



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

Autor/es

Isaac Royo Silvestre

Director/es

Jesús Letosa Fleta  
Antonio Usón Sardaña

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza  
2013



# Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

## RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster (TFM) corresponde al Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética de la Universidad de Zaragoza.

En este trabajo se ha estudiado un tipo de rodamiento magnético con control activo en los tres ejes, con rotor cilíndrico e imanes permanentes. Esta estructura fue propuesta por Tsuchida, Takemoto y Ogasawara en 2010 [1]. Los objetivos principales son entender las características magnéticas del dispositivo y desarrollar un modelo electromagnético funcional del sistema bajo estudio que sea adaptable a diferentes dimensiones del rotor y el estátor. El estudio tiene la dificultad de requerir simulaciones en 3D. También se estudia la posibilidad de realizar simulaciones simplificadas en 2D que permitan acelerar los cálculos.

El trabajo comienza con una introducción que explica la relevancia del tema y qué es un rodamiento magnético activo, también incluye una revisión del estado del arte en rodamientos magnéticos activos.

A continuación se expone la estructura del dispositivo en estudio, después se explica brevemente el principio de funcionamiento del sistema.

La parte central del trabajo justifica el modelo utilizado en las simulaciones por Método de Elementos Finitos (MEF) 3D y expone algunos resultados. La justificación del modelo se realiza de varias formas. Primero se comparan resultados de fuerzas y campos magnéticos con la referencia [1], esto también sirve para mostrar la potencia del dispositivo. En segundo lugar, puesto que algunos resultados no coinciden con la referencia, se justifica la calidad de nuestro modelo por medios teóricos. Se pone a prueba el margen de error del modelo variando sus parámetros, se intenta calcular fuerzas con dos métodos y se utiliza otra forma de validación por medio de simulaciones con MEF 2D.

El siguiente punto explora las posibilidades y limitaciones inherentes a simular este problema 3D por medio de modelos simplificados 2D.

A continuación se expone brevemente un ejemplo de aplicación adaptando el rodamiento a un *flywheel* (volante de inercia) con unos requerimientos determinados. Se presenta una curva de rigidez necesaria para diseñar un control (más allá del ámbito de este TFM).

Finalmente se presentan las conclusiones, propuestas de trabajos de investigación futuros y las referencias.

Tras la finalización del documento principal de la memoria se encuentran anexos con información adicional.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ÍNDICE.....	4
1. Introducción.....	5
2. Estructura del Rodamiento Magnético en estudio.....	7
3. Breve descripción del principio de funcionamiento.....	9
4. Metodología.....	10
5. Justificación del modelo.....	11
5.1. Comparación con una referencia.....	11
5.2. Variación de los parámetros de la simulación.....	13
5.3. Resultados de Fuerzas con diferentes métodos.....	14
5.4. Resultados con diferente software.....	15
6. Modelos en 2D.....	16
6.1. Modelo 2D para el calculo de la fuerza axial $F_z$ .....	16
6.2. Modelo 2D para el calculo de las fuerzas radiales $F_x$ y $F_y$ .....	18
7. Aplicación y curvas de rigidez.....	19
8. Conclusiones y trabajo futuro.....	21
Referencias.....	22

## 1. Introducción

En este trabajo se ha estudiado un tipo de rodamiento magnético con control activo en los tres ejes, con rotor cilíndrico e imanes permanentes. Los problemas abordados y objetivos son:

- Revisión del estado del arte sobre rodamientos magnéticos activos en los tres ejes
- Diseño y puesta en funcionamiento de una simulación 3D, del sistema de suspensión, que permita el cálculo numérico del problema electromagnético mediante el método de los elementos finitos.
- Validación de los modelos desarrollados con resultados de la bibliografía.
- Estudiar las limitaciones de las simulaciones simplificadas del sistema en 2D para analizar este sistema de suspensión.
- Generalizar los modelos, en la medida de lo posible, para que puedan utilizarse con conjuntos rotor-estátor de distintas dimensiones.

Los rodamientos magnéticos son sistemas de suspensión magnética que pueden regular los desplazamientos de un eje rotatorio sin necesidad de contacto mecánico, reduciendo el mantenimiento necesario y aumentando la eficiencia de la máquina rotativa. Estas características favorecen su aplicación en máquinas rotativas de alta velocidad.

Un tema de investigación importante en la actualidad, en el ámbito de las energías renovables, es el del almacenamiento de energía. Existen muchas posibilidades, p.e. los volantes de inercia. Para esa aplicación es fundamental que la frecuencia de giro y su eficiencia en el almacenamiento de energía sea la máxima posible, por tanto se hace imprescindible la utilización de rodamientos magnéticos.

Estos rodamientos magnéticos pueden usar imanes permanentes, electroimanes o ambos. El control puede ser pasivo por medio de fuerzas de restauración o activo si se controla la corriente de los electroimanes en función del desplazamiento [2].

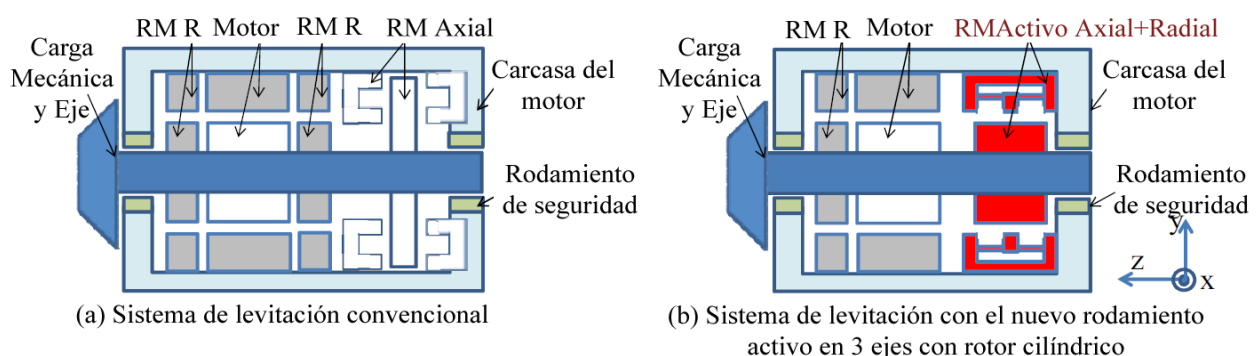


Figura 1. Sistemas de levitación magnética para un motor. A la izquierda un sistema convencional con dos rodamientos radiales y uno axial. A la derecha la configuración asociada a este trabajo (en rojo el rodamiento activo con control en los tres ejes). Imagen modificada de [1].

En las últimas décadas podemos encontrar abundante investigación sobre el tema, que ha dado lugar a la proposición de muchos sistemas de suspensión magnética. Una posible configuración permite el control activo en los cinco grados de libertad de movimiento del rotor. Dicha configuración consta de un rodamiento radial y un rodamiento activo en los tres ejes (Figura 1); este TFM se centra en el segundo dispositivo (el rodamiento activo elegido esta descrito en la referencia [1]).

Pueden encontrarse investigaciones desde los 80, Matsumura [3] experimenta con la suspensión magnética de un motor eléctrico de eje horizontal, utilizando electroimanes. El sistema de control es modelado y ajustado experimentalmente con un montaje real, sin embargo no se simula teóricamente el dispositivo.

En 1998 Antila [4] publica un estudio exhaustivo de rodamientos activos radiales usando MEF 2D y el tensor de Stress de Maxwell, los resultados se comparan con valores experimentales. Los estudios teóricos anteriores datan de principios y mediados de los 90, utilizaban circuitos magnéticos (menos fiable y más difícil de parametrizar) o simulaciones de MEF 2D incompletas o no validadas experimentalmente (ver introducción en [4]).

En 2001 Pichot [5] estudia los rodamientos magnéticos activos para grandes volantes de inercia. Su diseño es de tipo homopolar con imanes permanentes, pero coloca la parte rotórica en el exterior. Sus conclusiones incluyen un breve análisis con MEF 3D de un rodamiento radial y de un rodamiento combinado que aplica fuerza radial y de empuje. Lleva a la práctica la construcción del rodamiento radial.

En 2004 Polajžer [6] modeliza y cuantifica el problema de los acoplamientos entre las bobinas en los rodamientos magnéticos radiales basados únicamente en electroimanes. Durante la primera década de siglo se desarrolla el standard ISO 14839-3:2006, referente a las vibraciones en maquinaria industrial equipada con rodamientos magnéticos activos.

En 2009 Hijikata [7] propone y analiza un nuevo rodamiento axial que utiliza un acople de rotor cilíndrico, en vez del gran disco habitual en los rodamientos axiales. Se comprueba que funciona correctamente a altas velocidades de rotación.

En 2010 Tsuchida [1] propone y patenta una nueva estructura para un rodamiento magnético activo que controla tres ejes, inspirado por trabajos previos en motores sin rodamientos y el modelo de rodamiento axial de Hijikata [7]. La nueva estructura no requiere un gran disco acoplado al rotor, presenta características muy lineales y coloca el rotor en el interior, además requiere menos espacio. El dispositivo es modelado con MEF 3D pero no se construye experimentalmente. Este es el dispositivo que analizamos en este Trabajo de Fin de Master.

También en 2010 Khoo[8] propone una nueva estructura de rodamiento magnético activo axial de disco muy lineal y capaz de generar más fuerza.

Las investigaciones en 2012 y 2013 tocan los ámbitos del control ( Kang[9]), análisis dinámico (Han[10]), nuevas estructuras de rodamientos activos radiales con rigidez pasiva axial (Eryong [11], Bangcheng[12]), rodamientos radiales con bajas pérdidas por rotación del eje (Jiancheng[13]), rodamientos electrodinámicos como alternativa a los rodamientos activos (Impinna[14]) y nuevos actuadores axiales contrastados con experimentos (Yang[15], el concepto es muy similar al de la parte axial de la referencia [1] que usamos en este Trabajo Fin de Master).

## 2. Estructura del Rodamiento Magnético en estudio

El rodamiento tiene cuatro grupos de piezas diferenciados que solo son funcionales al emplearse conjuntamente: control axial, control radial, imanes permanentes y rotor. El rotor es la parte móvil del rodamiento, en contacto con el eje de la máquina en la que se instala el rodamiento; el resto forman la parte estática del rodamiento (normalmente ajustada a la parte estática de la máquina). Ver Figura 2.

El estátor de control axial o empuje es el cilindro hueco de mayor tamaño que sirve de carcasa para todo el conjunto. Por medio de una sustancia adhesiva [16] (nombrado como *SUS tube* en la referencia [1]) el resto de elementos estáticos (todos menos el rotor) quedarán alojados en su interior. La bobina de mayor tamaño, cuyo eje es el eje Z, es la bobina de control axial o de empuje. El estátor de control radial es un estrecho cilindro de menor tamaño del que sobresalen cuatro polos, a cada polo se arrolla una bobina de control radial, una pareja de bobinas (cada bobina en un polo opuesto) controla la Fuerza del eje X y la otra controla el eje Y. Como la corriente que circula por cada pareja va a ser la misma las bobinas para cada eje pueden estar conectadas en serie.

