    else
        switch=switch-1
    end
end

--Eliminar las curvas entre imanes
for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do    --Para los
primeros imanes de cada polo
    angle=pi/2+ang*pi/180+theta_med_int
    for i = 1, ni_pol-1, 1 do    --Para cada iman de cada polo
        x_pos=Rr_ext*cos(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        y_pos=Rr_ext*sin(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
mi_selectarcsegment(x_pos,y_pos)          --
Seleccionar arco circunferencia que sobra
if ang==90 or ang==270 then
    mi_deleteselected()
    mi_clearselected()
    mi_selectarcsegment(x_pos,y_pos)
    mi_deleteselected()
    mi_clearselected()
else
    mi_deleteselected()
    mi_clearselected()
end
end
end

--Cerrar espacio entre imanes. Si se dejan como esquina hay problemas
de mallado
for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do          --Para los
primeros imanes de cada polo
    angle=pi/2+ang*pi/180+theta_med_int
    for i = 1, ni_pol-1, 1 do          --Para cada iman de cada polo
        x_pos1=r*cos(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        y_pos1=r*sin(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        x_pos2=r*cos(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180+tol*pi/180)
        y_pos2=r*sin(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180+tol*pi/180)
        mi_addsegment(x_pos1,y_pos1,x_pos2,y_pos2)
--Seleccionar arco circunferencia que sobra
    end
end

paso_polar=theta_med_int*180/pi+(copyangle_pol)*copies_pol

if paso_polar>=90 then
    mi_selectarcsegment(-Rr_ext,0)
    mi_selectarcsegment(Rr_ext,0)
    mi_deleteselected()
end
mi_zoomnatural()
```

- **imanes_sup_rectB.lua**

```
--Eliminamos el rotor exterior
mi_selectnode(-Rr_ext,0)
mi_selectnode(Rr_ext,0)
mi_deleteselected()

--Creación Primer Iman
-- a_ext=20          --Anchura iman dentro del rotor
-- a_int=20          --Anchura iman borde del rotor
-- b=10              --profundidad desde punto más interno.
-- tol=30            --Tolerancia entre dos polos en grados

--Defino el iman sobre el (0,0)
mi_addnode(-a_ext/2,b/2)          --Punto izquierda Superior iman
mi_addnode(a_ext/2,b/2)          --Punto derecha Superior iman
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
mi_addnode(-a_int/2,-b/2)           --Punto izquierda Inferior iman
mi_addnode(a_int/2,-b/2)           --Punto derecha Inferior iman
mi_addsegment(-a_ext/2,b/2,a_ext/2,b/2)   --Segmento superior
mi_addsegment(-a_ext/2,b/2,-a_int/2,-b/2) --Segmento izquierdo
mi_addsegment(a_ext/2,b/2,a_int/2,-b/2)   --Segmento derecho
mi_addsegment(-a_int/2,-b/2,a_int/2,-b/2) --Segmento inferior

mi_addblocklabel(0,0)              --Etiqueta en el centro
mi_selectlabel(0,0)
mi_setblockprop("NdFeB 32 MGOe", 1,0,"",90,0,0)
mi_clearselected()
mi_selectrectangle(-a_ext/2,b/2,a_ext/2,-b/2,4) --Seleciono el iman
para llevarmelo al estátor
mi_movetranslate(0,b/2,4)         --Lo subo para que quede en el 0,0

theta_med_ext=asin(a_ext/2/Rr_ext)
h_ext=Rr_ext*(1-cos(theta_med_ext))
Rr_sup=sqrt((a_ext/2)^2+(Rr_ext-h_ext-b)^2)
theta_med_sup=asin(a_ext/2/Rr_sup)
h_sup=Rr_sup*(1-cos(theta_med_sup))
d=Rr_sup-h_sup+b

r=sqrt((a_ext/2)^2+(d-b)^2)

