



Universidad
Zaragoza

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

Diseño y configuración óptima de rodamientos magnéticos radiales de N polos

Autor
Jorge González Val

Director
Jesús Letosa Fleta

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2017

Autor del proyecto: Jorge González Val

Director del proyecto: Jesús Letosa Fleta (Departamento de Ingeniería Eléctrica)

Título del proyecto: Diseño y configuración óptima de rodamientos magnéticos radiales de N polos

Titulación: Ingeniería Industrial

RESUMEN

En este trabajo se ha estudiado el diseño y configuración óptima de rodamientos magnéticos radiales de N polos.

Al principio se exponen las ventajas de usar esta tipología de rodamientos, así como una serie de características propias de cada diseño obtenidas durante el desarrollo del proyecto. Las primeras páginas repasan de forma sencilla los principios fundamentales de los rodamientos magnéticos estudiados. En los anexos está incluido el script de QtOctave que permite realizar todos los cálculos.

Se han realizado muchas simulaciones, algunas de ellas están recogidas en los siguientes apartados y explican variaciones de diseño según algunos cambios de variables. Se incluye un estudio de las limitaciones que tienen este tipo de simulaciones frente a los resultados que se obtendrían mediante un modelo experimental. Se realizan algunas propuestas que podrían suponer un estudio adicional más minucioso y que aportarían posibles mejoras en el diseño de rodamientos magnéticos.

Los anexos incluyen algunos de los resultados obtenidos, así como tablas y diagramas usados, además del script antes mencionado.

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Ventajas de los rodamientos magnéticos frente a los mecánicos y tipologías más usadas	2
3. Estructura de los rodamientos magnéticos en estudio	3
4. Fundamentos físicos aplicados	4
5. Diseño de las dimensiones	6
6. Instrucciones, características del script y visualización de soluciones.	
6.1. Instrucciones y características del script	7
6.2. Visualización de la solución	10
7. Justificación del modelo	
7.1. Resultados obtenidos en el artículo	12
7.2. Modelado para cálculo de fuerzas	12
7.3. Variación de los resultados de la simulación con el mallado	16
7.4. Aproximaciones y simplificaciones aplicadas en la simulación	16
8. Variación de las dimensiones del rodamiento variando algunos parámetros operativos del mismo	
8.1. Radio del eje	17
8.2. Medida del gap	18
8. Conclusiones y trabajo futuro	18
9. Referencias y bibliografía	19
Anexos	21

1. Introducción

En las últimas décadas hay interés creciente en el desarrollo de rodamientos magnéticos sin contacto para máquinas eléctricas rotativas, que reduzcan su mantenimiento respecto a los rodamientos mecánicos convencionales, sobre todo en máquinas de alta velocidad. Para reducir el tiempo de desarrollo y costosos ensayos es frecuente la simulación electromagnética del rodamiento. De entre los procedimientos numéricos de simulación uno de los más habituales en la actualidad es el método de elementos finitos (FEM).

Para la realización del trabajo ha sido necesario un repaso de los temas sobre inducción electromagnética cursados durante la titulación. También ha sido preciso un estudio minucioso del artículo “*Optimal Number of Stator Poles for Compact Active Radial Magnetic Bearings,*” de Koichi Matsuda, Yoichi Kanemitsu y Shinya Kijimoto. Ha sido necesario un aprendizaje desde cero de cómo manejar el programa QtOctave, obtención de información adicional sobre comandos y búsqueda de paquetes adicionales.

Utilizando el programa los programas de software libre femm2D y QtOctave se ha desarrollado una herramienta que permite simular rodamientos activos magnéticos del tipo descrito en [1], con las características operativas deseadas, que permite la optimización de los mismos. Se realiza un estudio del estado de la técnica de los rodamientos magnéticos, exponiendo las ventajas e inconvenientes de cada tipo, comparándolos con los rodamientos mecánicos y mostrando su utilidad. Además, se desarrolla una herramienta paramétrica para la simulación, por el método de los elementos finitos en 2D, de rodamientos magnéticos radiales activos de N polos, del tipo descrito en [1].

La herramienta dispone de diferentes menús con opciones en las que se pueda elegir el rodamiento deseado a medida, según la geometría de la sección de cada polo, dimensión de gap, factor de empaquetamiento, diámetro eje central, etc. También simulará rodamientos según el número de polos: 3, 4, 6, 8, y configuraciones en herradura con 6 y 8 polos.

Después de analizar las limitaciones de los modelos desarrollados y con el fin de verificar su aproximación, se comparan los resultados obtenidos con los publicados en [1]. Por último, se visualiza mediante gráficos 2D como afecta a las dimensiones del rodamiento la variación de algunos uno de los parámetros operativos del mismo.

Este trabajo se basa principalmente en [1]. Se usarán las expresiones matemáticas y los datos aportados para desarrollar un programa informático en femm (software libre que permite simular en elementos finitos) y QtOctave (software libre para realizar cálculos numéricos).

2. Ventajas de los rodamientos magnéticos frente a los mecánicos y tipologías más usadas

Los rodamientos magnéticos se usan en lugar de los rodamientos de rodillos o bolas y de los cojinetes lubricados en aplicaciones de turbo-maquinaria de alto rendimiento. Las aplicaciones específicas incluyen bombas para fluidos peligrosos/cáusticos, husillos de mecanizado de precisión, volantes de almacenamiento de energía y bombas de alta fiabilidad y compresores.

Los cojinetes magnéticos funcionan sin lubricante. Esto los hace especialmente apropiados para máquinas que funcionan en entornos de vacío, con altas o bajas (criogénicas) temperaturas, o con agentes corrosivos. De hecho, cualquier máquina o proceso, que no tolere la contaminación de los lubricantes o las partículas de desgaste supone un objetivo para los cojinetes magnéticos. Dos ejemplos típicos son la industria de los equipos para semiconductores y las compañías de alimentación y bebidas. Una operación libre de lubricación significa que ya no se requieren los equipos relacionados con la lubricación, como las bombas y los filtros. Esto supone una reducción considerable de los costes totales de propiedad. Otra característica de los cojinetes magnéticos es la baja pérdida de rotación del eje. Esto permite reducir la potencia del motor y lograr mayores eficiencias. Una baja pérdida significa que las temperaturas de funcionamiento son generalmente más bajas que con otros rodamientos, como los de elementos rodantes o los cojinetes hidrodinámicos. Esto reduce la necesidad de utilizar equipos de refrigeración.

Los cojinetes magnéticos funcionan con un intersticio de aire controlado, que incluso puede ser una ventaja. En algunos procesos se requiere que un líquido o material pase por el cojinete. El intersticio de aire hace que esto sea posible. Las aplicaciones biológicas y farmacéuticas relacionadas con el procesamiento de células son sólo dos ejemplos. También es posible obturar herméticamente a los cojinetes magnéticos, lo que los hace atractivos para los procesos que manejen fluidos corrosivos que de lo contrario, atacarían al devanado o las laminaciones. Asimismo, se pueden sumergir bajo presión en los fluidos de los procesos sin la necesidad de obturaciones. Esto los hace extremadamente útiles en procesos sensibles como los de la industria alimentaria.

En comparación con los rodamientos mecánicos o los cojinetes hidrodinámicos, los cojinetes magnéticos permiten velocidades periféricas mucho más altas. Se pueden lograr velocidades de hasta 250 m/s o alrededor de 4,5 millones “n x d” (velocidad de giro en min-1 y diámetro en mm). Estas altas velocidades permiten muchas aplicaciones nuevas como husillos avanzados para máquinas herramienta.

Los primeros ahorros se logran eliminando el sistema de lubricación con aceite, el sistema de refrigerado, la caja de engranajes (un motor de alta velocidad, variable unido directamente a, por ejemplo, un compresor), el equipo de monitorización de estado y las piezas de repuesto. Al eliminar estos 'accesorios' también se incrementa la fiabilidad de la máquina.

Se pueden lograr dos ahorros adicionales. El primero gracias a una necesidad de mantenimiento regular menor y el segundo ahorrando en energía. Un cojinete magnético consume sólo una fracción de la energía consumida por un cojinete hidrodinámico.

El coste es mayor en comparación con rodamientos tradicionales. Su complejidad es una desventaja para usarlos y es una tecnología no muy conocida

Entre muchos tipos de rodamiento magnético radial activo, un cojinete heteropolar de 8 polos tiene muchas aplicaciones industriales porque se puede controlar fácilmente la fuerza necesaria. En contraste con los rodamientos de 8 polos, los rodamientos de 3 polos tienen pocas aplicaciones, y son más excelentes en un sentido de reducir el coste (menos electroimanes, material...).

Se debe usar una configuración de estator de 3 polos para diseñar un cojinete compacto en el caso de que tenga que soportar un diámetro de eje menor con mayores aberturas de aire. Un cojinete magnético heteropolar de 3 polos está diseñado y utilizado para soportar un rotor delgado.

La configuración de 8 polos herradura es la que más se usa para soportar fuerzas elevadas tiene más capacidad de carga. El inconveniente es que ocupa más espacio y resulta más caro de fabricar (más material).

Se han realizado simulaciones de todas las tipologías, comprobando la fuerza obtenida y diámetro exterior (ANEXO 9). En cualquier caso, se elegirá el más adecuado a las características del problema.

3. Estructura de los rodamientos magnéticos en estudio

El software desarrollado en el presente estudio es capaz de simular rodamientos de 3, 4, 6 y 8 polos; para simplificar la explicación de la estructura geométrica analizaremos rodamientos de 8 polos (ver ANEXO 9).

La configuración típica está compuesta de cuatro electroimanes con forma de herradura. Los cuatro imanes están dispuestos uniformemente alrededor de una pieza circular de hierro montada en el eje que está levitando. Cada uno de los electroimanes produce una fuerza que atrae el hierro del rotor, por lo que los cuatro electroimanes deben actuar en conjunto para producir una fuerza de magnitud y dirección arbitrarias en el rotor.

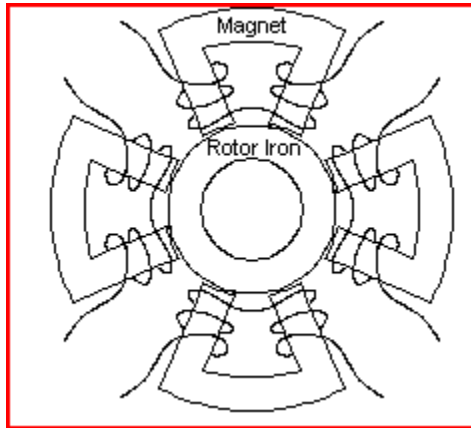


Figura 1 procede de [5]

Para conseguir resistencia estructural y tener capacidad de fabricación, este tipo de cojinete magnético está fabricado con hierro que conecta las herraduras, de manera que el hierro del estator es una pieza monolítica.

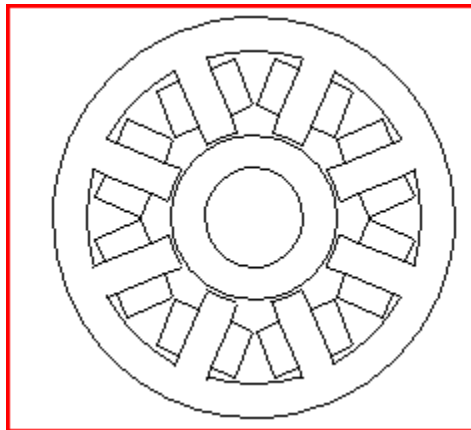


Figura 2 procede de [5]

Hay N vueltas de alambre alrededor de cada polo del cojinete, así que el cojinete se comporta funcionalmente como un rodamiento compuesto de herraduras discretas. Conjuntos de bobinas adyacentes están conectados entre sí en serie inversa, como muestra la figura.

4. Fundamentos físicos aplicados

Este tipo de cojinete magnético es susceptible de análisis a través de la teoría de circuitos magnéticos. Suponiendo fugas insignificantes y dejando de lado la reluctancia de las piezas de hierro de la trayectoria del flujo frente a la del hueco, se obtiene el siguiente circuito magnético:

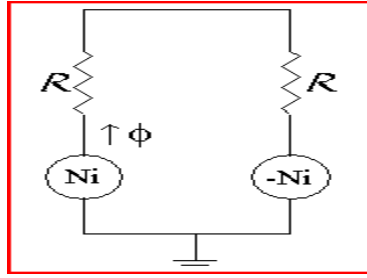


Figura 3 procede de [5].

Se representa como un circuito eléctrico con baterías y resistencias. Sin embargo, en lugar de la corriente tenemos Φ flujo, y en lugar de la resistencia existe reluctancia R . En vez de fuentes de voltaje, hay fuerza magnetomotriz (FMM) de Ni y de $-Ni$.

En términos de la geometría del rodamiento, la reluctancia (R) es:

$$R = \frac{g}{\mu_0 \times a}$$

donde g es el espacio de aire entre el rotor y la punta de cada polo del cojinete (gap), a es el área de la sección transversal de cada polo, y μ_0 es la permeabilidad del vacío (1.2566×10^{-6}).

Se puede resolver que para el flujo en el circuito:

$$\Phi = \frac{N \times i}{R} = \frac{\mu_0 \times a \times N \times i}{g}$$

donde N son las vueltas de bobina e i la intensidad que circula por ellas.

