



**Universidad  
Zaragoza**

## Trabajo Fin de Máster

# Herramienta para el diseño de rodamientos magnéticos axiales

Autor/es

**José María Pamplona Marco**

Director/es

**Jesús Letosa Fleta**

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza  
2013

# Herramienta para el diseño de rodamientos magnéticos axiales

## RESUMEN

En este Trabajo Fin de Máster (TFM) se ha considerado el principal objetivo el desarrollo de una herramienta de diseño sobre un cojinete magnético activo de flujo axial. La herramienta debe permitir la selección de algunos parámetros geométricos y materiales (radio del disco del rotor, espesor, anchura de la ventana de bobinado en el estator, corriente, entrehierro, número de espiras...). Como resultado se obtendrá la fuerza ejercida por el devanado estatórico en función de la variación de algunos parámetros del diseño.

Para el resolver el problema electromagnético se utilizará un programa de cálculo numérico por el método de elementos finitos. Para el control de las simulaciones en función de los parámetros de diseño se utiliza un lenguaje de programación con recursos de cálculo, compatible con el software de elementos finitos utilizado (*FEMM v4.2*).

En primer lugar, se ha realizado una revisión del estado del arte sobre los cojinetes magnéticos. A continuación se procede a modelizar el cojinete magnético activo con flujo axial y posteriormente se comprueba la validación del modelo simulado en elementos finitos. También se ha realizado un estudio del comportamiento del modelo simulado en elementos finitos variando alguno de sus parámetros.

Con esta herramienta diseñada en *Octave*, se ha podido llevar a cabo el estudio paramétrico del rodamiento de una manera más visual y rápida. En consecuencia, tras el estudio de diversas modificaciones en la geometría del rodamiento magnético se puede obtener diferentes curvas de comportamiento de la fuerza axial producida por el devanado estatórico. También se han diseñado dos script que permiten el cálculo de la fuerza axial ejercida por el devanado estatórico sobre disco magnético que está acoplado al rotor frente a la corriente con un entrehierro constante (*GAP*) y frente al *GAP* con una corriente constante.

Gracias a los script diseñados, en este TFM se diseña un modelo electromagnético de un cojinete magnético activo con flujo axial que aporta más fuerza axial que la necesaria para mantener en equilibrio el rotor levitado del prototipo.

## ÍNDICE GENERAL

1. Introducción .....	7
2. Simulación mediante elementos finitos de un rodamiento magnético activo con flujo axial .....	8
<b>2.1. Diseño y funcionamiento del rodamiento magnético activo con flujo axial .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2. Validación del modelo en FEMM .....</b>	<b>12</b>
2.2.1. Dimensiones y características de los materiales en el modelo del rodamiento magnético de flujo axial .....	15
2.2.2. Comprobación de los valores del campo magnético en el modelo diseñado.....	17
2.2.3. Comprobación del coeficiente de rigidez estática $K_{i0}$ .....	20
2.2.4. Comprobación del coeficiente de rigidez estática $K_{z0}$ .....	20
3. Descripción del Script en Octave para un diseño parametrizado del cojinete magnético.....	21
<b>3.1. Descripción del script para OctaveFEMM .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Resultados después de la ejecución del script principal en Octave.....</b>	<b>24</b>
4. Estudio del comportamiento de la fuerza axial en función a una variación del GAP .....	25
5. Estudio del comportamiento de la fuerza axial en función a una variación de corriente DC.....	28
6. Aplicaciones .....	30
<b>6.1. Diseño de un cojinete magnético activo axial para un volante de inercia .....</b>	<b>30</b>
7. Conclusiones y Trabajo Futuro .....	38
8. BIBLIOGRAFÍA.....	39
9. ANEXOS .....	41
<b>9.1. Interfaz gráfico para Octave .....</b>	<b>41</b>
<b>9.2. Visualización del Script Principal del diseño de un rodamiento magnético .....</b>	<b>42</b>

9.3.	Descripción de los comandos para interactuar Octave con FEMM en el script principal .....	43
9.4.	Script ejecutado en Octave "Principal_Variacion_del_GAP.m" .....	45
9.5.	Script ejecutado en Octave "Principal_Variacion_del_CORRIENTE.m" .....	46
9.6.	Scrip en Octave "Cargar_funciones_para_dibujar.m" .....	47
9.7.	Script en Octave "Datos_Geometria_RodamientoMagnetico.m" .....	47
9.8.	Script en Octave "Materiales_y_Condiciones.m" .....	49
9.9.	Script en Octave "Calculos_Variacion_CORRIENTE.m" .....	51
9.10.	Script en Octave "Calculos_Variacion_GAP.m" .....	52

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Rodamiento magnético activo axial realizado mediante Autocad.....	9
<b>Figura 2.</b> Diferentes cortes sobre el rodamiento magnético activo axial realizado en Autocad.....	10
<b>Figura 3.</b> Esquema de un cojinete magnético activo y sus componentes principales de control [14].....	11
<b>Figura 4.</b> Esquema del principio de funcionamiento de la suspensión electromagnética [14].....	12
<b>Figura 5.</b> Dimensiones de la frontera en FEMM.....	13
<b>Figura 6.</b> Tamaño del mallado en el modelo de FEMM.....	14
<b>Figura 7.</b> Modelo simulado en FEMM y semejanza en Autocad.....	15
<b>Figura 8.</b> Dimensiones acotadas del modelo simulado en FEMM.....	16
<b>Figura 9.</b> Circuito magnético del modelo .....	17
<b>Figura 10.</b> Sentido del flujo magnético del modelo en FEMM.....	18
<b>Figura 11.</b> Campo magnético (B) en el entrehierro simulado en FEMM .....	19
<b>Figura 12.</b> Visualización del rodamiento magnético en el preprocesador de FEMM....	23
<b>Figura 13.</b> Visualización del rodamiento magnético en el post-procesador de FEMM	23
<b>Figura 14.</b> Visualización del rodamiento magnético: a) preprocesador en FEMM; b) post-procesador en FEMM.....	24
<b>Figura 15.</b> Gráfica de la fuerza axial en función de la variación del GAP .....	25
<b>Figura 16.</b> Post-procesador en FEMM con un GAP de 0.5 mm y con una corriente de 3.5 A .....	26
<b>Figura 17.</b> Post-procesador en FEMM con un GAP de 1.5 mm y con una corriente de 3.5 A .....	26
<b>Figura 18.</b> Gráfica de la fuerza axial frente a la variación del GAP simulado con FEMM .....	27
<b>Figura 19.</b> Simulación inicial en FEMM del rodamiento magnético con una corriente de 3.5 A .....	29
<b>Figura 20.</b> Gráfica de la fuerza axial frente a la variación de corriente simulado con FEMM.....	29
<b>Figura 21.</b> Estructura del prototipo operativo de rotor levitado de [10]......	31
<b>Figura 22.</b> Rodamiento magnético activo axial aplicado al prototipo de rotor levitado. ....	32

<b>Figura 23.</b> Característica de fuerza axial frente al desplazamiento axial del prototipo de rotor levitado en considerando el peso del rotor.....	33
<b>Figura 24.</b> Curva de la fuerza axial frente al desplazamiento axial del rotor levitado en el rango de trabajo .....	34
<b>Figura 25.</b> Gráfica de fuerza axial frente al desplazamiento axial del rotor con una corriente constante en el rodamiento magnético activo axial diseñado para el prototipo de [10]. .....	36
<b>Figura 26.</b> Gráfica de fuerza axial frente a la corriente con un desplazamiento axial constante en el rodamiento magnético activo axial diseñado para el prototipo de [10].	37
<b>Figura 27.</b> Interfaz gráfico del programa Octave .....	41
<b>Figura 28.</b> Visualización del Script Principal del diseño de un rodamiento magnético	43
<b>Figura 29.</b> Comparación de sistemas de almacenamiento de energía [1]. .....	44

**LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b> Comprobación de la frontera del modelo simulado en FEMM.....	13
<b>Tabla 2.</b> Variación de la Fuerza en función del tamaño de mallado del modelo en FEMM.....	14
<b>Tabla 3.</b> Dimensiones del modelo simulado en FEMM.....	15
<b>Tabla 4.</b> Características de los materiales asignados al modelo simulado en FEMM..	16
<b>Tabla 5.</b> Comparación del campo magnético ( $B_{medio}$ ) mediante cálculos analíticos y simulados en FEMM .....	19
<b>Tabla 6.</b> Comparación del coeficiente de rigidez estática $K_{io}$ .....	20
<b>Tabla 7.</b> Comparación del coeficiente de rigidez estática $K_{zo}$ .....	21
<b>Tabla 8.</b> Descripción de los subprogramas del script principal para Octave.....	22
<b>Tabla 9.</b> Descripción de los comandos aplicados al post-procesador de FEMM del script principal .....	23
<b>Tabla 10.</b> Fuerza axial frente a la variación del GAP con una corriente constante de 3.5 A simulado en FEMM.....	28
<b>Tabla 11.</b> Fuerza axial frente a la variación de la corriente con un GAP de 0.5 mm simulado en FEMM .....	30
<b>Tabla 12.</b> Dimensiones del cojinete magnético para el rotor levitado .....	35
<b>Tabla 13.</b> Descripción de los comandos para interactuar Octave con FEMM en el script principal .....	43

## 1. Introducción

Los rodamientos magnéticos son el elemento clave de los volantes de inercia y máquinas rotativas de alta velocidad. Son el elemento que se encarga de soportar el conjunto rotórico a la vez que le permite girar sobre un eje de rotación. La elección de estos componentes requiere un cuidado especial y es determinante para el correcto funcionamiento del conjunto. Existen varios tipos de rodamientos, con diferentes usos [1].

Los **rodamientos mecánicos** utilizan elementos rodantes entre el eje y el alojamiento para minimizar el rozamiento entre ellos. Son capaces de aportar gran rigidez al sistema, pero producen pérdidas energéticas debido al rozamiento de sus componentes. Requieren de lubricación para minimizar la fricción y el calentamiento excesivo, que puede producir desgaste y rotura de los elementos.

Existen múltiples tipos que rodamientos mecánicos (de bolas, de rodillos...) cada uno con sus propiedades características y se usarán correspondientemente dependiendo de la aplicación.

Los **cojinetes magnéticos** tienen la ventaja de que no existe un contacto mecánico entre el eje y el soporte, eliminando por completo las pérdidas por rozamiento. Una interacción magnética es la encargada de producir las fuerzas que mantienen al eje en su posición. En función del origen de estas fuerzas, los cojinetes magnéticos se pueden clasificar en dos grupos, cojinetes activos [2], [3] o pasivos [4], [5], [6]. También se pueden dividir en función del grado de libertad del rotor sobre el que actúen, hablaremos de rodamientos magnéticos radiales [4], [7] o axiales [8], [9]. Los cojinetes activos utilizan electroimanes que generan las fuerzas de atracción adecuadas. Para ello, están regulados mediante un sistema de control y así compensan las inestabilidades generadas por las interacciones magnéticas. Los cojinetes pasivos, usan exclusivamente imanes permanentes en una configuración especial que, produzca las fuerzas de compensación adecuadas.

El objetivo principal de este TFM es desarrollar un modelo electromagnético para rodamientos magnéticos activos de fuerza axial según la geometría descrita en [8]. Con el modelo desarrollado, se estudian las prestaciones de este tipo de rodamiento frente a variaciones de algunos de los parámetros que lo definen.

Los problemas que se afrontan en este TFM y los objetivos que se desean cumplir se mencionan a continuación:

- ❖ Una breve descripción del estado del arte sobre rodamientos magnéticos activos axiales.
- ❖ Diseño y funcionamiento de un modelo electromagnético del cojinete magnético activo con flujo axial descrito en [8] mediante un programa de elementos finitos en 2D que permita analizar su funcionamiento.
- ❖ Validar el modelo desarrollado en *FEMM* con el descrito en [8].
- ❖ Estudio paramétrico del comportamiento con la variación de algunos de los parámetros que constituyen al cojinete magnético.



- ❖ Diseño del cojinete magnético con las características de este TFM aplicado a un prototipo de volante de inercia.

En primer lugar, se desarrolla un modelo electromagnético de un cojinete magnético activo con flujo axial basado en el modelo descrito en [8] mediante el programa de elementos finitos.

Tras finalizar el modelo se realizan diferentes estudios para la validación del modelo simulado en *FEMM* con el modelo descrito en [8]. Se han calculado los coeficientes rigidez estática, reluctancias magnéticas del circuito magnético, campo magnético medio que circula por el circuito magnético, dimensiones de la frontera y tipo de tamaño del mallado del modelo.

Una vez verificado el modelo se procede a la implementación de un script con *Octave* que permita parametrizar el modelo descrito en [8]. La implementación del script es fundamental ya que permite un estudio mucho más rápido y dinámico del cojinete magnético.

Se han realizados diferentes estudios del comportamiento de la fuerza axial que produce el cojinete magnético en función de la variación del *GAP* y la corriente que circula por la bobina.

Finalmente se describe el diseño de un rodamiento magnético para un prototipo operativo de volante de inercia descrito en [10]. El objetivo del cojinete magnético es mantener en equilibrio el rotor levitado. El prototipo ya tiene diseñado un sistema para compensar el movimiento del rotor en sentido radial mediante imanes permanentes. Así, se simula un modelo de un rodamiento magnético activo axial que permite compensar el peso del rotor de [10] y la fuerza axial que producen los imanes permanentes al desplazamiento axial del rotor levitado gracias a la fuerza axial que ejerce el cojinete magnético.

## 2. Simulación mediante elementos finitos de un rodamiento magnético activo con flujo axial

En este trabajo se estudia un modelo de un rodamiento magnético activo con flujo axial en 2D mediante *FEMM* a partir del modelo descrito en [8] para analizar su comportamiento electromagnético.

### 2.1. Diseño y funcionamiento del rodamiento magnético activo con flujo axial

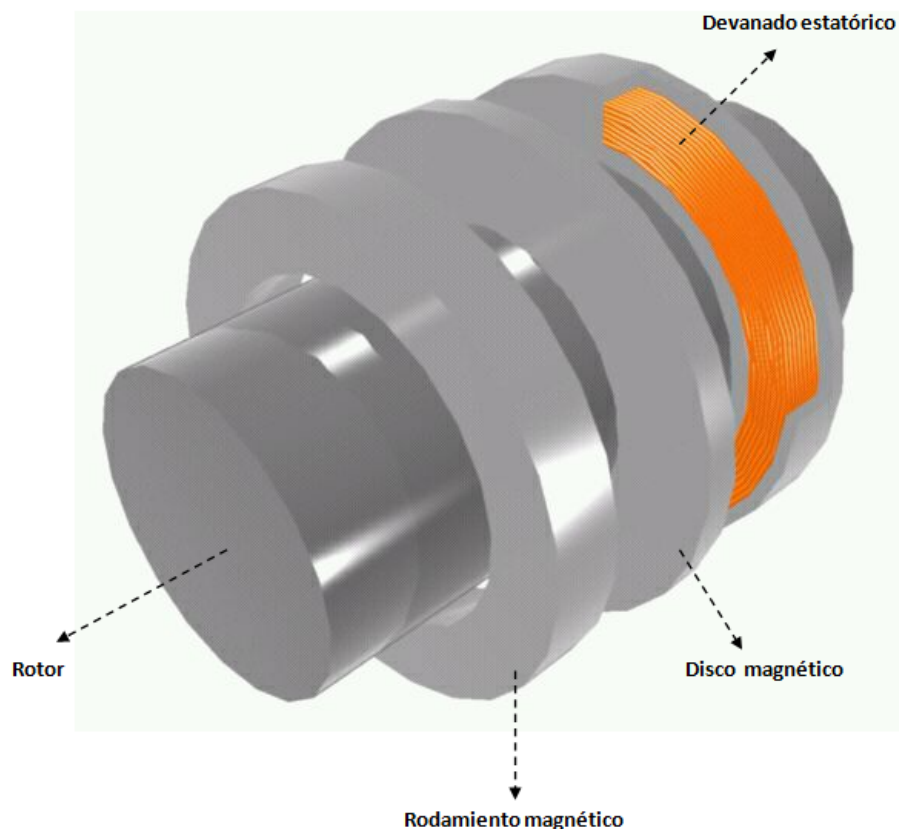
#### Diseño del rodamiento magnético con flujo axial:

Se pretende modelar un rodamiento magnético activo con flujo axial cuya estructura está compuesta por un rotor, dos devanados estáticos, un disco y un entrehierro. Estas partes constituyen el circuito magnético del modelo, cuyas características se citan a continuación:

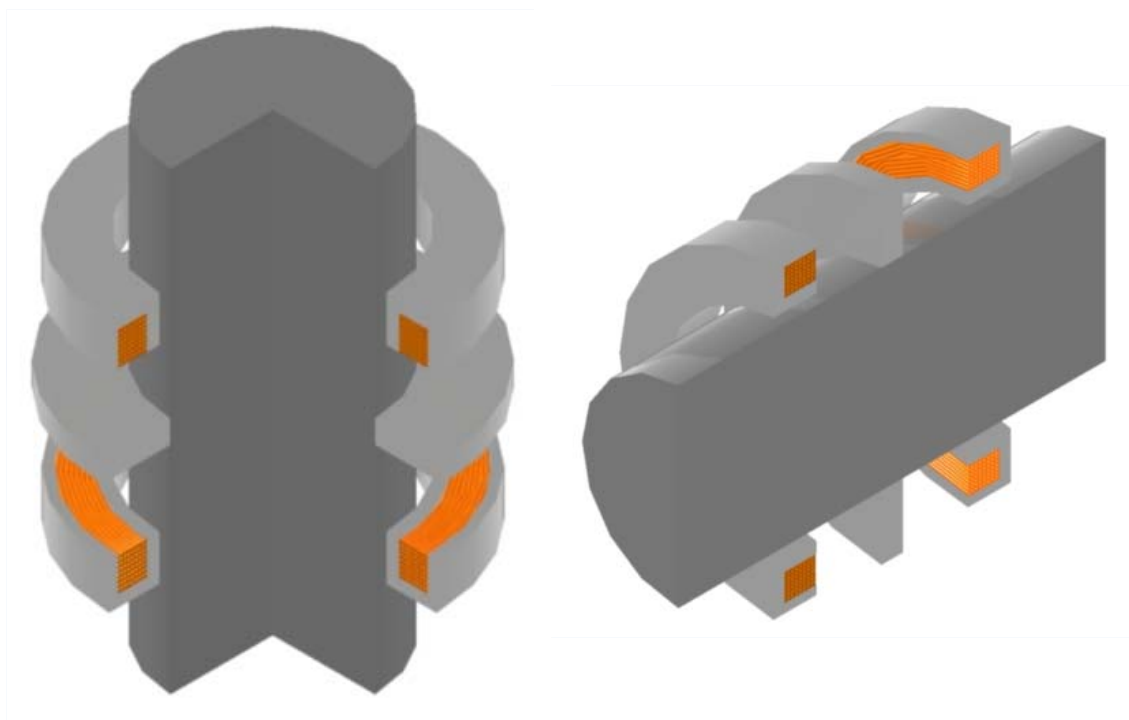
- **Rotor:** Es un cilindro de material no ferromagnético, que no permanece estático, sino que gira respecto de su eje. Solidario al rotor está el disco del rodamiento magnético.
- **Entrehierro:** Es el medio material no magnético que separa al disco rotórico del estator, cuya distancia la marca el gap. En este caso, el medio material es el aire.

- **Disco:** Es un toroide macizo de un material ferromagnético, que en nuestro caso es el “3% silicon steel”. Dicha pieza es clave para cerrar el circuito magnético que se encuentra entre los dos devanados rodamientos magnéticos activos con flujo axial.
- **Rodamiento magnético:** Formado por dos toroides de material ferromagnético, en nuestro caso el “3% silicon steel”. Cada uno contiene en su interior un devanado de cobre que crea el flujo axial.
- **Devanado estático:** Es una bobina de cobre que se aloja entre los anillos electromagnéticos del estator y es la encargada de generar el campo magnético mediante una corriente continua (DC) o corriente alterna (AC) que circula a su través. En nuestro caso está compuesto por 86 espiras y permite una corriente de máxima 3.5 A.