Los imanes permanentes son ocho, todos magnetizados en dirección axial, aunque no todos en la misma dirección. Los imanes se colocan entre los dos estatores, cuatro a cada lado del estátor radial, el sentido de la magnetización es +Z para los de un lado, -Z para los del otro lado.

El rotor es la única parte móvil, notar que la pieza que aparece en los diagramas de las referencias [1][16] y en este trabajo no es el eje del rotor de la máquina en la que se utiliza este rodamiento, si no un tubo de material magnético (p.e. Hierro) de unas dimensiones concretas que se ajusta alrededor del eje de la máquina (de forma similar a como se ajusta un rodamiento de bolas al eje de una máquina rotatoria, con la salvedad de que en un rodamiento magnético las bolas son sustituidas por un entrehierro de aire). El entrehierro entre el rotor y los estátor es de 0,5 mm. Las fuerzas calculadas se aplican sobre el rotor. Ver dimensiones en la Figura 3.

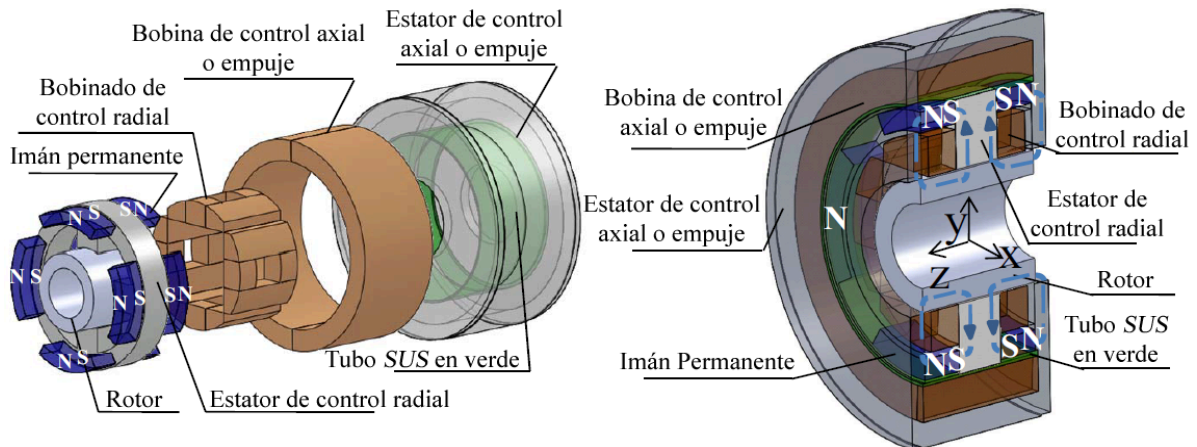
Las bobinas son de cobre, los estatores y el rotor son de materiales magnéticos como el Hierro, la sustancia adhesiva debe ser aislante (aparece como aire en las simulaciones) y el eje de la máquina (que atravesaría el rotor) se considera no magnético (aparece como aire en las simulaciones).

Se ha simulado un modelo standard, muy similar al de la referencia [1], si bien se desconocen los metales e imanes permanentes utilizados en la referencia. La corriente que circula por las bobinas es corriente continua [16].

El peso de las partes móviles no se incluye en las fuerzas resultantes mostradas en este trabajo o en las referencias. El peso a levantar se estima en 43,1 N [1].

Las simulaciones se han limitado a las densidades de corriente de la referencia [1], 4A/mm<sup>2</sup>, 6A/mm<sup>2</sup> en casos puntuales. 4A/mm<sup>2</sup> es una densidad de corriente usada frecuentemente en las referencias, la experiencia dicta que es adecuada para no llegar a límites térmicos en un dispositivo pequeño. El volumen que ocupan los conductores reales (con sus aislantes) no afecta a los cálculos magnéticos y no se utiliza en nuestras simulaciones en Opera 3D, la experiencia y la referencia [1] indican que las secciones de cable utilizadas son adecuadas. Según [1] el factor de llenado de los bobinados sería de 34,3% para los bobinados radiales, 49,9% para el axial.

Cada bobina radial tiene una sección de  $45 \text{ mm}^2$ , la bobina axial es de  $298 \text{ mm}^2$ . Notar que en la práctica esta sección puede conseguirse con diferentes combinaciones sección-N vueltas. El supuesto en la referencia [1] y en este trabajo es que el cable exterior de alimentación para cada bobinado es de  $1 \text{ mm}^2$  (aunque internamente los bobinados puedan ser de cables de menor sección en paralelo) por lo que se indica indistintamente densidad de corriente  $[\text{A}/\text{mm}^2]$  y corriente  $[\text{A}]$ .



\*El Tubo SUS es un adhesivo aislante

← Flujo Bias flux  $\Psi_b$  causado por cada imán permanente

Figura 2. Despiece (izquierda) y corte en el plano ZY (derecha). Imagen modificada de la referencia [1].

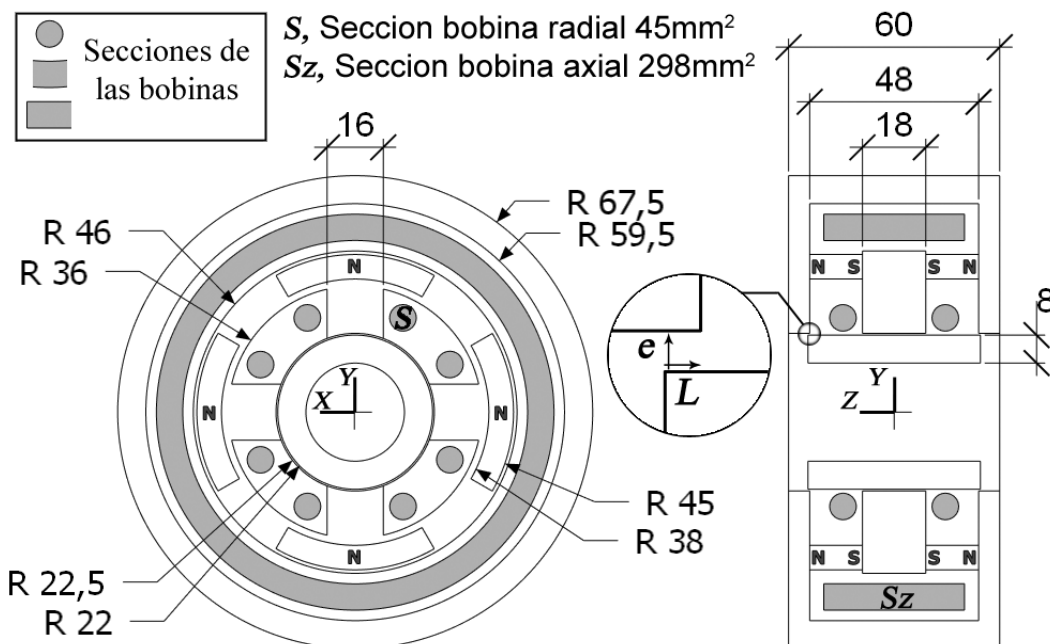


Figura 3. Dimensiones del rodamiento simulado (alzado y perfil) y direcciones de magnetización de los imanes permanentes. En el detalle definición de la distancia e (entrehierro, de 0,5 mm) y L (solapamiento axial o *axial overlap*).

El modelo standard que se ha hecho para comparar con la referencia [1] utiliza la curva de magnetización del Hierro Puro para sus elementos metálicos. Los imanes permanentes son de SmCo 24 MGOe (Samarium-Cobalto de 24 MegaOersted) representado como un material lineal isotrópico de  $\mu_r=1,11$  y coercitividad  $H_c=-724000 \text{ A/m}$ , es decir un imán de 1,01 T. Ver curvas B-H en Anexo III.



### 3. Breve descripción del principio de funcionamiento

El funcionamiento de este dispositivo se basa en la superposición de diferentes flujos de tal manera que aparezcan campos magnéticos de diferente intensidad en puntos opuestos del rotor (la pieza móvil). Este desequilibrio en el modulo de los campos magnéticos produce Fuerzas netas en el rotor (Figura 4).

Los flujos producidos por los imanes permanentes son constantes, simétricos y opuestos, no producen Fuerzas en el rotor si el rotor está centrado, cuando el rotor se desplaza aparecen fuerzas de atracción y repulsión. Los flujos producidos por las bobinas son variables, controlando la corriente que circula por los bobinados creamos flujos que se superponen a los de los imanes permanentes. Notar que el flujo de los imanes pasa por el rotor, el estátor radial y el estátor axial moviéndose en el plano ZY. El flujo de la bobina axial solo pasaría por el rotor y el estátor axial (plano ZY). El flujo de las bobinas radiales pasa por el rotor y el estátor radial (plano XY), además el flujo de las bobinas alrededor del eje X hacen pasar su flujo por los polos en el eje X y las bobinas del eje Y hacen pasar su flujo por los polos del eje Y.

Así el flujo de los imanes permanentes se superpone a los de las bobinas solo en algunos entrehierros. Con el de las bobinas del eje Y, arriba y debajo del rotor. Con el de las bobinas del eje X, a izquierda y derecha del rotor. Con el de la bobina axial (eje Z), delante y detrás del rotor. Los flujos de los imanes son opuestos, mientras que los flujos de las bobinas van en una sola dirección. Por tanto en un lado los flujos se suman y en el otro lado los flujos se restan, creando una Fuerza en una dirección.

De lo anterior también se desprende que, idealmente, la Fuerza en un eje depende solo de la corriente por la bobina que crea el flujo variable en ese eje. Por tanto este dispositivo permite controlar de forma independiente las fuerzas en los tres ejes cartesianos, en condiciones ideales.

Es posible controlar independientemente las tres fuerzas a la vez. Sin embargo hay que tener en cuenta que pueden aparecer saturaciones en los materiales al hacer pasar grandes flujos por los puntos comunes (por ejemplo los flujos radiales X e Y tienen que pasar ambos por el estátor de control radial), en cuyo caso se perdería independencia. Las simulaciones mostrarán si esto pasa.