La densidad de flujo (B) en el espacio de aire es el flujo dividido por el área del entrehierro:

$$B = \frac{\Phi}{a} = \frac{\mu_0 \times N \times i}{g}$$

Usando el principio de trabajos virtuales obtenemos que la fuerza en cada polo.

$$F = \frac{B^2 \times a}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 \times N \times i}{2g}$$

Además, la densidad de flujo obtenible en el entrehierro debe limitarse por el flujo que es capaz de bajar a los polos del cojinete. Decir que el material del núcleo es ferromagnético y se satura con una fuerza de B_{SAT} . Entonces, la fuerza máxima que puede ser producida por la geometría de un cojinete en particular es:

$$F_{MAX} = \frac{B_{SAT}^2 \times a}{2\mu_0}$$

A efectos de diseño de los cojinetes es importante saber la corriente máxima requerida en una herradura:

$$i_{MAX} = \frac{B_{SAT} \times g}{N \times \mu_0}$$

5. Diseño de las dimensiones

Diseño según “*Optimal Number of Stator Poles for Compact Active Radial Magnetic Bearings*,” por Koichi Matsuda, Yoichi Kanemitsu, y Shinya Kijimoto [1]. Por lo visto en el apartado anterior para calcular necesito saber ciertas dimensiones; estas son: el espacio del entrehierro, la sección del electroimán y el número de espiras. A continuación se va a considerar cómo se seleccionan generalmente dichos valores.

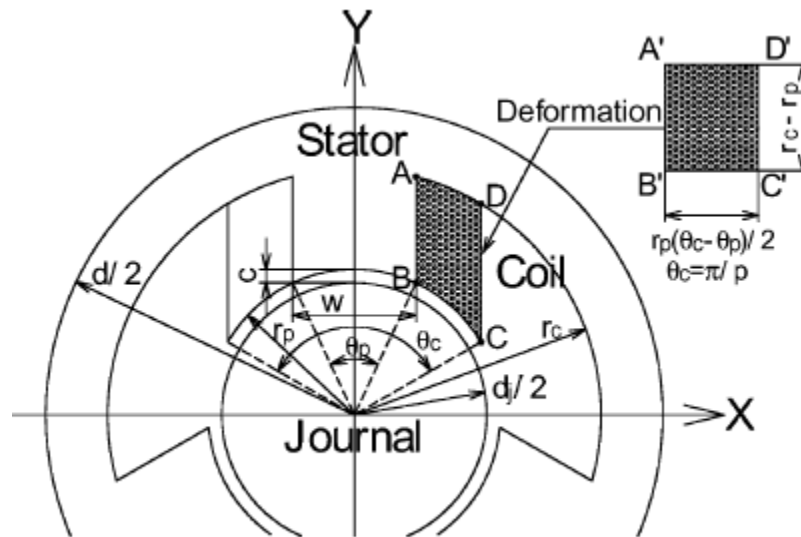
1º Área de la sección de cable S_w : Según corriente y densidad de corriente

$$S_w = \frac{I_0}{J_0}$$

2º Área transversal de la bobina A_c : Depende de área de la sección del cable, factor de empaquetamiento K_f (entre 0 y 1) y del número de vueltas de cable N

$$A_c \geq \frac{N * S_w}{K_f}$$

Figura 4



Bearing design parameters and deformation of coil cross section.

Figura 4 procede de [1]

3° Radio exterior de la bobina r_c :

$$r_c = r_p + \frac{2 * A_c}{[r_p * (\theta_c - \theta_p)]}$$

4° Diámetro exterior del rodamiento d :

$$d = 2 * r_c + 2 * w$$

donde

$$w = 2 * r_p * \sin \frac{\theta_p}{2}$$

En el ANEXO 3 se muestra una gráfica obtenida empíricamente para eje de diámetro $d_j=10$ mm, $C_r=0,01$ es la relación entre la holgura respecto al diámetro del eje.

$$c = c_r * d_j$$

Se toma dicha relación de valor 0,01 en todos los casos, para un eje de $d_j=100$ mm, entonces la distancia de entrehierro será 1mm.

En el eje de abscisas tenemos la capacidad específica de carga F_s ; ésta se define como:

$$F_s = \frac{\mu_0 * F_{\min}}{B_0^2 * d_j * L}$$

Calculando el valor de F_s , puedo obtener el valor de la relación de diámetros del estator, a continuación el diámetro exterior del estator d . Uso las tablas del ANEXO 3. La capacidad de carga de un rodamiento magnético se define como la máxima carga que el rodamiento puede generar. La situación más desfavorable cuando el rodamiento está a carga máxima se llama F_{\min} o fuerza mínima.

6. Instrucciones, características del script y visualización de soluciones.

6.1. Instrucciones y características del script

El presente script es una herramienta capaz de dibujar y simular por elementos finitos los casos que se describen a continuación. Al cargarlo aparecen diferentes los menús de opciones que se desglosan a continuación:

1) CASO: Pregunta que tipología de rodamiento se quiere estudiar:

1: Rodamiento de 3 polos.

1: Rodamiento de 4 polos.

1: Rodamiento de 6 polos.

1: Rodamiento de 8 polos.

1: Rodamiento de 6 polos herradura.

1: Rodamiento de 8 polos herradura.

- 2) K : El programa o script está definido para introducir valores de K al definir el rodamiento que queremos, Este valor define la forma geométrica del polo, si es cuadrada o rectangular $L=K*w$; La longitud será igual al ancho del polo si es cuadrada y $K=1$, Si la longitud es mayor que el ancho del polo será rectangular. Para testear se ha usado por defecto el valor 1. Lo que indica que el ancho es igual que la longitud del rodamiento.
- 3) F_L (K_f): Es el factor de llenado de las bobinas, parámetro poco influyente. Normalmente los cables son de sección redonda y van agrupados de tal forma que se maximice este valor. Para testear se ha usado por defecto el valor 1.
- 4) I_o : La intensidad que circula por las bobinas, No influye realmente en las dimensiones del rodamiento, pero hace que varíe el número de vueltas.
- 5) Gap: Pregunta por el tamaño del gap en milímetros.
- 6) F_{min} : Es el mínimo módulo de la fuerza que se aplica el rodamiento en el peor caso de ángulo de orientación de las fuerzas. Las tablas que aparecen en el ANEXO 5 son los valores óptimos de densidad de flujo magnética en esas circunstancias. Depende de la sección de polo ancho (w) y longitud (L)

Se han usado las características de material de las librerías para el hierro (Silicon Steel 3%), para las bobinas (copper) y aire (air)

En los CASOS 3 y 6 se ha definido una condición para que giren 30 grados, de acuerdo a la disposición del paper.

Se han aplicado reglas de simetría o rotación más copia para dibujar el plano del rodamiento, a partir de un polo parametrizado, de traslado un número de veces $360/p$. En este caso se crea primero el polo 1 (Arriba con eje $x=0$), las bobinas se designan con intensidad signo más (hacia adentro) la de la derecha y con signo menos (hacia fuera) la de la izquierda.

Se creó una regla para la correcta numeración de cada bobina, desde la primera (Arriba $x=0$), la parte que entra será denominada I_1 y la que sale I_2 , así hasta completar el número de bobinas existentes ($I_1, I_2, I_3 \dots I_n$) Los sentidos de las corrientes están definidos para cada caso según el paper, al igual que todas las normalizaciones, usando matrices, Para I_1 toma el primer valor de la matriz y así sucesivamente hasta I_8 . Si se elige el CASO 3 busca los valores de las corrientes para el CASO 3 y los aplica, al igual que cada una de las normalizaciones empleadas y las diferentes fórmulas a aplicar en cada caso para saber número de vueltas y fuerzas.

Se realiza un zoom en el que se centra en la pantalla el rodamiento y se amplía por dos.

Se han realizado múltiples simulaciones para comprobar el correcto funcionamiento, así como modificaciones de los menús de opciones a fin de optimizar el tiempo de testeo.

En el cálculo del número de vueltas se desprecian los decimales, si la cuenta da 35,8 toma como valor 25.

Se toman los siguientes valores $\mu_0=1.25664e-06 \text{ N}\cdot\text{A}^{-2}$, $B_0=1,4\text{T}$, $J_0=6 \text{ A/m}^2$, Permeabilidad relativa del material ferromagnético 2700 $\text{N}\cdot\text{A}^{-2}$ y conductividad 58 S/m del material ferromagnético

Se emplea un mallado por defecto de 1 bastante preciso y la frontera es el diámetro D o Diámetro exterior del estator.

Para empezar a trabajar se crea un nuevo proyecto y se abre el archivo .m. Es necesario definir la ubicación de los archivos .ans y .FEM, para ello es obligatorio modificar las líneas 537 y 525. Finalmente clicar en el símbolo del ordenador (send to octave).

6.2. Visualización de la solución

Para ver la fuerza voy a block integral y selecciono forcé via weighted stress tensor después de marcar el rotor.

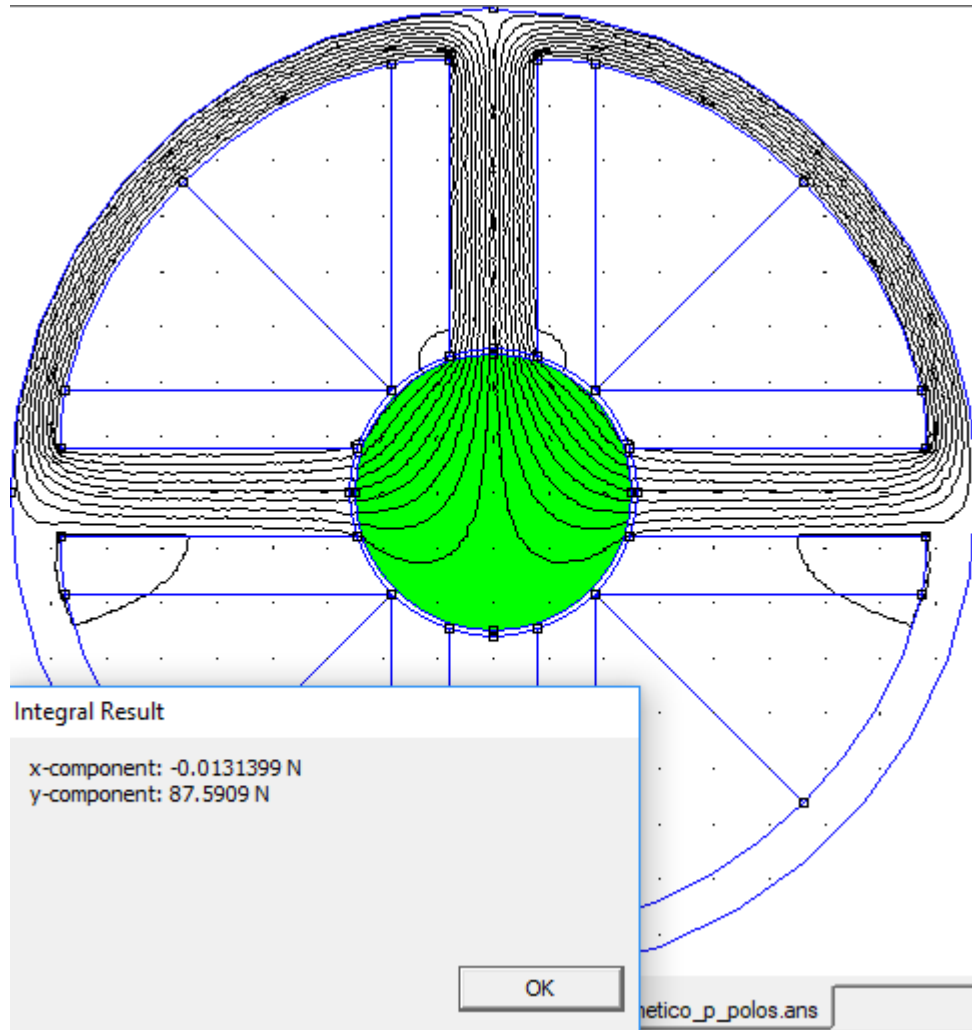
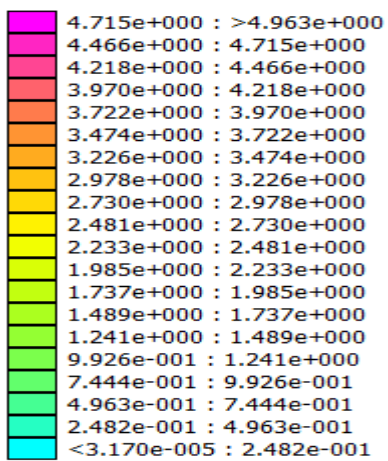
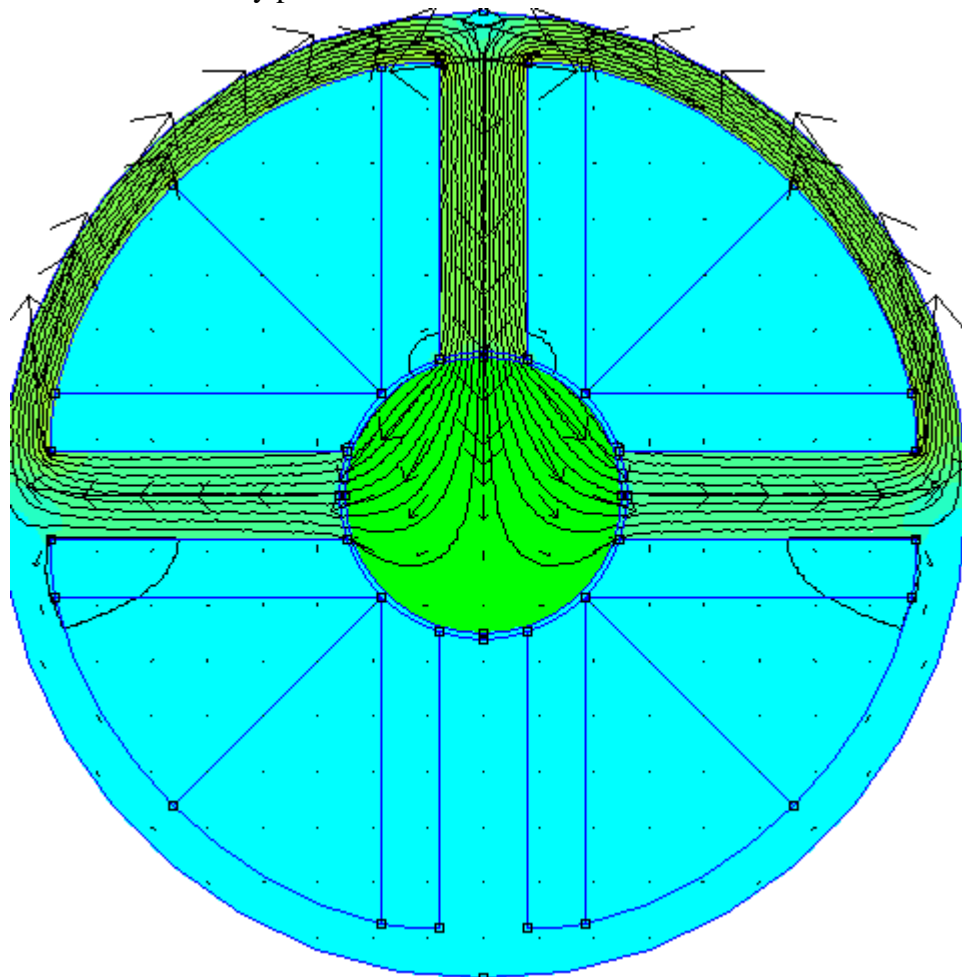


Figura 5

También podemos saber el valor de la densidad de flujo y en qué zonas es mayor mediante un código de colores, para ello señalo en plotted value la opción flux density (B) y señalo show density plot.