En la figura siguiente se ilustra un modelo en 3D del rodamiento magnético activo con flujo axial realizado con el programa de diseño gráfico *Autocad*. En las siguientes figuras, se ilustran detalles del rodamiento magnético, que permiten distinguir mejor las partes de las que se compone (Figura 1) y (Figura 2).



**Figura 1.** Rodamiento magnético activo axial realizado mediante *Autocad*



**Figura 2.** Diferentes cortes sobre el rodamiento magnético activo axial realizado en Autocad

### Funcionamiento del rodamiento magnético activo con flujo axial

Un rodamiento magnético tiene como objetivo remplazar las partes mecánicas, como rodillos o esferas metálicas, que integran comúnmente a los rodamientos mecánicos, mediante la aplicación de fuerzas electromagnéticas. La finalidad de ello es permitir el movimiento del rotor sin la necesidad de que exista contacto físico.

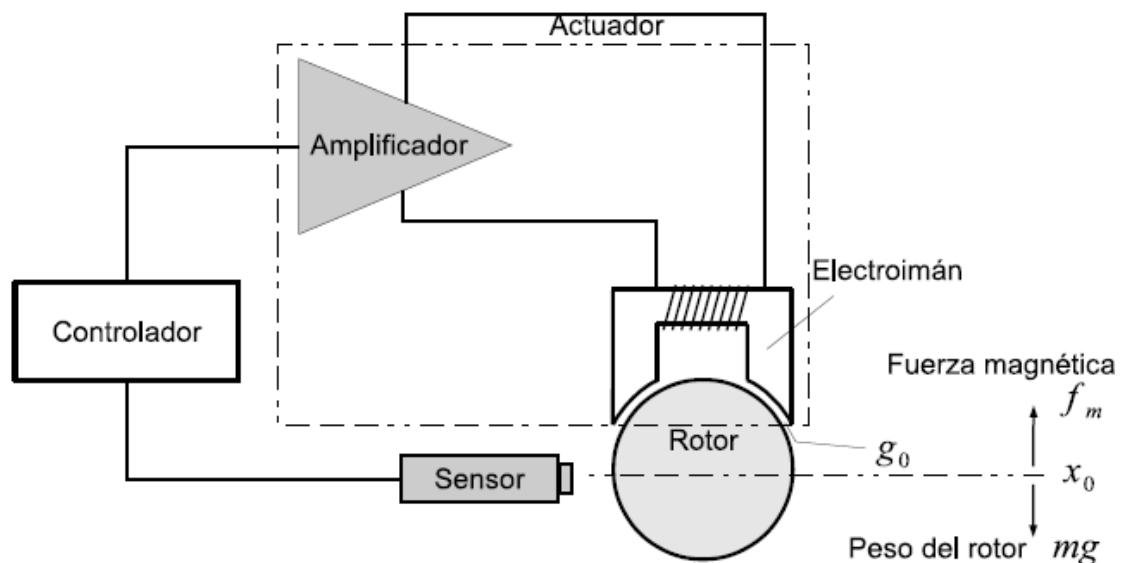
Éste proyecto se basa en el principio de los rodamientos magnéticos activos o también llamados cojinetes magnéticos activos. La atracción es el principio por el cual se logra la levitación del eje. El proceso completo implica la vigilancia del valor del entrehierro; cuando éste es mayor al deseado se incrementa el voltaje de alimentación, por lo tanto, la corriente se incrementa, igual que la densidad “ $J$ ”; como resultado “ $B$ ” aumenta y la fuerza magnética también. El papel de esta fuerza es oponerse a la gravitacional [11].

Este proceso se repite hasta alcanzar el entrehierro deseado. Cuando el entrehierro es menor al deseado, se anula y se activa el otro rodamiento para atraer el disco magnético y así conseguir el entrehierro deseado. La vigilancia y toma de decisiones es realizada por un algoritmo de control, que puede ser implementado en una tarjeta electrónica o en un PC.

Los rodamientos magnéticos se basan en interacciones magnéticas que han sido comentadas anteriormente entre elementos del rotor y del estator. Esto da lugar a dos tecnologías diferentes cojinetes activos y cojinetes pasivos.

Los cojinetes activos son los que se accionan mediante una fuente de energía externa [12]. Según el ejemplo que aparece en la Figura 1 el estator consiste en un conjunto de bobinas puestas en círculo que son las encargadas de generar el campo magnético necesario para producir las fuerzas atractivas en el rotor de material ferromagnético. Para conseguir que el

sistema sea estable, se necesitan añadir unos sensores de posición (generalmente inductivos) alrededor de la circunferencia que midan el estado del eje (rotor). Esta información se usa como realimentación para controlar la corriente de las bobinas y mantener la estabilidad del eje. En la Figura 3 se muestra un esquema de estos sistemas [13].

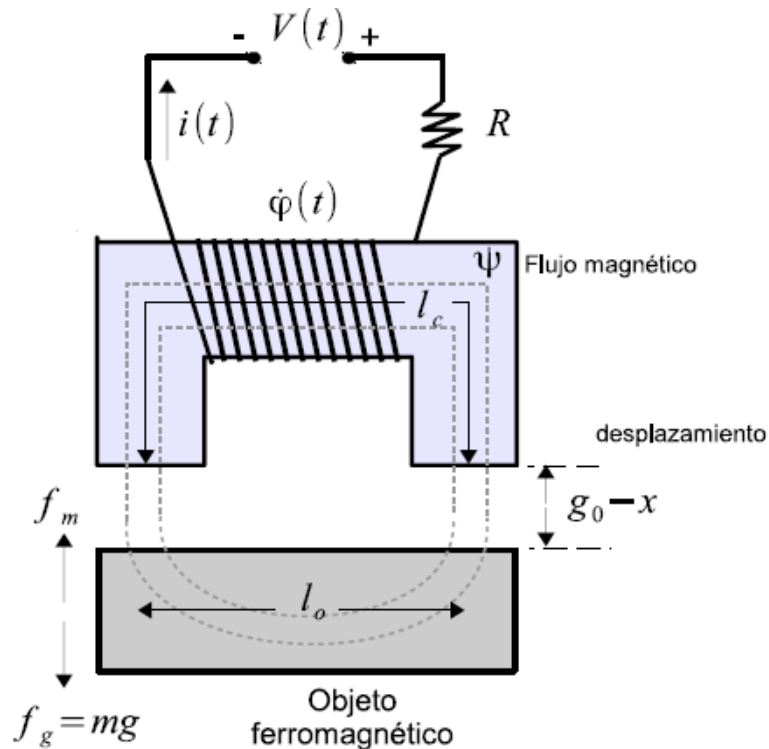


**Figura 3.** Esquema de un cojinete magnético activo y sus componentes principales de control [14]

A continuación, se describen brevemente los elementos de este sistema de control [15], [16]:

- Sensor de posición: mide la desviación entre la posición deseada del rotor y la posición actual y transmite dicha información al controlador.
- Controlador: se encarga de mantener la posición del rotor en el valor deseado. Envía una señal de posición del rotor al amplificador de potencia.
- Rotor: es la masa que se pretende sustentar a una distancia determinada del electroimán.
- Amplificador de potencia: recibe la señal del controlador y la transforma en una consigna de corriente eléctrica para que circule por la bobina. Esa bobina, mediante el electroimán, será la encargada de generar la fuerza magnética.

La corriente, al circular a través de las espiras del devanado del rodamiento genera una *fuerza magnetomotriz*, que a su vez produce un flujo magnético que circulará a través del núcleo ferromagnético del electroimán, del espacio libre y del propio objeto levitado (Figura 4). Los parámetros  $Rl_c$ ,  $R_{g0}$  y  $Rl_o$  corresponden a la reluctancia del núcleo del rodamiento, la del espacio libre, y la del objeto levitado, respectivamente.  $l_c$ ,  $A_c$ ,  $l_o$  y  $A_{l_o}$  corresponden a la construcción propia del rodamiento y del objeto levitado (longitud y área de la sección transversal de los mismos). Mientras que  $\mu$  y  $\mu_o$  corresponden a la permeabilidad magnética relativa para el material ferromagnético, y la permeabilidad magnética del aire. La expresión  $g_0 - x$  indica que la separación entre el objeto levitado y el rodamiento puede variar cierta longitud  $x$ .



**Figura 4.** Esquema del principio de funcionamiento de la suspensión electromagnética [14]

El inconveniente de estos sistemas se debe a la necesidad de una fuente de control y alimentación externa. Tienen que estar protegidas correctamente para evitar el fallo y establecer medidas de seguridad para proveer alimentación eléctrica ininterrumpida, ya que, sin suministro eléctrico, los cojinetes no actuarían sobre el rotor eliminando los soportes del mismo permitiendo moverse libremente.

## 2.2. Validación del modelo en FEMM

Los objetivos fundamentales del proceso de validación son:

- Asegurar que el modelo propuesto representa el comportamiento de un sistema real con una precisión suficiente.
- Aumentar la fiabilidad del modelo, para poder tomar decisiones de diseño en base a los resultados que proporciona.

En primer lugar, hay que tener en cuenta una serie de criterios de validación del diseño del rodamiento magnético en el modelo de elementos finitos.

El modelo se trata como un problema de tipo magnetostático, porque se pretende analizar el comportamiento del flujo magnético en un electroimán generado por una bobina alimentada con corriente eléctrica.

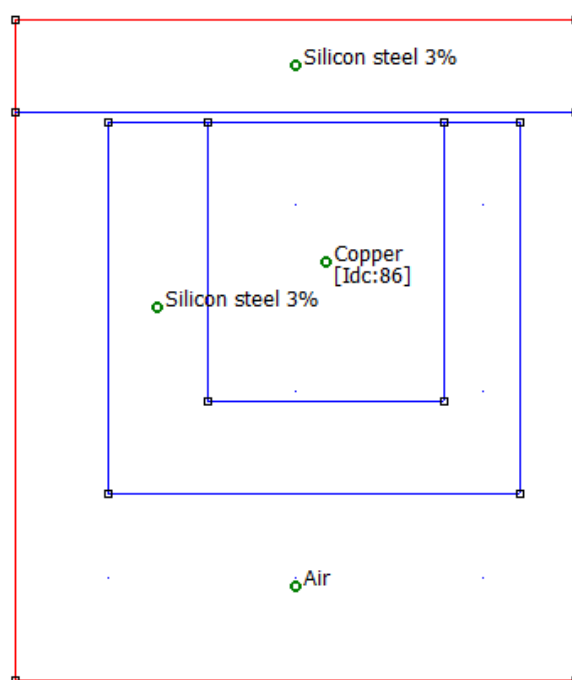
Al mismo tiempo el modelo presenta simetría axisimétrica, ya que el rodamiento a simular tiene simetría de revolución.

En primer lugar se ha estudiado la variación de los resultados en función de la distancia a la que se coloca la frontera externa del problema. Como referencia se tomará la frontera propuesta en [8] (ver Figura 5). En la siguiente tabla muestra la fuerza para distintas posiciones de la frontera. De ella se deduce que introducen un error despreciable.

DIMENSIONES DE LA FRONTERA	FUERZA (N)	ERROR (%)
Informe científico	-211,04	
Frontera aumentada un 10 %	-210,93	0,05
Frontera aumentada un 20 %	-210,88	0,08
Frontera aumentada un 50 %	-210,86	0,09
Frontera aumentada un 200 %	-210,74	0,14
Frontera aumentada un 500 %	-210,24	0,38

**Tabla 1.** Comprobación de la frontera del modelo simulado en FEMM

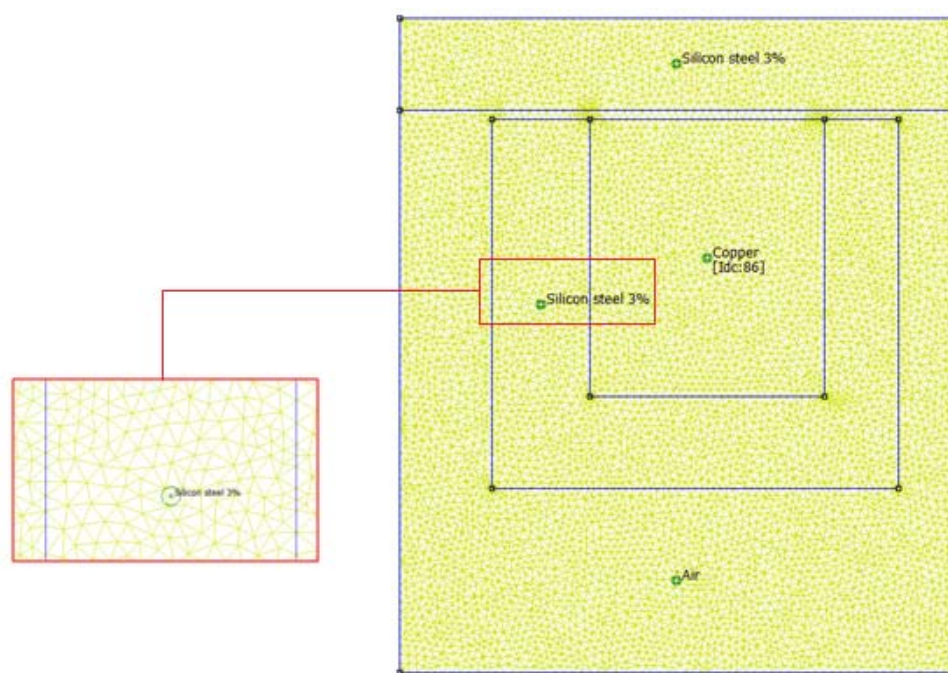
Las líneas de color rojo de la siguiente figura muestran las dimensiones de la frontera establecidas por el informe científico comentado anteriormente [8] en el modelo simulado en el software de elementos finitos:



**Figura 5.** Dimensiones de la frontera en FEMM

Por otro lado el tamaño del mallado se ha considerado muy pequeño ya que estamos trabajando con unidades muy pequeñas como el *mm* y variaciones muy pequeñas. He considerado un mallado de 0.2 *mm* en el modelo simulado en FEMM (ver Figura 6).

La siguiente figura representa el mallado del modelo simulado en FEMM:



**Figura 6.** Tamaño del mallado en el modelo de FEMM

La Tabla 2 representa los valores de la fuerza axial frente a la variación del tamaño del mallado en el modelo simulado:

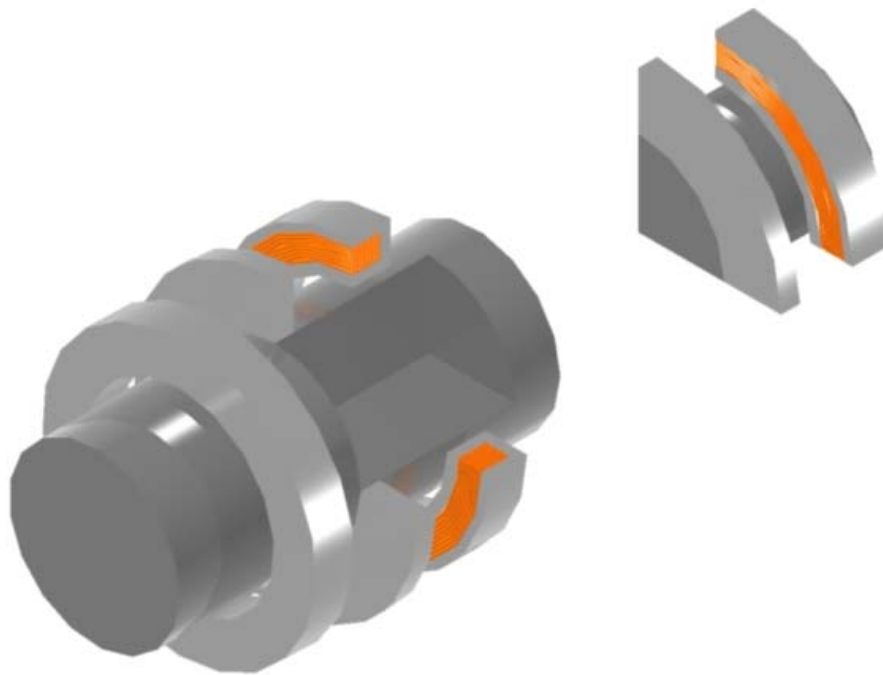
Dimensiones del tamaño del mallado	Fuerza (N) vs GAP 0,5 mm	Fuerza (N) vs GAP 0,51 mm	Fuerza (N) vs GAP 0,52 mm	Error (%)
Tamaño del mallado = 0,1 mm	-211,21	-203,69	-196,49	0,33
Informe científico (Tamaño del mallado= 0,2 mm)	-210,91	-203,39	-196,26	
Tamaño del mallado = 0,3 mm	-210,81	-203,18	-195,85	0,22
Tamaño del mallado = 0,5 mm	-210,75	-203,15	-195,85	0,26
Tamaño del mallado = 0,9 mm	-210,75	-203,15	-195,85	0,26
Tamaño del mallado = 2 mm	-210,75	-203,15	-195,85	0,26
Tamaño del mallado = 9 mm	-210,75	-203,15	-195,85	0,26

**Tabla 2.** Variación de la Fuerza en función del tamaño de mallado del modelo en FEMM

He considerado tomar un valor de mallado de 0.2 mm porque creo que es suficiente pequeño para las variaciones de GAP que vamos a realizar. El caso más desfavorable que he simulado ha sido una variación de 0.1 mm sobre el GAP y se comporta bien a posibles incrementos del GAP de 0.01 mm. No he considerado un tamaño más pequeño porque el tiempo de cálculo es demasiado para realizar muchas variaciones en el GAP o en la corriente. Desde mi punto de vista no considero eficiente seleccionar un tamaño de mallado más pequeño a 0.2 mm porque el tiempo de cálculo no es proporcional al error que podemos obtener en los cálculos.

En la Figura 7 se identifica el modelo realizado en el software de elementos finitos y la semejanza en Autocad.