mi_addnode(-Rr_sup*cos(pi/2-theta_med_sup-tol*pi/180/2),-
Rr_sup*sin(pi/2-theta_med_sup-tol*pi/180/2))
mi_addnode(Rr_sup*cos(pi/2-theta_med_sup-
tol*pi/180/2),Rr_sup*sin(pi/2-theta_med_sup-tol*pi/180/2))
mi_addarc(-Rr_sup*cos(pi/2-theta_med_sup-tol*pi/180/2),-
Rr_sup*sin(pi/2-theta_med_sup-tol*pi/180/2),Rr_sup*cos(pi/2-
theta_med_sup-tol*pi/180/2),Rr_sup*sin(pi/2-theta_med_sup-
tol*pi/180/2),180,2)
mi_addarc(Rr_sup*cos(pi/2-theta_med_sup-tol*pi/180/2),Rr_sup*sin(pi/2-
theta_med_sup-tol*pi/180/2),-Rr_sup*cos(pi/2-theta_med_sup-
tol*pi/180/2),-Rr_sup*sin(pi/2-theta_med_sup-tol*pi/180/2),180,2)

mi_selectrectangle(-a_ext/2,b,a_ext/2,0,4)   --Seleciono el iman para
llevarmelo al estátor
mi_movetranslate(0,(Rr_sup-h_sup),4)         --Lo subo para que los
puntos exteriores coincidan con el borde exterior

mi_selectarcsegment(0,Rr_sup)                --Seleciono el segmento que sobra
mi_deletesegment(0,Rr_sup)                  --Elimino segmento que sobra

--Creación de los demás imanes
--p=1                                       --Número de pares de polos
--ni_pol=4                                  --Número de imanes por cada Polo
copies_ini=(2*p-1)
copyangle_ini=360/2/p                       --Ángulo entre imanes iniciales
copies_pol=ni_pol-1                          --Numero de copias por polos
copyangle_pol=(360/(2*p)-3*theta_med_sup*180/pi-tol)/(copies_pol)
--Ángulo (°en funciones de femm) entre imanes consecutivos polo

mi_selectrectangle(-a_ext/2,d,a_ext/2,d-b,4) --Seleciono el
iman para copiarlo
mi_copyrotate(0,0,copyangle_ini,copies_ini,4) --Copiar el iman
en el rotor
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
mi_clearselected()

for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do
    angle=ang*pi/180
    x1=((Rr_ext+0.5)*cos(pi/2+theta_med_ext+angle+0.008))
    y1=((Rr_ext+0.5)*sin(pi/2+theta_med_ext+angle+0.008))
    x2=(r*cos(pi/2-theta_med_sup+angle-0.008))
    y2=(r*sin(pi/2-theta_med_sup+angle-0.008))
    mi_selectrectangle(x1,y1,x2,y2,4)  --Seleciono el iman inicial
del polo para copiarlo
    mi_copyrotate(0,0,copyangle_pol,copies_pol,4  --Copiar el iman
en el rotor

    mi_clearselected()
end
switch=0  --Interruptor ficticio. En 1 sirve para cambiar polaridad.
En 0 para no cambiar.
for ang = 0, (360-copyangle_ini), copyangle_ini do  --Para los
primeros imanes de cada polo
    angle=pi/2+ang*pi/180
    for i = 1, ni_pol, 1 do  --Para cada iman de cada polo
        x_pos=Rr_sup*cos(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        y_pos=Rr_sup*sin(angle+(i-1)*copyangle_pol*pi/180)
        mi_selectarcsegment(x_pos,y_pos)  --Seleccionar arco
circunferencia que sobra
        if i==1 and ang==0 then
            mi_clearselected()
        else
            mi_deletesselected()
            mi_clearselected()
        end
        mi_selectlabel(x_pos,y_pos)
        if switch==1 then
            mi_setblockprop("NdFeB 32 MGOe", 1,0,"",90+(ang+(i-
1)*copyangle_pol)-180,0,0)
        end
        mi_clearselected()
    end
    if switch==0 then
        switch=switch+1
    else
        switch=switch-1
    end
end
end
```

- stator.lua

```
-----
--Construcción de la circunferencia Interior Estátor. Problema plano
en mm-----
--Entrehierro=5  --Defino entrehierro. Para asignar etiqueta

--Re_int=300  --Radio interior estator (mm)
mi_addnode(-Re_int,0)  --Punto izquierda
mi_addnode(Re_int,0)  --Punto derecha
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
mi_addarc(-Re_int,0,Re_int,0,180,2) --Semicircinferencia(180°)Inferior
mi_addarc(Re_int,0,-Re_int,0,180,2) --Semicircinferencia(180°)Superior