Density Plot: |B|, Tesla

Figura 6

7. Justificación del modelo

Para simular el rodamiento se ha empleado el programa de software libre femm; hay que justificar si el modelo del script es correcto, comparándolo con los resultados.

7.1. Resultados obtenidos en el artículo

En la referencia (1) se diseña y construye un rodamiento magnético heteropolar de 3 polos y se prueba utilizando el equipo de laboratorio. El equipo contiene un rotor delgado sostenido con un cojinete de bolas y el rodamiento magnético. La longitud y masa del rotor son 388 mm y 4,32 kg, respectivamente. El rotor está conectado a través de un tipo de mordaza de acoplamiento flexible a un motor de inducción trifásico. El motor de inducción tiene un rotor de jaula de ardilla con dos polos en los devanados del estator, y la salida es de 2,2 kW

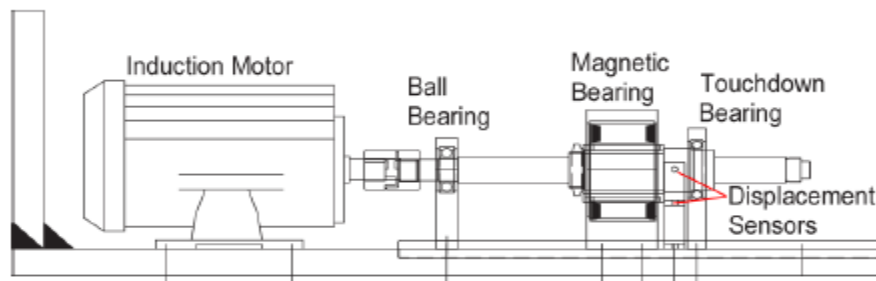


Figura 7 procede de [1]

Con respecto al cojinete magnético de 3 polos diseñado, los núcleos del rotor y del estator se fabrican por laminación de una chapa de acero de silicio de 0,35 mm de espesor. Las dimensiones del cojinete se muestran a continuación, y éste genera la fuerza máxima de 450 N aplicada con corriente eléctrica de 4 A en cada bobina.

Datos del artículo: $D=110$ mm, $D_j=64,4$ mm, $L=64,4$ mm, $\text{Gap}=0,5$

7.2. Modelado para cálculo de fuerzas

Lo mejor es comparar nuestros resultados con resultados experimentales o resultados publicados por otros autores. Para ello se dispone de los resultados del artículo [1].

Datos empleados en la simulación:

Rodamiento de 3 polos

Intensidad $I_0=4$ A

$B_0=1$ T

$K_f=0,5$

Espesor del gap $c=0,5\text{mm}$

Es preciso calcular K_i , el ratio de volumen de hierro en el rodamiento.

Mallado 1

Frontera el diámetro exterior

$L=64,4\text{mm}$

Diámetro de eje $64,4\text{ mm}$.

Para rodamientos de tres bobinas, miramos tablas de valores del paper (ANEXO 5)

$$\overline{F_{mn}} = 3/4$$

$$\overline{N_3} = 3/4$$

El número de vueltas para 3 polos es:

$$N = \frac{\overline{N_3} * \overline{R} * B_0}{I_0} = \frac{0,75 * 397,88 * 1}{4} = 74,6 \text{ redondeo a } 74$$

$$\overline{R} = \frac{\text{gap}}{\mu_0} = \frac{0,5 * 10^{-3}}{4 * \pi * 10^{-7}} = 397,88$$

La sección de un cable será S_w :

$$S_w = \frac{I_0}{J_0} = \frac{4}{6 * 10^6} = 6,66 * 10^{-7} \text{m}^2$$

Con los datos anteriores calculo la sección de la bobina A_c , teniendo en cuenta el factor de llenado $K_f=0,5$:

$$A_c = \frac{N * S_w}{K_f} = \frac{74 * 6,66 * 10^{-7}}{0,5} = 985,68 * 10^{-7} \text{m}^2 = 98,57 \text{mm}^2$$

Por otro lado, en el paper [1] tenemos los gráficos que relacionan el ratio D/D_j con la capacidad específica de carga. Calculamos F_s (Capacidad específica de carga):

Mediante el método de interpolación, se obtiene una gráfica que relaciona $F_s=f(D/D_j)$. Para ello interpolo las gráficas de [1] y represento una de acuerdo con el problema planteado

Las tablas son para $C_r=0,01$, el valor de C_r (gap relativo) según los datos aportados es:

$$C_r = \frac{C}{D_j} = \frac{0,5}{64,4} = 0,0077$$

$$\frac{D}{D_j} = \frac{110}{64,4} = 1,72$$

Fs	d/dj
0,01	1,13
0.05	1,256
0.1	1,4
0.15	1,55
0.2	1,74
0.25	1,95

Tabla 1

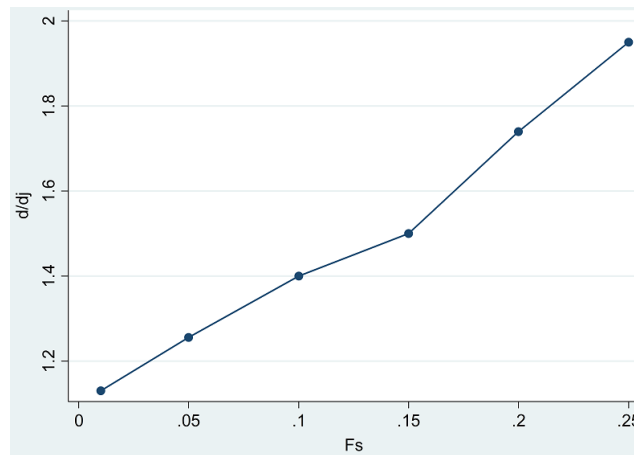


Imagen 8

Fs=0,19

Conocido el valor de F_s puedo despejar la ecuación que aparece en el paper para obtener S_p .

$$F_s = \frac{S_p * \overline{F_{min}}}{2 * d_j * L} \Rightarrow S_p = \frac{F_s * 2 * d_j * L}{\overline{F_{min}}} = \frac{0,19 * 2 * 0,0644 * 0,388}{0,75} = 0,0127m^2$$

La sección del polo S_p es el producto entre el ancho y la longitud del polo:

$$w = \frac{S_p}{L} = \frac{0,0126}{0,388} = 0,0327m$$

Se calcula otras dimensiones relevantes:

Radio r_c

$$r_c = \frac{D - w}{2} = \frac{0,11 - 0,0327}{2} = 0,03865m$$

Radio r_p

$$r_p = \frac{d_j}{2} + c = \frac{64,4}{2} + 0,5 = 32,7\text{mm} = 0,0327\text{m}$$

Ángulo φ_c

$$\theta_c = \frac{2 * \pi}{p} = \frac{2 * \pi}{3} = 2,1\text{rad}$$

Sabidas todas las dimensiones anteriores puedo conseguir la magnitud φ_p

$$\begin{aligned} r_c = r_p + \frac{2 * A_c}{r_p * (\theta_c - \theta_p)} &\Rightarrow \theta_p = \theta_c - \frac{2 * A_c}{(r_c - r_p) * r_p} \\ &= 2,1 - \frac{2 * 985,68 * 10^{-7}}{(0,03865 - 0,0327) * 0,0327} = 1,11 \end{aligned}$$

Y también despejo el factor K_i (ratio de hierro en el rodamiento)

$$\theta_p = K_i * \theta_c \Rightarrow K_i = \frac{\theta_p}{\theta_c} = \frac{1,11}{2,1} = 0,528$$

Cálculo fuerza mínima:

$$F_{min} = \frac{F_S * B_0^2 * D_j * L}{\mu_0} = \frac{0,19 * 0,0644 * 0,0644}{4 * \pi * 10^{-7}} = 627\text{N}$$

Resumiendo los cálculos:

D=110mm

Dj=64,44mm

F=627N

Dc=77,3mm

W=32,7mm

Dp=65,4mm

Ki=0,53

N=74

L=64,4mm

El programa o script está definido para introducir valores de k al definir el rodamiento que queremos, Este valor define la forma geométrica del polo, si es cuadrada o rectangular $L=K*w$; La longitud será igual al ancho del polo si es cuadrada y $K=1$, Si la longitud es mayor que el ancho del polo será rectangular.

$$K = \frac{L}{w} = \frac{64,4}{10,7} = 6$$

Para estos valores se realiza la simulación (ANEXO 7):
 $F_y=430\text{N}$ Aguanta el peso del rotor que es de 44N .

7.3. Variación de los resultados de la simulación con el mallado

Cuanto más fino sea el mallado más exactos serán los resultados, además podemos estimar que calidad de mallado es suficiente.

Se expone a continuación un resumen de los resultados para el mismo modelo con parámetros de simulación diferentes.

Se realizan las comprobaciones para rodamiento de 3 polos: $K=1$, Factor de llenado=0.9, Corriente bobinas $I_o=5\text{ A}$, $F_{\text{min}} 200\text{N}$, diámetro eje 100 mm , $\text{gap}=1\text{ mm}$.

Mallado	Elementos	Nodos
0,5	72952	144869
1	43147	21825
5	18881	9535
10	18881	9535

Tabla 2

Se observa una mínima diferencia de aproximadamente una décima al calcular entre el menor y el mayor valor. A partir de mallados mayores de 5 el programa usa el mismo número de nodos y elementos). Para el mallado más fino se observa un delay al ejecutarlo, tarda unos segundos más. La mayoría de simulaciones se han realizado con mallado 1.

7.4. Aproximaciones y simplificaciones aplicadas en la simulación

El número de vueltas de cable se determina por el análisis de circuito magnético para seis tipos de cojinetes magnéticos en esta sección. Muchos supuestos se hacen para simplificar el análisis en lo siguiente.

- a) Los cojinetes diseñados tienen una configuración heteropolar y no hay flujo suministrado desde el exterior.
- b) Los polos del estator tienen el mismo tamaño y están espaciados uniformemente, y los devanados tienen el mismo número de vueltas de alambre.

- c) Los cojinetes magnéticos ahora están compuestos de núcleos ferromagnéticos de hierro con pequeñas aberturas de aire, y el flujo magnético está completamente confinado al núcleo y al volumen de separación.
- d) Además, la permeabilidad del material del núcleo se supone muy superior a la del espacio libre, por lo que la reluctancia del núcleo se desprecia en el cálculo analítico. En la simulación se emplea un valor realista de permeabilidad, pero no espera que influya significativamente.
- e) Para simplificar aún más el análisis, el centro del eje se sitúa ahora en el centro del rodamiento y la reluctancia es la misma para todas las aberturas de aire.

8. Variación de las dimensiones del rodamiento variando algunos parámetros operativos del mismo

Por último, se analizará cómo afecta a las dimensiones del rodamiento la variación de cada uno de los parámetros operativos del mismo. Estos tests se realizan en las tipologías de 3 polos y 8 polos herradura.

8.1. Radio del eje

La potencia es igual al producto entre par y velocidad angular. Además la velocidad angular es el cociente entre velocidad lineal y radio eje. Si queremos velocidades angulares elevadas buscaremos radios menores aunque estaremos reduciendo el par transmitido. Según las condiciones de funcionamiento buscaremos un tipo de rodamiento u otro. Las tablas podrían usarse como catálogo.

Datos usados: $K=1$, $K_f=0.9$, Corriente bobinas $I_0=5$ A, $F_{min}=200$ N, $gap=1$.

Diámetro eje (mm)	Fuerza (N)	Diámetro exterior (mm)
50	179	142,4

Tabla 3: Para 3 polos

Diámetro eje (mm)	Fuerza (N)	Diámetro exterior (mm)
100	171	200

Tabla 4: Para 8 polos herradura

Se fija la fuerza y a partir de ella se obtienen la sección del polo usando.