**Figura 7.** Modelo simulado en FEMM y semejanza en Autocad

### 2.2.1. Dimensiones y características de los materiales en el modelo del rodamiento magnético de flujo axial

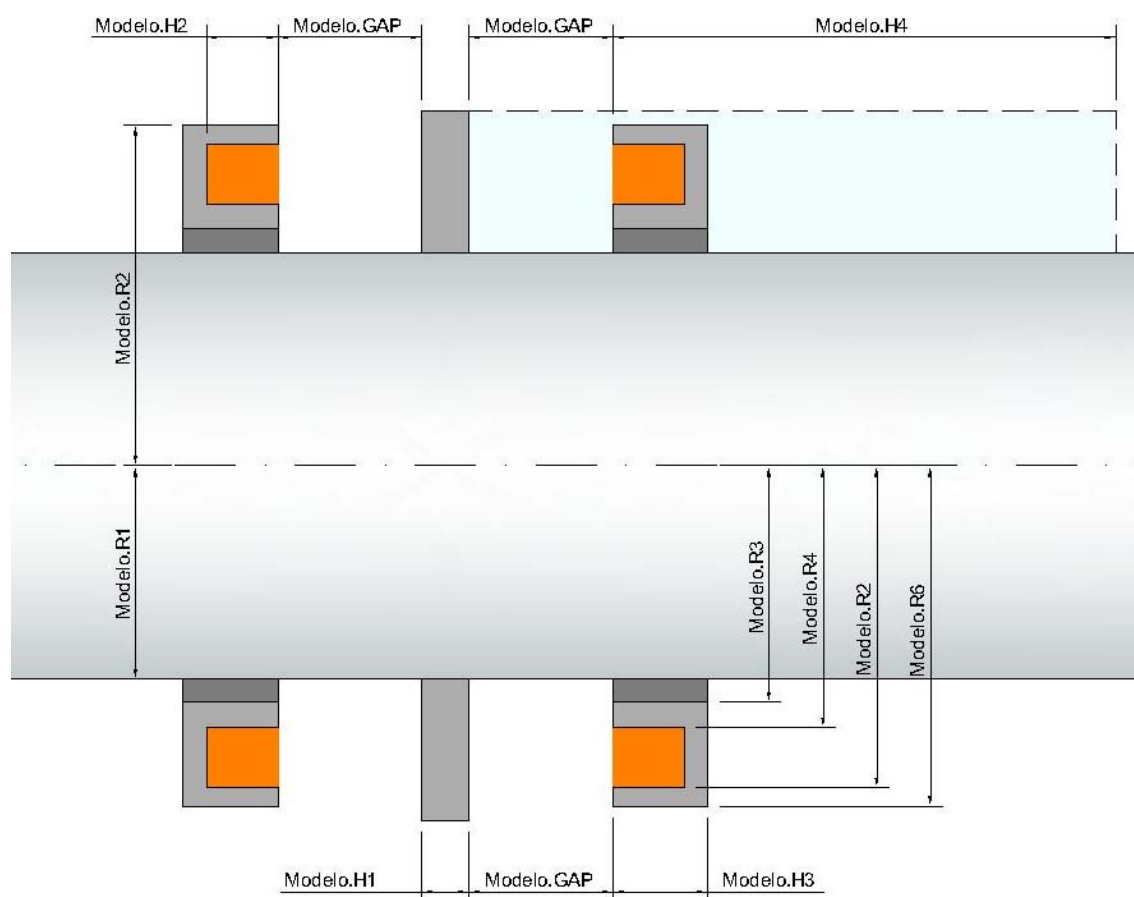
Las dimensiones del modelo vienen determinadas por el modelo [8] que vienen descritas en la siguiente tabla:

Parámetros	Valor (mm)	Descripción
Modelo.R <sub>1</sub>	45	Radio del rotor
Modelo.R <sub>2</sub>	75	Radio del disco magnético
Modelo.R <sub>3</sub>	50	Radio interior del rodamiento magnético
Modelo.R <sub>4</sub>	55,3	Radio interior de la bobina
Modelo.R <sub>5</sub>	68	Radio exterior de la bobina
Modelo.R <sub>6</sub>	72	Radio exterior del rodamiento magnético
Modelo.H <sub>1</sub>	10	Espesor en z del disco magnético
Modelo.H <sub>2</sub>	15	Espesor en z de la bobina
Modelo.H <sub>3</sub>	20	Espesor en z del rodamiento magnético
Modelo.H <sub>4</sub>	30	Espesor en z de la frontera de aire
Modelo.GAP	0,5	Distancia del entrehierro de aire entre el disco magnético y el rodamiento magnético

**Tabla 3.** Dimensiones del modelo simulado en FEMM



La Figura 8 ilustra las dimensiones del modelo simulado en FEMM.



**Figura 8.** Dimensiones acotadas del modelo simulado en FEMM

Después de establecer las dimensiones del modelo de elementos finitos se procede a aplicar los materiales y otros parámetros al modelo geométrico.

La siguiente tabla expresa los materiales y características técnicas que contiene cada material asignado al modelo en FEMM.

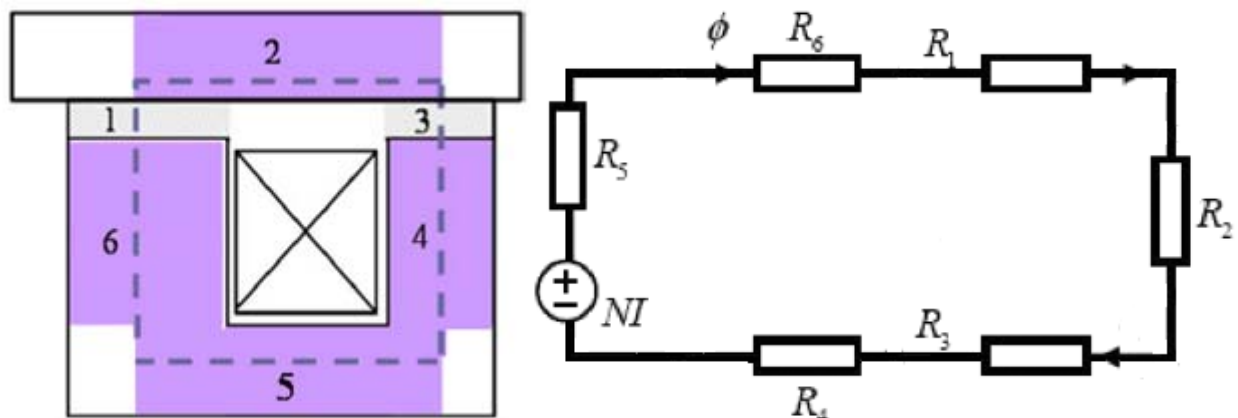
Parámetros	Valor	Descripción
Modelo.PermeabilidadRelativa	2700	Permeabilidad relativa del material ferromagnético
Modelo.ConductividadFerromagnetico	$2,083333 (\Omega \cdot m)^{-1}$	Conductividad del material ferromagnético
Modelo.ConductividadConductor	$58 (\Omega \cdot m)^{-1}$	Conductividad del material conductor (bobina)
Modelo.CORRIENTE	3,5 A	Corriente que circula por la bobina
Modelo.NumeroEspiras	86	Número de espiras que contiene la bobina
Modelo.Mallado	0,2	Tamaño del mallado en el material

**Tabla 4.** Características de los materiales asignados al modelo simulado en FEMM

### 2.2.2. Comprobación de los valores del campo magnético en el modelo diseñado

El siguiente estudio se basa en la comparación de los valores obtenidos del flujo magnético medio en el cojinete magnético, despreciando el flujo de dispersión que podría tener el modelo. Los dos métodos a comparar son los cálculos analíticos, basados en la reluctancia, procedentes las fórmulas de [17] (adjunto en anexo) y los resultados numéricos obtenidos con el modelo desarrollado en *FEMM* según los datos proporcionados en [8] en *FEMM*.

El circuito magnético del modelo simulado en *FEMM* es el siguiente:



**Figura 9.** Circuito magnético del modelo

La parte de la izquierda de la figura anterior representa cada una de las zonas del modelo simulado en *FEMM*. Cada zona representa el espacio seleccionado para el cálculo de la reluctancia, área y el campo magnético. Las zonas 1 y 3 representan el espacio de entrehierro que hay entre el disco magnético y el rodamiento magnético que contiene aire en nuestro caso. Las zonas 1 y 3 tienen un flujo magnético axial. La zona 2 representa el disco magnético con el mismo material ferromagnético que el rodamiento que gira solidario al rotor. En la zona 2 el flujo magnético es radial. La zona 5 representa la culata inferior del rodamiento magnético y el flujo magnético es radial. La zona 4 y 6 representan dos zonas del rodamiento magnético en las que el flujo es axial. El rectángulo que contiene una cruz representa el área de la bobina que contiene el cojinete magnético.

Por otro lado, el circuito que aparece a la derecha de la figura anterior representa la reluctancia ( $R_k$ ) de cada una de las zonas que hemos descrito anteriormente y la fuerza magnetomotriz generada por la bobina conectada a una fuente de corriente ( $N \cdot I$ ). En la siguiente fórmula ilustra el cálculo de la reluctancia magnética en los tramos axiales.

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

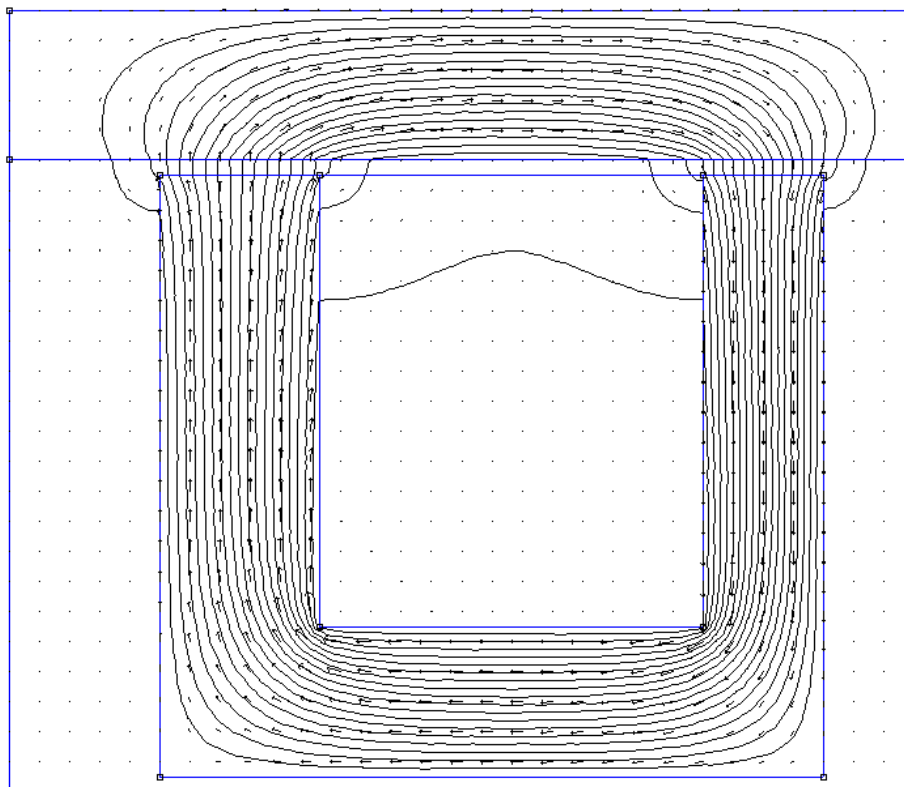
- **R:** reluctancia magnética, medida en  $\text{Av/Wb}$ .
- **l:** longitud del circuito, medida en  $m$  (metros).
- **$\mu$ :** permeabilidad magnética del material, medida en  $\text{H/m}$  (henrio/metro).
- **A:** Área de la sección del circuito magnético, en  $\text{m}^2$  (metros cuadrados).

En los tramos radiales el cálculo de la reluctancia magnética es el siguiente:

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{(2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot h)}$$

- $r_o$ : radio exterior (m)
- $r_i$ : radio interior (m)
- $h$ : espesor de material magnetico(m)

Cuanto mayor sea la reluctancia de un material, más fuerza magnetomotriz se requerirá para establecer un flujo magnético a través del mismo. En nuestro caso se ha despreciado simular en *FEMM* el eje del rotor que está acoplado al disco magnético ya que es de un material no ferromagnético y por lo tanto tiene una reluctancia muy elevada y no influye en los cálculos (ver Figura 10).



**Figura 10.** Sentido del flujo magnético del modelo en FEMM

La Tabla 5 contiene los valores obtenidos por los dos métodos comentados anteriormente:

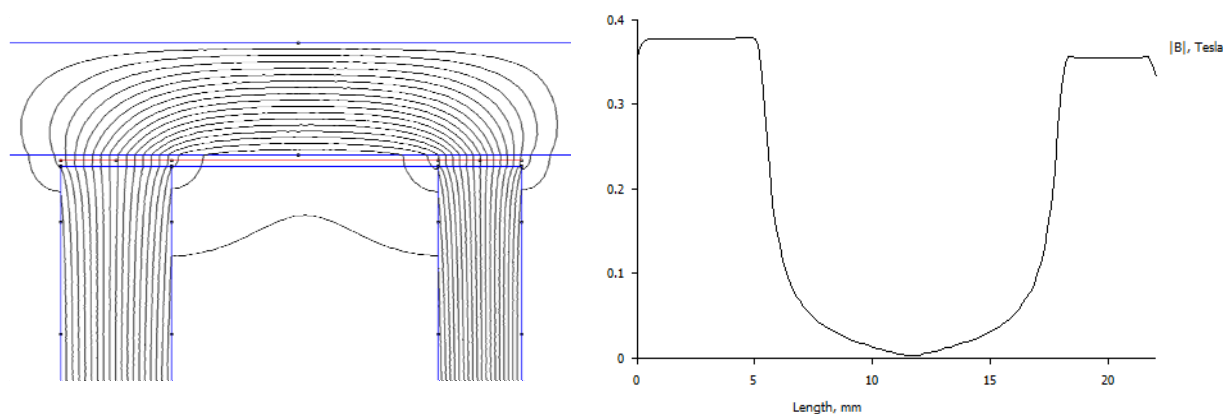
Descripción del $B_{\text{medio}}$ (T)	C. Analíticos (T)	C. FEMM (T)	Error (%)
Zona 1	0,370	0,375	1,34
Zona 2	0,337	0,468	38,84
Zona 3	0,369	0,352	4,52
Zona 4	0,369	0,492	33,38
Zona 5	0,337	0,498	47,69
Zona 6	0,370	0,491	32,50

**Tabla 5.** Comparación del campo magnético ( $B_{\text{medio}}$ ) mediante cálculos analíticos y simulados en FEMM

En los cálculos realizados en *FEMM* se ha considerado el flujo que atraviesa la parte media de cada zona descrita anteriormente (Zona 1, Zona 2, Zona 3, Zona 4, Zona 5 y Zona 6). Los cálculos de la zona 1 y 3 son muy precisos porque en el modelo en *FEMM* se produce flujo de dispersión y por lo tanto el flujo magnético es menor en el entrehierro que en el interior del material ferromagnético. El flujo que se obtiene en *FEMM* en el entrehierro está más cercano al calculado analíticamente. Esto se debe al método analítico ya que despreciamos el flujo de dispersión y se obtiene un valor aproxima del flujo magnético. En el resto de zonas como el área seleccionado en *FEMM* atraviesa todo el flujo es mayor al calculado analíticamente y por eso conlleva a un error elevado.

Realizando diferentes simulaciones en el modelo del rodamiento magnético en *FEMM* he llegado a la conclusión que en el [8] hay una errata en el valor del campo magnético. Según el informe técnico aparece el valor de 0.7 T y en mis simulaciones se obtiene un valor aproximado de 0.37 T.

En la siguiente gráfica se aprecia el valor aproximado de 0.37 T a lo largo del material ferromagnético.



**Figura 11.** Campo magnético ( $B$ ) en el entrehierro simulado en FEMM

### 2.2.3. Comprobación del coeficiente de rigidez estática $K_{i0}$

En primer lugar se explica de la configuración estudiada, que es de la siguiente manera:

La configuración del modelo estudiado es como se aprecia en la Figura 9. Las dimensiones provienen de la Tabla 3 y los parámetros aplicados a cada material provienen de la Tabla 4. La bobina contiene 86 espiras de cobre y circula por cada espira 3.5 A. Dicha corriente es la que se encarga de producir un flujo aproximado de 0.37 T en el GAP. Se ha considerado que el material ferromagnético es lineal y con una permeabilidad relativa de 2700.

Los coeficientes de rigidez estática  $K_{i0}$  y  $K_{z0}$  a frecuencia cero, son tan importantes porque se toman como referencia para muchos cálculos en el diseño del cojinete magnético.

La expresión del coeficiente de rigidez estática  $K_{i0}$  es de la siguiente manera cuando la frecuencia es cero [8], [17]:

$$k_{i0} = \frac{dF}{dI}$$

En el modelo simulado se ha considerado una variación de 0.1 A y se ha obtenido el siguiente resultado:

$$k_{i0} = \frac{dF}{dI} = \frac{(223,27 - 211,04)N}{(3,6 - 3,5)A} = 122,3 \text{ N/A}$$

En la siguiente tabla se aprecia la comparación de los valores obtenidos y los valores que aparecen en el artículo científico [8]:

Coeficiente de rigidez estática	Valor científico (N/m)	Valor calculado (N/m)	Error (%)
$K_{i0}$	120	122,3	1,92

**Tabla 6.** Comparación del coeficiente de rigidez estática  $K_{i0}$

### 2.2.4. Comprobación del coeficiente de rigidez estática $K_{z0}$

La expresión del coeficiente de rigidez estática  $K_{z0}$  es de la siguiente manera cuando la frecuencia es cero [8], [17]:

$$k_{z0} = \frac{dF}{dZ}$$

En el modelo simulado se ha considerado una variación de 0.01 mm y se ha obtenido el siguiente resultado:

$$k_{z0} = \frac{dF}{dZ} = \frac{(203,457 - 211,037)N}{(0,51 - 0,5)mm} = 7,58 \cdot 10^5 \text{ N/m}$$

La Tabla 7 compara el valor obtenido del modelo en *FEMM* y con el valor del artículo científico:

Coeficiente de rigidez estática	Valor científico (N/m)	Valor calculado (N/m)	Error (%)
$K_{zo}$	836000	758000	9,33

**Tabla 7.** Comparación del coeficiente de rigidez estática  $K_{zo}$

### 3. Descripción del Script en Octave para un diseño parametrizado del cojinete magnético.

El programa que he utilizado para el desarrollo del script es el software *Octave* porque es capaz de interactuar con *FEMM* v4.2 y por su amplia capacidad para realizar cálculos y gráficas.

El script en *Octave* que posteriormente está relacionado con un programa de elementos finitos que se llama *FEMM*. Este script tiene como objetivo parametrizar un cojinete magnético y posteriormente realizar simulaciones para resolver diferentes problemas.

A continuación voy a explicar brevemente que es *Octave* ya que es uno de los programas utilizado en el desarrollo de este proyecto [18].

*Octave* o *GNU Octave* es un programa libre para realizar cálculos numéricos. Como indica su nombre es parte de proyecto *GNU*. *MATLAB*® es considerado su equivalente comercial. Entre varias características que comparten se puede destacar que ambos ofrecen un intérprete permitiendo ejecutar órdenes en modo interactivo. Nótese que *Octave* no es un sistema de álgebra computacional como podría ser *Maxima*, sino que usa un lenguaje que está orientado al análisis numérico.

La descripción del algoritmo de *Octave* se puede dividir en tres partes: la interfaz gráfica para *Octave* (ver anexos), el contenido del algoritmo y los resultados que aporta el mismo.

#### 3.1. Descripción del script para *OctaveFEMM*

Un script es un pequeño código que sigue una serie de comandos escritos en un lenguaje de programación. Nuestro caso está escrito en un fichero de texto pero con extensión \*.m que después será ejecutado en *Octave*.

La función de nuestro script es modelizar un cojinete magnético parametrizado, del tipo estudiado, en función de los datos introducidos por el usuario. Se han diseñado dos script distintos en *Octave*. La finalidad de estos dos script es implementar los estudios que se han realizado en el modelo que aparece en el [8]. Así, cada uno de los script tiene una función distinta, tal y como se describe a continuación:

**Principal\_Variacion\_del\_GAP.m:** El objetivo de este script es diseñar, aplicar los materiales correspondientes a cada parte del rodamiento magnético y finalmente calcular la fuerza axial

ejercida por el devanado estatórico sobre el disco que está acoplado al rotor. La fuerza axial calculada es en función de un valor de corriente DC constante y una variación del entrehierro (*GAP*).

**Principal\_Variacion\_de\_Corriente.m:** El objetivo de este script es diseñar, aplicar los materiales correspondientes a cada parte del rodamiento magnético y finalmente calcular la fuerza axial ejercida por el devanado estatórico sobre el disco que está acoplado al rotor. La fuerza axial calculada es en función de un valor del *GAP* constante y una variación de la corriente que circula en el devanado estatórico.

En este caso hemos manejado el programa *Octave*, cuya configuración habitual es de modo texto, con el entorno *QtOctave* de forma que los script anteriores se ejecutan de la siguiente manera en *QtOctave*:

- En primer lugar abrimos el fichero \*.m mediante el siguiente icono



- Para ejecutar el script abierto tenemos que seleccionar el icono



Un ejemplo de un script de nuestra simulación sobre el cojinete magnético se puede ver en anexos.