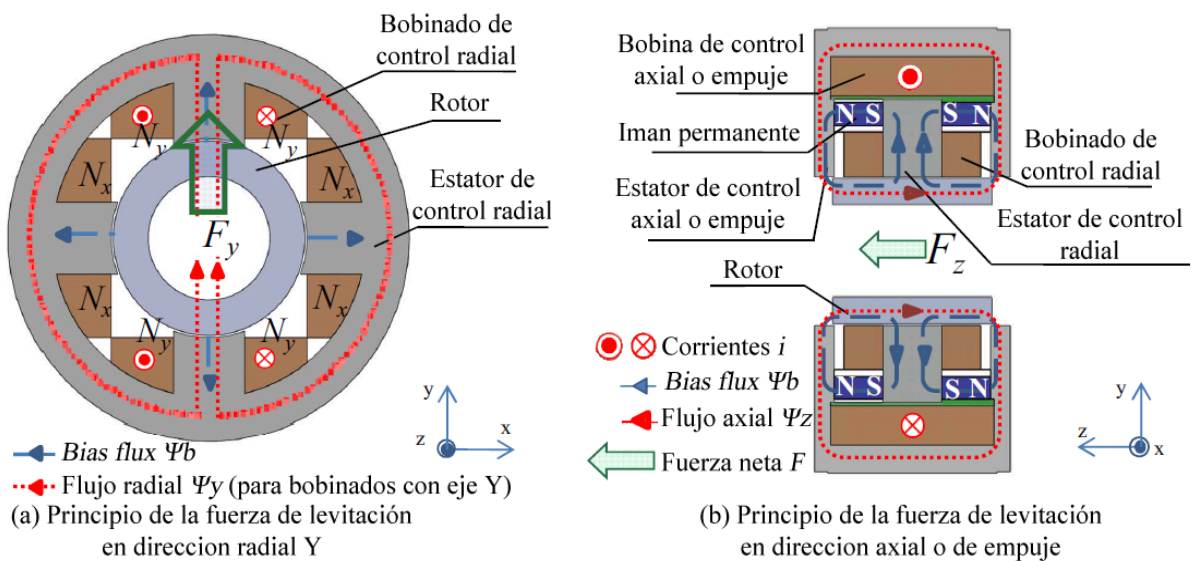


Figura 4. Flujos relevantes. Imagen modificada de la referencia [1].

## 4. Metodología

El modelo simulado parte del mostrado en la referencia [1], con las dimensiones y materiales mostrados en los puntos anteriores.

Para simular el rodamiento magnético en 3D se ha empleado un programa de elementos finitos 3D profesional utilizado por la Universidad de Zaragoza: Opera v13.0 de Vector Fields (COBHAM). El programa se ha ejecutado en un ordenador personal con Windows XP (32 bits), RAM 4 GB y CPU Intel QuadCore i3 540 a 3,07 GHz.

Las simulaciones en 2D se han realizado con el programa *freeware* femm 4.2. de David Meeker.

En primer lugar se han realizado algunas simulaciones realizadas por medio de la interfaz de usuario habitual de estos programas, realizando evaluaciones iniciales sobre la manera apropiada de plasmar el modelo en cada programa.

Puesto que ambos programas pueden ejecutar *scripts*, se ha programado el código correspondiente a cada modelo para realizar el proceso de simulación automáticamente. Un *script* es un archivo de ordenes que se guarda en texto simple y es ejecutado por otro programa, en esencia un código sencillo en un lenguaje de programación específico para el programa que lo ejecuta. Opera tiene su propio lenguaje de *scripting* similar a Fortran (archivos .comi) mientras que femm 4.2 utiliza el lenguaje *open-source* LUA similar a C++.

Uno de los objetivos del TFM es crear modelos que se puedan modificar, en un programa 2D esto es sencillo pero en un programa 3D cambiar la geometría por medio de la interfaz de usuario del programa es más tedioso. Usar *scripts* permite abordar este objetivo, en un *script* se pueden alterar los comandos e incluso se pueden parametrizar ciertos aspectos para que tan solo cambiar una constante cambie la geometría.

El *script* de Opera para el modelo permite cambiar estos parámetros modificando las constantes al principio del *script*: Longitud del solapamiento axial (L), corrientes, sección de los polos, radio interior del rotor (es decir, radio del eje de la máquina a la que se acopla el rodamiento), grosor del estátor radial (en el eje Z, también varía la dimensión Z de los imanes), la forma de los imanes permanentes (8 imanes en forma de arco, o dos anillos) y varios parámetros de simulación (p.e. tamaños de mallado). También resulta sencillo cambiar los materiales.

No solo el modelo se ha realizado por *script*, también se realiza así el postprocesado (tratamiento de los datos extraídos de la solución de la simulación) con opción para procesar un lote de varios archivos. Esto tiene varias ventajas:

- Las tareas repetitivas se realizan automáticamente sin requerir supervisión.
- Se reducen los errores por fallos humanos al crear y procesar los modelos, el *script* comi es esencialmente el mismo para todas las simulaciones. Esto nos ayuda a ser metódicos y a dar un aspecto uniforme a los informes de resultados.

Una vez realizados los *scripts* generales para los modelos, se han realizado las simulaciones específicas pertinentes y se han interpretado los resultados.

## 5. Justificación del modelo

Para simular el rodamiento se ha empleado un programa de MEF 3D profesional pero hay que justificar que el modelo utilizado da lugar a una simulación correcta.

### 5.1. Comparación con una referencia

Lo mejor es comparar nuestros resultados con resultados experimentales o resultados publicados por otros autores. Solo se dispone de los resultados de la simulación efectuada por los autores del paper y patente de referencia [1] [16]. Esa simulación se realizó con MEF 3D pero no se detalla el programa ni los materiales y dimensiones utilizados. Las dimensiones pueden extrapolarse de la publicación [1]; la patente [16] indica qué materiales son magnéticos y cuales no magnéticos.

No habiendo encontrado una combinación de materiales que de valores coincidentes en todos los ejes con los de la referencia (ver Figura 7), se ha elegido un modelo en el que  $F_y$  coincida con la referencia.

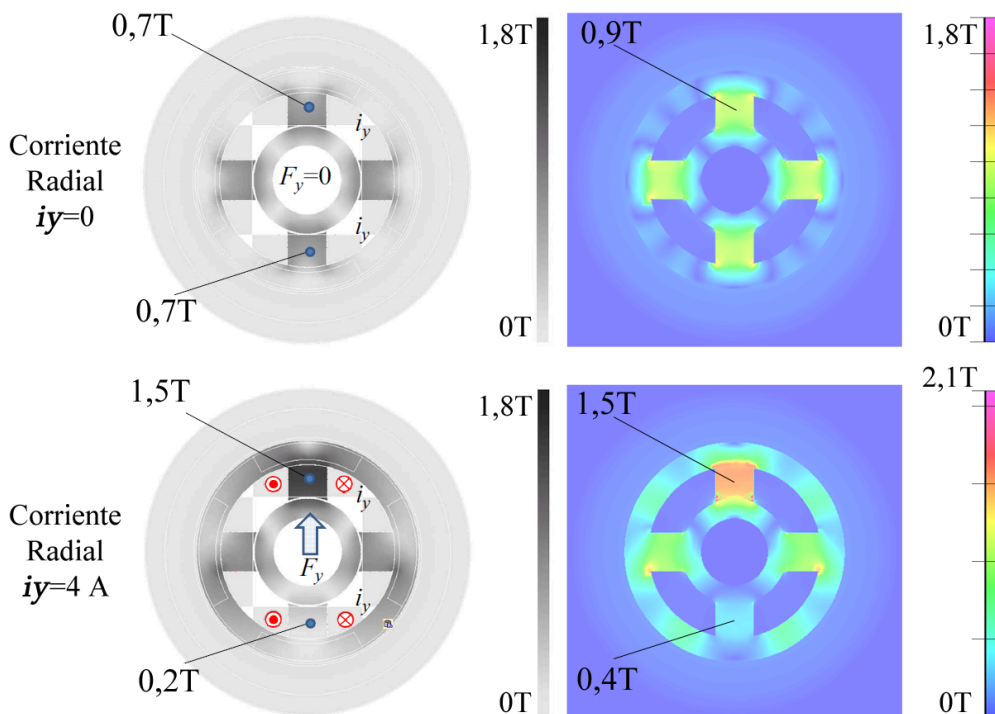


Figura 5. Campo B en el plano XY. Izquierda referencia [1], derecha nuestro modelo.

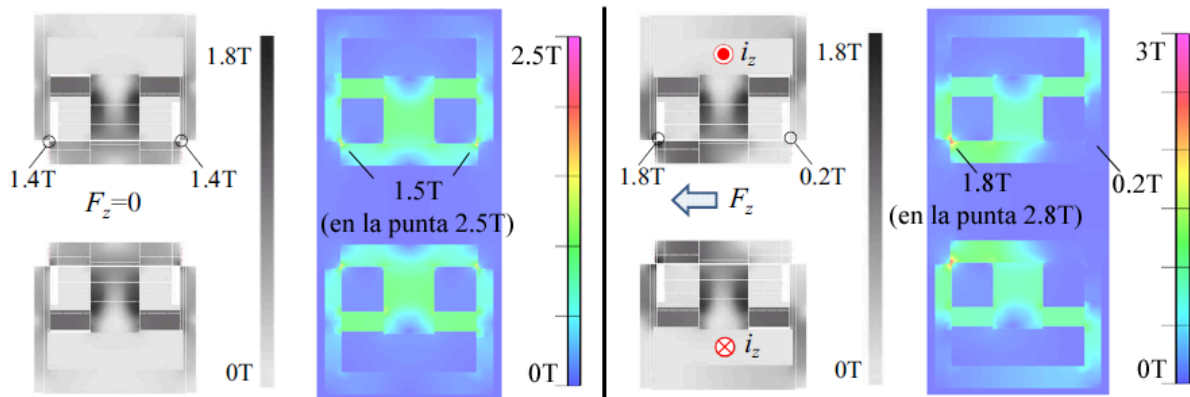


Figura 6. Comparación de campos B en el plano ZY. En gris referencia [1], en color la simulación de este trabajo. Izquierda  $J_z=0$ , derecha  $J_z=-4\text{A/mm}^2$ . Rotor centrado.