Se observa un error de 0,11 para rodamientos de tres polos y de 0,15 en 8 polos herradura. Esta diferencia de valores podría ser debida a que las simulaciones son 2D, sería

interesante poder ver si ese error se reduce con diseños en 3D. (Representaciones en ANEXO 8)

8.2. Espesor del gap

Zona de aire del rodamiento que separa la parte central o eje de la parte exterior que permite la separación entre parte móvil y fija. Su espesor es un valor que se decide en el diseño, suele ser de 1 mm o menos.

Datos usados: $K=1$, $D_j=100$, Factor de llenado=0.9, Corriente bobinas $I_o=5$ A, F_{min} 200N.

Gap (mm)	Fuerza (N)	Diámetro exterior (mm)
1	147,848	110,4
5	184	236

Tabla 5: Para 3

Gap (mm)	Fuerza (N)	Diámetro exterior (mm)
1	188,616	194
5	204,1	556

Tabla 6: Para 8 polos

El entrehierro no es más que una zona donde el núcleo o camino del flujo sufre un salto o discontinuidad que se traduce en una zona con baja permeabilidad. Los rodamientos de 3 polos pueden ser diseñados con valores de entrehierro elevado, en las mismas condiciones ocupan mucho menos espacio. Un rodamiento de 3 polos tiene la mitad de tamaño que el de 8 polos.

9. Conclusiones y trabajo futuro

En este proyecto, utilizando el programa de software libre femm2D se ha desarrollado una herramienta que permite simular rodamientos activos magnéticos del tipo descrito en [1], con las características operativas deseadas, que permite la optimización de los mismos (ANEXO 4).

Se realizó también el estudio del estado de la técnica de los rodamientos magnéticos, exponiendo las ventajas e inconvenientes de cada tipo y se han comparado con los rodamientos mecánicos, mostrando su utilidad.

Dicha herramienta permite elegir el rodamiento deseado a medida, según geometría de la sección de cada polo, dimensión de gap, factor de empaquetamiento, diámetro eje central, etc. También simulará rodamientos según el número de polos: 3, 4, 6, 8, y configuraciones en herradura con 6 y 8 polos.

Se han analizado las limitaciones de los modelos desarrollados y con el fin de verificar su aproximación, se han comparado los resultados obtenidos con los publicados en [1]. También se ha estudiado cómo afecta a las dimensiones del rodamiento la variación de varios de los parámetros operativos del mismo.

Como trabajo futuro se propone lo siguiente:

- Diseño de rodamientos para soportar grandes solicitaciones, maquinaria pesada. Con tamaños mucho mayores y que necesite resistir más cargas.
- Diseñar posible rodamiento para diámetros de eje mayores, similar al caso anterior.
- Diseñar el sistema de control de corriente de las bobinas del rodamiento para su correcto funcionamiento.
- Construcción de un rodamiento y estudiar su comportamiento.

10. Referencias y bibliografía

[1] Koichi Matsuda, Yoichi Kanemitsu, y Shinya Kijimoto (2007). Optimal Number of Stator Poles for Compact Active Radial Magnetic Bearings. IEEE Transactions on Magnetics, Volume 43, Issue 8, pp. 3420-3427.

[2] Paul Allaire, J. Imlach, y J.P. McDonald (2017). Design, construction and test of magnetic bearings in an industrial canned motor pump. University of Virginia.

[3] Finite Element Method Magnetics. Version 4.2 User's Manual por David Meeker.

[4] Catálogo del fabricante de rodamientos SKF (<http://www.skf.com/es/industry-solutions/medical-health-care/products/magnetic-bearings/index.html>)

[5] Información básica de femm (<http://www.femm.info/wiki/RadialMagneticBearing>)

[6] Apuntes de Máquinas eléctricas (Universidad de Zaragoza)

[7] Isaac Royo Silvestre (2013). Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes. TAZ-TFM-2013-085, Universidad de Zaragoza.

Diseño y configuración optima de rodamientos magnéticos radiales de N polos

ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Ciclo de histéresis	22
ANEXO 2. Tabla inducción magnética en función del campo magnético	23
ANEXO 3. Tablas capacidad específica de carga en función del ratio (d/dj)	24
ANEXO 4. Tablas de densidad de corriente	25
ANEXO 5. Normalizaciones según artículo [1]	26
ANEXO 6. Script proyecto	27
ANEXO 7. Simulación del modelo del artículo [1]	37
ANEXO 8. Representación de rodamientos para comparar error	38
ANEXO 9. Representación de tipologías estudiadas	40
ANEXO 10. Representación de tipologías estudiadas	46

ANEXO 1. Ciclo de histéresis

Los dominios en un material ferromagnético son regiones con un campo magnético resultante de la suma de los campos magnéticos originados por el movimiento de los electrones de los átomos que conforman estas regiones.

Si sobre un material ferromagnético no actúa ningún campo magnético externo, la orientación de los campos magnéticos de los dominios esta ordenada al azar, como en la figura de abajo, pero si se aplica un campo magnético externo (como por ejemplo ocurre en los electroimanes), los campos magnéticos de estos dominios se orientan progresivamente en la dirección del campo magnético aplicado.

Si construimos un electroimán con un núcleo de material ferromagnético (hierro), la intensidad del campo magnético inducido por la bobina no sólo dependerá del número de espiras de la bobina y de la corriente que circule por la misma, también dependerá de la aportación de los campos magnéticos de los dominios. En el caso de que la corriente que circule por la bobina sea una corriente alterna, los dominios magnéticos están en constante movimiento, ya que tienden a orientarse en la dirección del campo alterna inducido en la bobina. Si representamos el valor del campo magnético en función del valor de la corriente (alterna) que circula por la bobina tenemos el llamado ciclo de histéresis.

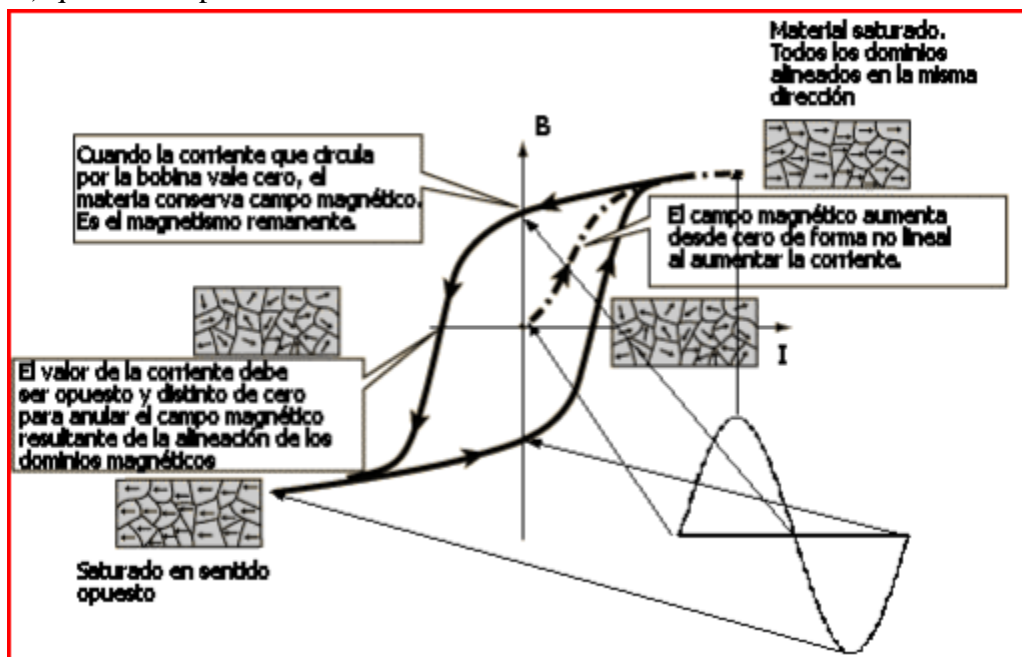


Figura 9 procede de [5]

Llamamos B_0 a la máxima intensidad de campo magnético e I_0 a la corriente en ese punto.

ANEXO 2. Tabla inducción magnética en función del campo magnético

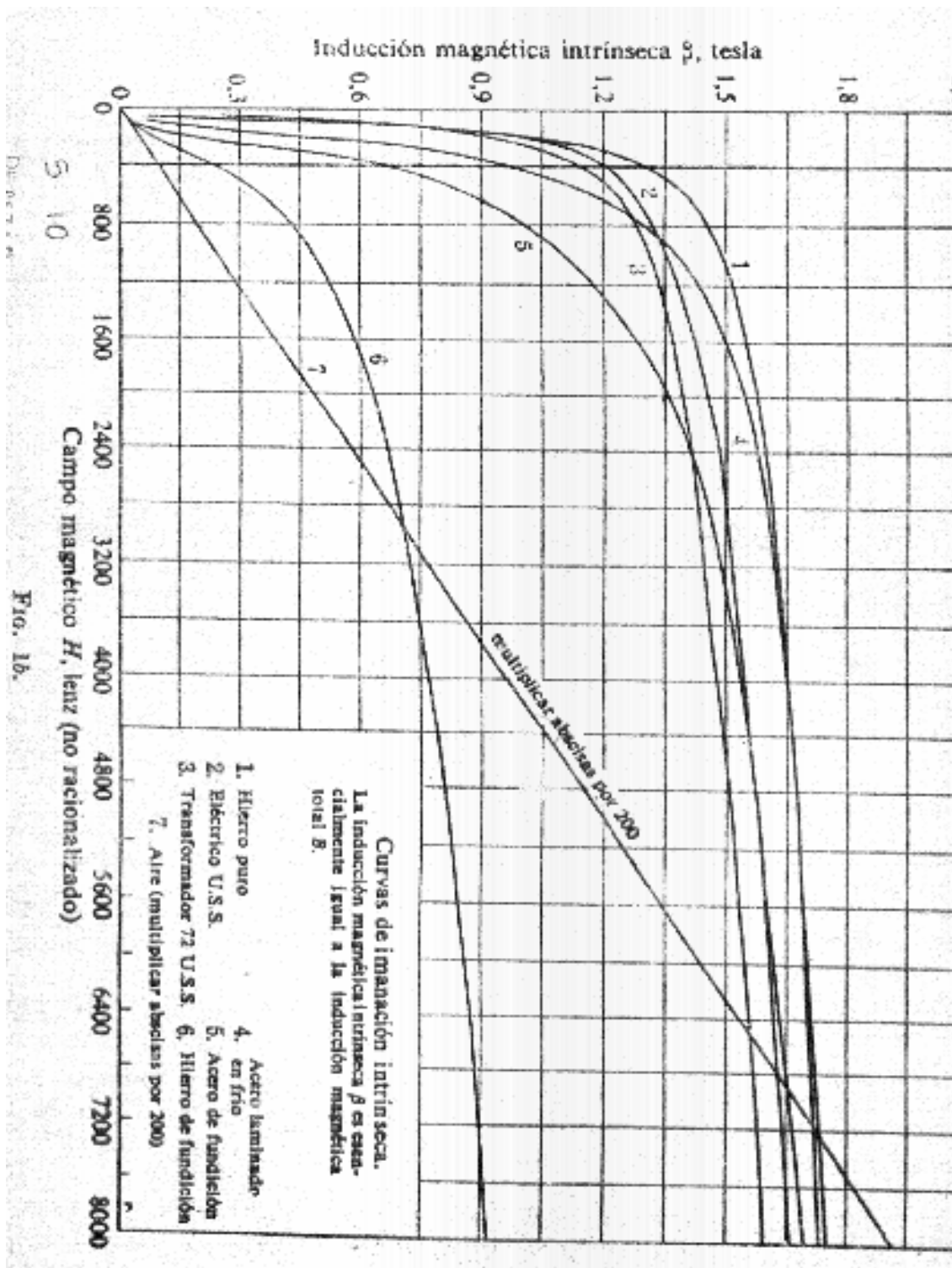


Figura 9 procede de [5]

ANEXO 4. Tablas de densidad de corriente

Según ITC-BT-06 REDES AÉREAS PARA DISTRIBUCIÓN EN BAJA TENSIÓN Conductores desnudos de cobre y aluminio.

Las intensidades máximas admisibles en régimen permanente serán las obtenidas por aplicación de la tabla siguiente:

Sección nominal mm ²	Densidad de corriente A/mm ²	
	Cobre	Aluminio
10	8,75	--
16	7,60	6,00
25	6,35	5,00
35	5,75	4,55
50	5,10	4,00
70	4,50	3,55
95	4,05	3,20
120	--	2,90
150	--	2,70

Tabla 7 procede de [5]

En el presente trabajo se ha elegido un valor aproximado de 6 A/mm². Refrigeración natural.

ANEXO 5. Normalizaciones según artículo [1]

TABLE I
OPTIMAL VALUES OF $\bar{B}_j = B_j/B_0$

	\bar{B}_1	\bar{B}_2	\bar{B}_3	\bar{B}_4	\bar{B}_5	\bar{B}_6	\bar{B}_7	\bar{B}_8
A	1	-1/2	-1/2					
B	1	-1/2	0	-1/2				
C	-1	1	0	0	-1	1		
D	1	-1	1/2	0	0	0	1/2	-1
E	1	0	$1/\sqrt{2}$					
F	1	$1/\sqrt{2}$	0	$1/\sqrt{2}$				

TABLE II
WORST LOAD CAPACITY AND NUMBER OF TURNS IN THE WINDINGS

	A	B	C	D	E	F
p	3	4	6	8	6	8
\bar{F}_{\min}	3/4	1	$\sqrt{3}$	$1+\sqrt{2}$	3/2	$2\cos(\pi/8)$
\bar{N}_p	3/4	3/4	1	1	1	1
$p\bar{N}_p$	9/4	3	6	8	6	8

Tabla 8 procede de [1]

La tabla 1 indica los valores de B_{gorro} que se usan en el programa desarrollado para cada caso.