El programa principal comienza indicando la ruta de trabajo a Octave mediante el comando:

```
addpath ("C:\\*");
```

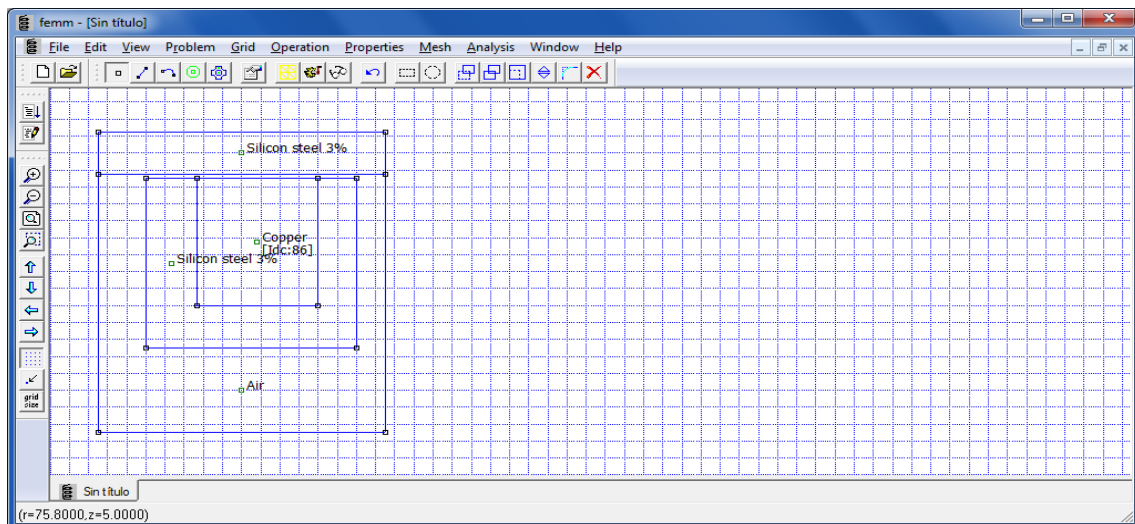
Después se define una serie de subprogramas que se han detallado en la Tabla 8.

COMANDO	DESCRIPCIÓN
<b>Cargar_funciones_para_dibujar</b>	Cargo las funciones necesarias para resolver el problema (en este ejemplo solo la función dibujar)
<b>Datos_Geometria_Rodamiento Magnético</b>	Cargo los datos introducidos por el usuario para diseñar la geometría del rodamiento magnético
<b>Materiales_y_Condiciones</b>	Cargo los materiales y las propiedades técnicas al diseño del rodamiento magnético

**Tabla 8.** Descripción de los subprogramas del script principal para Octave

El siguiente paso es comunicarse con el programa de elementos finitos *FEMM v4.2* mediante una serie de comandos (ver anexos).

En el preprocesador del programa de elementos finitos después de los siguientes comandos explicados se visualiza lo siguiente:



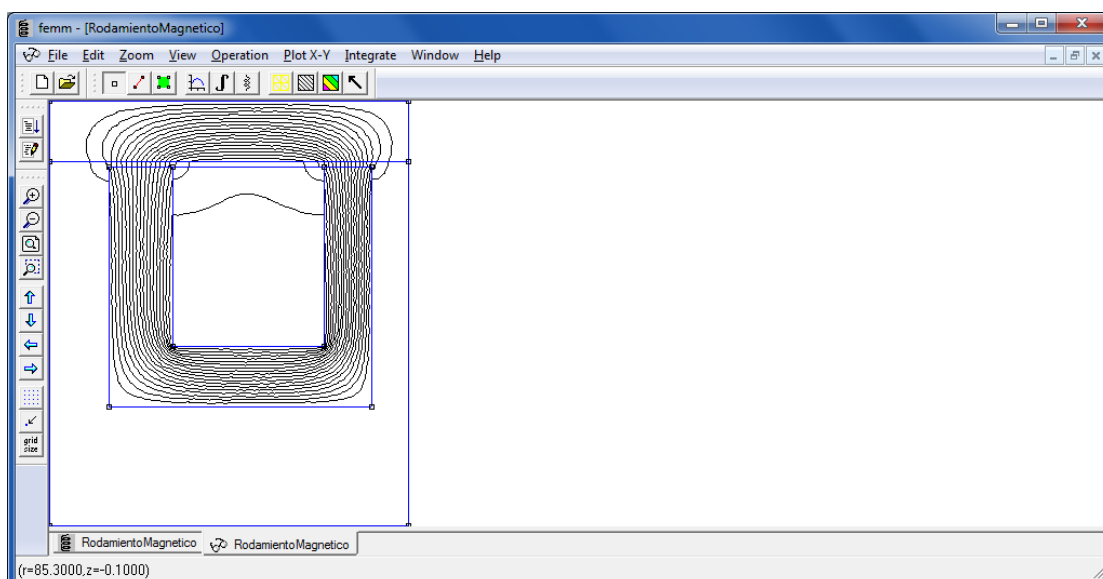
**Figura 12.** Visualización del rodamiento magnético en el preprocesador de FEMM

Los siguientes comandos son aplicados en el post-procesador del programa de elementos finitos que son resumidos en la siguiente tabla:

COMANDO	DESCRIPCIÓN
<b>mi_analyze(0);</b>	Ejecuta el proceso de cálculo del preprocesador al post-procesador de FEMM
<b>mi_loadsolution</b>	Carga y muestra la solución correspondiente a la geometría
<b>Calculos_Variacion_GAP()</b>	Calcula la fuerza axial en función de una variación del GAP introducida por el usuario y con una corriente DC constante

**Tabla 9.** Descripción de los comandos aplicados al post-procesador de FEMM del script principal

La Figura 13 se visualiza el post-procesador de FEMM después de ejecutar en Octave el programa principal "Principal\_Variacion\_del\_GAP.m".



**Figura 13.** Visualización del rodamiento magnético en el post-procesador de FEMM



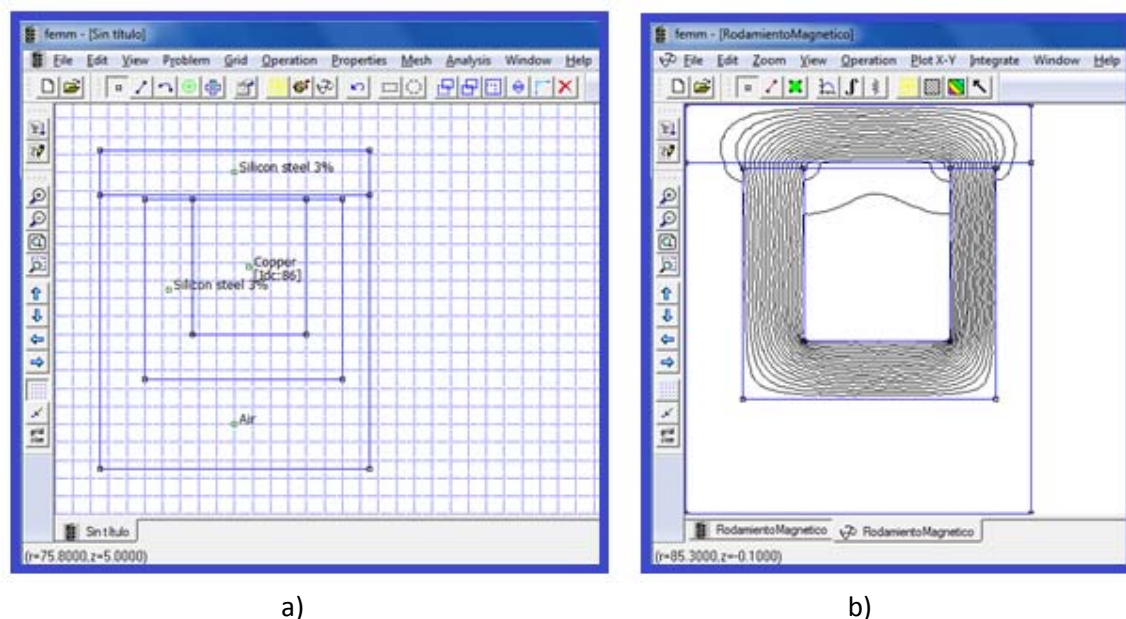
### 3.2. Resultados después de la ejecución del script principal en Octave

Tal y como se ha comentado anteriormente, este script permite diseñar y analizar un rodamiento magnético activo axial utilizando *FEMM*.

Así, dicho script nos elabora una serie de datos y herramientas que facilitan el análisis del rodamiento, como son:

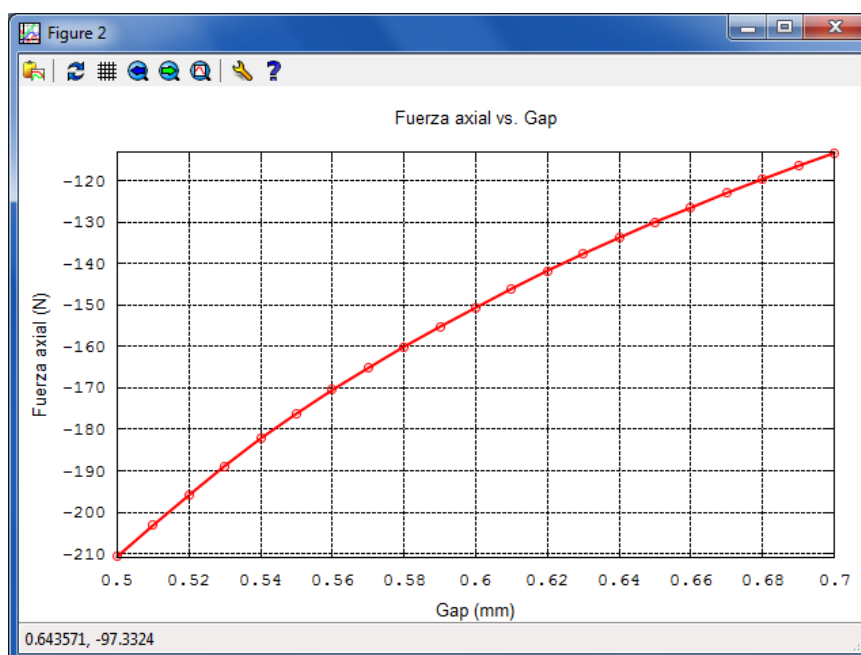
- ❖ **Guarda el diseño del rodamiento magnético en un fichero de FEMM:** Dentro del script hay un comando que es capaz de guardar un fichero en *FEMM* del diseño del rodamiento magnético con flujo axial (RodamientoMagnetico.FEM) ejecutado mediante Octave.
- ❖ **Representación gráfica en Octave:** Se muestra una gráfica en la que se representa la fuerza axial ejercida por el devanado estático al disco ferromagnético (acoplado al rotor) respecto a la variación de *GAP* (Principal\_Variacion\_del\_GAP.m) o también respecto a la variación de la corriente (Principal\_Variacion\_de\_Corriente.m).
- ❖ **Disponibilidad de almacenamiento de los datos referentes al gráfico simulado por Octave:** Se almacenan los datos de los gráficos en ficheros de texto que pueden ser exportados a otros programas como una hoja de cálculo o de texto.

La siguiente figura visualiza el diseño del cojinete magnético guardado en *FEMM*.



**Figura 14.** Visualización del rodamiento magnético: a) preprocesador en *FEMM*; b) post-procesador en *FEMM*

La Figura 15 representa el gráfico referente a la fuerza axial en función de la variación del *GAP*:



**Figura 15.** Gráfica de la fuerza axial en función de la variación del GAP

#### 4. Estudio del comportamiento de la fuerza axial en función a una variación del GAP

A continuación, se describe el estudio realizado en el cojinete magnético cuya finalidad es simular en el modelo la variación de la fuerza axial que ejerce el devanado estático sobre el disco magnético que está acoplado al rotor en función de la variación del entrehierro de aire (GAP) que hay entre el disco magnético y el rodamiento magnético.

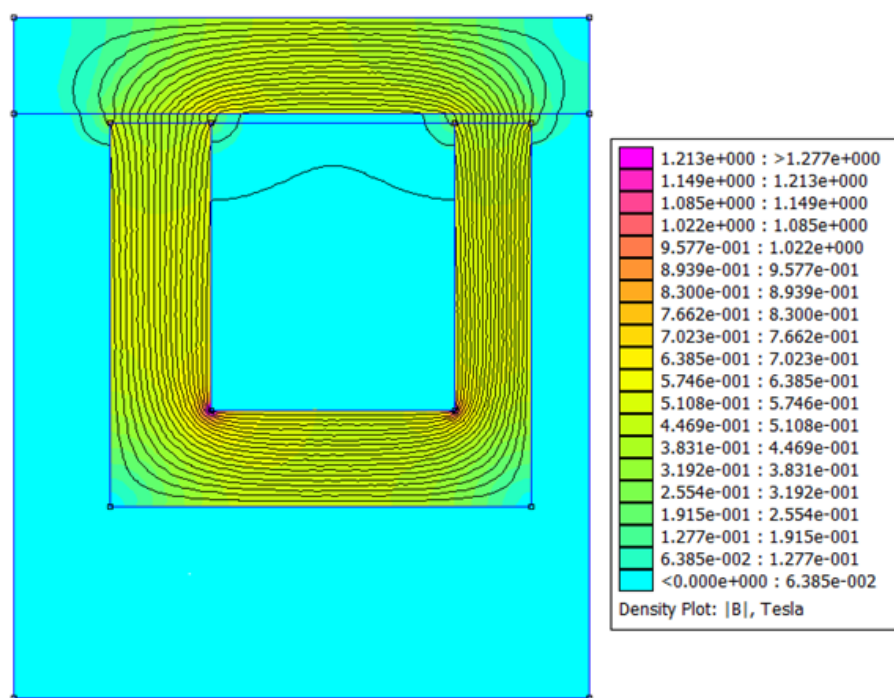
Para ello, en cada prueba se trata de variar un único parámetro (GAP) manteniendo constante el resto de valores.

El GAP inicial será de 0.5 mm y se irá aumentando, con incrementos de 0,1 mm, hasta llegar a un GAP de 1.5 mm. Para ello, se irá desplazando axialmente el rodamiento magnético y manteniendo fijo el disco magnético que está acoplado al rotor.

El proceso que se realiza en el programa de elementos finitos es el siguiente:

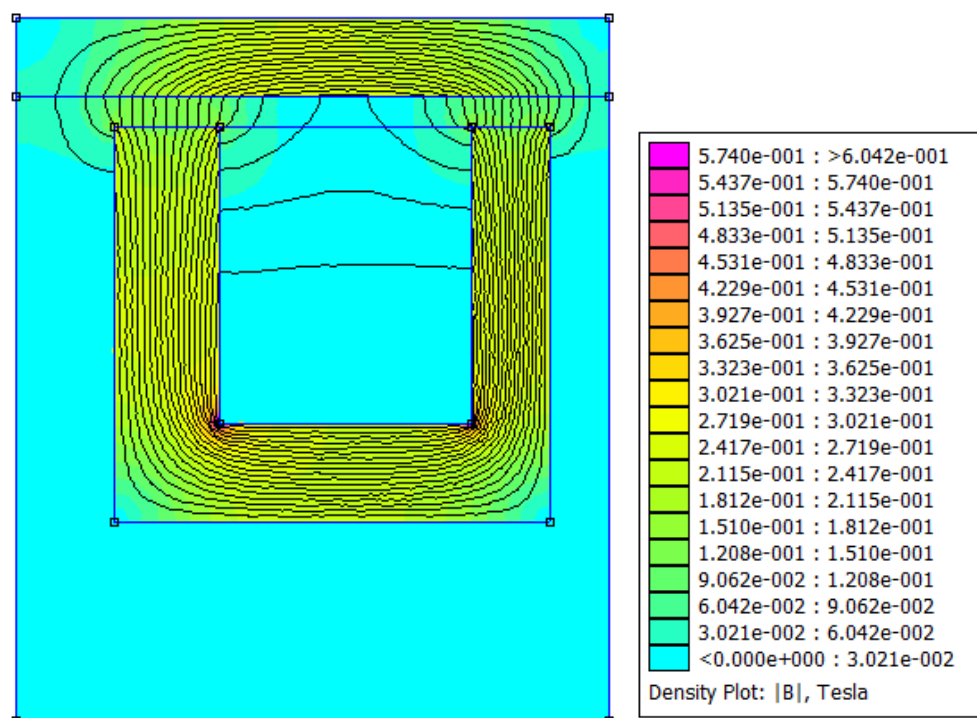
*FEMM* se abre tras ejecutar el script principal en *Octave* y empieza a dibujar las dimensiones geométricas del cojinete magnético. Posteriormente inserta a cada zona del cojinete magnético sus materiales específicos, el tamaño de mallado y finalmente establecer las condiciones de contorno.

Lo comentado anteriormente se realiza en el preprocesador de FEMM. Después de guardar el archivo y que el programa realice su proceso de cálculos que va en función del número de variables espaciales y dependencias temporales se muestra el post-procesador del cojinete magnético con las dimensiones y características técnicas que aparecen en la Tabla 3 y Tabla 4.



**Figura 16.** Post-procesador en FEMM con un GAP de 0.5 mm y con una corriente de 3.5 A

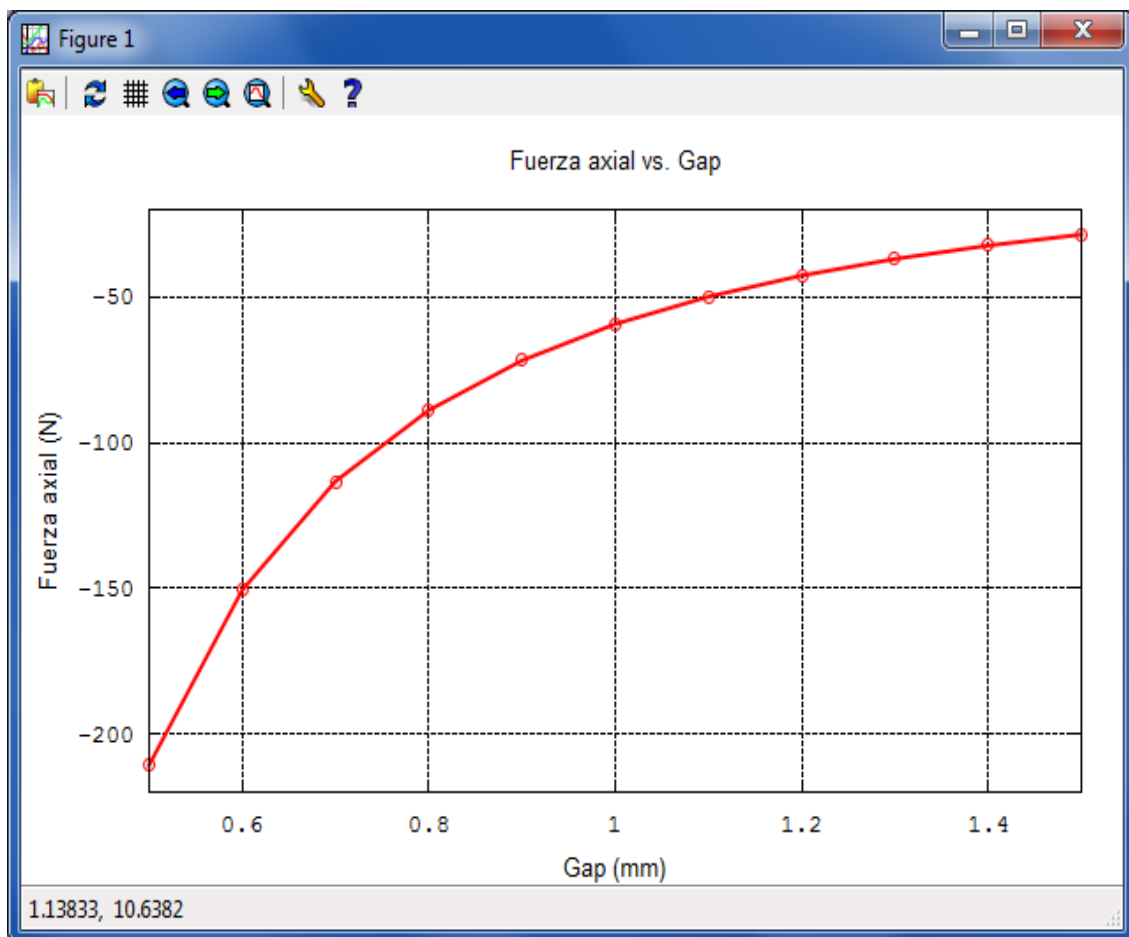
La última simulación realizada en FEMM que corresponde a una GAP de 1.5 mm y se muestra en la siguiente figura.