-----
--Construcción de la circunferencia Exterior Estator. Problema plano
en mm-----
--Re_ext=350                                --Radio exterior estator (mm)
mi_addnode(-Re_ext,0)                        --Punto izquierda
mi_addnode(Re_ext,0)                         --Punto derecha

mi_addarc(-Re_ext,0,Re_ext,0,180,2) --Semicircinferencia(180°)Inferior
mi_addarc(Re_ext,0,-Re_ext,0,180,2) --Semicircinferencia(180°)Superior
mi_addblocklabel(0,(Re_ext-1)) --Etiqueta del Estator
```

• rotor_ext.lua

```
-----
--Construcción de la circunferencia Exterior Rotor. Problema plano en
mm-----
Rr_ext=Re_int-Entrehierro                    --Radio exterior rotor (mm)
mi_addnode(-Rr_ext,0)                         --Punto izquierda
mi_addnode(Rr_ext,0)                          --Punto derecha

mi_addarc(-Rr_ext,0,Rr_ext,0,180,2) --Semicircinferencia(180°)Inferior
mi_addarc(Rr_ext,0,-Rr_ext,0,180,2) --Semicircinferencia(180°)Superior
```

• rotor_simple.lua

```
-----
--Construcción detalles Rotor. Problema plano en mm-----
-----
--Rr_int=60
mi_addnode(-Rr_int,0)                        --Punto izquierda
mi_addnode(Rr_int,0)                         --Punto derecha

mi_addarc(-Rr_int,0,Rr_int,0,180,2) --Semicircinferencia(180°)Inferior
mi_addarc(Rr_int,0,-Rr_int,0,180,2) --Semicircinferencia(180°)Superior
mi_addblocklabel(0,Rr_int*2/3)              --Etiqueta del Rotor
mi_selectlabel(0,Rr_int*2/3)
mi_setblockprop("Air", 1)
mi_clearselected()
```

• rotor.lua

```
-----
--Construcción detalles del rotor-----
-----
Rr_ext=Re_int-Entrehierro                    --Radio exterior rotor (mm)
-- E=50                                       --Espesor rotor (mm)
R2=Rr_ext-E
-- R3=70
-- nb=6
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
Centro=(copyangle_pol*copies_pol)/2

mi_addnode(-E/2,R3*cos(asin(E/2/R3)))      --Punto izquierda
mi_addnode(E/2,R3*cos(asin(E/2/R3)))      --Punto derecha
mi_addnode(-E/2,R2*cos(asin(E/2/R2)))     --Punto izquierda
mi_addnode(E/2,R2*cos(E/2/R2))           --Punto derecha
mi_addsegment(-E/2,E*cos(asin(E/2/R3)), -E/2,R2*cos(asin(E/2/R2)))
mi_addsegment(E/2,E*cos(asin(E/2/R3)), E/2,R2*cos(asin(E/2/R2)))

arco=360/nb*pi/180
mi_addnode(0,R2)                          --Punto izquierda
mi_addnode(-R2*sin(arco),R2*cos(arco))    --Punto derecha
mi_addarc(0,R2,-R2*sin(arco),R2*cos(arco),arco*180/pi,2) --Arco
mi_addnode(0,R3)                          --Punto izquierda
mi_addnode(-R3*sin(arco),R3*cos(arco))    --Punto derecha
mi_addarc(0,R3,-R3*sin(arco),R3*cos(arco),arco*180/pi,2) --Arco

mi_selectrectangle(-E/2-0.5,(R2+0.5)*cos(asin(E/2/R2)),E/2+0.1,0,1)
mi_copyrotate(0,0,arco*180/pi,1,1)

mi_selectnode(0,R2)
mi_selectnode(-R2*sin(arco),R2*cos(arco))
mi_selectnode(0,R3)                      --Punto izquierda
mi_selectnode(-E*sin(arco),E*cos(arco))  --Punto derecha
mi_selectnode(E/2,R3*cos(asin(E/2/R3)))
mi_selectnode(E/2,R2*cos(asin(E/2/R2)))
mi_selectnode(-R2*sin(asin(E/2/R2)+arco),R2*cos(asin(E/2/R2)+arco))
mi_selectnode(-R3*sin(asin(E/2/R3)+arco),R3*cos(asin(E/2/R3)+arco))
mi_selectnode(-(R2+1)*sin(arco-asin(E/2/R2)),(R2+1)*cos(arco-
asin(E/2/R2)))
mi_deleteselect()

mi_createradius(-E/2,R2*cos(asin(E/2/R2)),5)
mi_createradius(-R2*sin(arco-asin(E/2/R2)),R2*cos(arco-
asin(E/2/R2)),5)

mi_addblocklabel(-(R2-(R2-R3)/2)*sin(arco/2),(R2-(R2-
R3)/2)*cos(arco/2)                       --Etiqueta del Rotor
mi_selectlabel(-(R2-(R2-R3)/2)*sin(arco/2),(R2-(R2-R3)/2)*cos(arco/2))
mi_setblockprop("Air", 1)

mi_selectcircle(0,0,R2+1,4)
mi_copyrotate(0,0,arco*180/pi,nb-1,4)

mi_selectcircle(0,0,R2+1,4)
mi_moverotate(0,0,Centro,4)