La tabla 2 indica valores de F_{mingorro} y N_{pgorro} .

ANEXO 6. Script proyecto

%%DEFINICIÓN DEL TIPO DE PROBLEMA

```
% Datos mm
%% Inicio la tarea de mi programa
printf("Abriendo FEMM (Iniciando conexión de Octave a FEMM...\n");
openfemm % Abrimos el FEMM
printf("Creando documento de FEMM para simulación magnéticos...\n");
newdocument(0); % Creamos nuevo documento de femm magnético
printf("Especificando características del problema...\n");
% Inicialización de variables
L=1;
% Frecuencia -> 0 Hz, al trabajar con corriente en DC; Unidades -> milímetros; Simetría ->
axial o axisimétrica; El resto de valores por defecto
mi_probdef(0, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, L, 30); % Especificamos las características del
problema en femm
```

%%DEFINICIÓN DE VARIABLES

```
%% Preguntar por pantalla;
Caso=prompt('Introduce caso a resolver de 1 al 6:');
K=prompt('Introduce ratio entre ancho y largo del polo: K, entre 0,5 y 2');
Rj=prompt('Introduce valor del radio del eje mm:Rj entre 25 y 100');
FL=prompt('Introduce factor de llenado: FL entre 0.6 y 1') ;
Io=prompt('Introduce corrientes bobinas: Io en A entre 1 y 5' ) ;
gap=prompt('Introduce valor gap en mm: gap entre 1 y 5'); %% mm, valor elegido
Fmin=prompt('Introduce valor objetivo de la fuerz: Fmin entre 100 y 500') ; %% Newtons
% Valores para testear
% K=1;
% Rj=50;
% FL=0.9;
% Io=5;
% Fmin=200;
% gap=1;
```

%%DEFINICIÓN DE CONSTANTES

```
Bo=1; %% Teslas, Según curva material ferromagnético
Bmax=Bo;
uo=1.25664e-06; %% Permeabilidad magnética
Jo=6; %% Este valor depende del tipo de refrigeración. Para refrigeración natural toma este
valor, según tablas A/mm2
% Normalizaciones según caso
```

```

if Caso==1
Fmingorro=3/4;
Npgorro=3/4;
p=3;
I1=Io;
I2=-Io;
I3=-Io;
I=[I1,-I1,I2,-I2,I3,-I3,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
elseif Caso==2
Fmingorro=1;
Npgorro=3/4;
p=4;
I1=Io;
I2=-Io;
I3=-Io/3;
I4=-Io;
I=[I1,-I1,I2,-I2,I3,-I3,I4,-I4,0,0,0,0,0,0,0];
elseif Caso==3
Fmingorro=sqrt(3);
Npgorro=1;
p=6;
I1=Io;
I2=-Io;
I3=0;
I4=0;
I5=Io;
I6=-Io;
I=[I1,-I1,I2,-I2,0,0,0,0,I5,-I5,I6,-I6,0,0,0];
elseif Caso==4
Fmingorro=1+sqrt(2)
Npgorro=1;
p=8;
I1=Io;
I2=-Io;
I3=Io/2;
I4=0;
I5=0;
I6=0;
I7=Io/2;
I8=-Io;
I=[I1,-I1,I2,-I2,I3,-I3,0,0,0,0,0,0,I7,-I7,I8,-I8];

```

```

elseif Caso==5
Fmingorro=3/2;
Npgorro=1;
p=6;
I1=Io;
I2=Io;
I3=0;
I4=0;
I5=Io/sqrt(2);
I6=Io/sqrt(2);
I=[I1,-I1,-I2,I2,I3,-I3,-I4,I4,I5,-I5,-I6,I6,0,0,0,0];
elseif Caso==6
Fmingorro=1.88;
Npgorro=1;
p=8;
I1=Io;
I2=(Io/2);
I3=(Io/2);
I4=0;
I5=0;
I6=(Io/2);
I7=(Io/2);
I8=Io;
I=[I1,-I1,-I2,I2,I3,-I3,-I4,I4,I5,-I5,-I6,I6,I7,-I7,-I8,I8];
endif
Valores_Bgorro=[1,-1/2,-1/2,0,0,0,0,0;
1,-1/2,0,-1/2,0,0,0,0;
-1,1,0,0,-1,1,0,0;
1,-1,1/2,0,0,0,1/2,-1;
1,0,1/sqrt(2),0,0,0,0,0;
1,1/sqrt(2),0,1/sqrt(2),0,0,0,0];
Valores_B=Bo*Valores_Bgorro;
Rgorro=gap*1e-3/uo; %%Normalización, según gap elegido

```

%% CÁLCULO NORMALIZADO DE LA SECCION DE UN POLO

```

amm=(Fmin/Fmingorro)*(2*uo/Bmax^2)*1000000; %%mm^2
w=sqrt(amm/K);
L=K*w;
mi_probdef(0, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, L, 30);
am=amm/1000000; %%m^2
L=amm/w;

```

alfa_p=am/(2*uo); %% Normalización

%% DEFINICION DE LAS BOBINAS

Nmin=floor(3*Rgorro*Bo/Io); %% Número de espiras. Redondeo al entero más cercano por abajo floor(1.6)=1

Sc=Io/Io; %% mm², sección del conductor

Sbobina=Sc*Nmin/FL; %% mm², Depende del factor de llenado elegido

%% CÁLCULO DE LAS FUERZAS Fx, Fy, Fo

%% CÁLCULO DE LAS FUERZAS Fx, Fy, Fo y número de espiras (Redondeo al entero más cercano por abajo floor(1.6)=1)

if Caso==1

Fx=alfa_p*(2*Valores_B(Caso,1)^2-Valores_B(Caso,2)^2-Valores_B(Caso,3)^2)/2;

Fy=(3)^(1/2)*alfa_p*(Valores_B(Caso,3)^2-Valores_B(Caso,2)^2);

Fo=(Fx^2+Fy^2)^(1/2) % Módulo de la fuerza

Nmin=floor(Npgorro*Rgorro*Bo/Io);

elseif Caso==2

Fx=alfa_p*(Valores_B(Caso,1)^2-Valores_B(Caso,3)^2);

Fy=alfa_p*(Valores_B(Caso,4)^2-Valores_B(Caso,2)^2);

Fo=(Fx^2+Fy^2)^(1/2); % Módulo de la fuerza

Nmin=floor(Npgorro*Rgorro*Bo/Io);

elseif Caso==3

Fx=((3)^(1/2)*alfa_p/2)*(Valores_B(Caso,1)^2-Valores_B(Caso,3)^2-
Valores_B(Caso,4)^2+Valores_B(Caso,6)^2);

Fy=(alfa_p/2)*(Valores_B(Caso,4)^2+2*Valores_B(Caso,5)^2+Valores_B(Caso,6)^2-
Valores_B(Caso,1)^2-2*Valores_B(Caso,2)^2-Valores_B(Caso,3)^2);

Fo=(Fx^2+Fy^2)^(1/2); % Módulo de la fuerza

Nmin=floor(Npgorro*Rgorro*Bo/Io);

elseif Caso==4

Fx=(alfa_p/((2)^(1/2)))*(Valores_B(Caso,6)^2+((2)^(1/2))*Valores_B(Caso,7)^2+Valores
_B(Caso,8)^2-Valores_B(Caso,2)^2-((2)^(1/2))*Valores_B(Caso,3)^2-
Valores_B(Caso,4)^2);

Fy=(alfa_p/((2)^(1/2)))*(((2)^(1/2))*Valores_B(Caso,1)^2+Valores_B(Caso,2)^2-
Valores_B(Caso,4)^2-((2)^(1/2))*Valores_B(Caso,5)^2-
Valores_B(Caso,6)^2+Valores_B(Caso,8)^2);

Fo=(Fx^2+Fy^2)^(1/2); % Módulo de la fuerza

Nmin=floor(Npgorro*Rgorro*Bo/Io);

elseif Caso==5

Fx=(3)^(1/2)*alfa_p*(2*Valores_B(Caso,3)^2-Valores_B(Caso,1)^2-
Valores_B(Caso,2)^2);


```

Fy=3*alfa_p*(Valores_B(Caso,1)^2-Valores_B(Caso,2)^2);
Fo=(Fx^2+Fy^2)^(1/2); % Módulo de la fuerza
Nmin=floor(Npgorro*Rgorro*Bo/Io);
elseif Caso==6
Fx=2*alfa_p*(Valores_B(Caso,2)^2-Valores_B(Caso,4)^2)*0.71;
Fy=2*alfa_p*(Valores_B(Caso,1)^2-Valores_B(Caso,2)^2)*0.71;
Fo=(Fx^2+Fy^2)^(1/2); % Módulo de la fuerza
Nmin=floor(Npgorro*Rgorro*Bo/Io);
Endif

```

%% DEFINICIÓN GEOMETRÍA

```

Rp=Rj+gap %% mm, depende radio eje y gap
Titac=2*pi/p; %% rad, depende número de polos
Titap_mitad=asin((w/2)/Rp) %% rad, depende w (ancho polo)
Titap=Titap_mitad*2;
Rc=Rp+(2*Sbobina/(Rp*(Titac-Titap))); %% mm, radio interior estator
PuntoBx=w/2; %% coordenada x punto B (bobina)
PuntoBy=cos(Titap_mitad)*Rp; %% coordenada y punto B (bobina)
Ki=Titap/Titac %% coeficiente que indica el grado de ocupación del espacio
R=Rc+w/2; %% mm, radio exterior estator
PuntoAx=PuntoBx; %% coordenada x punto A (bobina)
PuntoAy=PuntoBy+(Rc-Rp); %% coordenada y punto A (bobina)
PuntoCx=Rp*sin(Titac/2); %% coordenada x punto C (bobina)
PuntoCy=Rp*cos(Titac/2); %% coordenada y punto C (bobina). Ángulo en radianes
PuntoDx=PuntoCx; %% coordenada x punto D (bobina)
PuntoDy=PuntoDx/tan(asin(PuntoDx/Rc)); %% coordenada y punto D (bobina)
DifAngulos=(Titac-Titap)/2; %% ángulo auxiliar para definir arcos de la bobina
Puntoauxx=Rc*sin(Titac/2); %% punto auxiliar para definir arco en estator interior
Puntoauxy=Rc*cos(Titac/2); %% punto auxiliar para definir arco en estator interior
Titaaux=(Titac/2)-asin(PuntoDx/Rc) %% grados, ángulo auxiliar para definir el ángulo del
arco auxiliar

```

%% REPRESENTACIÓN GRÁFICA ((POLO+BOBINA))

```

mi_addnode(0,Rp);
mi_addnode(Rj,0);
mi_addnode(0,Rj);
mi_addnode(-Rj,0);
mi_addnode(0,-Rj);
mi_addarc(Rj,0,0,Rj,90,10);
mi_addarc(0,Rj,-Rj,0,90,10);
mi_addarc(-Rj,0,0,-Rj,90,10);

```

```

mi_addarc(0,-Rj,Rj,0,90,10);
mi_addnode(R,0);
mi_addnode(0,R);
mi_addnode(-R,0);
mi_addnode(0,-R);
mi_addarc(R,0,0,R,90,10);
mi_addarc(0,R,-R,0,90,10);
mi_addarc(-R,0,0,-R,90,10);
mi_addarc(0,-R,R,0,90,10);
mi_addnode(PuntoAx,PuntoAy);
mi_addnode(PuntoBx,PuntoBy);
mi_addnode(PuntoCx,PuntoCy);
mi_addnode(PuntoDx,PuntoDy);
mi_addnode(Puntoauxx,Puntoauxy);
mi_addsegment(PuntoAx,PuntoAy,PuntoBx,PuntoBy);
mi_addsegment(PuntoCx,PuntoCy,PuntoDx,PuntoDy);
mi_addsegment(PuntoCx,PuntoCy,Puntoauxx,Puntoauxy);
mi_addarc(PuntoCx,PuntoCy,0,Rp,(180/pi)*Titac/2,10); %% mi
addarc(x1,y1,x2,y2,angle,maxseg)
mi_addarc(Puntoauxx,Puntoauxy,PuntoDx,PuntoDy,(180/pi)*(Titaaux),10);
mi_addarc(PuntoDx,PuntoDy,PuntoAx,PuntoAy,(180/pi)*(asin(PuntoDx/Rc)),10);
%% % % % % % DEFINICIÓN GRUPO 1 % % % % % % %
mi_selectarcsegment(Rp*sin(0.5*(Titap/2)),Rp*cos(0.5*(Titap/2)));
mi_selectarcsegment(Rp*sin(0.5*Titap+(0.5*((Titac-
Titap)/2))),Rp*cos(0.5*Titap+(0.5*((Titac-Titap)/2))));
j1=asin(PuntoAx/Rc)
j2=asin(PuntoDx/Rc)
mi_selectarcsegment(Rc*sin(j1+0.5*((j1+j2)/2)),Rc*cos((j1+0.5*((j1+j2)/2))));
mi_selectarcsegment(Puntoauxx,Puntoauxy);
mi_setgroup(1);
mi_clearselected;
mi_selectsegment(PuntoBx,PuntoBy+0.5*(PuntoAy+PuntoBy));
mi_selectsegment(PuntoCx,PuntoCy+0.5*(PuntoCy+PuntoDy));
mi_selectsegment(Puntoauxx,Puntoauxy);
mi_setgroup(1);
mi_clearselected;

%% % SIMETRÍAS Y TRASLACIONES
mi_selectgroup(1);
mi_mirror(0,0,0,R);
mi_clearselected;