**Figura 17.** Post-procesador en FEMM con un GAP de 1.5 mm y con una corriente de 3.5 A

Comparando las dos figuras anteriores se aprecia que la densidad de campo magnético varía en función del GAP que hay en el diseño del cojinete magnético. A mayor GAP, la densidad del campo magnético es menor.

Para poder representar una gráfica se necesita realizar una repetición de lo comentado anteriormente para obtener una serie de medidas de la fuerza axial para distintos valores de GAP. En la siguiente figura se representa la gráfica para los distintos GAP que he descrito anteriormente (desde 0.5 mm hasta 1.5 mm con intervalos de 0.1 mm).



**Figura 18.** Gráfica de la fuerza axial frente a la variación del GAP simulado con FEMM

Observando la gráfica de la fuerza axial frente a la variación del GAP con una corriente constante se puede extraer que la fuerza axial ejercida por el devanado estatórico sobre el disco magnético que está acoplado al rotor disminuye su valor respecto al aumento del GAP.

En la siguiente tabla se representa los valores obtenidos después de la simulación estudiada en ese apartado.

GAP (mm)	FUERZA (N)
0,5	-210,75
0,6	-150,65
0,7	-113,32
0,8	-88,94
0,9	-71,84
1	-59,37
1,1	-49,98
1,2	-42,72
1,3	-37,02
1,4	-32,43
1,5	-28,66

**Tabla 10.** Fuerza axial frente a la variación del GAP con una corriente constante de 3.5 A simulado en FEMM

Por tanto, al modificar el parámetro del GAP del cojinete magnético se observan importantes variaciones en el comportamiento de la fuerza.

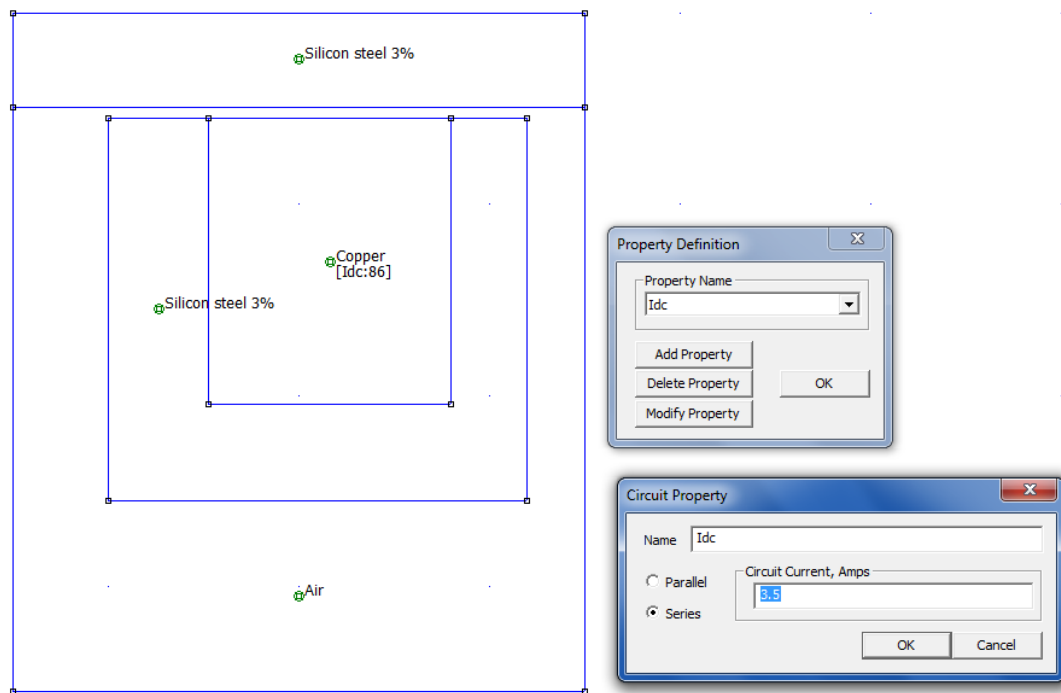
## 5. Estudio del comportamiento de la fuerza axial en función a una variación de corriente DC

En este caso, se describe el estudio realizado en el cojinete magnético cuya finalidad es simular la variación de la fuerza axial que ejerce el devanado estatórico sobre el disco magnético que está acoplado al rotor en función de la variación de corriente que circula por la bobina que se encuentra en el rodamiento magnético (devanado estatórico).

Para ello, en cada simulación se trata de variar el parámetro “corriente” manteniendo constante el resto de valores y geometría.

La corriente inicial será de 2.5 A y se irá aumentando, con incrementos de 0,1 A, hasta llegar a una corriente de 4.5 A. Para ello, se irá cambiando el valor de corriente DC en el circuito del modelo en FEMM que es denominada “ $I_{dc}$ ” (ver Figura 20) en nuestro caso.

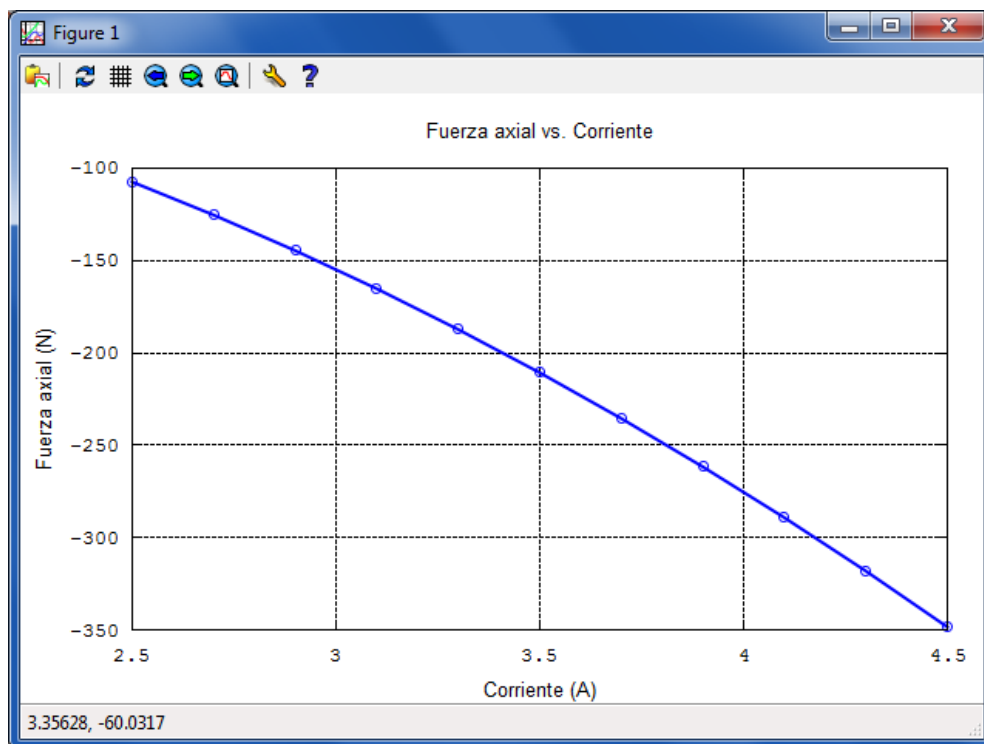
El proceso que se realiza en el programa de elementos finitos es similar al comentado en el estudio anterior.



**Figura 19.** Simulación inicial en FEMM del rodamiento magnético con una corriente de 3.5 A

El propio script creado varía progresivamente el valor de la corriente de nuestro modelo con el incremento introducido por el usuario que en nuestro caso es de 0.1 A. Nuestro circuito está compuesto por 86 espiras de cobre y por un valor de corriente asignado según en qué estado de la simulación estemos.

En la siguiente gráfica se visualiza todas las medidas de fuerza para las distintas corrientes.



**Figura 20.** Gráfica de la fuerza axial frente a la variación de corriente simulado con FEMM

Observando la gráfica de la fuerza axial frente a la variación de corriente con un *GAP* constante se puede observar que el módulo de la fuerza axial ejercida por el devanado estatórico sobre el disco magnético que está acoplado al rotor aumenta progresivamente su valor en función al aumento de la corriente.

En este caso como aumenta la corriente “*I*” logramos que el valor del flujo magnético sea más grande y por lo tanto la fuerza aumenta al estar el flujo en el numerador como está descrito en la ecuación anterior.

En la siguiente tabla se constituyen los valores obtenidos tras la simulación y además están representados en la Figura 19.

CORRIENTE (A)	FUERZA (N)
2,5	-107,53
2,7	-125,42
2,9	-144,69
3,1	-165,33
3,3	-187,35
3,5	-210,75
3,7	-235,53
3,9	-261,68
4,1	-289,2
4,3	-318,1
4,5	-348,38

**Tabla 11.** Fuerza axial frente a la variación de la corriente con un *GAP* de 0.5 mm simulado en FEMM

## 6. Aplicaciones

### 6.1. Diseño de un cojinete magnético activo axial para un volante de inercia

Los sistemas de almacenamiento cinéticos, también llamados volantes de inercia o Flywheels, se basan en el uso de una masa rotativa (rotor) que gira a alta velocidad para almacenar energía cinética. Esta energía se puede extraer o inyectar mediante un generador o un motor, respectivamente. Este proceso se realiza mediante un convertidor bidireccional de potencia, que es el encargado de controlar la dirección del flujo de la energía [1].

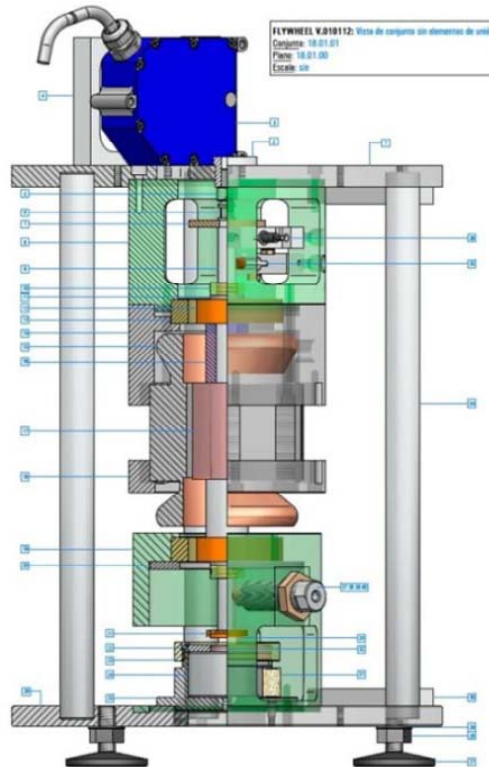
Para garantizar una elevada eficiencia energética, los volantes de inercia trabajan dentro de una cámara de vacío. Por este motivo, el uso de rodamientos magnéticos es ideal para este tipo de sistema de almacenamiento de energía.

Los volantes de inercia no son los únicos elementos que permiten almacenar energía. Existen diversas tecnologías y sistemas (ver anexo).

Las ventajas de los volantes de inercia frente a otros sistemas de almacenamiento convencionales, como las baterías electroquímicas, consisten en que son menos

contaminantes y aseguran una mayor eficiencia energética. Además, aportan una gran densidad de potencia de salida y mayor vida útil [1].

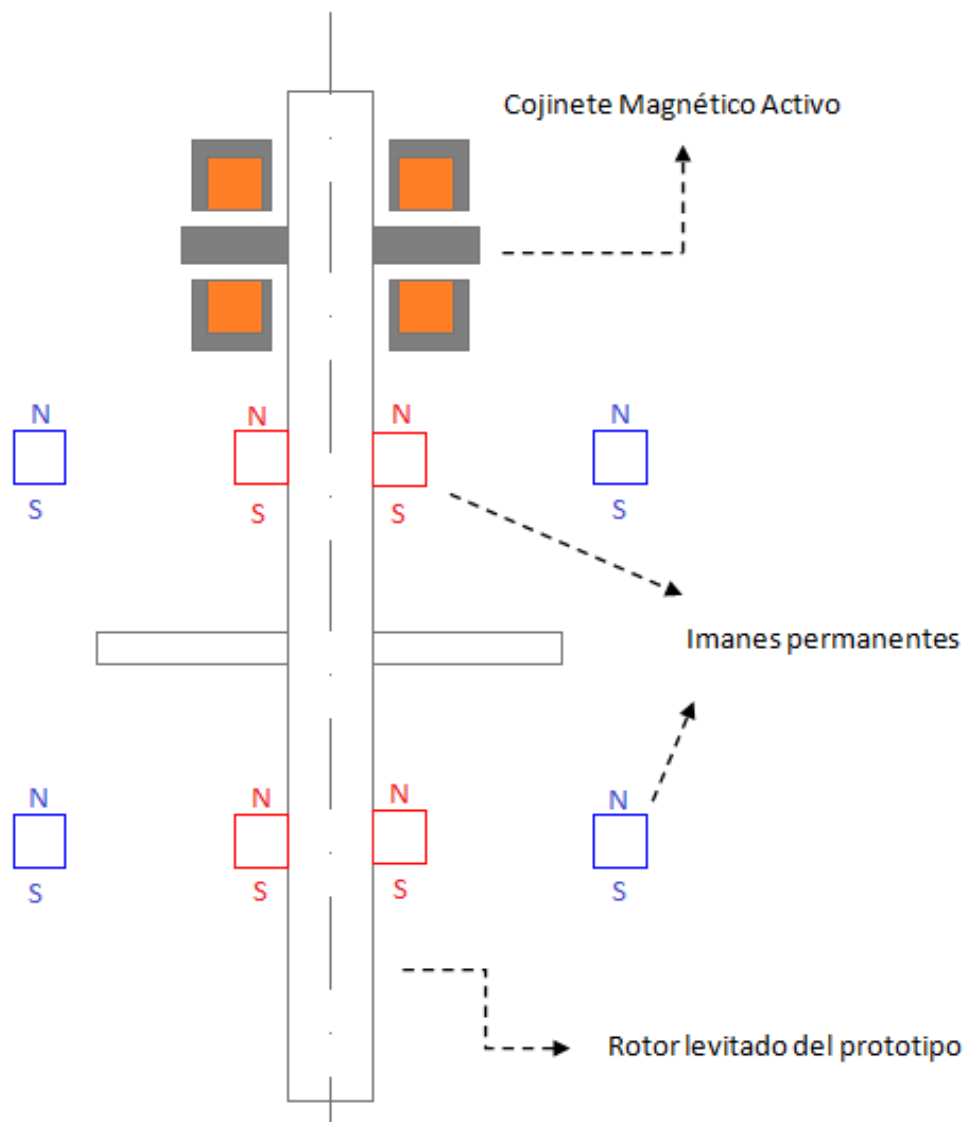
Tras esto, se describe el diseño de un rodamiento magnético axial del tipo estudiado en este trabajo para el prototipo construido en [10]. La estructura general del prototipo se ilustra en la Figura 21.



**Figura 21.** Estructura del prototipo operativo de rotor levitado de [10].

En la Figura 22 se ilustra la estructura del rotor del prototipo desde un corte transversal. En la Figura 22 se aprecia que los grados de libertad radiales son compensados con dos imanes de la misma dirección de magnetización que se encuentran enfrentados lateralmente. El funcionamiento del control radial se basa cuando los imanes de la estructura del rotor (rojo) se acercan radialmente a los imanes más alejados (azul) son repelidos. La fuerza axial a compensar por nuestro rodamiento magnético activo corresponde al peso de la estructura del rotor y la fuerza que ejercen los imanes tras el desplazamiento axial.

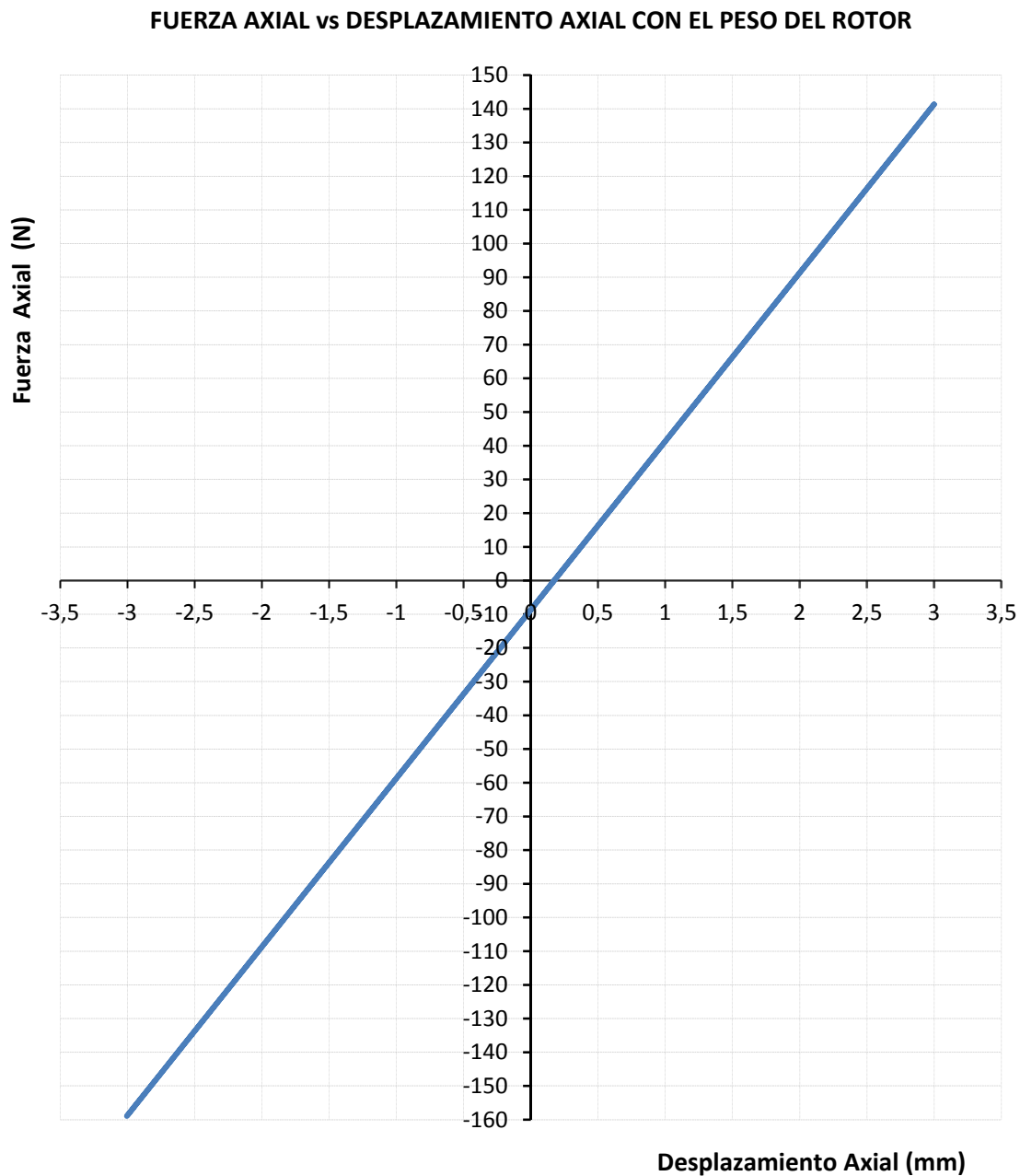




**Figura 22.** Rodamiento magnético activo axial aplicado al prototipo de rotor levitado.

Para diseñar nuestro rodamiento magnético, hay que tener en cuenta el peso del rotor y la fuerza ejercida por los imanes por el desplazamiento axial del rotor. La fuerza ejercida por los imanes al desplazamiento axial del rotor se produce cuando el rotor se desplaza en dirección axial (por ejemplo, hacia arriba), el polo Norte del imán externo atraerá al polo Sur del imán situado en la estructura del rotor, creando una fuerza axial que hay que tener en cuenta para diseñar el rodamiento. Para caracterizar dicha fuerza en función del desplazamiento axial se ha tomado como origen del desplazamiento axial el punto en el que los imanes externos están alineados con los imanes de la estructura del rotor. La curva característica de fuerza axial frente al desplazamiento axial se ha obtenido de los datos facilitados por [10].