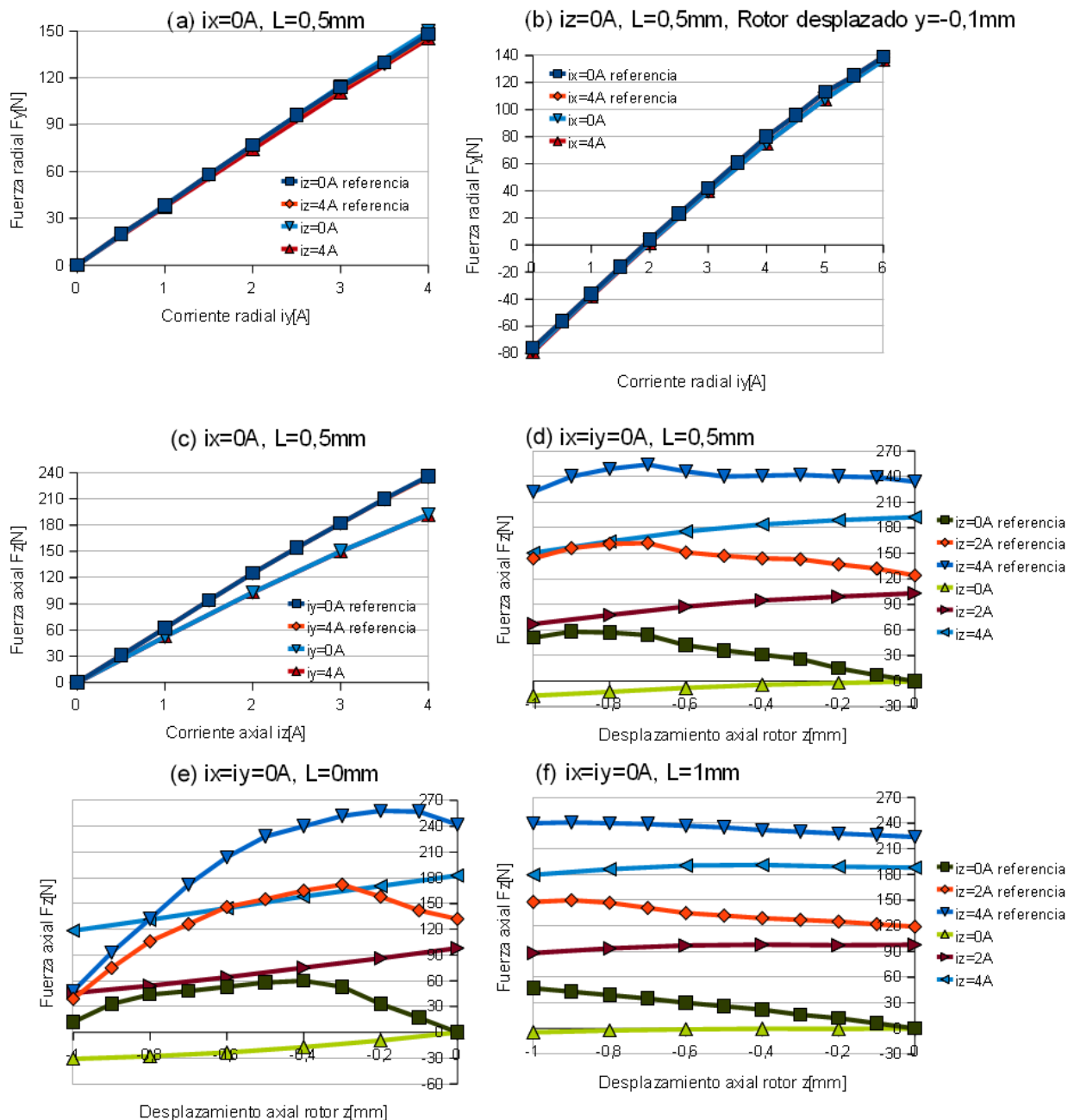


Figura 7. Selección de gráficas comparando los resultados de Fuerzas.

Nuestra simulación confirma el principio de funcionamiento de la referencia [1]. Las fuerzas son suficientes (el peso a levantar es 43,1 N). Sin embargo los valores exactos de  $F$  y  $B$  obtenidos no coinciden (ver figuras 5 y 6), existiendo una discrepancia importante en el cálculo de  $F_z$ , especialmente cuando el rotor no está centrado. La referencia [1] asegura que en su modelo aparece una fuerza axial  $F_z$  de restauración pasiva, pero en nuestra simulación aparece una pequeña fuerza desestabilizadora (para obtener Fuerzas de restauración debemos variar la geometría y perder linealidad en la relación Fuerza-Corriente). La referencia [15] es un actuador axial con un concepto similar y tampoco obtienen fuerza de restauración.

La conclusión es que nuestro modelo confirma algunos resultados de la bibliografía (linealidad, suficiente fuerza y fuerzas casi independientes) pero contradice otros (comportamiento de  $F_z$ ), por tanto debe revisarse en detalle.

## 5.2. Variación de los parámetros de la simulación

Cuando no se tiene una referencia para validar los resultados queda una manera para estimar que algunos parámetros de una simulación de elementos finitos son teóricamente correctos y razonables. Consiste en variar los parámetros de la simulación (p.e. grosor del mallado y distancia hasta la frontera) y observar como cambian los resultados al variar dichos parámetros. Si el modelo es bueno los resultados tienen que tender a converger al hacer un cálculo más fino, además podemos estimar qué calidad de mallado es suficiente.

Notar que con esa metodología podemos estimar solamente si una serie de parámetros del modelo son formalmente correctos. Pueden aparecer errores indetectables debido a fallos o limitaciones en el software, o bien por planteamientos incorrectos dado que debemos asumir decisiones de modelado basadas en la teoría y la experiencia (como el tipo de condiciones de frontera). Tan solo la comparación con resultados experimentales puede confirmar las simulaciones.

Para realizar esta prueba se ha simulado el rodamiento con las tres corrientes a 4 A/mm<sup>2</sup> y el rotor desplazado -0,5mm en el eje Z, que es una simulación bastante exigente. Se ha simulado varias veces, variando mallados y parámetros para estimar como afecta a la calidad del modelo:

- Modelo standard: Es el modelo que se ha utilizado para los resultados de este trabajo, y por tanto el modelo cuya calidad se está evaluando.
- Frontera cercana: Es el modelo standard, pero la frontera está a 1,5 veces el tamaño del rodamiento, en vez de 5 veces.
- Mallado algo grueso: Standard con mallado un 50% más grueso.
- Mallado Grueso: Standard con mallado el doble de grueso.
- Mallado Muy Grueso: Standard con mallado cuatro veces más grueso.
- Entrehierro polos mejorado: Standard con algunas mejoras en el entrehierro de los polos.
- Fino Z: Se malla mejor el entrehierro relevante para Fz, pero se malla peor el relevante para Fx y Fy.
- Fino XY: Se malla mejor el entrehierro relevante para Fx y Fy, pero se malla peor el relevante para Fz.

Modelo	Tamaño	t Solver (minutos)	Nodos	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]
Fino Z Grueso XY	978 MB	65	661126	142,890	142,741	180,507
Fino XY Grueso Z	914 MB	69	629036	139,955	140,331	173,034
Entrehierro polos mejorado	873 MB	78	548440	139,370	139,913	179,594
Modelo standard	740 MB	51	466367	139,331	139,659	179,616
Frontera cercana	608 MB	49	337647	139,268	139,596	179,833
Mallado Algo grueso	364 MB	22	217494	140,350	140,442	177,188
Mallado Grueso	211 MB	15	122744	143,223	142,776	173,485
Mallado Muy Grueso	124 MB	8	68927	137,799	142,274	169,049

Tabla 1. Resumen de resultados para variaciones del modelo.

La Tabla 1 muestra un resumen de los resultados para el mismo modelo con parámetros de simulación diferentes. "Tamaño" es el tamaño del archivo de la solución en Opera (.op3). "t Solver" es el tiempo que requiere solucionar la base de datos en TOSCA. "Nodos" indica cuantos nodos contiene el mallado el volumen. Los valores en rojo no son adecuados para una comparación dada la naturaleza de esas simulaciones. El modelo standard es el modelo que usamos en las simulaciones.

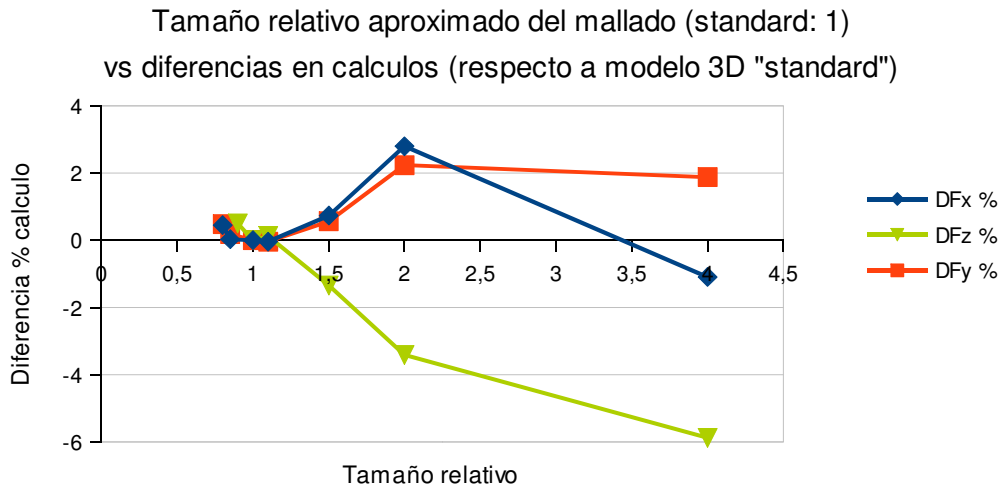


Figura 8. Cálculos de Fuerzas respecto al tamaño relativo del mallado. La referencia es el modelo standard (este tiene tamaño relativo 1, diferencia calculo 0%). Ver fuerzas absolutas en la Tabla 1.

En la Tabla 1 se observa que modificar el tamaño de la frontera no afecta a la solución. La Figura 8 indica que aumentar el grosor del mallado tan solo varía la solución en unos pocos puntos porcentuales, incluso al cuadruplicar el grosor, por lo que el modelo standard debe tener un bajo error matemático. Otras conclusiones que se obtienen observando más datos es que los resultados de los campos magnéticos son aceptables y que aparecen algunos elementos deformados en los polos (pueden verse en algunos mapas de B en este trabajo) que sin embargo no afectan a las soluciones.

### 5.3. Resultados de Fuerzas con diferentes métodos

La Fuerza puede ser calculada de diferentes formas, se puede pensar que todos los métodos producirían el mismo resultado en modelos sin errores de cálculo. Sin embargo diferentes métodos pueden producir diferentes resultados, esto es debido tanto a las aproximaciones numéricas utilizadas para solucionar las ecuaciones de los campos magnéticos como a la distribución de la Fuerza en el espacio. El método más apropiado puede depender del dispositivo simulado [17].

Para este modelo se ha probado el Tensor de Stress de Maxwell y el método de Trabajos Virtuales (que implica calcular energías). Para calcular la Fuerza en el software Opera para un modelo como este, el mejor método es el Tensor de Stress de Maxwell. En el Anexo V se muestra como se llega a esta conclusión.

Así queda justificado que comparar los cálculos de Fuerzas con diferentes métodos no da información sobre la validez de la simulación, y al mismo tiempo se justifica la elección del método empleado para calcular Fuerzas.



#### 5.4. Resultados con diferente software

No se ha utilizado otro programa de MEF 3D para comparar los resultados, tampoco se pueden comparar directamente los resultados con los de un programa de MEF 2D ya que el modelo no es simétrico.

Aunque no se puedan recrear todas las características del rodamiento utilizando un modelo de MEF 2D, sí que es posible comparar algunas características de la simulación por medio de modelos simplificados en 2D. Este método se ha utilizado para determinar la forma más adecuada de mallar los entrehierros relevantes para calcular  $F_z$  en un dispositivo similar al de este trabajo. La simplificación a consistido en convertir los 4 imanes de cada lado en un único anillo, los 4 polos en un único disco, y eliminar las bobinas radiales ( $i_x$  e  $i_y$ ), modificando las dimensiones de los elementos para que no varíen sustancialmente los flujos y reluctancias. El resultado es un rodamiento simple que puede modelarse axisimétricamente en MEF 2D, este modelo es válido para calcular  $F_z$  (axial) y permite mover el rotor axialmente ( $\pm Z$ ).