-- Rr_int=20                               --Radio exterior rotor (mm)
mi_addnode(-Rr_int,0)                      --Punto izquierda
mi_addnode(Rr_int,0)                       --Punto derecha

mi_addarc(-Rr_int,0,Rr_int,0,180,2) --Semicircinferencia(180°)Inferior
mi_addarc(Rr_int,0,-Rr_int,0,180,2) --Semicircinferencia(180°)Superior
mi_addblocklabel(0,(Rr_int*2/3))          --Etiqueta del Rotor
mi_selectlabel(0,(Rr_int*4/5))
mi_setblockprop("Air", 1)
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

- **slots_stator.lua**

```
-----
--Creación Slot. Cable -----
-----
--Primer Slot
-- --Parámetros Bobinado y ranura
-- r_cable=10          --Radio del cable dentro del slot
-- b_inf_bob=7
-- b_sup_bob=15
-- t=1                --Aislamiento
-- r1=t
-- r2=3*t
-- r3=t

-- a=2.5              --Semilado Abertura ranura
-- h1=1                --Margen ranura/estátor
-- h2=10               --Profundidad cuña
-- h5=40               --Profundidad total

--Escoger var==1 si se desea una forma trapezoidal/rectangular
--Escoger var==2 si se desea una forma circular
--Dado en el programa de geometria principal: var=1

--Variables Ranura
if var==1 then
    b_inf=b_inf_bob+t    --Semilado de inferior de ranura
    b_sup=b_sup_bob+t    --Semilado superior de la ranura
    h3=h2+t              --Profundidad minima bobinado
    h4=h5-t              --Profundidad maxima bobindao

    --Defino la ranura sobre el (0,0)
    mi_addnode(-b_sup,h5) --P1:Punto izquierda Superior ranura
    mi_addnode(b_sup,h5)  --P2:Punto derecha Superior ranura
    mi_addnode(-b_inf,h2) --P3:Punto izquierda Superior cuña
    mi_addnode(b_inf,h2)  --P4:Punto derecha Superior cuña
    mi_addnode(-a,h1)     --P5:Punto izquierda Superior margen
    mi_addnode(a,h1)      --P6:Punto derecha Superior margen
    mi_addnode(-a,0)      --P7:Punto izquierda inferior
    mi_addnode(a,0)       --P8:Punto derecha inferior

    mi_addsegment(-b_sup,h5,-b_inf,h2) --Segmento P1-P3
    mi_addsegment(-b_inf,h2,-a,h1)     --Segmento P3-P5
    mi_addsegment(-a,h1,-a,0)          --Segmento P5-P7

    mi_addsegment(-b_sup,h5,b_sup,h5)  --Segmento P1-P2

    mi_addsegment(b_sup,h5,b_inf,h2)   --Segmento P2-P4
    mi_addsegment(b_inf,h2,a,h1)       --Segmento P4-P6
    mi_addsegment(a,h1,a,0)            --Segmento P6-P8

    mi_createradius(-b_sup,h5,r1)       --Redondeo P1
    mi_createradius(b_sup,h5,r1)        --Redondeo P2
    mi_createradius(-b_inf,h2,r2)       --Redondeo P3
    mi_createradius(b_inf,h2,r2)       --Redondeo P4
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
mi_createradius (-a,h1,r3)          --Redondeo P5
mi_createradius (a,h1,r3)          --Redondeo P6

--Defino bobinado del slot
mi_addnode (-b_sup_bob,h4) --p1:Punto izquierda Superior bobinado
mi_addnode (b_sup_bob,h4)  --p2:Punto derecha Superior bobinado
mi_addnode (-b_inf_bob,h3) --p3:Punto izquierda Inferior bobinado
mi_addnode (b_inf_bob,h3)  --p4:Punto derecha Inferior bobinado

mi_addsegment (-b_sup_bob,h4,-b_inf_bob,h3) --Segmento p1-p3
mi_addsegment (-b_sup_bob,h4,b_sup_bob,h4)  --Segmento p1-p2