De los datos obtenidos de [10] se aprecia que la curva característica de fuerza axial frente al desplazamiento axial tiene un comportamiento lineal de pendiente 50 N/mm en el intervalo de desplazamiento que vamos a trabajar para el prototipo. La fuerza que ejerce el peso del rotor se representa como 8,7 N [10] a lo largo de todo desplazamiento porque el peso del rotor es constante y no varía según el desplazamiento del rotor. En la Figura 23 ilustra la fuerza de fuerza axial frente al desplazamiento axial del prototipo de rotor levitado en considerando el peso del rotor.



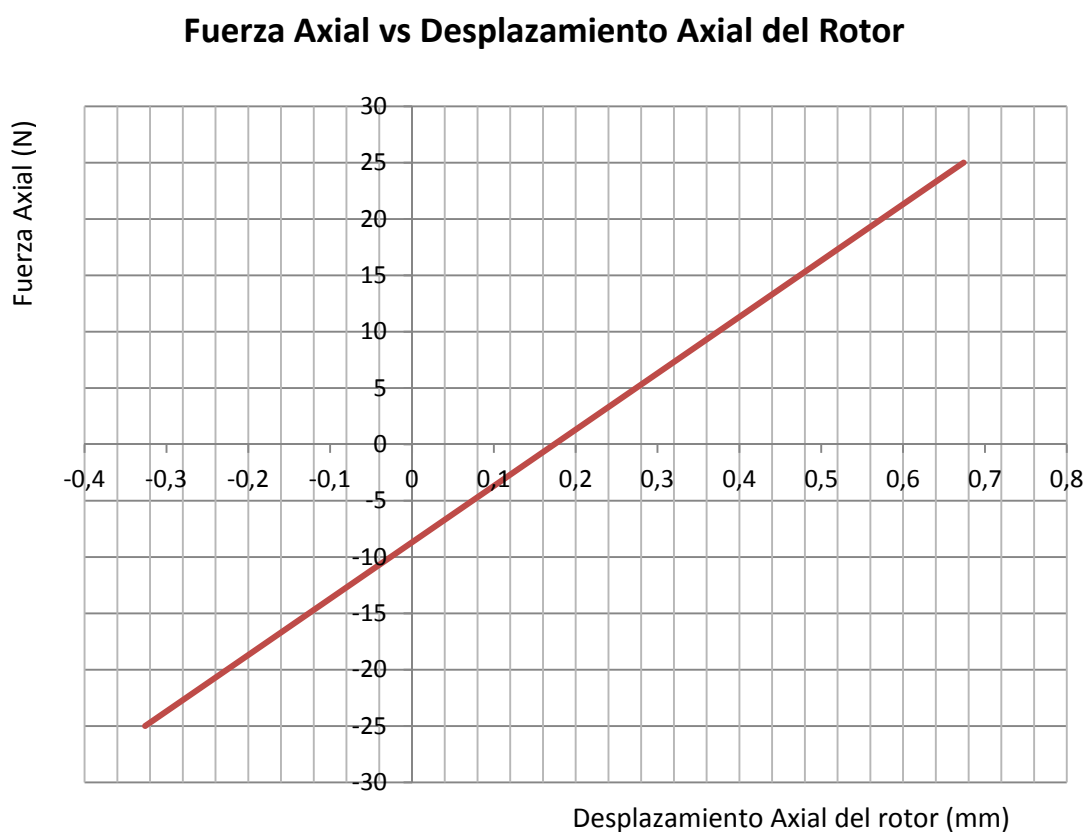
**Figura 23.** Característica de fuerza axial frente al desplazamiento axial del prototipo de rotor levitado en considerando el peso del rotor.

Observando la Figura 23 se deduce que hay un punto donde la fuerza axial es nula. El punto en el que el rotor está en equilibrio axialmente se consigue para un desplazamiento de 0,174 mm. A partir de este desplazamiento de 0,174 mm es un punto de equilibrio inestable ya que a pequeños desplazamientos del rotor en dirección axial crean fuerzas que lo alejan más del punto de equilibrio. Por ello, necesitamos acoplar nuestro rodamiento magnético activo de flujo axial para estabilizar el rotor axialmente.

Se va a diseñar un rodamiento que garantice, al menos, el doble de la fuerza axial necesaria con una variación de  $\pm 0.5$  mm de desplazamiento axial. Por tanto, el modelo simulado de rodamiento debe aportar, al menos, 50 N para trabajar en torno al punto de equilibrio, que se

sitúa en  $0.174 \text{ mm}$  respecto al origen del desplazamiento axial. Asimismo, para trabajar en dicho punto de equilibrio, se debe considerar una amplitud máxima de movimiento axial comprendida entre  $0,674$  y  $-0,326 \text{ mm}$ .

La Figura 24 ilustra la curva de fuerza axial frente al desplazamiento axial del rotor levitado en el rango de trabajo.



**Figura 24.** Curva de la fuerza axial frente al desplazamiento axial del rotor levitado en el rango de trabajo

En primer lugar, se deben considerar los parámetros geométricos iniciales del prototipo antes de realizar cualquier tipo de ensayo. Los parámetros del rotor levitado del prototipo que nos restringen las dimensiones del cojinete magnético activo con flujo axial son los siguientes:

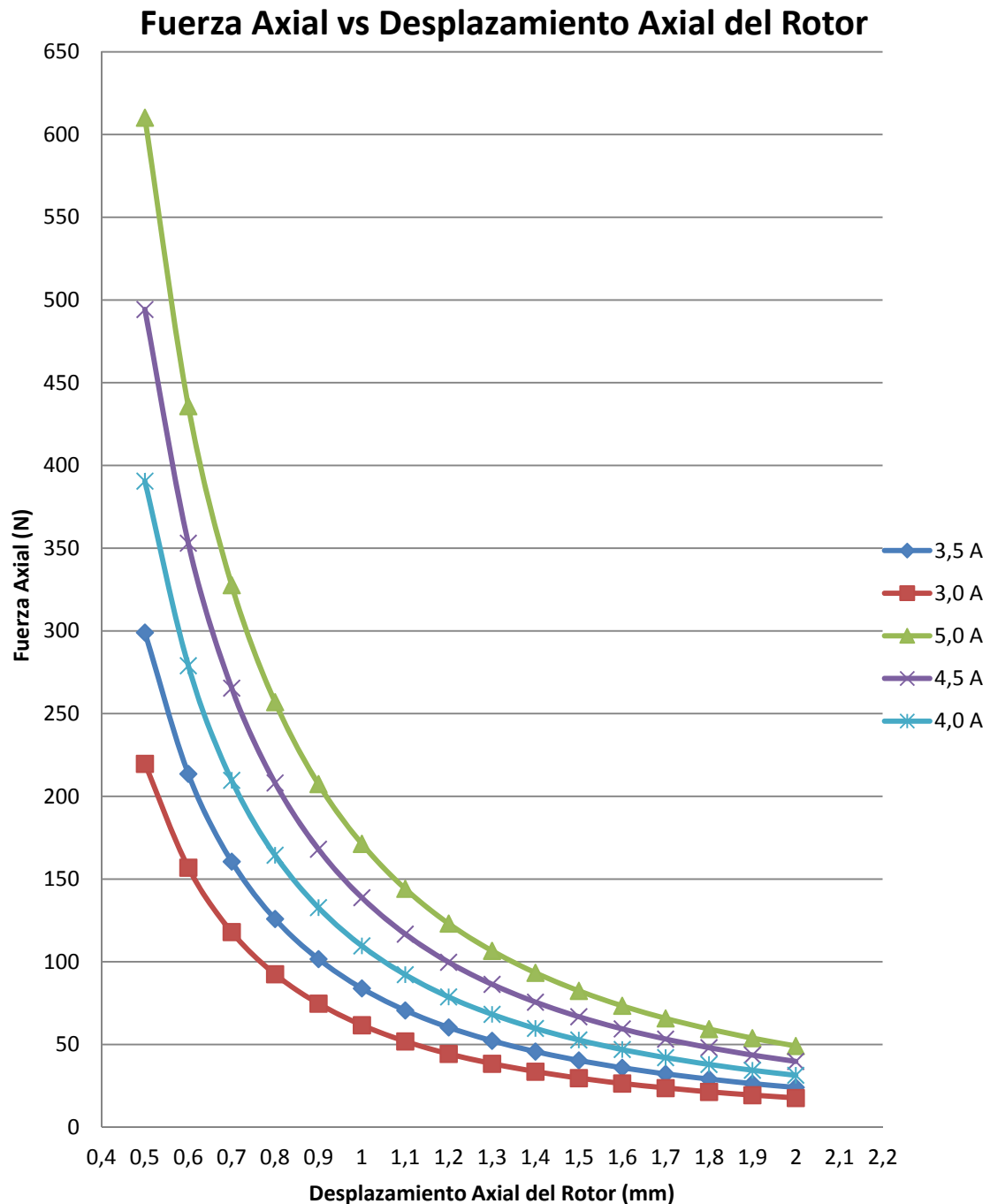
- Diámetro del eje: 11-25 mm
- Diámetro de la carcasa del estator: 250 mm
- Masa del rotor: 870 g

La Tabla 12 ilustra las dimensiones del cojinete magnético diseñado para el rotor levitado del prototipo.

Parámetros	Valor	Descripción
Modelo.R <sub>1</sub>	12 mm	Radio del rotor
Modelo.R <sub>2</sub>	42 mm	Radio del disco magnético
Modelo.R <sub>3</sub>	17 mm	Radio interior del rodamiento magnético
Modelo.R <sub>4</sub>	22,3 mm	Radio interior de la bobina
Modelo.R <sub>5</sub>	35 mm	Radio exterior de la bobina
Modelo.R <sub>6</sub>	39 mm	Radio exterior del rodamiento magnético
Modelo.H <sub>1</sub>	10 mm	Espesor en z del disco magnético
Modelo.H <sub>2</sub>	15 mm	Espesor en z de la bobina
Modelo.H <sub>3</sub>	20 mm	Espesor en z del rodamiento magnético
Modelo.H <sub>4</sub>	30 mm	Espesor en z de la frontera de aire
Modelo.GAP	De 0,5 a 1,5 mm	Distancia del entrehierro de aire entre el disco magnético y el rodamiento magnético
Modelo.CORRIENTE	4,0 A	Corriente que circula por la bobina
Modelo.NumeroEspiras	155 Espiras	Número de espiras que contiene la bobina

**Tabla 12.** Dimensiones del cojinete magnético para el rotor levitado

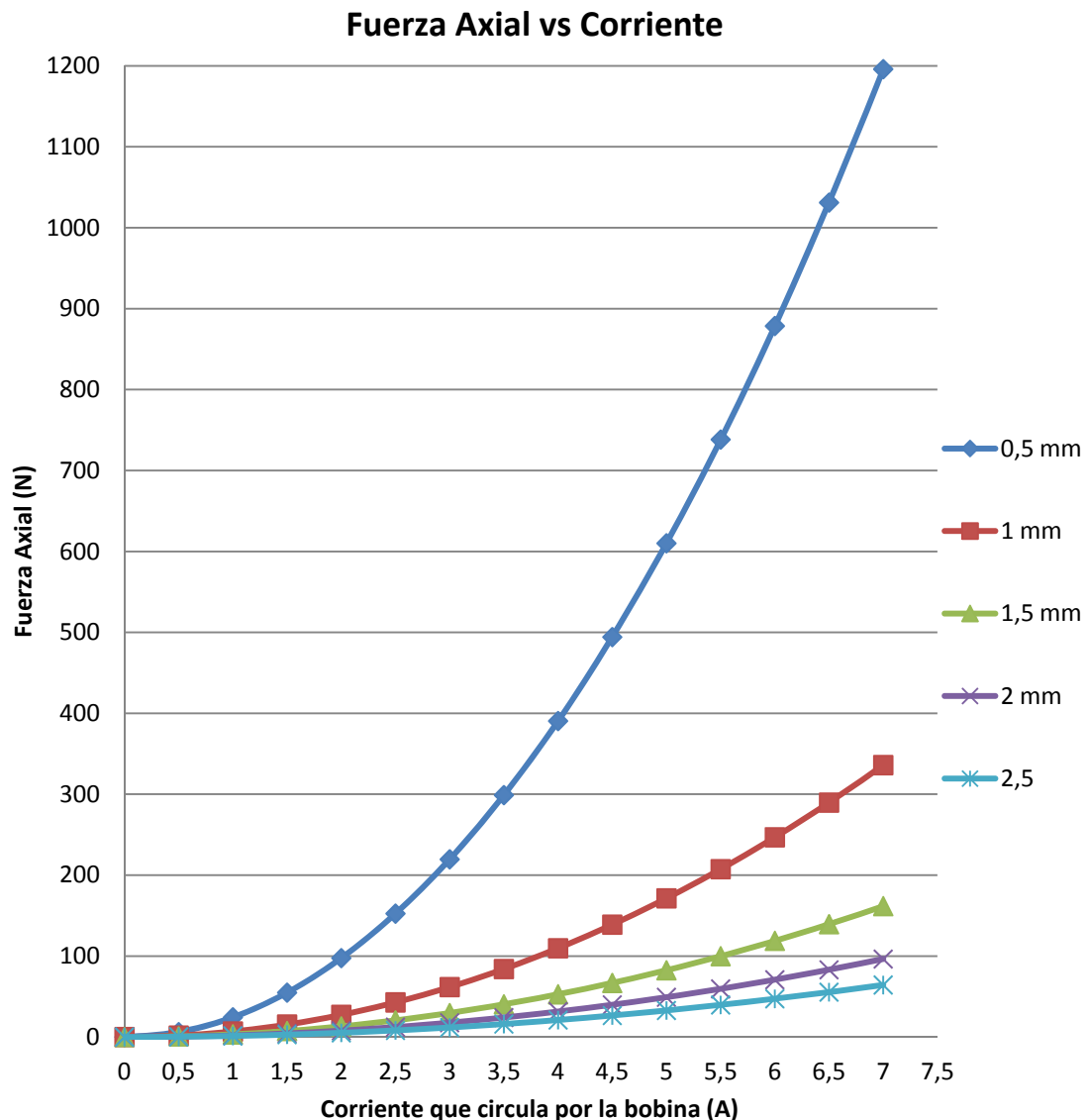
Con las dimensiones de la Tabla 12 se han podido obtener las gráficas de fuerza axial frente al desplazamiento axial del rotor con una corriente constante (Figura 25) y la fuerza axial frente a la corriente con un desplazamiento axial del rotor constante (Figura 26).



**Figura 25.** Gráfica de fuerza axial frente al desplazamiento axial del rotor con una corriente constante en el rodamiento magnético activo axial diseñado para el prototipo de [10].

En la gráfica de fuerza axial frente al desplazamiento axial del rotor levitado, se puede observar que para diferentes valores de corriente la fuerza se comporta de diferente manera. La variación del desplazamiento axial del rotor está comprendida entre 0,5-2 mm y se obtienen diferentes valores de fuerza. En nuestro caso se ha optado por una corriente nominal de 4 A y el rango de variación del rotor es de 0,5 mm hasta 1,5 mm con lo que se cubre el valor de fuerza axial estimado en 50 N calculado para compensar las fuerzas en dirección axial.

La Figura 26 ilustra la fuerza axial frente a la corriente con un desplazamiento axial del rotor constante.



**Figura 26.** Gráfica de fuerza axial frente a la corriente con un desplazamiento axial constante en el rodamiento magnético activo axial diseñado para el prototipo de [10].

En la Figura 26 se ilustra las diferentes curvas del comportamiento de la fuerza axial en función de la corriente a diferentes GAP. Observando la gráfica anterior se aprecia que la fuerza disminuye cuanto mayor es el GAP a una misma corriente. Nuestro caso más desfavorable sobre el diseño del cojinete magnético es cuando hay un GAP de 1.5 mm y con una fuerza axial mayor a 50 N que es valor que hemos definido anteriormente.

La densidad de corriente que circula por la bobina es un dato muy importante para el diseño del cojinete magnético. En nuestro cojinete magnético con una corriente de 4 A y 155 espiras, la densidad de corriente nominal que circula por la bobina es de 4.07 A/mm.

Finalmente se va a calcular las pérdidas por efecto Joule. Lo primero que hay que calcular es la longitud de la bobina. Después la resistencia eléctrica de la bobina y para terminar las pérdidas por efecto Joule.

$$L_{\text{bobina}} = \Phi_{\text{medio arroll}} \cdot \pi \cdot n^{\circ}_{\text{espiras}} \cdot n^{\circ}_{\text{conductor/espira}} = 57.3 \text{ mm} \cdot \pi \cdot 155 \cdot 1 = 27902.056 \text{ mm} = 27.902 \text{ m}$$

$$S_{\text{util/espira}} = \frac{S_{\text{Total}} \cdot f}{n^{\circ}_{\text{espiras}}} = \frac{190,5 \cdot 0,8}{155} = 0,983 \text{ mm}^2$$

$$R_{\text{bobina}} = 0.48 \Omega$$

Por tanto, considerando la corriente máxima que circula por la bobina de valor 4 A, se obtienen las siguientes pérdidas por efecto Joule y, por consiguiente, la potencia calórica que genera este devanado:

$$P_{\text{Joule}} = 0.93 \text{ W}$$

## 7. Conclusiones y Trabajo Futuro

En primer lugar, en este TFM se desarrolla un modelo 2D para resolución, parametrizada, mediante el método de elementos finitos de un cojinete magnético activo con flujo axial basado la geometría en [8]. Se ha validado el modelo con los datos publicados en [8].

Los datos calculados son los coeficientes rigidez estática, reluctancias magnéticas del circuito magnético, campo magnético medio que circula por el circuito magnético, dimensiones de la frontera y tipo de tamaño del mallado del modelo para validar el modelo simulado.

Además, se ha diseñado un script con *Octave* que permite, manteniendo las dimensiones y características técnicas descritas en [8], el diseño y análisis del cojinete magnético activo con flujo axial mediante *FEMM*. Concretamente, se han diseñado dos subprogramas que permiten el cálculo de la fuerza axial ejercida por el devanado estático sobre disco magnético que está acoplado al rotor frente a la corriente con un *GAP* constante (*Principal\_Variacion\_del\_GAP.m*) y frente al gap con una corriente constante (*Principal\_Variacion\_del\_CORRIENTE.m*), lo que permite un estudio mucho más rápido y dinámico del cojinete magnético.

Gracias a los script diseñados, en este TFM se diseña un modelo electromagnético simulado de un cojinete magnético activo con flujo axial que aporta más fuerza axial que la necesaria para mantener en equilibrio estable el rotor levitado descrito en [10].

Como trabajo futuro, quedan pendientes las siguientes tareas de investigación:

- Diseño de un bucle de control con la consigna de corriente adecuada para el control de la estabilidad en dirección axial del rodamiento magnético simulado en este TFM.
- Calcular los esfuerzos mecánicos que se producen en el diseño desarrollado en este TFM en la aplicación del prototipo operativo de rotor levitado de [10].