Notar que este modelo simplificado es similar pero no equivalente al modelo standard 3D, su utilidad es comprobar cual es la mejor manera de modelar en Opera. Para un modelo 2D que calcule fuerzas equivalentes, ver el punto 5. Modelos en 2D.

El rodamiento simplificado se modeló en Opera (con un modelo 3D completo) y en femm 4.2 (Figura 9). Los resultados de femm se consideran muy precisos, ya que el mallado en 2D es más fiable, se puede mallar mucho más fino y los modelos axisimétricos suelen dar buenos resultados. En el modelo simplificado de Opera 3D se han probado diferentes formas para mallar los entrehierros y diferentes formas de definir la superficie sobre la que se aplica el Tensor de Stress de Maxwell, hasta conseguir que los resultados de  $F_z$  sean similares en 3D y 2D. Las conclusiones son aplicables al modelo 3D original ya que esta característica geométrica es igual.

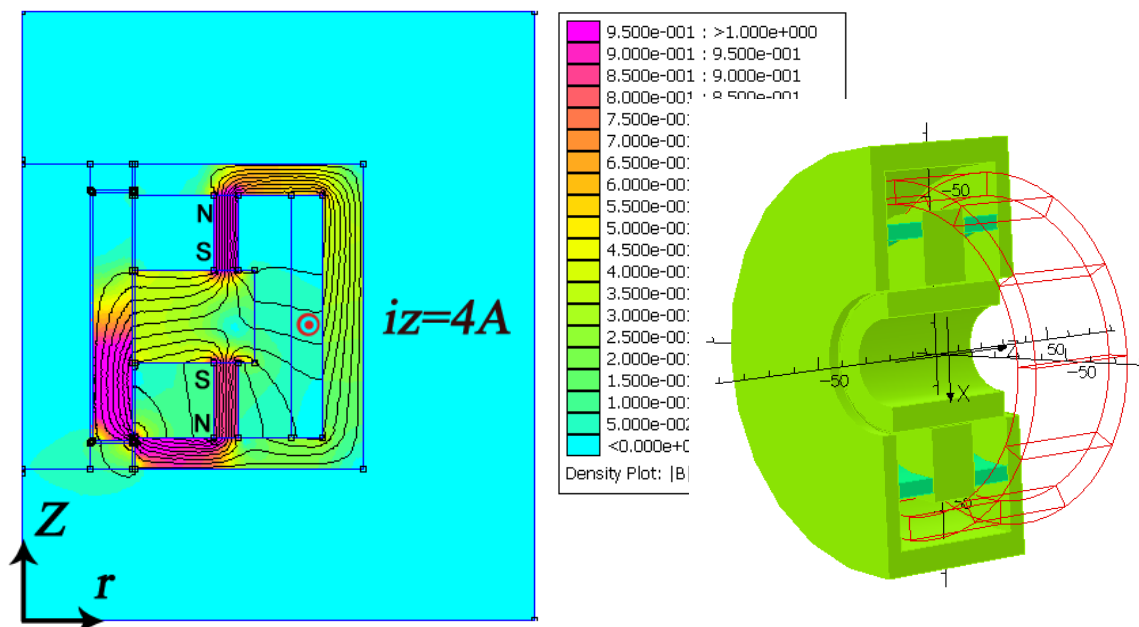


Figura 9. Modelos simplificados axisimétricos del rodamiento magnético. A la izquierda mapa  $|B|$  en femm 4.2 ( $i_z=4A$ , eje Z en vertical). A la derecha un corte del modelo axisimétrico 3D en Opera (eje Z en horizontal, las líneas rojas son la bobina axial, las piezas verde-azuladas son los imanes permanentes, convertidos en anillos).

## 6. Modelos en 2D

Uno de los objetivos de este trabajo es simular algunas características de este dispositivo por medio de modelos 2D, más fáciles de entender, menos costosos computacionalmente y resolubles con programas de MEF gratuitos como femm 4.2. Esto permite realizar evaluaciones iniciales rápidas, sin embargo se aconseja realizar las simulaciones finales con MEF 3D ya que estos modelos 2D siempre son artificiosos y solo se puede garantizar su validez al realizar un estudio parametrizado completo. En este TFM se ha realizado un estudio parcial (ver este capítulo y los anexos).

El tema ya ha sido abordado para otros rodamientos por otros autores (ver introducción y contenido de la referencia [4]).

A continuación se explican los fundamentos de esa simplificación y los resultados obtenidos con los modelos 2D. Para las simulaciones se ha utilizado el programa de MEF femm 4.2. de David Meeker, programa gratuito y muy conocido. El tiempo necesario para una simulación en 2D ha sido del orden de 50 veces menor que en 3D.

Antes se ha explicado que el principio de funcionamiento de este rodamiento es tridimensional y que existen pocas simetrías geométricas (ninguna si consideramos todos los desplazamientos del rotor). Los programas MEF 2D pueden calcular Fuerzas en X e Y por medio de modelos planares, los modelos axisimétricos solo pueden calcular Fz, en ambos casos hay restricciones a la fidelidad geométrica que podemos conseguir. Conclusiones: a) Un único modelo 2D jamás puede calcular las tres fuerzas a la vez, necesitamos dos modelos b) Los desplazamientos del rotor solo pueden representarse en algunos ejes c) Hay que modificar la geometría del modelo.

En esencia simplificar nuestro modelo 3D a un objeto creado a partir de revolucionar o trasladar un modelo 2D es similar a hacer un circuito magnético clásico. Para que el circuito magnético final sea similar al original hay que asegurarse de que el flujo generado por las fuentes (bobinas e imanes permanentes) sea el mismo, también se debe intentar mantener la reluctancia del circuito (modificado por secciones y longitudes de las piezas).

### 6.1. Modelo 2D para el calculo de la fuerza axial Fz

El calculo de Fz con un modelo 2D es el más sencillo y fiable. Anteriormente se ha explicado que Fz se produce por la superposición de los flujos de los imanes permanentes y el flujo de la bobina de control axial, en ambos casos los flujos tienden a describir trayectorias en un plano ZY (que además rotaría alrededor del eje Z, si observamos las simulaciones 3D). Por tanto debe ser sencillo utilizar un modelo 2D axisimétrico para modelar Fz.

La limitación del modelo axisimétrico es que solamente se puede calcular Fz y que el rotor solo se puede desplazar en el eje Z.

Hay que hacer modificaciones geométricas para representar correctamente el modelo. Los imanes permanentes originales no forman dos anillos continuos, son 4 piezas en cada lado; así que hay que representarlos como dos anillos más estrechos, de tal forma que la sección y volumen total de los imanes permanentes se mantenga (así mantenemos el flujo). Los cuatro polos del estátor radial se convierten en un gran anillo, se pueden obtener mejores resultados si estrechamos el anillo para que la superficie total de los entrehierros de esos polos se mantenga, así también



representamos mejor la reluctancia del circuito. Por supuesto las bobinas radiales desaparecen. La Figura 10 muestra el modelo 2D axisimétrico utilizado.

La Figura 11 muestra la comparación de resultados entre el modelo standard en Opera y el modelo simplificado 2D en femm 4.2; se observa que son casi idénticos.

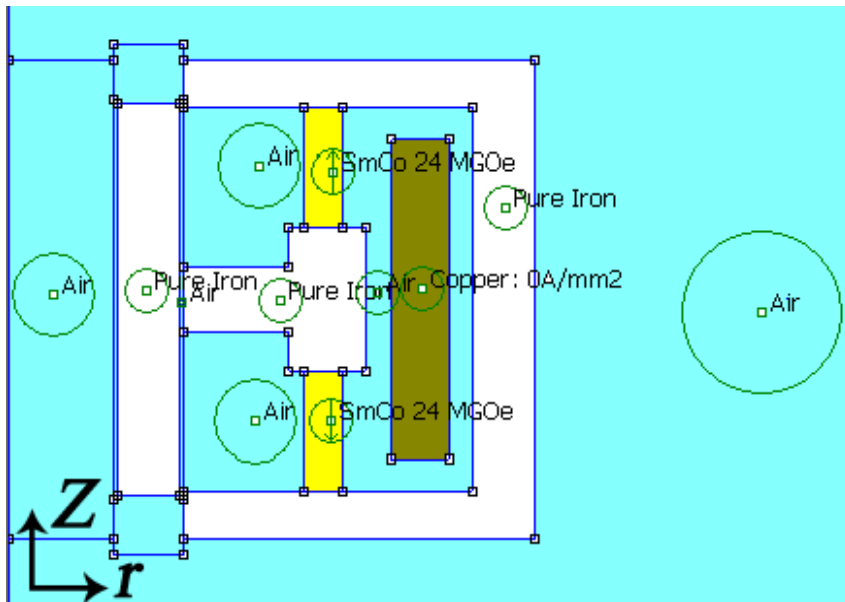


Figura 10. Modelo 2D axisimétrico en femm 4.2 (eje Z vertical), coloreado por materiales. Observar que se han estrechado imanes y polos.