mi_addsegment (-b_inf_bob,h3,b_inf_bob,h3)  --Segmento p3-p4
mi_addsegment (b_sup_bob,h4,b_inf_bob,h3)   --Segmento p2-p4

mi_createradius (-b_sup_bob,h4,r1) --Redondeo p1
mi_createradius (b_sup_bob,h4,r1)  --Redondeo p2
mi_createradius (-b_inf_bob,h3,r1) --Redondeo p3
mi_createradius (b_inf_bob,h3,r1)  --Redondeo p4

cdg_y=h3+(h4-h3)/2

elseif var==2 then
  b_inf=r_cable+t          --Semilado de inferior de ranura
  b_sup=b_inf              --Semilado superior de la ranura
  h2=h1                    --Profundidad minima bobinado
  h4=h5-r_cable-t         --Profundidad maxima bobindao

--Defino la ranura sobre el (0,0)
mi_addnode (-b_sup,h5)    --P1:Punto izquierda Superior ranura
mi_addnode (b_sup,h5)     --P2:Punto derecha Superior ranura
mi_addnode (-b_inf,h2)    --P3:Punto izquierda Superior cuña
mi_addnode (b_inf,h2)     --P4:Punto derecha Superior cuña
mi_addnode (-a,h1)        --P5:Punto izquierda Superior margen
mi_addnode (a,h1)         --P6:Punto derecha Superior margen
mi_addnode (-a,0)         --P7:Punto izquierda inferior
mi_addnode (a,0)          --P8:Punto derecha inferior

mi_addsegment (-b_sup,h5,-b_inf,h2) --Segmento P1-P3
mi_addsegment (-b_inf,h2,-a,h1)     --Segmento P3-P5
mi_addsegment (-a,h1,-a,0)          --Segmento P5-P7
mi_addsegment (-b_sup,h5,b_sup,h5)  --Segmento P1-P2
mi_addsegment (b_sup,h5,b_inf,h2)   --Segmento P2-P4
mi_addsegment (b_inf,h2,a,h1)       --Segmento P4-P6
mi_addsegment (a,h1,a,0)            --Segmento P6-P8

mi_createradius (-b_sup,h5,r1)      --Redondeo P1
mi_createradius (b_sup,h5,r1)       --Redondeo P2
mi_createradius (-b_inf,h2,r1)      --Redondeo P3
mi_createradius (b_inf,h2,r1)       --Redondeo P4
mi_createradius (-a,h1,r3)          --Redondeo P5
mi_createradius (a,h1,r3)           --Redondeo P6

--Defino el Slot pegado al fondo de la ranura
mi_addnode (-r_cable,h4) --Punto izquierda Superior slot
mi_addnode (r_cable,h4)  --Punto derecha Superior slot
mi_addarc (-r_cable,h4,r_cable,0,180,2) --Semicircinferencia
superior
```

Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes

Pablo Macarro García

```
mi_addarc(r_cable,h4,-r_cable,0,180,2)  --Semicircinferencia
inferior

    cdg_y=h4
end

mi_addblocklabel(0,cdg_y)                --Etiqueta en el centro
mi_selectrectangle(-b_sup,h5,b_sup,0,4)  --Seleciono el slot
para llevarmelo al estátor. Rectángulo mayor

theta_med=asin(a/Re_int)
d=Re_int*(1-cos(theta_med))

mi_movetranslate(0,(Re_int-d),4)         --Lo subo para que los
puntos exteriores coincidan con el borde exterior

mi_selectarcsegment(0,Re_int)           --Seleciono el segmento que sobra
mi_deleteselected()                   --Elimino segmento que sobra

--Creación de los demás Slots
--ns_est=30                             --Número de slots
en el estátor
copies=(ns_est-1)
copyangle=360/ns_est                    --Ángulo entre slots
mi_selectrectangle(-b_sup,h5+(Re_int-d),b_sup,0,4)  --Seleciono el
slot para copiarlo
mi_copyrotate(0,0,copyangle,copies,4)  --Copiar el slot en
el estator
```

- **solve.lua**

```
mi_analyse()
mi_loadsolution()
```