- Construcción del modelo del cojinete magnético activo con flujo axial según el modelo simulado en este TFM para acoplarlo al prototipo operativo de rotor levitado de [10].

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] José Portela González, “Optimización de un volante de inercia de altas prestaciones” Proyecto Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) Ingeniero Industrial de la Universidad de Pontificia Comillas, Junio 2011. Puede consultarse en <http://www.iit.upcomillas.es>.
- [2] Ki-Chang Lee , Yeon-Ho Jeong , Dae-Hyun Koo and Hyeong Joon Ahn, “Development of a radial active magnetic bearing for high speed turbo-machinery motors”, *SICE-ICASE International Joint Conference 2006 Oct. 18-21, 2006 in Bexco, Busan, Korea*
- [3] C. Zhang, Member, IEEE, T.D. Nguyen, KJ. Tseng, Senior Member, IEEE and S. Zhang, “Stiffness Analysis and Levitation Force Control of the Active Magnetic Bearing for a Partially-Self-Bearing Flywheel System”, *IEEE IeSET 2010 6-9 Dec 2010, Kandy, Sri Lanka*
- [4] Han Bangcheng, Zheng Shiqiang, Wang Xi, and Yuan Qian,” Integral Design and Analysis of Passive Magnetic Bearing and Active Radial Magnetic Bearing for Agile Satellite Application”, *IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 6, June 2012*
- [5] Kevin D. Bachovchin , James F. Hoburg , Fellow, IEEE, and Richard F. Post , “Stable Levitation of a Passive Magnetic Bearing”, *IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 1, January 2013*
- [6] Jiancheng Fang, Yun Le, Jinji Sun, and Kun Wang, “Analysis and Design of Passive Magnetic Bearing and Damping System for High-Speed Compressor”, *IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 9, September 2012*
- [7] R. Ravaut, G. Lemarquand, and V. Lemarquand, “Force and Stiffness of Passive Magnetic Bearings Using Permanent Magnets. Part 2: Radial Magnetization”, *IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 9, September 2009*
- [8] Yanhua Sun, Yick-Sing Ho y Lie Yu,”Dynamic Stiffnesses of Active Magnetic Thrust Bearing Including Eddy-Current Effects”, *IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 45, NO. 1, January 2009*
- [9] Walter Bauer, Wolfgang Amrhein, “Electrical Design and Winding Selection for a Bearingless Axial-Force/Torque Motor”, *2012 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*
- [10] Proyecto de investigación CYCIT\_2011 de la Universidad de Zaragoza “Rodamientos por levitación magnética para volantes de inercia”, ref. ENE2011-29741-C02-02, 2011.
- [11] José Danilo Rairán Antolines, Julio Cesar Moreno Cañón “Diseño del circuito magnético de un rodamiento magnético por medio de elementos finitos”. *Tecnura*, vol. 11, núm. 22, 2008, pp. 63-72. Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá (Colombia).



- [12] J. M. A. da Silva, P. A. Teppa, and J. J. Ferrer, "Control de sistemas no lineales de datos muestreados a través de un enfoque de ganancia programada difusa por modo deslizante", *Revista de la Facultad de ingeniería a de la U.C.V.*, vol. 20, No 2, 2005, pp. 15–25.
- [13] Hernán Alberto Rojas Chitiva, "Diseno e Implementación de un sistema de Rodamiento Magnetico como Prototipo de Laboratorio". Facultad Tecnológica - Seminario de Investigación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2008. Puede consultarse en [http://rodamiento-esv.wikispaces.com/file/view/Documento\\_IEEE.pdf](http://rodamiento-esv.wikispaces.com/file/view/Documento_IEEE.pdf).
- [14] Rigoberto Vásquez Díaz, "Control Tolerante a Fallas Pasivo en un Rodamiento Magnético". Tesis de Maestría en Ciencias. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET en Cuernavaca, Morelos, México (2012).
- [15] G. Schweitzer and E. H. Maslen "Magnetic bearings. Theory, design and application to rotating machinery", Capítulos 1 – 2, Ed. Springer, 2009.
- [16] Iker Xabier Iturrate Gil, "Estudio de un rodamiento magnético activo axial mediante simulaciones de elementos finitos". Trabajo Fin de Máster. Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza (EINA) 2012. Puede consultarse en <http://zaguan.unizar.es/>.
- [17] Ladislav Kucera, Markus Ahrens, "MODEL FOR AXIAL MAGNETIC BEARINGS INCLUDING EDDY CURRENTS". International Center for Magnetic Bearings, ETH Zurich, 1995. Puede consultarse en <http://www.ifr.mavt.ethz.ch/publications/kucera95a.pdf>
- [18] David Meeker, "Finite Element Method Magnetics: OctaveFEMM Version 1.2, 16 October 2010". Manual de usuario. Fue consultada en Junio del 2012 en la dirección: <http://www.femm.info/Archives/doc/octavefemm.pdf>.
- [19] John W. Eaton, David Bateman, Soren Hauberg , "GNU Octave A high-level interactive language for numerical computations". Edition 3 for Octave version 3.6.1, February 2011". Manual de usuario. Fue consultada en Junio del 2012 en la dirección: <http://www.gnu.org/software/octave/octave.pdf>.
- [20] Romina Galván, Julieta E. Villanueva, Mari Ángeles Soldi, Mauricio Gende , "Nociones Básicas de Octave". Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata. Fue consultada en Agosto del 2012 en la dirección: [http://fcaglp.unlp.edu.ar/referenciacion/images/Octave\\_1.pdf](http://fcaglp.unlp.edu.ar/referenciacion/images/Octave_1.pdf)

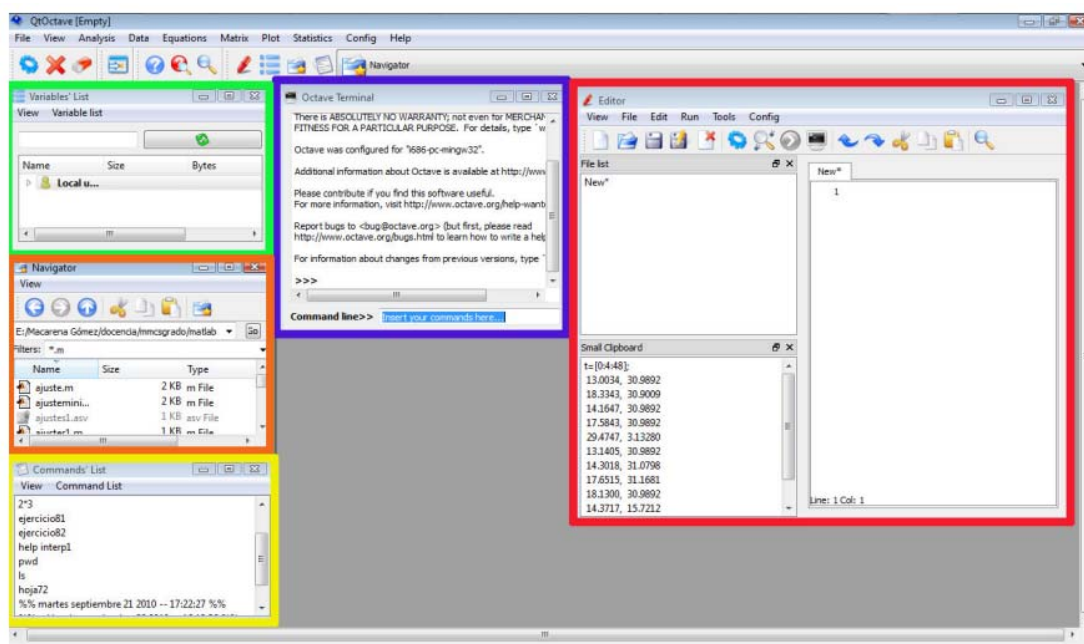
## 9. ANEXOS

### 9.1. Interfaz gráfico para Octave

En este apartado vamos a explicar brevemente un interfaz gráfico para *Octave* y los principales pasos a seguir para poder ejecutar diferentes ficheros \*.m.

De entre las interfaces, nosotros utilizaremos *QtOctave*. Este programa está disponible para distintos sistemas operativos, cuenta con numerosos menús, botones y ventanas de diálogo que, aun encontrándose todavía en fase experimental, podemos decir que se trata de una herramienta que facilita al usuario la comunicación con *Octave*.

En la siguiente figura representa el interfaz gráfico para el programa *Octave*:



**Figura 27.** Interfaz gráfico del programa *Octave*

En la parte izquierda de la pantalla aparecen tres ventanas también muy útiles: en la parte superior aparece la ventana (recuadrada en verde en la Figura 27) *Variable Lists* que contiene información sobre todas las variables que se hayan definido en esta sesión y permite ver y modificar las matrices y vectores con los que se esté trabajando. A continuación tenemos la pantalla *Navigator* (recuadrada en naranja en la Figura 27) donde se muestra los ficheros del directorio activo o actual.

En la parte inferior aparece la ventana (recuadrada en amarillo en la Figura 27) *Commands List* que muestra los últimos comandos ejecutados en la *Octave Terminal*. Estos comandos se pueden volver a ejecutar haciendo doble clic sobre ellos.

Por último aparece una ventana (recuadrada en rojo en la Figura 27) que corresponde al *Editor* de texto para los programas. Estas ventanas pueden ser colocadas en cualquier orden dentro del espacio de trabajo, pueden estar cerradas si no van a ser utilizadas, y pueden abrirse en cualquier momento.

En la figura anterior se tiene que introducir la ruta del directorio del programa de elementos finitos (*FEMM*) en parte recuadrada de color naranja para que *Octave* pueda comunicarse con la biblioteca que contiene *FEMM*. Es muy importante porque *FEMM* tiene una biblioteca muy amplia de diferentes materiales con sus características técnicas que posee cada tipo de material.

*Octave* puede trabajar de dos maneras que son por línea de comando y por ficheros \*.m [18], [19], [20].

#### Línea de comandos:

En *editor* (recuadro de color rojo de la Figura 28) se puede escribir directamente los cálculos que se quieren realizar. Un ejemplo de línea de comandos sería el siguiente:

```
octave:1>1+1
```

```
ans = 2
```

```
octave:2>
```

#### Ficheros \*.m :

Las instrucciones se pueden proporcionar a través de ficheros. Estos ficheros tienen la extensión \*.m y contienen conjuntos de comandos o definición de funciones. La importancia de estos ficheros es que al teclear su nombre en la línea de comandos y pulsar Intro, se ejecutan uno tras otro todos los comandos contenidos en dicho fichero. El poder guardar las instrucciones en un fichero permite ahorrar mucho tiempo y trabajo.

Aunque los ficheros \*.m se pueden crear con cualquier editor de texto tal como *Bloc de Notas*, *Notepad++*, *Word*, etc, *Octave* dispone de un editor que permite crear y modificar estos ficheros, como ejecutarlos paso a paso para ver si contiene errores. Las líneas de comentario se indican con el carácter % delante del comentario. En nuestro caso para la realización de los diferentes scripts hemos utilizado el editor de texto *Notepad++* porque representa los diferentes comandos en distintos colores. Por lo tanto, en nuestro caso se ha utilizado ficheros \*.m.

Otra manera de introducir en un fichero .m la ruta del directorio donde se encuentra la biblioteca de *FEMM* es introduciendo en el script el siguiente comando:

```
addpath("C:\\femm42\\mfiles")
```

## **9.2. Visualización del Script Principal del diseño de un rodamiento magnético**

En la Figura 28 representa uno de los dos scripts comentados en el trabajo que contienen una serie de funciones y comandos que vamos a comentar:

```

1  %-----
2  % PROGRAMA DEL DISEÑO DE UN RODAMIENTO MAGNETICO ACTIVO CON FLUJO AXIAL EN FEMM %
3  %-----
4
5
6  %% SECCIÓN caminos %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
7  % Añadimos a OCTAVE la ruta de los ficheros .m del FEMM
8  % addpath("C:\\femm42\\mfiles") % Elimino en mi ordenador esta sentencia porque ya está dedinido este camino.
9
10 % Añado a Octave el path al directorio de trabajo
11 addpath ("C:\\Users\\CHEMA\\Desktop\\PFM\\Ejemplos algoritmos\\Rectangulo en Octave")
12
13 % Cambio de directorio al directorio de trabajo (MODIFICAR SEGUN EL CASO)
14 cd("C:\\Users\\CHEMA\\Desktop\\PFM\\Ejemplos algoritmos\\Rectangulo en Octave")
15 % Fin sección caminos %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
16 global Modelo ; % Defino la variable global tipo objeto que contiene los datos del modelo
17 Cargar_funciones_para_dibujar % Cargo las funciones necesarias para resolver el problema (en este ejemplo solo la de dibujar)
18 Datos_Geometria_RodamientoMagnetico % Cargo los datos introducidos por el usuario para diseñar la geometria del rodamiento magnético
19 Materiales_y_Condiciones % Cargo los materiales y las propiedades técnicas al diseño del rodamiento magnético
20
21 %%% Inicio la tarea de mi programa
22 printf("Abriendo FEMM (Iniciando conexión de Octave a FEMM...\n");
23 openfemm % Abrimos el FEMM
24
25 printf("Creando documento de FEMM para simulación magnética...\n");
26 newdocument(0); % Creamos nuevo documento de femm magnético
27
28 printf("Especificando características del problema...\n");
29
30 % Frecuencia -> 0 Hz, al trabajar con corriente en DC; Unidades -> milímetros; Simetría -> axial o axisimétrica; El resto de valores por defecto
31 mi_probdef(0, 'millimeters', 'axi', 1.e-8, 0, 30); % Especificamos las características del problema en femm

```

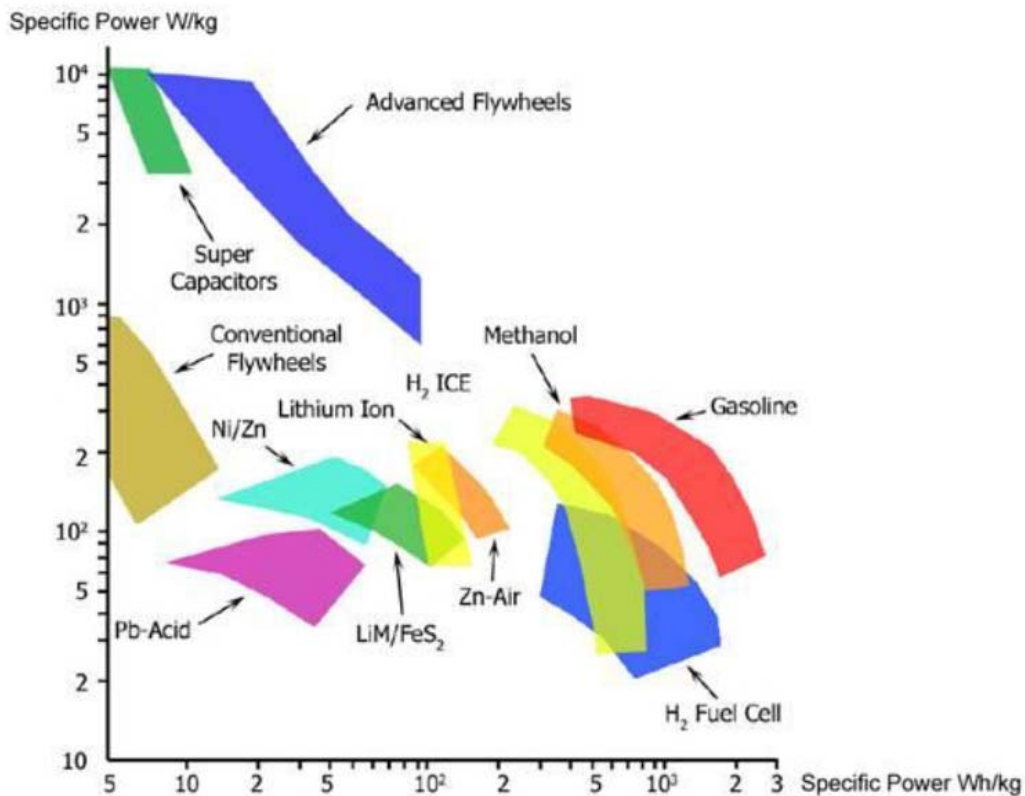
**Figura 28.** Visualización del Script Principal del diseño de un rodamiento magnético

### 9.3. Descripción de los comandos para interactuar Octave con FEMM en el script principal

Para comunizarse con el programa de elementos finitos *FEMM* v4.2 se realiza mediante una serie de comandos que se han resumido en la siguiente tabla:

COMANDO	DESCRIPCIÓN
<b>openfemm</b>	Se abre <i>FEMM</i>
<b>newdocument(0)</b>	Creamos nuevo documento en FEMM
<b>mi_probdef(0, 'millimeters', 'axi', 1.e-8, 0, 30)</b>	Especificaciones en FEMM sobre el tipo de simulación que queremos obtener. En nuestro caso Frecuencia = 0 Hz (trabajamos con corriente DC); Unidades = milímetros; Simetría= axial o axisimétrica; El resto de valores por defecto
<b>Dibujar()</b>	Es una función creada anteriormente en un subprograma y se llama para que dibuje el cojinete magnético
<b>Materiales()</b>	Es una función creada anteriormente en un subprograma. EL objetivo de esta función es la aplicación de los materiales a cada parte del rodamiento, características técnicas y condición de contorno introducidas por el usuario
<b>mi_zoom(*,*,*,*)</b>	Se hace un zoom del rodamiento magnético en <i>FEMM</i>
<b>mi_saveas('*.FEM');</b>	Se guarda el archivo con el nombre que deseemos sin espacios y con extensión .FEM

**Tabla 13.** Descripción de los comandos para interactuar Octave con FEMM en el script principal



**Figura 29.** Comparación de sistemas de almacenamiento de energía [1].

Cada sistema tiene sus ventajas y sus inconvenientes, pero sobre todo, la aplicación para la que se va a utilizar es el factor determinante en la elección del sistema.

En el sector del transporte y, concretamente en el transporte ferroviario, los almacenadores se usan principalmente para recuperar energía de la frenada de los trenes y almacenarla, para más tarde proporcionar un pico de potencia durante los arranques de estos. Otros se usan como UPS (Unstoppable power Supply), proporcionando energía durante los micro cortes que se producen en la red, etc.

Se trata, además, de proporcionar un sistema cuya implantación sea económica. Para ello es muy útil la Figura 29. Los supercondensadores y los flywheels serían los más adecuados ya que poseen una potencia específica mayor, de manera que para aportar la potencia deseada se requiere un sistema más pequeño que con los otros sistemas y, por consiguiente, más económico.