```

```
mi_selectgroup(1);
mi_copyrotate(0,0,360/p,p-1);
mi_clearselected;
```

%%MATERIALES Y PROPIEDADES

```
PermeabilidadRelativa = 2700; % Permeabilidad relativa del material ferromagnético
ConductividadFerromagnetico = 2.08333333333; % Conductividad del material
ferromagnético (La inversa de la resistividad) % Número de espiras que contiene la bobina
ConductividadConductor = 58; % Conductividad del material que pertenece a la bobina(En
este caso es el mismo que el material de librería "Copper")
Mallado = 1; % Tamaño del mallado en el material
mi_addmaterial("Silicon steel 3%",PermeabilidadRelativa, PermeabilidadRelativa, 0, 0,
ConductividadFerromagnetico, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0 );
mi_getmaterial("Air");
mi_getmaterial("Copper");
```

%%ETIQUETAS PARA ASIGNAR MATERIALES

```
%%Seleccionar eje para aplicarle el grupo 2%%
%mi_selectarcsegment(Rj/2,Rj/2);
%mi_setgroup(2);
%mi_clearselected;
mi_addblocklabel(0,0); %%%mi_addblocklabel(x,y). Etiqueta eje y definir material
mi_selectlabel(0,0);
mi_setblockprop("Silicon steel 3%", 0, Mallado, 0, 0, 2, 0)
mi_clearselected;
%%Seleccionar rodamiento magnético para aplicarle el grupo 3%%
%mi_selectarcsegment((R+Rc/2)+0.5,0)
%mi_selectarcsegment((R+Rc/2)-0.5,0)
%mi_setgroup(3);
%mi_clearselected;
mi_addblocklabel(0,(Rc+R)/2); %%%mi_addblocklabel(x,y). Etiqueta rodamiento y definir
material
mi_selectlabel(0,(Rc+R)/2);
mi_setblockprop("Silicon steel 3%", 0, Mallado, 0, 0, 3, 0)
mi_clearselected;
mi_selectlabel(0,(Rc+R)/2);
mi_setgroup(2);
mi_clearselected;
mi_addblocklabel((((Rc+Rp)/2)*sin(Titac/2)-
PuntoDx)/2+PuntoDx,((Rc+Rp)/2)*cos(Titac/2));
mi_selectlabel((((Rc+Rp)/2)*sin(Titac/2)-PuntoDx)/2+PuntoDx,((Rc+Rp)/2)*cos(Titac/2))
```

```

mi_setblockprop("Air", 0, Mallado, 0, 0, 3, 0)
mi_clearselected;
mi_selectlabel((((Rc+Rp)/2)*sin(Titac/2)-PuntoDx)/2+PuntoDx,((Rc+Rp)/2)*cos(Titac/2));
mi_setgroup(3);
mi_clearselected;
mi_selectgroup(3);
mi_mirror(0,0,0,R);
mi_clearselected;
mi_selectgroup(3);
mi_copyrotate(0,0,360/p,p-1);
mi_clearselected;
%% Seleccionar aire interior para aplicarle el grupo 4%%
%mi_selectarcsegment(Rj/2,Rj/2);
%mi_selectarcsegment(Rp,Rp+0.1);
%mi_setgroup(4);
%mi_clearselected;
mi_addblocklabel((Rp+Rj)/2,0); %%% Etiqueta del aire y definir material
mi_selectlabel((Rp+Rj)/2,0)
mi_setblockprop("Air", 0, Mallado, 0, 0, 4, 0)
mi_clearselected;
Giro=360/p;
for i=2:p
Int_bob_1=strcat("I_",num2str(2*(i-1)+1));
Int_bob_2=strcat("I_",num2str(2*(i-1)+2));
aux1=I(1,2*(i-1)+1);
aux2=I(1,2*(i-1)+2);
mi_addcircprop(Int_bob_1,aux1, 1);
mi_addcircprop(Int_bob_2,aux2, 1);
mi_addblocklabel((PuntoBx+PuntoCx)/2,(PuntoAy+PuntoBy)/2);
mi_selectlabel((PuntoBx+PuntoCx)/2,(PuntoAy+PuntoBy)/2);
mi_setblockprop("Copper", 0, Mallado, Int_bob_1, 0 , 5, Nmin);
mi_clearselected;
mi_addblocklabel(-(PuntoBx+PuntoCx)/2,(PuntoAy+PuntoBy)/2);
mi_selectlabel(-(PuntoBx+PuntoCx)/2,(PuntoAy+PuntoBy)/2);
mi_setblockprop("Copper", 0, Mallado, Int_bob_2, 0 , 5, Nmin);
mi_clearselected;
mi_selectlabel((PuntoBx+PuntoCx)/2,(PuntoAy+PuntoBy)/2);
mi_selectlabel(-(PuntoBx+PuntoCx)/2,(PuntoAy+PuntoBy)/2);
mi_moverotate(0,0,(i-1)*Giro);
mi_clearselected
endfor

```

```

mi_addcircprop("I_1",I(1,1), 1);
mi_addcircprop("I_2",I(1,2), 1);
mi_addblocklabel((PuntoBx+PuntoCx)/2,(PuntoAy+PuntoBy)/2);
mi_selectlabel((PuntoBx+PuntoCx)/2,(PuntoAy+PuntoBy)/2);
mi_setblockprop("Copper", 0, Mallado, 'I_1', 0 , 5, Nmin);
mi_clearselected;
mi_addblocklabel(-(PuntoBx+PuntoCx)/2,(PuntoAy+PuntoBy)/2);
mi_selectlabel(-(PuntoBx+PuntoCx)/2,(PuntoAy+PuntoBy)/2);
mi_setblockprop("Copper", 0, Mallado, 'I_2', 0 , 5, Nmin);
mi_clearselected;
%GIRAR CASOS 3 y 6
if Caso==1
mi_selectgroup(1);
mi_selectgroup(2);
mi_selectgroup(3);
mi_selectgroup(4);
mi_selectgroup(5);
mi_moverotate(0,0,0);
mi_clearselected;
elseif Caso==2
mi_selectgroup(1);
mi_selectgroup(2);
mi_selectgroup(3);
mi_selectgroup(4);
mi_selectgroup(5);
mi_moverotate(0,0,0);
mi_clearselected;
elseif Caso==3
mi_selectgroup(1);
mi_selectgroup(2);
mi_selectgroup(3);
mi_selectgroup(4);
mi_selectgroup(5);
mi_moverotate(0,0,30);
mi_clearselected;
elseif Caso==4
mi_selectgroup(1);
mi_selectgroup(2);
mi_selectgroup(3);
mi_selectgroup(4);
mi_selectgroup(5);

```

```

mi_moverotate(0,0,0);
mi_clearselected;
elseif Caso==5
mi_selectgroup(1);
mi_selectgroup(2);
mi_selectgroup(3);
mi_selectgroup(4);
mi_selectgroup(5);
mi_moverotate(0,0,0);
mi_clearselected;
elseif Caso==6
mi_selectgroup(1);
mi_selectgroup(2);
mi_selectgroup(3);
mi_selectgroup(4);
mi_selectgroup(5);
mi_moverotate(0,0,22.5);
mi_clearselected;
endif

```

%%DELIMITACIÓN DE LA FRONTERA

```

mi_addboundprop("Tangencial", 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
% Seleccionar a la frontera para aplicarle la condición de contorno, decido que la frontera
sea la circunferencia exterior de radio R (menos pérdidas).
mi_selectarcsegment(R*cos(45*pi/180),R*sin(45*pi/180));
mi_selectarcsegment(-R*cos(45*pi/180),R*sin(45*pi/180));
mi_selectarcsegment(R*cos(45*pi/180),-R*sin(45*pi/180));
mi_selectarcsegment(-R*cos(45*pi/180),-R*sin(45*pi/180));
mi_setarcsegmentprop(10,"Tangencial", 0, 0, 1)
mi_clearselected;

```

%% DIBUJAR Y SIMULAR

```

%Dibujar(); % Dibuja el cojinete magnético
% Se hace un zoom del rodamiento magnético en FEMM
mi_zoom(R+10,R+10,-R-10,-R-10);
% Se guarda el archivo con el nombre que deseemos sin espacios y con extensión .FEM
mi_saveas('C:\Users\Jorge\Desktop\Proyecto\RodamientoMagnético_p_polos.FEM');
% Se hace una simulación con FEMM----
mi_analyze(0);
mi_loadsolution;
%%%POST PROCESADO

```

```
% Se hace zoom de la pieza en FEMM
mi_zoom(R+10,R+10,-R-10,-R-10);
disp(Mallado);
mi_saveas('C:\Users\Jorge\Desktop\Proyecto\RodamientoMagnetico_p_polos.ans');
%mo_close;
disp("fin");
%%Fin del programa
```

ANEXO 7. Simulación del modelo del artículo [1]