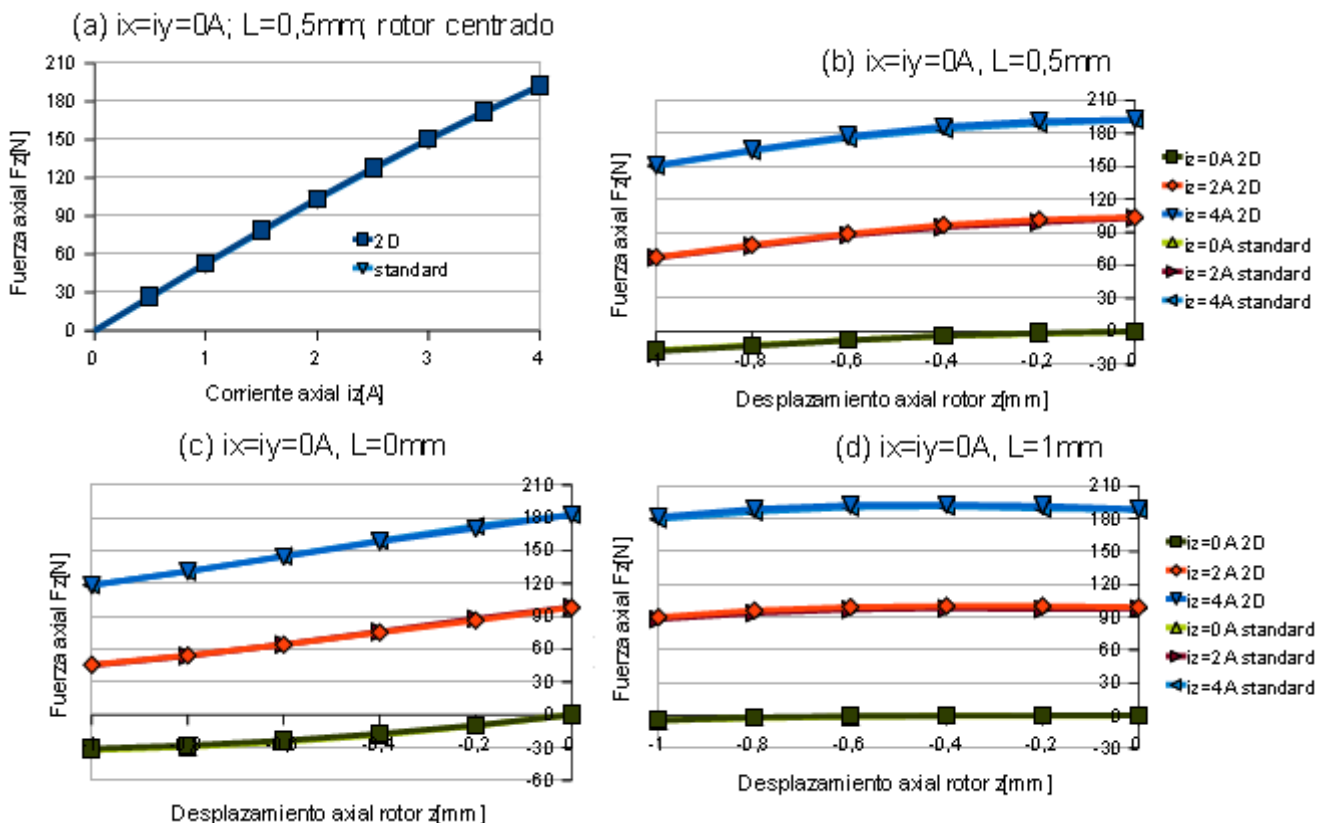


Figura 11. Comparación entre el modelo standard (Opera 3D) y el modelo simplificado 2D para calcular  $F_z$ .  $L$  es la longitud del *axial overlap* o solapamiento axial.

## 6.2. Modelo 2D para el calculo de las fuerzas radiales $F_x$ y $F_y$

El calculo de la fuerzas radiales ( $F_x$  y  $F_y$ ) con un modelo 2D simplificado es más complicado, no representa algunas características geométricas y requiere un nivel mayor de abstracción.

Anteriormente se ha explicado que la fuerzas radiales se producen por la superposición de los flujos de los imanes permanentes y los flujos producidos por las bobinas radiales en los polos del estátor radial. El flujo de los imanes circula por los planos ZY y ZX, el flujo de las bobinas circula por el plano XY, los flujos relevantes para  $F_x$  se superponen en los dos polos donde se instalan las bobinas para  $F_x$ , lo mismo sucede para  $F_y$ .

Por tanto los flujos implicados circulan por planos independientes y solo tienen los polos y entrehierros del estátor radial como puntos comunes. Al convertir este problema 3D a un modelo 2D tenemos que respetar esa independencia entre los flujos. En un modelo axisimétrico la bobina (y por tanto polos) tendría que usar el eje de revolución del modelo, por lo sería demasiado abstracto. De ese modo tan solo queda usar un modelo planar 2D.

El modelo planar puede partir de un corte del plano XY o del plano ZY, cada modelo tiene ventajas y desventajas al no poder representar correctamente ciertas características geométricas, en ambos casos la falta de espacio limita la calidad de la solución. Se han probado varios modelos y se han apuntado sus características (Figuras 12 y 13).

El modelo similar a un corte en el plano XY proporciona buenos resultados y la simplificación de las piezas es más sencilla. Este modelo no puede tener en cuenta el *axial overlap*  $L$  (que no parece tener mucha importancia), además el circuito del estátor axial no existe; los imanes se colocan entre estátor y rotor para que su flujo pase por los polos, pero esto puede saturar algunas zonas que no deberían hacerlo, por otro lado apenas hay flujos dispersos. Finalmente el volumen de los imanes es solo la mitad del nominal, esto es así por que las simulaciones indican que aproximadamente la mitad de las líneas de flujo de los imanes se cierran por el estátor axial y el aire, en vez de pasar por los entrehierros de los polos (esto no puede representarse en este modelo y puede invalidarlo si el dispositivo varía sustancialmente sus dimensiones y materiales). Aunque el modelo puede aplicar las dos corrientes  $i_x$  e  $i_y$  a la vez, los resultados son poco fiables si bien se confirma que los circuitos son casi independientes. La desventaja de este modelo es que se basa en el conocimiento previo de que la mitad del flujo de los imanes permanentes se desperdicia, no podemos afirmar que esta sea una condición general y por tanto este modelo 2D no se sustenta en una base teórica tan sólida.

En el modelo 2D basado en un corte de ZY los resultados son similares pero el error puede variar mucho según la forma de adaptar el recorrido del estátor radial, además la conversión de las dimensiones geométricas es más laboriosa. En este caso solo se representa la corriente para un eje, un par de polos, un par de imanes para cada lado, la totalidad del estátor radial y el rotor así como parte del estátor axial. Es de aplicación más general al poder modelar (aunque no perfectamente) el flujo inútil de los imanes permanentes y usar el volumen real de imán permanente que afecta a cada polo.

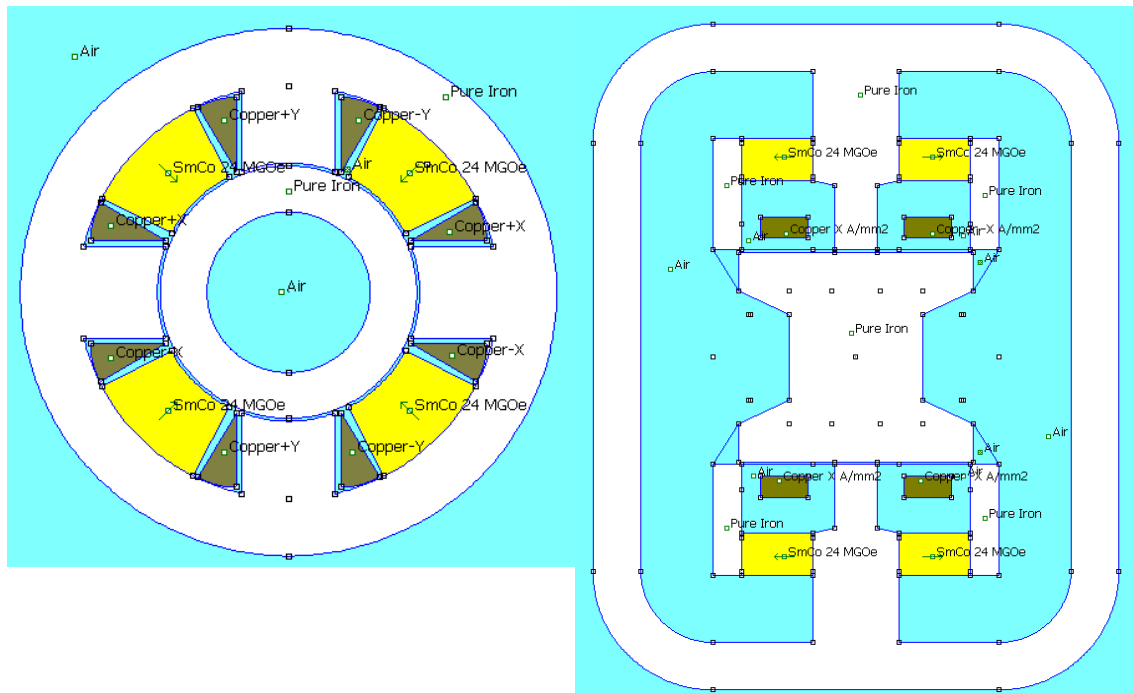


Figura 12. Modelos 2D planares en femm 4.2, a la izquierda modelo XY, a la derecha modelo alternativo ZY. Coloreado según materiales (amarillo: imanes, marrón: cobre de las bobinas, blanco: hierro, azul: aire o material no magnético). Notar que se ha modificado la posición y forma de los imanes para respetar la circulación de flujos.

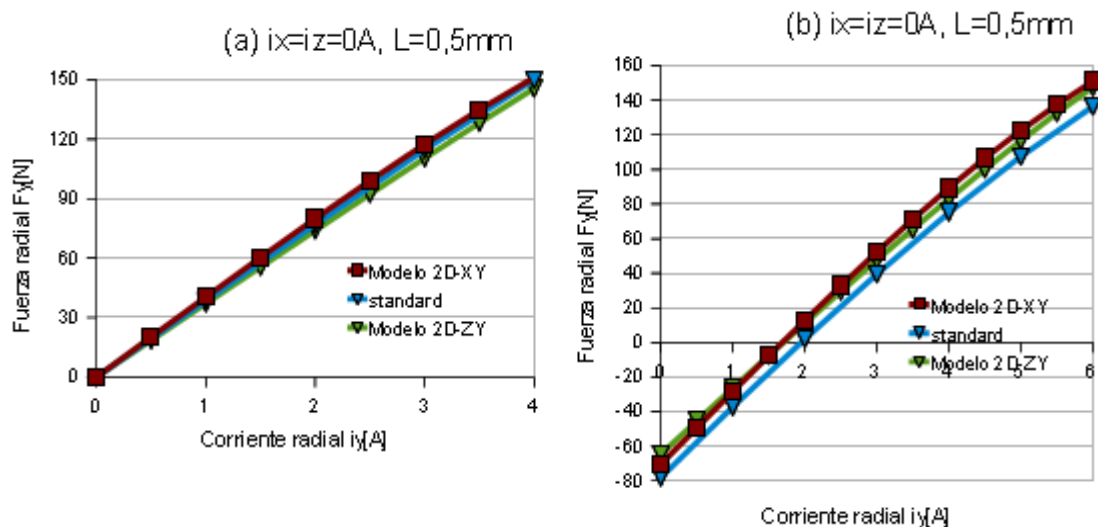


Figura 13. Comparación entre el modelo standard (Opera 3D) y los modelos simplificados 2D para calcular  $F_y$ . (a) rotor centrado, (b) rotor desplazado  $Y=-0,1mm$ .

## 7. Aplicación y curvas de rigidez

Como punto final de este trabajo se ha modificado el modelo del rodamiento magnético para simular un dispositivo de este tipo que podría colocarse en un *flywheel* (volante de inercia) que se ha construido en la Universidad de Zaragoza [18]. Actualmente el *flywheel* tiene rodamientos radiales pasivos, este rodamiento activo permitiría controlar el desplazamiento axial e incluso podrían plantearse configuraciones para controlar los 5 grados de libertad.

<b>Datos del <i>Flywheel</i> construido</b>	
Masa del rotor	870 g
Diámetro del eje	Entre 11 y 25 mm (según altura)
Diámetro de la carcasa del soporte del estátor	250 mm
Fuerza axial necesaria si se conservan los rodamientos radiales actuales y la oscilación máxima permitida es $\pm 1$ mm:	67 N a 2 mm
Rigidez en dirección radial (actualmente)	41 N/mm
Margen de seguridad del rodamiento activo	Deseable el doble de Fuerza

Tabla 2. Resumen de datos y especificaciones del *flywheel*.