#### 9.4. Script ejecutado en Octave "Principal\_Variacion\_del\_GAP.m"

```
%-----
% PROGRAMA DEL DISEÑO DE UN RODAMIENTO MAGNETICO ACTIVO CON FLUJO AXIAL EN FEMM
%-----

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Añadimos a OCTAVE la ruta de los ficheros .m del FEMM
%% addpath("C:\\femm42\\mfiles") %% Elimino en mi ordenador esta sentencia porque ya
está definido este camino.

%% Añado a Octave el path al directorio de trabajo
addpath ("C:\\Users\\CHEMA\\Desktop\\PFM\\Ejemplos algoritmos\\Rectangulo en Octave")
%% Cambio de directorio al directorio de trabajo (MODIFICAR SEGUN EL CASO)
cd("C:\\Users\\CHEMA\\Desktop\\PFM\\Ejemplos algoritmos\\Rectangulo en Octave")
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Defino la variable global tipo objeto que contiene los datos del modelo
global Modelo ;
% Cargo las funciones necesarias para resolver el problema (en este ejemplo solo la función de
dibujar)
Cargar_funciones_para_dibujar
% Cargo los datos introducidos por el usuario para diseñar la geometría del rodamiento
magnético
Datos_Geometria_RodamientoMagnetico
% Cargo los materiales y las propiedades técnicas al diseño del rodamiento magnético
Materiales_y_Condiciones

%%%%%%%% 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 magnética...\n");
newdocument(0); % Creamos nuevo documento de femm magnético
printf("Especificando características del problema...\n");
% 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', 'axi', 1.e-8, 0, 30);
% Especificamos las características del problema en femm
%% Dibujo el rodamiento magnético
Dibujar(); % Dibuja el cojinete magnético
%% Aplicación de los materiales a cada parte del rodamiento, características técnicas y
condición de contorno
Materiales(); % Aplica las propiedades definidas al rodamiento magnético
% Se hace un zoom del rodamiento magnético en FEMM, no es necesario visualizar el entorno
entero
mi_zoom((Modelo.R1-5), (Modelo.ZinfFRONTERA-5), (Modelo.R2+5), (Modelo.ZsupDISCO+5));
% Se guarda el archivo con el nombre que deseemos sin espacios y con extensión .FEM
mi_saveas('RodamientoMagnetico.FEM');
% Se hace una simulación con FEMM----
mi_analyze(0);
mi_loadsolution;
%%%%%%%%Post-procesador%%%%%%%%%
```

```
% Se hace zoom de la pieza en FEMM
mi_zoom((Modelo.R1-5), (Modelo.ZinfFRONTERA-5), (Modelo.R2+5), (Modelo.ZsupDISCO+5));
Calculos_Variacion_GAP();
%Calculos_Variacion_CORRIENTE ();
printf("Saldra la tabla de valores");
disp("fin");
%% Fin del programa
```

### 9.5. Script ejecutado en Octave “Principal\_Variacion\_del\_CORRIENTE.m”

```
%-----
% PROGRAMA DEL DISEÑO DE UN RODAMIENTO MAGNETICO ACTIVO CON FLUJO AXIAL EN FEMM
%-----

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Añadimos a OCTAVE la ruta de los ficheros .m del FEMM
%% addpath("C:\\femm42\\mfiles") %% Elimino en mi ordenador esta sentencia porque ya
está definido este camino.

%% Añado a Octave el path al directorio de trabajo
addpath ("C:\\Users\\CHEMA\\Desktop\\PFM\\Ejemplos algoritmos\\Rectangulo en Octave")
%% Cambio de directorio al directorio de trabajo (MODIFICAR SEGUN EL CASO)
cd("C:\\Users\\CHEMA\\Desktop\\PFM\\Ejemplos algoritmos\\Rectangulo en Octave")
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Defino la variable global tipo objeto que contiene los datos del modelo
global Modelo ;
% Cargo las funciones necesarias para resolver el problema (en este ejemplo solo la función de
dibujar)
Cargar_funciones_para_dibujar
% Cargo los datos introducidos por el usuario para diseñar la geometría del rodamiento
magnético
Datos_Geometria_RodamientoMagnetico
% Cargo los materiales y las propiedades técnicas al diseño del rodamiento magnético
Materiales_y_Condiciones

%% 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 magnética...\n");
newdocument(0); % Creamos nuevo documento de femm magnético
printf("Especificando características del problema...\n");
% 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', 'axi', 1.e-8, 0, 30);
% Especificamos las características del problema en femm
%% Dibujo el rodamiento magnético
Dibujar(); % Dibuja el cojinete magnético
%% Aplicación de los materiales a cada parte del rodamiento, características técnicas y
condición de contorno
Materiales(); % Aplica las propiedades definidas al rodamiento magnético
```



```
% Se hace un zoom del rodamiento magnético en FEMM, no es necesario visualizar el entorno
entero
mi_zoom((Modelo.R1-5), (Modelo.ZinfFRONTERA-5), (Modelo.R2+5), (Modelo.ZsupDISCO+5));
% Se guarda el archivo con el nombre que deseemos sin espacios y con extensión .FEM
mi_saveas('RodamientoMagnetico.FEM');
% Se hace una simulación con FEMM----
mi_analyze(0);
mi_loadsolution;
%%%Post-procesador%%%%%%%%%%
% Se hace zoom de la pieza en FEMM
mi_zoom((Modelo.R1-5), (Modelo.ZinfFRONTERA-5), (Modelo.R2+5), (Modelo.ZsupDISCO+5));
%Calculos_Variacion_GAP();
Calculos_Variacion_CORRIENTE ();
printf("Saldra la tabla de valores");
disp("fin");
%%%%%%%%Fin del programa
```

#### 9.6. Scrip en Octave “Cargar\_funciones\_para\_dibujar.m”

```
%% En esta rutina definimos una función de octave, como ejemplo de su uso
1; %% def esta primera sentencia para que entienda que el fichero contiene funciones
(misterios de la informática)
```

```
function Dibujar()
```

```
%% En esta función los datos se transpasan en el objeto Modelo
```

```
global Modelo ; %% Esta función contiene una variable global tipo objeto estructura de datos
```

```
%% Esta función nos va a dibujar los diferentes rectangulos para realizar el diseño de nuestro
rodamiento magnético
```

```
mi_drawrectangle(Modelo.RinfDISCO,Modelo.ZinfDISCO,Modelo.RsupDISCO,Modelo.ZsupDISCO);
```

```
mi_drawrectangle(Modelo.RinfRODAMIENTO,Modelo.ZinfRODAMIENTO,Modelo.RsupRODAMIENTO,Modelo.ZsupRODAMIENTO);
```

```
mi_drawrectangle(Modelo.RinfBOBINA,Modelo.ZinfBOBINA,Modelo.RsupBOBINA,Modelo.ZsupBOBINA);
```

```
mi_drawrectangle(Modelo.RinfFRONTERA,Modelo.ZinfFRONTERA,Modelo.RsupFRONTERA,Modelo.ZsupFRONTERA);
```

```
endfunction
```

#### 9.7. Script en Octave “Datos\_Geometria\_RodamientoMagnetico.m”

```
% DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA GENERAL (En este caso es un rodamiento magnético activo
con flujo axial con simetría axi-simétrica)
```

```
%% La geometría se define en la variable Modelo que es un objeto tipo estructura datos de
octave
```

```
Modelo.H1 = 10; % Espesor en z del disco magnético [mm]
```

```
Modelo.R1 = 45; % Radio interior del disco magnético [mm]
```



Modelo.R2 = 75; % Radio exterior del disco magnético [mm]  
Modelo.GAP = 0.5; % Distancia en r desde el disco magnético al rodamiento magnético [mm]  
Modelo.H3 = 20; % Espesor en z del rodamiento magnético [mm]  
Modelo.R3 = 50; % Radio interior del rodamiento magnético [mm]  
Modelo.R6 = 72; % Radio exterior del rodamiento magnético [mm]  
Modelo.H2 = 15; % Espesor en z de la bobina [mm]  
Modelo.R4 = 55.3; % Radio interior de la bobina [mm]  
Modelo.R5 = 68; % Radio exterior de la bobina [mm]  
Modelo.H4 = 30; % Espesor en z de la frontera de aire desde el comienzo del rodamiento magnético [mm]  
Modelo.R7 = Modelo.R1; % Radio interior de la frontera de aire [mm]  
Modelo.R8 = Modelo.R2; % Radio exterior de la frontera de aire [mm]

% Coordenadas del rectángulo que representa al disco magnético [mm] (En este ejemplo están definidas como componentes de un objeto estructura de datos)

Modelo.RinfDISCO = Modelo.R1; % Coord r de la esquina inferior del disco magnético  
Modelo.ZinfDISCO = -Modelo.H1/2; % Coord Z de la esquina inferior del disco magnético (Se pone el signo negativo ya que hemos considerado el punto (0,0) encima de nuestro dibujo)  
Modelo.RsupDISCO = Modelo.R2; % Coord r de la esquina superior del disco magnético  
Modelo.ZsupDISCO = 0; % Coord Z de la esquina superior del disco magnético (Se pone 0 porque es el punto de simetría)

% Coordenadas del rectángulo que representa al rodamiento magnético [mm] (En este ejemplo están definidas como componentes de un objeto estructura de datos)

Modelo.RinfRODAMIENTO = Modelo.R3; % Coord r de la esquina inferior del rodamiento magnético  
Modelo.ZinfRODAMIENTO = -Modelo.H1/2-Modelo.GAP-Modelo.H3; % Coord Z de la esquina inferior del rodamiento magnético  
Modelo.RsupRODAMIENTO = Modelo.R6; % Coord r de la esquina superior del rodamiento magnético  
Modelo.ZsupRODAMIENTO = -Modelo.H1/2-Modelo.GAP; % Coord Z de la esquina superior del rodamiento magnético

% Coordenadas del rectángulo que representa a la bobina [mm] (En este ejemplo están definidas como componentes de un objeto estructura de datos)

Modelo.RinfBOBINA = Modelo.R4; % Coord r de la esquina inferior de la bobina  
Modelo.ZinfBOBINA = -Modelo.H1/2-Modelo.GAP-Modelo.H2; % Coord Z de la esquina inferior de la bobina  
Modelo.RsupBOBINA = Modelo.R5; % Coord r de la esquina superior de la bobina  
Modelo.ZsupBOBINA = -Modelo.H1/2-Modelo.GAP; % Coord Z de la esquina superior de la bobina

% Coordenadas del rectángulo que representa a la frontera de aire [mm] (En este ejemplo están definidas como componentes de un objeto estructura de datos)

Modelo.RinfFRONTERA = Modelo.R7; % Coord r de la esquina inferior de la frontera de aire  
Modelo.ZinfFRONTERA = (-Modelo.H1/2-Modelo.GAP-Modelo.H4); % Coord Z de la esquina inferior de la frontera de aire  
Modelo.RsupFRONTERA = Modelo.R8; % Coord r de la esquina superior de la frontera de aire  
Modelo.ZsupFRONTERA = Modelo.ZsupDISCO; % Coord Z de la esquina superior de la frontera de aire

### 9.8. Script en Octave “Materiales\_y\_Condiciones.m”

% -----Se asigna un número de GRUPO a cada parte del rodamiento y se le aplica el material correspondiente en FEMM-----

1; %% def esta primera sentencia para que entienda que el fichero contiene funciones (misterios de la informática)

**function** Materiales()

%% En esta función los datos se traspasan en el objeto Modelo

**global** Modelo ; %% Esta función contiene una variable global tipo objeto estructura de datos (data estructura object)

% Se cargan los siguientes materiales de la librería de FEMM y se crean los materiales necesarios para el rodamiento magnético

Modelo.CORRIENTE = 2.5; % Corriente que circula por la bobina [A]

Modelo.PermeabilidadRelativa = 2700; % Permeabilidad relativa del material ferromagnético

Modelo.ConductividadFerromagnetico = 2.08333333333; % Conductividad del material ferromagnético (La inversa de la resistividad)

Modelo.NumeroEspiras = 86; % Número de espiras que contiene la bobina

Modelo.ConductividadConductor = 58; % Conductividad del material que pertenece a la bobina (En este caso es el mismo que el material de librería "Copper")

Modelo.Mallado = 0.4; % Tamaño del mallado en el material

mi\_getmaterial("Air");

mi\_addmaterial("Silicon steel 3%",Modelo.PermeabilidadRelativa,Modelo.PermeabilidadRelativa,0, 0, Modelo.ConductividadFerromagnetico, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0);

mi\_getmaterial("Copper");

% Grupo 1 -> Disco Magnético, Grupo 2 -> Rodamiento Magnético, Grupo 3 -> Bobina, Grupo 4 ->Vacío

% Seleccionar el Disco Magnético para aplicarle el Grupo 1

mi\_selectsegment( (Modelo.R1+0.1), Modelo.ZsupDISCO)

mi\_selectsegment( Modelo.R1, (Modelo.ZsupDISCO-0.1))

mi\_selectsegment( (Modelo.R1+0.1), (-Modelo.H1/2) )

mi\_selectsegment( Modelo.R2, (Modelo.ZsupDISCO-0.1))

mi\_setgroup(1);

mi\_clearselected;

% Inserción del material al Disco Magnético en FEMM

mi\_addblocklabel((((Modelo.R2+Modelo.R1)/2), (-(Modelo.H1/4))));

mi\_selectlabel((((Modelo.R2+Modelo.R1)/2), (-(Modelo.H1/4))));

```
mi_setblockprop("Silicon steel 3%", 0, Modelo.Mallado, 0, 0, 1, 0)
mi_clearselected;
```

#### % Seleccionar el Rodamiento Magnético para aplicarle el Grupo 2

```
mi_selectsegment( (Modelo.R3+0.1), Modelo.ZsupRODAMIENTO)
mi_selectsegment( Modelo.R3, (Modelo.ZsupRODAMIENTO-0.1))
mi_selectsegment( (Modelo.R3+0.1), (Modelo.ZinfRODAMIENTO) )
mi_selectsegment( Modelo.R6, (Modelo.ZsupRODAMIENTO-0.1))
mi_selectsegment( Modelo.R6-0.1, (Modelo.ZsupRODAMIENTO))
mi_selectsegment( Modelo.R5, (Modelo.ZsupRODAMIENTO-0.1))
mi_selectsegment( Modelo.R4+0.1, (Modelo.ZinfBOBINA))
mi_selectsegment( Modelo.R4, (Modelo.ZsupRODAMIENTO-0.1))
mi_setgroup(2);
mi_clearselected;
```

#### % Inserción del material al Rodamiento Magnético en FEMM

```
mi_addblocklabel(((Modelo.R3+Modelo.R4)/2),((Modelo.ZsupRODAMIENTO+Modelo.ZinfRODAMIENTO)/2));
```

```
mi_selectlabel(((Modelo.R3+Modelo.R4)/2),((Modelo.ZsupRODAMIENTO+Modelo.ZinfRODAMIENTO)/2));
```

```
mi_setblockprop("Silicon steel 3%", 0, Modelo.Mallado, 0, 0, 2, 0)
mi_clearselected;
```

#### % Seleccionar a la bobina para aplicarle el Grupo 3

```
mi_selectsegment( (Modelo.R4+0.1), Modelo.ZsupBOBINA)
mi_selectsegment( Modelo.R4, (Modelo.ZsupBOBINA-0.1))
mi_selectsegment( (Modelo.R4+0.1), (Modelo.ZinfBOBINA))
mi_selectsegment( Modelo.R5, (Modelo.ZsupBOBINA-0.1))
mi_setgroup(3);
mi_clearselected;
```

#### % Inserción del material a la bobina en FEMM

```
mi_addcircprop ('Idc', Modelo.CORRIENTE, 1); % Corriente del devanado estático
mi_addblocklabel(((Modelo.R4+Modelo.R5)/2),((Modelo.ZsupBOBINA+Modelo.ZinfBOBINA)/2));
```

```
mi_selectlabel(((Modelo.R4+Modelo.R5)/2),((Modelo.ZsupBOBINA+Modelo.ZinfBOBINA)/2));
```

```
mi_setblockprop('Copper', 0, Modelo.Mallado, 'Idc', 0, 3, Modelo.NumeroEspiras);
mi_clearselected;
```

#### % Inserción del material aire al interior de la frontera en FEMM

```
mi_addblocklabel(((Modelo.R1+Modelo.R2)/2),((Modelo.ZinfFRONTERA+Modelo.ZinfRODAMIENTO)/2));
```

```
mi_selectlabel((((Modelo.R1+Modelo.R2)/2),((Modelo.ZinfFRONTERA+Modelo.ZinfRODAMIEN
O)/2));
```

```
mi_setblockprop('Air', 0, Modelo.Mallado, 0, 0, 4, 0)
mi_clearselected;
```

```
% -----Condiciones de contorno-----
```

```
% Queremos un flujo magnético que sea tangencial a dicho segmentos.
```

```
% Para ello necesitamos que A0, A1, A2 y phi deben ser cero. El resto de valores se ponen
acero, por defecto.
```

```
mi_addboundprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
```

```
% Seleccionar a la frontera para aplicarle la condición de contorno
```

```
mi_selectsegment( (Modelo.R1+0.1), Modelo.ZinfFRONTERA)
```

```
mi_setsegmentprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0)
```

```
mi_selectsegment( Modelo.R1, (Modelo.ZinfFRONTERA+0.1))
```

```
mi_setsegmentprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0)
```

```
mi_selectsegment( Modelo.R2, (Modelo.ZinfFRONTERA+0.1))
```

```
mi_setsegmentprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0)
```

```
mi_selectsegment( (Modelo.R1), (Modelo.ZsupDISCO-0.1))
```

```
mi_setsegmentprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0)
```

```
mi_selectsegment( (Modelo.R1+0.1), (Modelo.ZsupDISCO))
```

```
mi_setsegmentprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0)
```

```
mi_selectsegment( Modelo.R2, (Modelo.ZsupDISCO-0.1))
```

```
mi_setsegmentprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0);
```

```
mi_clearselected;
```

```
endfunction
```

### 9.9. Script en Octave “Calculos\_Variacion\_CORRIENTE.m”

```
%%Vamos a lograr el cálculo de la fuerza en función de la variación del GAP
```

```
% Se selecciona el área del disco (Grupo = 1) y se calcula la fuerza con un bucle "for"
```

```
% Suponemos que la corriente varía entre 3.5- A con intervalos de 0.2 A, por tanto habrá 11
medidas
```

```
Modelo.ni=11; %Número de intervalos o número de medidas que queremos en el cálculo de
variación de la corriente
```

```
Modelo.variacionI=0.2;
```

```
mi_analyze;
```

```
mi_loadsolution;
```

```
mo_groupselectblock(1);
```

```
for k=1:Modelo.ni
```

```
mi_analyze;
```

```
mi_loadsolution;
```

```

mo_groupselectblock(1);
Modelo.prueba=(Modelo.variacionI*(k-1));
Modelo.x(k)=(Modelo.CORRIENTE+(Modelo.prueba));
Modelo.f(k)=mo_blockintegral(19);

mi_setcurrent('Idc', Modelo.x(k));

mi_analyze;
mi_loadsolution;
mo_groupselectblock(1);
Modelo.f(k)=mo_blockintegral(19);
End

```

% Se representa gráficamente la Fuerza axial ejercida en el rotor frente a la Corriente del devanado estático.

```

figure;
plot(Modelo.x,Modelo.f,'bo');
hold on;
grid on;
plot(Modelo.x,Modelo.f,'b-', 'LineWidth', 2);
xlim([2.5 4.5]);
xlabel('Corriente (A)');
ylabel('Fuerza axial (N)');
title('Fuerza axial vs. Corriente');
disp(Modelo.x)
disp(Modelo.f)
disp(Modelo.prueba)

```

#### 9.10. Script en Octave “Calculos\_Variacion\_GAP.m”

%%Vamos a lograr el cálculo de la fuerza en función de la variación del GAP

% Se selecciona el área del disco (Grupo = 1) y se calcula la fuerza axial con un bucle "for"

% Suponemos que el GAP varía entre 0.5-1.5 mm con intervalos de 0.1 mm, por tanto habrá 11 medidas

```

Modelo.n=11; %Número de intervalos o número de medidas
x=zeros(Modelo.n,0.5);
f=zeros(Modelo.n,0.5);
Modelo.traslacion=0.1;

for k=1:Modelo.n
mi_analyze;
mi_loadsolution;
mo_groupselectblock(1);
Modelo.x(k)=(Modelo.GAP+(Modelo.traslacion*(k-1)));
Modelo.f(k)=mo_blockintegral(19);
mi_selectgroup(1);
mi_movetranslate(0, Modelo.traslacion);

```

```
mi_clearselected;  
end
```

% Se representa gráficamente la Fuerza axial ejercida en el disco frente a la variación del GAP.

```
figure;  
plot(Modelo.x, Modelo.f, 'ro');  
hold on;  
grid on;  
plot(Modelo.x, Modelo.f, 'r-', 'LineWidth', 2);  
xlim([0.5 1.5]);  
xlabel('Gap (mm)');  
ylabel('Fuerza axial (N)');  
title('Fuerza axial vs. Gap');  
save('datoImagen.dat');  
disp(Modelo.x)  
disp(Modelo.f);
```