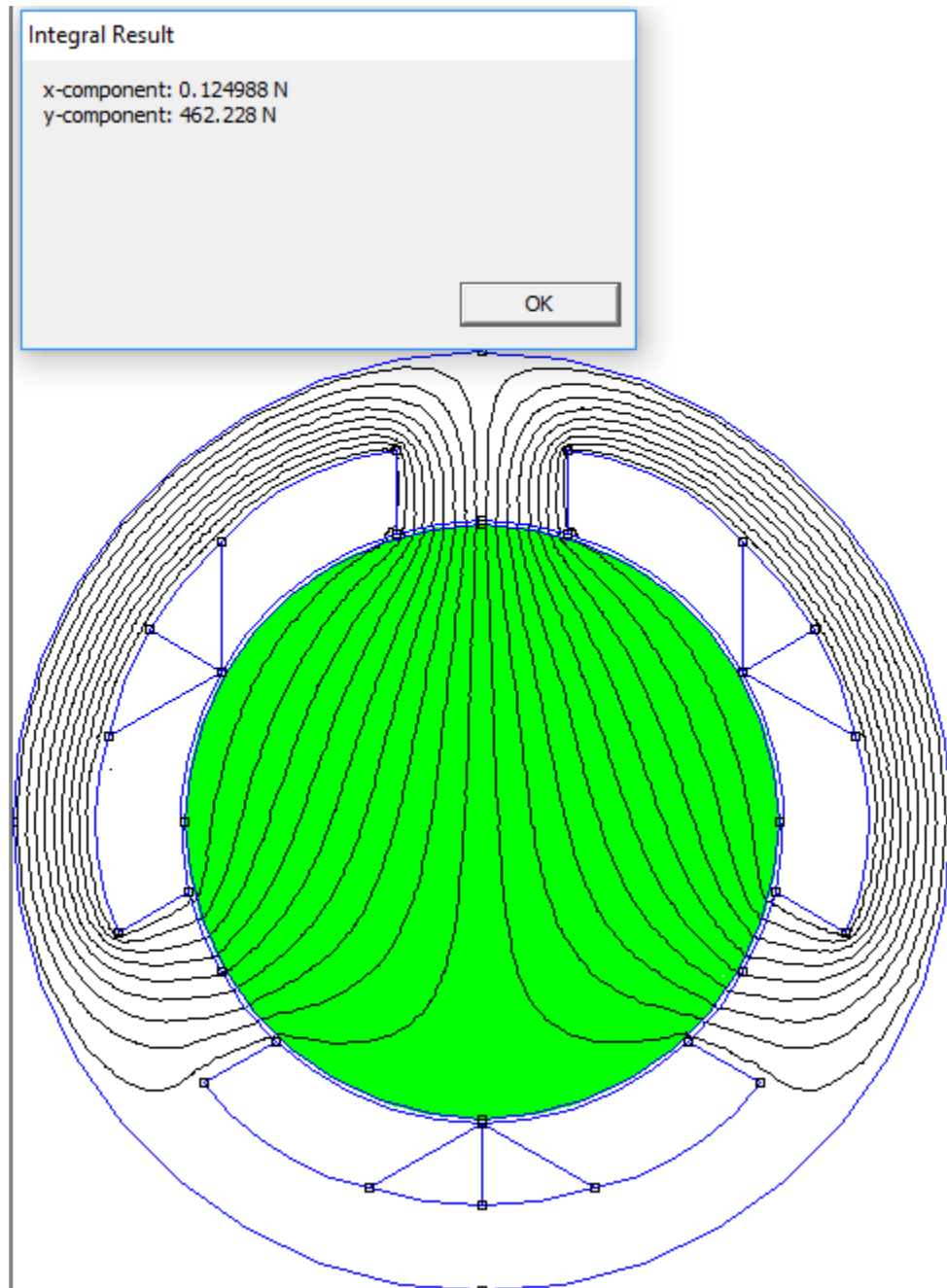


Figura 10

ANEXO 8. Representación de rodamientos para comparar error de la herramienta

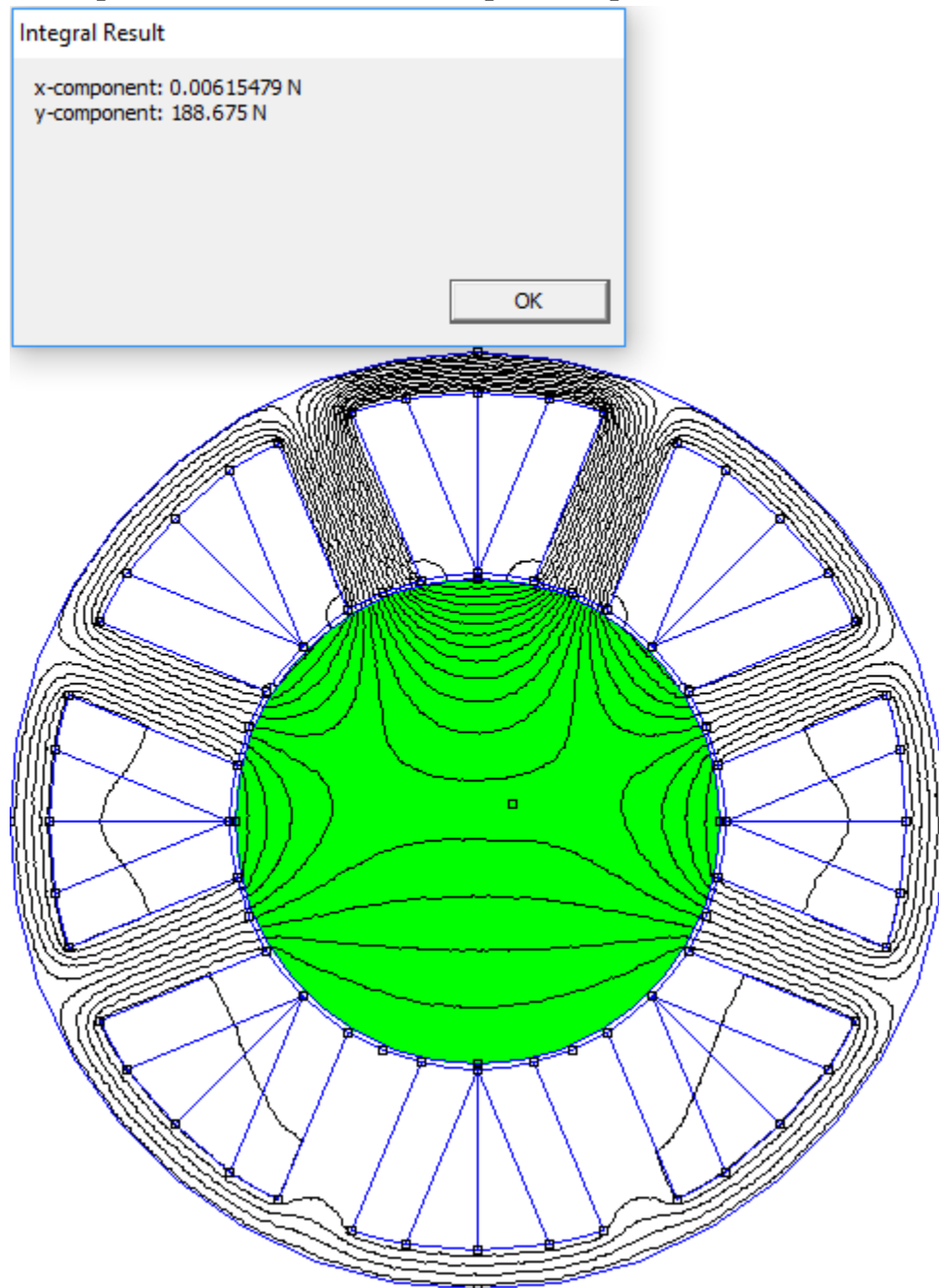


Figura 11

Integral Result
x-component: 0.00288197 N
y-component: 170.714 N

OK

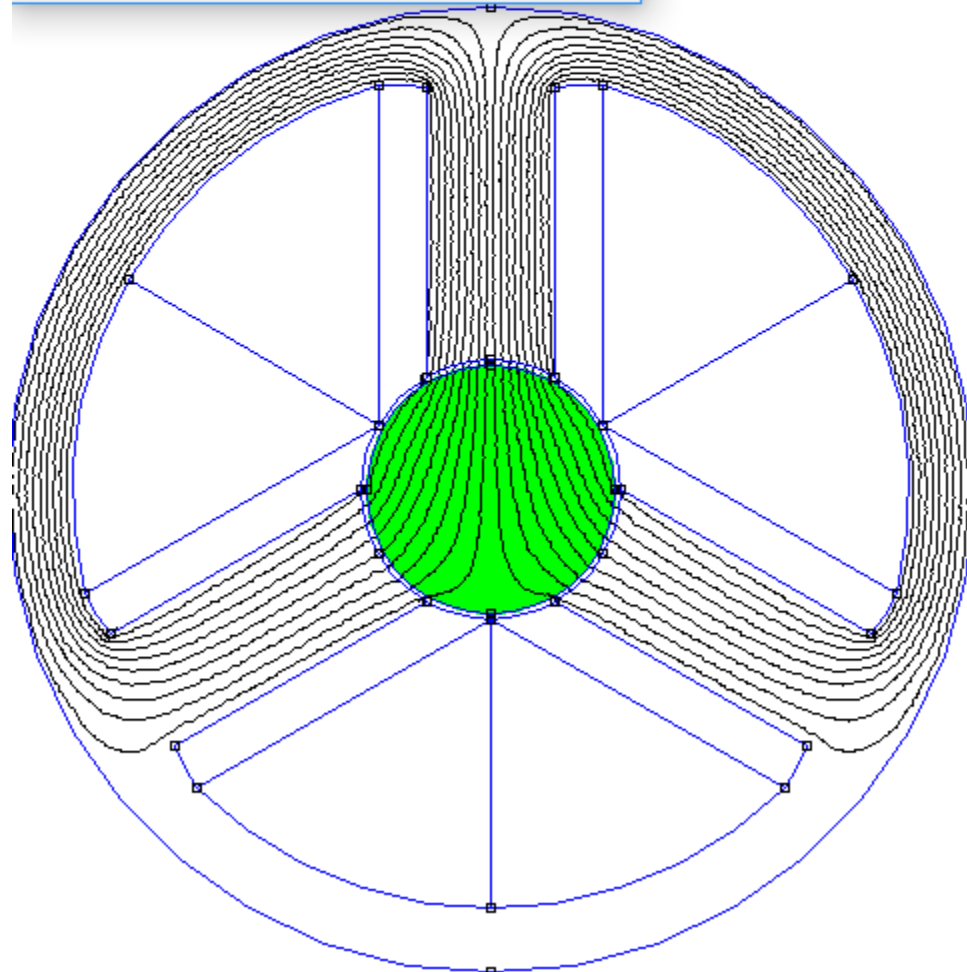


Figura 12

ANEXO 9. Representación de tipologías estudiadas

Tipología
3 POLOS
4 POLOS
6 POLOS
8 POLOS
6 POLOS HERRADURA
8 POLOS HERRADURA

Tabla 9

CASO 1: 3 POLOS

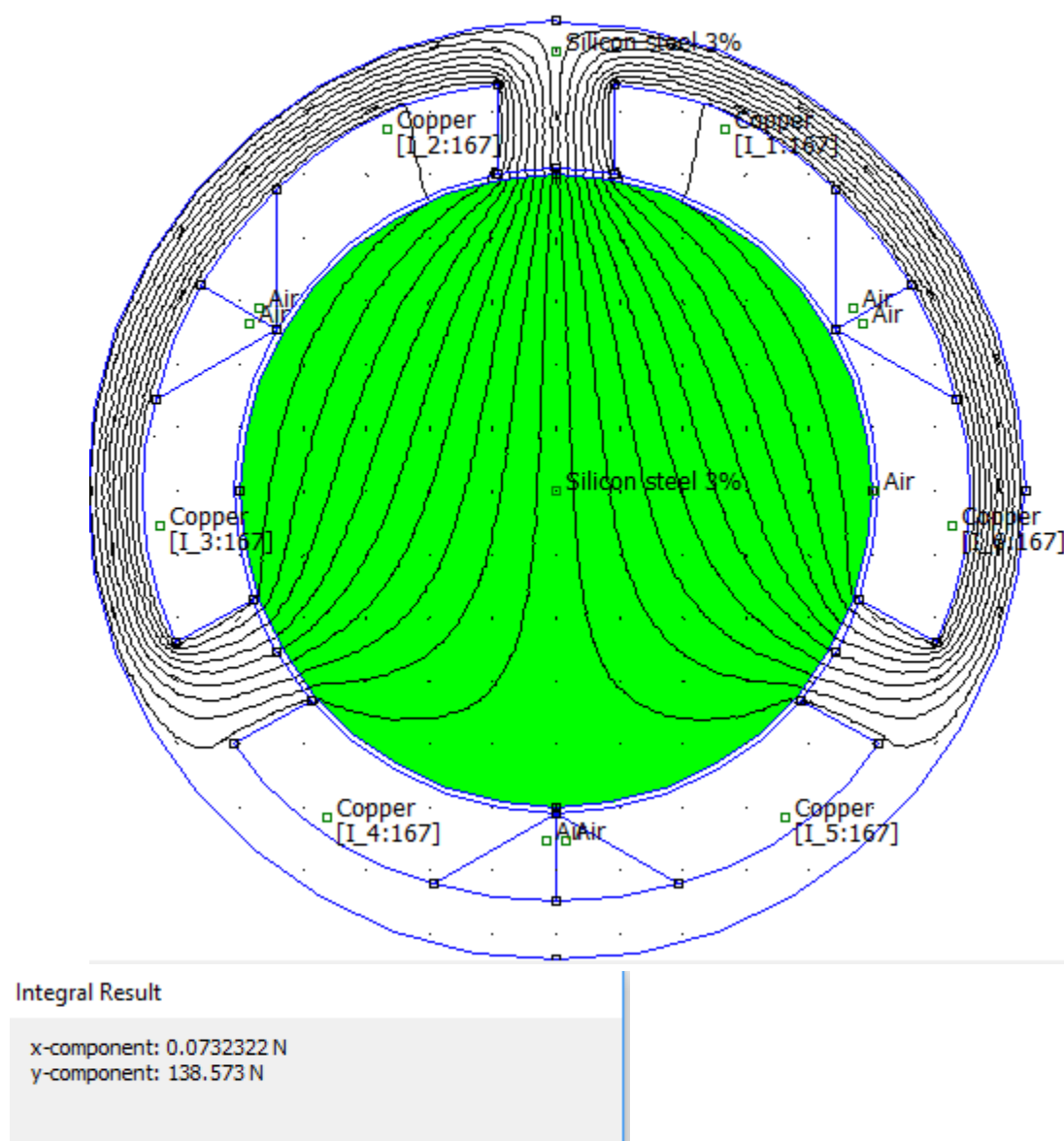


Figura 13

CASO 2: 4 POLOS

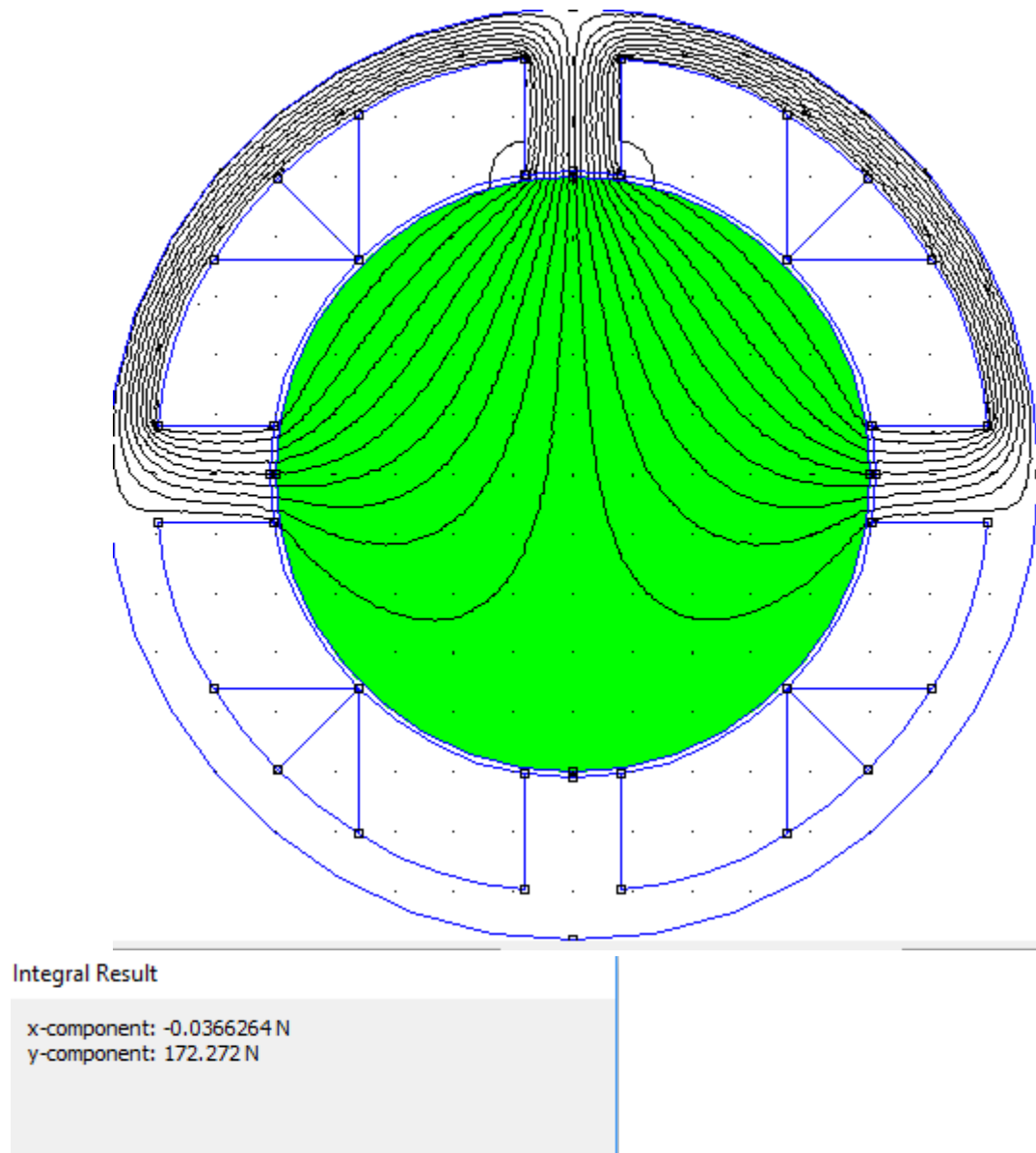
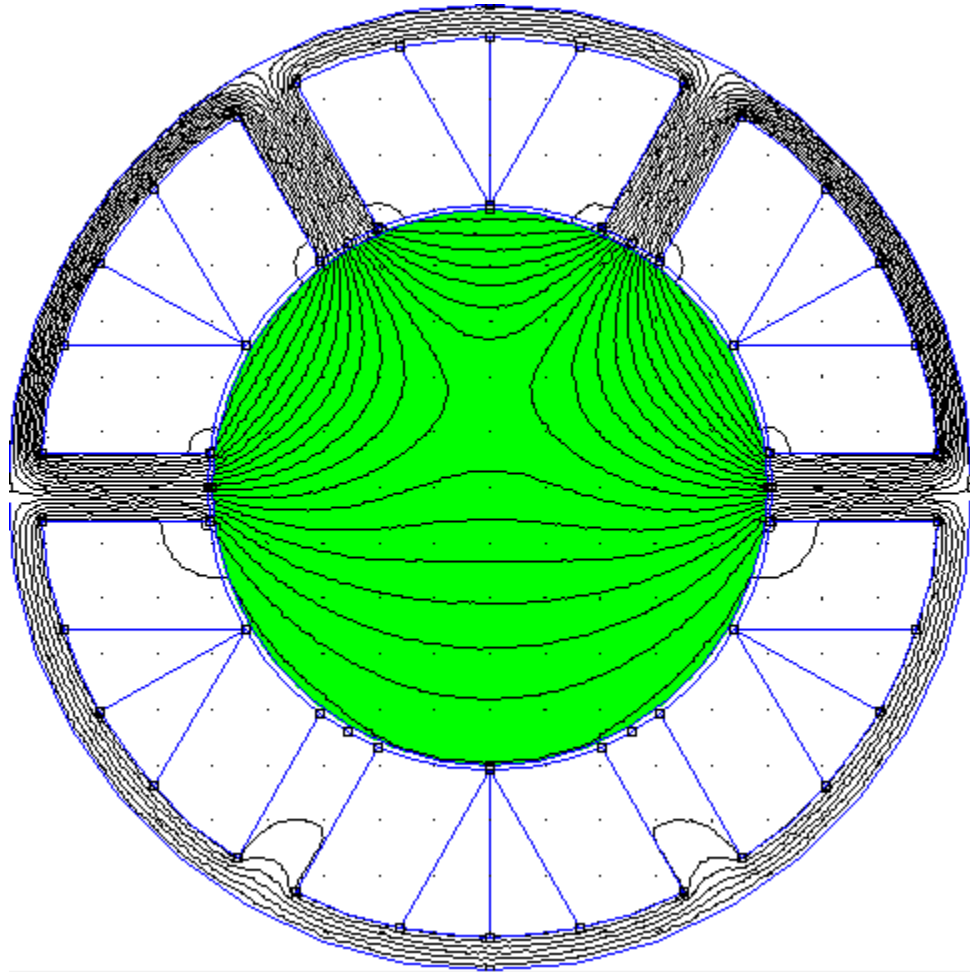


Figura 14

CASO 3: 6 POLOS



Integral Result

x-component: -0.0804245 N
y-component: 174.747 N

Figura 15

CASO 4: 8 POLOS

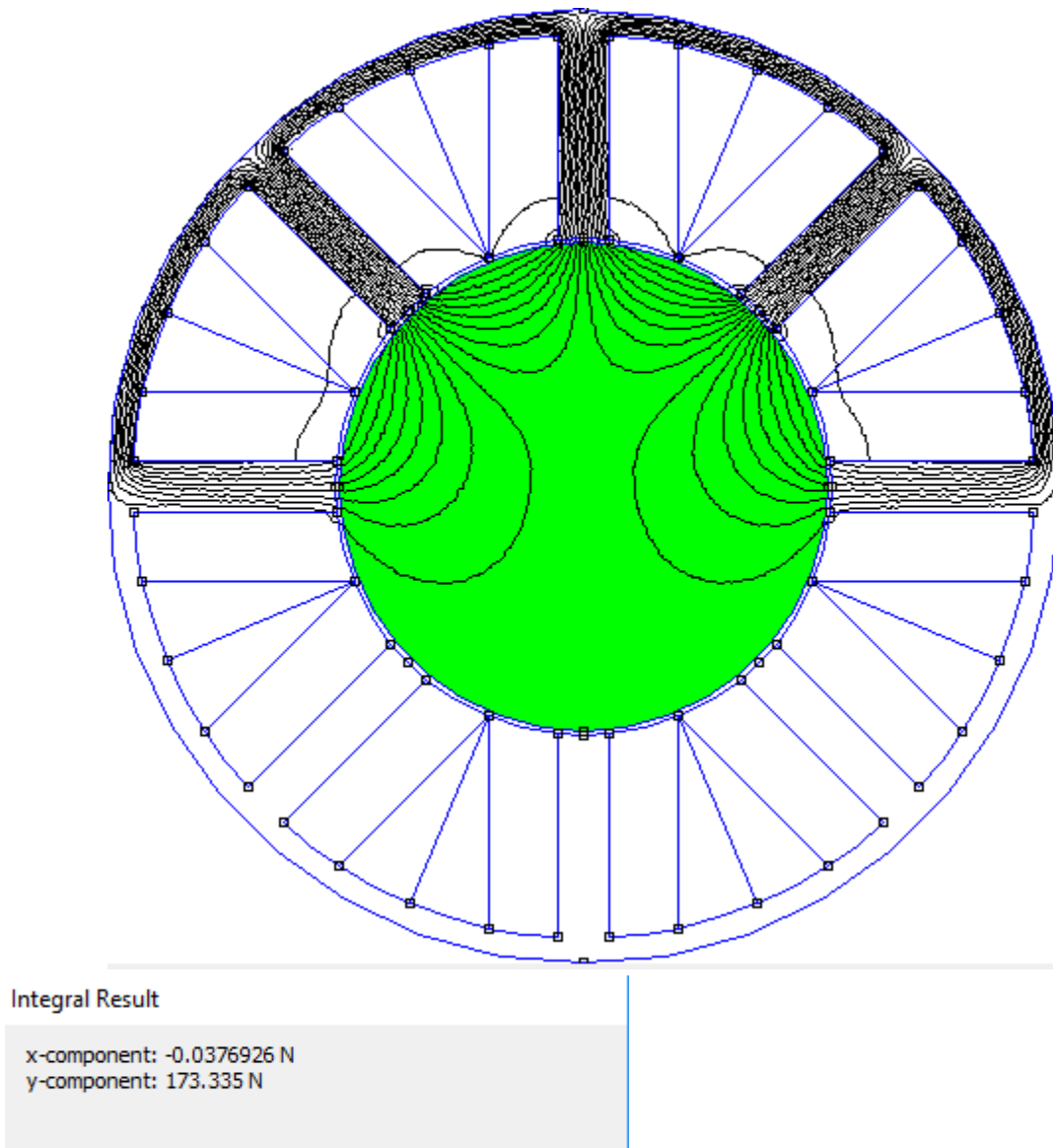
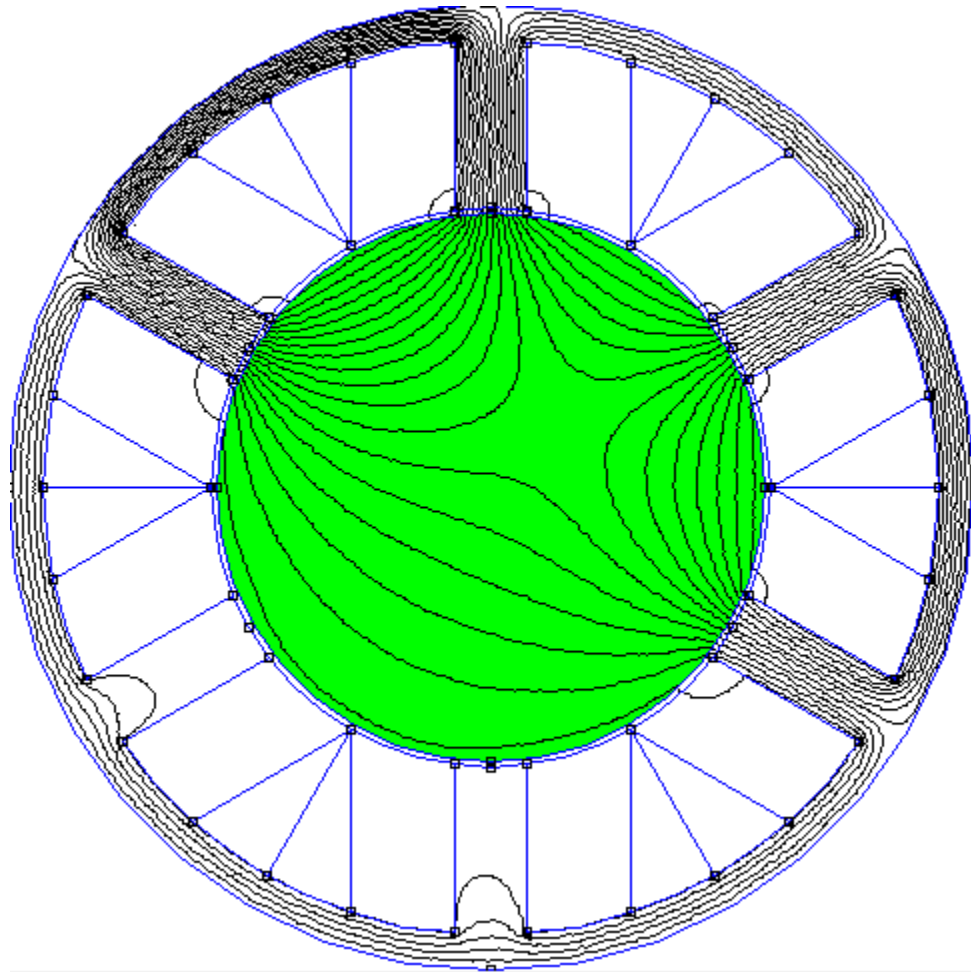


Figura 16

CASO 5: 6 POLOS HERRADURA

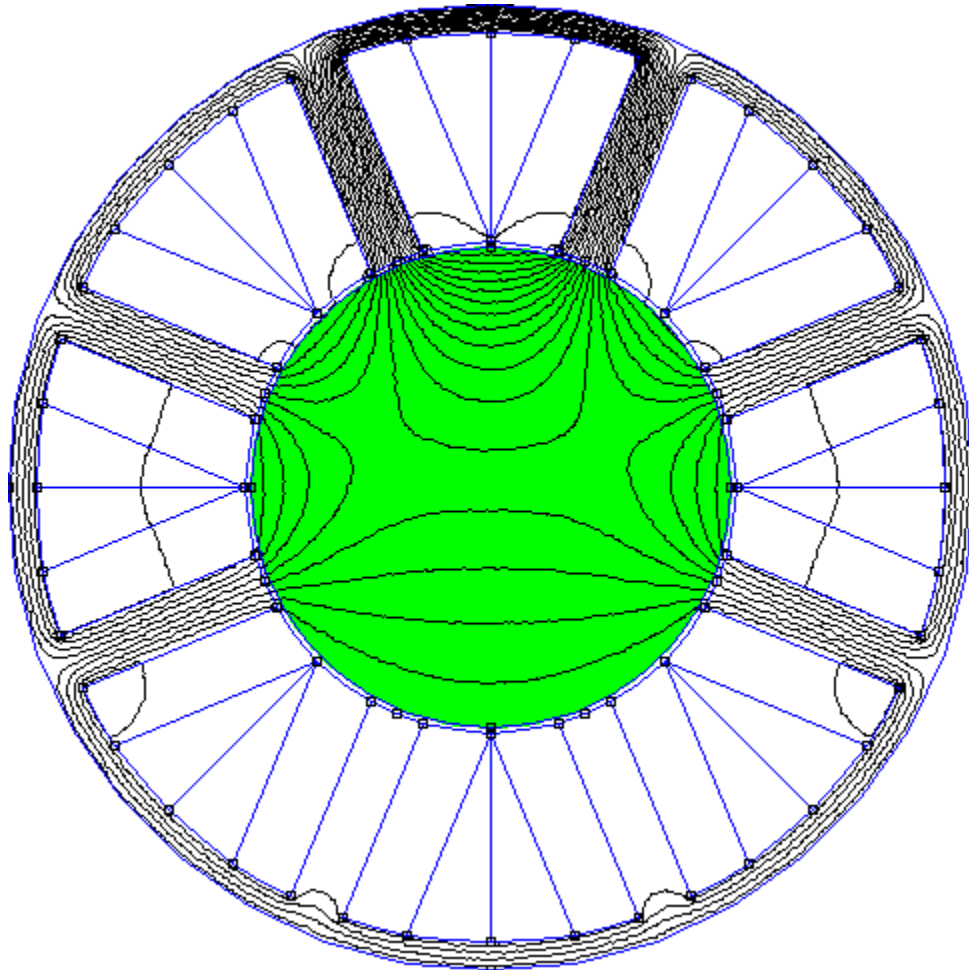


Integral Result

x-component: 2.64265 N
y-component: 174.495 N

Figura 17

CASO 6: 8 POLOS HERRADURA



Integral Result

x-component: -0.0971188 N
y-component: 171.215 N

Figura 18