Dadas las dimensiones del *flywheel* (Tabla 2) resulta posible utilizar el modelo standard de rodamiento activo de este trabajo con unas pocas modificaciones.

- El estátor del rodamiento es más pequeño que el del *flywheel*, por lo que el rodamiento se podría insertar por medio de una carcasa no magnética.
- Suponemos que el rodamiento activo se colocaría en un extremo, por lo que el diámetro del eje del *flywheel* sería de 11mm (si bien también es posible insertar uno de 25). Esto permite poner de manifiesto una ventaja constructiva de este rodamiento, al cambiar el diámetro del eje de la máquina cambiar el acople del rotor puede ser inmediato, solo cambia el diámetro interior del tubo. En la práctica sería fácil de cambiar ya que el rotor es de menor diámetro que la abertura en el estátor del rodamiento.
- Se ha cambiado también la característica constructiva de los imanes para probar, en vez de ocho piezas en arco se colocan dos anillos (el volumen total de imán es el mismo).
- Se ha utilizado una longitud del solapamiento axial  $L=1$ mm en vez de 0,5 mm, alargando el rotor en 1 mm. La razón es que con un mayor solapamiento axial la Fuerza axial se mantiene mejor al desplazar el rotor.

Las nuevas simulaciones ponen de manifiesto que las Fuerzas resultantes del rodamiento son las mismas. El grosor del tubo del rotor apenas afecta a la Fuerza conseguida (siempre y cuando no se estreche tanto que se sature el hierro).

Otra característica de este rodamiento activo es que la Fuerza axial apenas depende del desplazamiento radial, pero sí depende del desplazamiento axial. La Fuerza axial que genera el rodamiento cuando la corriente  $i_z=4$ A es 187 N con  $z=0$  y baja hasta 115 N con  $z=-2$  mm. Por lo tanto se genera casi el doble de la Fuerza axial necesaria (que incluye el peso del eje y la fuerza axial residual producida por los rodamientos activos radiales).

Una característica negativa de este rodamiento activo es que cuando el rotor se mueve radialmente -0,1 mm aparece una Fuerza radial de -79N, por lo que los rodamientos radiales pasivos quedan prácticamente anulados y hay que recurrir al control activo de la Fuerza radial que proporciona el rodamiento activo. Se requiere  $i_y=2$ A para que  $F_y(y=-0,1\text{mm})$  sea aproximadamente cero.

El producto final de nuestras simulaciones deberían ser curvas de rigidez. Estas curvas de rigidez se utilizan en el diseño del control de los dispositivos (el diseño completo de un control va más allá de los objetivos de este TFM). La rigidez es el cociente entre la derivada de la Fuerza y la derivada del desplazamiento.

La Figura 14 muestra la rigidez axial del rodamiento activo cuando  $iz=4A$ , en función del desplazamiento axial. Notar que la relación no es lineal, aunque podría simplificarse en tramos lineales. Además se debe recordar que  $Fz(z=0)$  es 187N, la gráfica de la Fuerza axial en sí puede verse en la Figura 7 (f), curva  $iz=4A$ .

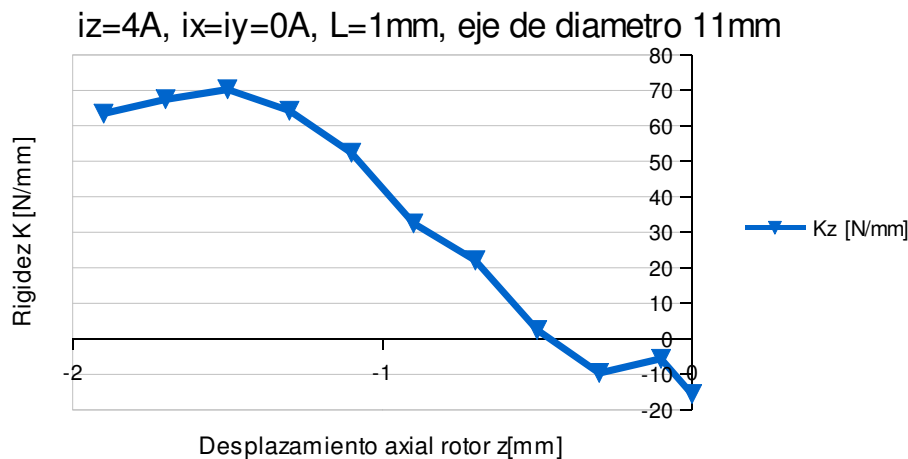


Figura 14. Rigidez de la Fuerza axial ( $K_z$ ) producida por el rodamiento en función del desplazamiento axial cuando  $iz=4 A$ . La unidad de medida es N/mm. Recordar que la rigidez es la derivada de la Fuerza respecto de la derivada del desplazamiento y que  $Fz(z=0 \text{ mm})$  en este rodamiento no es cero (a menos que  $iz=0 A$ ).

Para una aplicación práctica habría que plantearse mayores modificaciones, incluso en el conjunto del sistema de levitación. Puesto que la fuerza axial a compensar proviene fundamentalmente de los dos rodamientos pasivos radiales, se debería colocar solamente uno, así el rodamiento activo a colocar podría ser de menor potencia.

## 8. Conclusiones y trabajo futuro

En este Trabajo Fin de Máster se ha estudiado un rodamiento magnético con control activo en los tres ejes, mostrando su estructura y principio de funcionamiento contribuyendo a la comprensión del dispositivo.

Se ha hecho una revisión del estado del arte sobre rodamientos magnéticos activos.

Se ha realizado un modelo parcialmente parametrizable (por medio de *scripts*) para simular un rodamiento por medio del programa de elementos finitos 3D Opera. Se ha validado el modelo utilizando resultados de la bibliografía.

Las simulaciones han mostrado discrepancias respecto de la bibliografía. Según el modelo no existe fuerza de restauración axial y las fuerzas axiales generadas son menores. Se ha contrastado este resultado por otros métodos teóricos.

Se han realizado simulaciones satisfactorias del mismo dispositivo con MEF 2D, explicando la teoría que soporta estas simplificaciones y las limitaciones de las

mismas.

El modelo 3D se crea a partir de un *script* parcialmente parametrizable; se pueden cambiar fácilmente corrientes, las dimensiones de los polos y el solapamiento axial. Los modelos 2D se crean a partir de una geometría básica realizada manualmente y después se simulan en múltiples escenarios por medio de *scripts* parametrizables. Por tanto se ha realizado un modelo con algunas características generalizadas.

Se ha mostrado una aplicación del rodamiento adaptándolo a un volante de inercia, esto ha requerido cambiar algunas dimensiones geométricas y evaluar las condiciones a cumplir. Se ha mostrado que a partir de los cálculos del modelo se pueden construir curvas de rigidez necesarias para un control del rodamiento.

Finalmente se han realizado simulaciones más extensas que las mostradas en la referencia [1], de esta manera el conocimiento de las capacidades y limitaciones de este dispositivo es mayor gracias a este trabajo (Ver Anexos I y III).

Como trabajo futuro, se proponen las siguientes tareas:

- Comprobar experimentalmente el funcionamiento pasivo del dispositivo con el fin de comprobar las discrepancias observadas en la simulación. Esto requiere construir todo el rodamiento magnético, pero sin necesidad de aplicar corrientes ni implementar un control. Se deberían medir las fuerzas que aparecen sobre el rotor al moverlo en dirección axial y radial. Este es un paso previo a construir un rodamiento magnético activo funcional.
- Diseñar un control de corriente para las bobinas del rodamiento magnético activo, imprescindible para su funcionamiento.
- Construir el rodamiento magnético activo, lo que requiere completar los dos puntos anteriores.

## Referencias

[1] Kouhei Tsuchida, Masatsugu Takemoto, y Satoshi Ogasawara; "A Novel Structure of a 3-axis Active Control Type Magnetic Bearing With a Cylindrical Rotor"; 2010 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS (ICEMS); 2010.

[2] Gerhard Schweitzer y Eric H. Maslen; "Magnetic Bearings, Theory, Design, and Application to Rotating Machinery"; Springer-Verlag; 2009.

[3] F. Matsumura y T. Yoshimoto; "System modeling and control design of a horizontal-shaft magnetic-bearing system"; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 22, pp. 196-203; mayo 1986.

[4] M. Antila, E. Lantto, y A. Arkkio; "Determination of forces and linearized parameters of radial active magnetic bearings by finite element technique"; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 34, pp. 684-694; mayo 1998.

[5] M. A. Pichot, J. P. Kajs, B. R. Murphy, A. Ouroua, B. M. Rech, R. J. Hayes, J. H. Beno, G. D. Buckner, y A. B. Palazzolo; "Active Magnetic Bearings for Energy Storage Systems for Combat Vehicles"; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 37, NO. 1; enero 2001

[6] Bostjan Polajžer, Gorazd Stumberger, Jože Ritonja, Oto Težak, Drago Dolinar, y Kay Hameyer; "Impact of Magnetic Nonlinearities and Cross-Coupling Effects on Properties of Radial Active Magnetic Bearings"; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 40, NO. 2; marzo 2004.

[7] K. Hijikata, M. Takemoto, S. Ogasawara, A. Chiba, y T. Fukao; "Behavior of a Novel Thrust Magnetic Bearing with a Cylindrical Rotor on High Speed Rotation"; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 45, No. 10, pp. 4617-4620; octubre 2009.

[8] W. K. S. Khoo, Karuna Kalita, Seamus D. Garvey, R. J. Hill-Cottingham, Dave Rodger, y J. Fred Eastham; "Active Axial-Magnetomotive Force Parallel-Airgap Serial Flux Magnetic Bearings"; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 46, NO. 7; julio 2010

[9] Kyungdae Kang y Alan Palazzolo; "Homopolar Magnetic Bearing Saturation Effects on Rotating Machinery Vibration"; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 48, NO. 6; junio 2012

[10] Bangcheng Han, Shiqiang Zheng, Yingguang Wang y Junchao Cheng; "A FEM-Based Method Dynamic Analysis of a Thrust Magnetic Bearing with Permanent Magnet Bias"; 2012 8th IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INSTRUMENTATION AND CONTROL TECHNOLOGY (ISICT), pp.281 - 285; 2012

[11] Hou Eryong y Liu Kun; "Investigation of Axial Carrying Capacity of Radial Hybrid Magnetic Bearing"; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 48, NO. 1; enero 2012

[12] Han Bangcheng, Zheng Shiqiang, Wang Xi, y 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; junio 2012

[13] Fang Jiancheng, Wang Xi, Wei Tong, Tang Enqiong, y Fan Yahong; "Homopolar 2-Pole Radial Permanent-Magnet Biased Magnetic Bearing With Low Rotating Loss"; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 48, NO. 8; agosto 2012

[14] Fabrizio Impinna, Joaquim Girardello Detoni, Nicola Amati, y Andrea Tonoli; "Passive Magnetic Levitation of Rotors on Axial Electrodynamic Bearings"; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 49, NO.1, pp. 599-608 ; enero 2013

[15] Sheng-Ming Yang y Yu-Hue Tsai; "Design of a Thrust Actuator for Magnetic Bearings With Low Radial Attraction Force"; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 48, NO. 11; noviembre 2012

[16] Masatsugu Takemoto, Matsuhashi Daiki, y Nomura Masakatsu. *Patente JP.2011-085223.A* (obtenida traducción inglesa de Japan Patent Attorneys Association via <http://www4.ipdl.inpit.go.jp/Tokujitu/tjsogodben.ipdl?N0000=115> diciembre 2012)

[17] D.A.Lowther y P.P.Silvester; "Computer-Aided Design in Magnetics"; Springer-Verlag, New York; 1985

[18] Proyecto de investigación CYCIT\_2011 de la Universidad de Zaragoza "Rodamientos por levitación magnética para volantes de inercia", ref. ENE2011-29741-C02-02; 2011.



# Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

## **ANEXOS**



## ÍNDICE

ÍNDICE.....	25
I. Graficas de comparación con la bibliografía.....	26
II. Grados de Libertad.....	29
III. Resultados adicionales del modelo.....	30
III.I. Mapas del campo B.....	30
III.II. Flujos.....	34
III.III. Gráficas de fuerzas.....	35
III.IV. Diferentes materiales magnéticos.....	39
III.V. Diferentes imanes permanentes.....	40
IV. Resultados de los modelos 2D.....	42
IV.I. Calculo 2D de la fuerza axial $F_z$ .....	42
IV.II. Calculo 2D de la fuerza radial $F_y$ .....	44
V. Calculo de fuerzas en Opera y femm 4.2.....	46
V.I. El método del Tensor de Stress de Maxwell.....	49
V.II. El método de los trabajos virtuales.....	52
VI. Modificaciones del rodamiento.....	54
VII. Referencias.....	56
VIII. Códigos fuente en Opera.....	57
VIII.I. Script RodaMagActivo.comi.....	58
VIII.II. RodaMagActivoPostProc.comi.....	77
IX. Scripts para femm 4.2.....	84
IX.I. MagBearingZ.lua.....	84

## I. Gráficas de comparación con la bibliografía

En el punto 4.1. del TFM se ha mostrado una selección de gráficas comparando los resultados de la bibliografía (referencia [1]) y los obtenidos con nuestro modelo por medio de MEF 3D en Opera. También se han indicado las principales discrepancias.

En este anexo se incluyen todas las gráficas de comparación disponibles (figuras 15 y 16) y se expanden los comentarios sobre las diferencias y similitudes. En las gráficas la referencia son los datos de la bibliografía, mientras que las curvas sin nombrar son para el modelo standard de este trabajo (similar al de la bibliografía). Recordar estas fuerzas son magnéticas y no se les ha restado el peso de las partes móviles que deben ser suspendidas, el peso de esas partes se estima en 44 N [1].

La gráfica (a) muestra que nuestro modelo replica la fuerza y linealidad en dirección radial cuando el rotor está centrado. Además la fuerza radial es función de la corriente radial ( $i_y$  para  $F_y$ ) y casi independiente de la corriente axial ( $i_z$ ).

La gráfica (b) indica que los resultados de la fuerza radial de levitación  $F_y$  coinciden cuando el rotor se ha movido 0,1 mm hacia abajo (ver Figura 17). Se confirma la linealidad en ese caso y que no hay fuerza de restauración radial si no todo lo contrario, es desestabilizadora. Además vemos que  $F_y$  es independiente de  $i_x$ , solo depende de  $i_y$ .

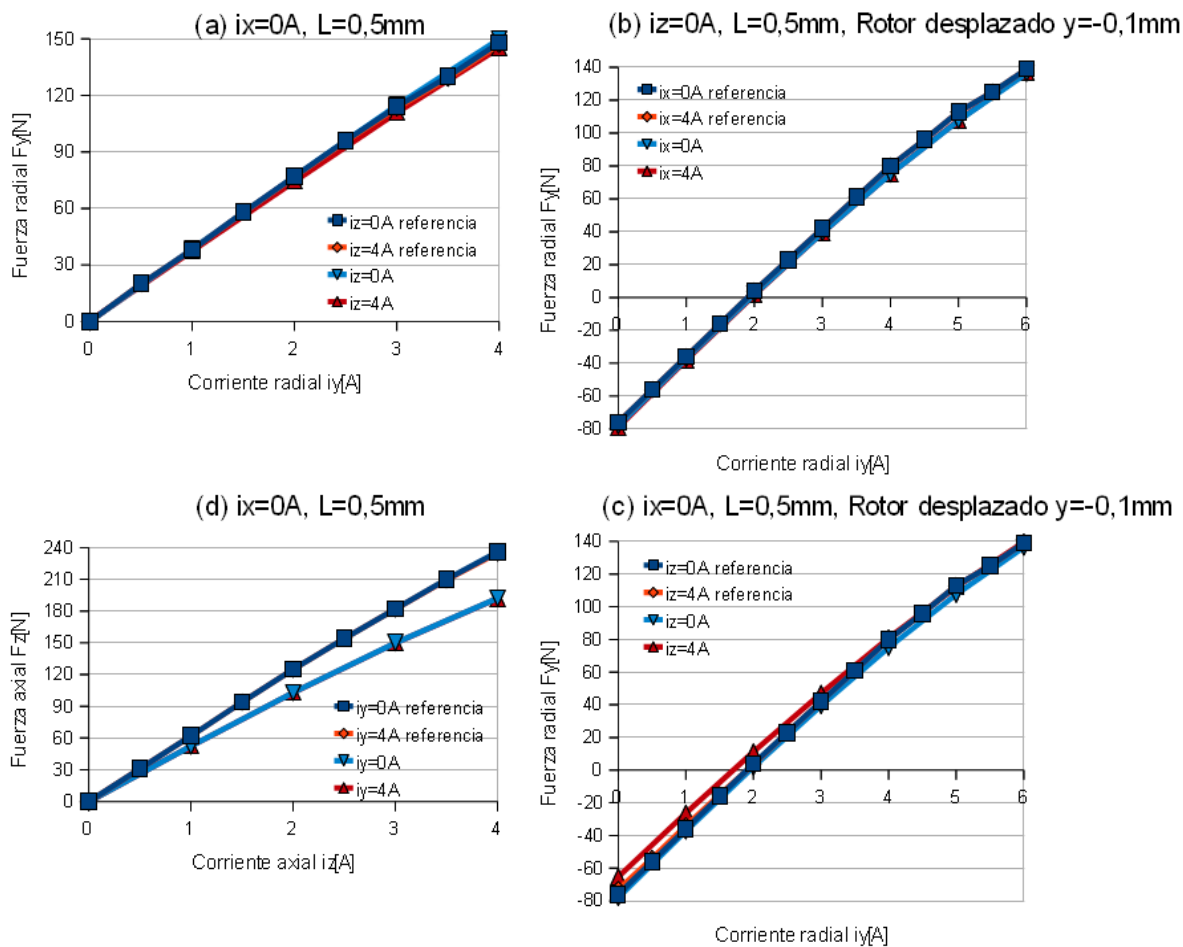


Figura 15. Gráficas comparando los resultados de Fuerzas obtenidos para el modelo de referencia y el modelo simulado en este trabajo. L es la longitud del *axial overlap*.

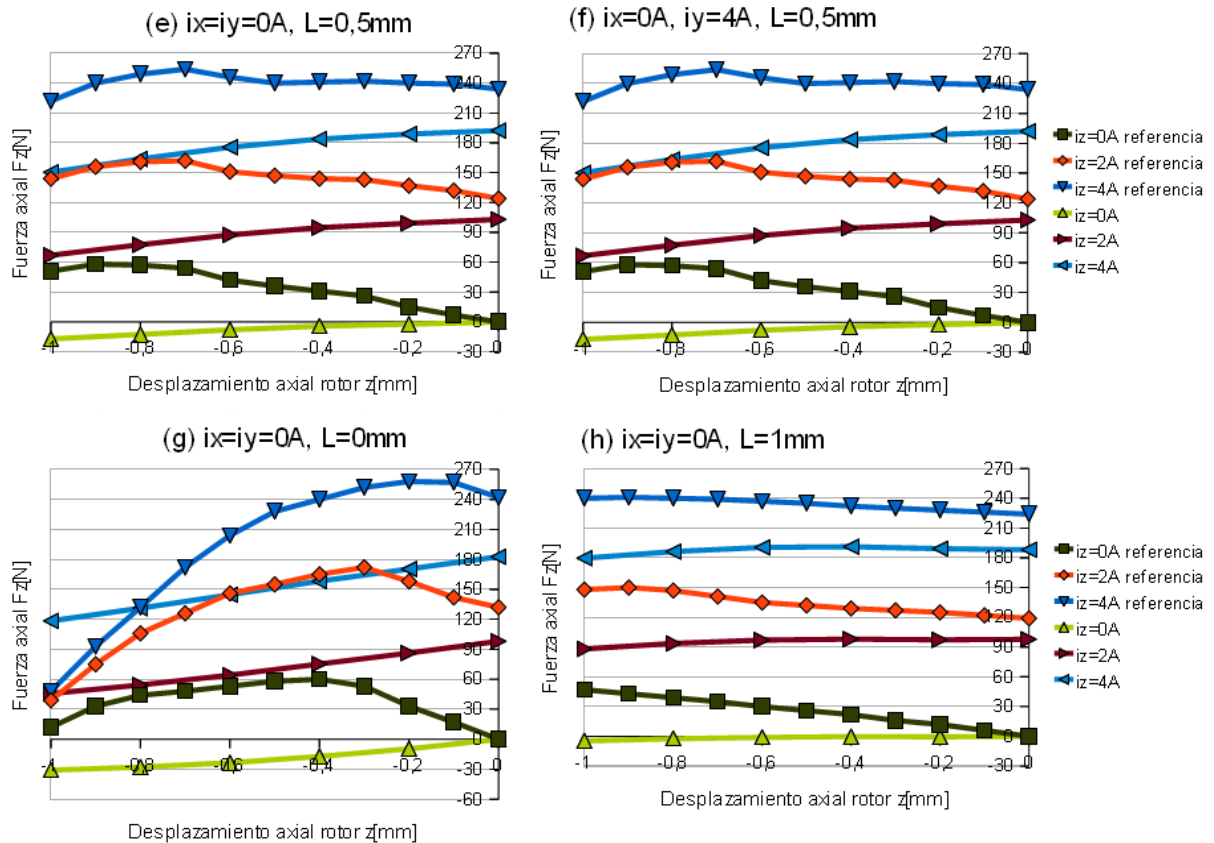


Figura 16. Gráficas comparando los resultados de Fuerzas obtenidos para el modelo de referencia y el modelo simulado en este trabajo.  $L$  es la longitud del *axial overlap*.

La gráfica (c) es similar a la (b), pero esta vez comprobamos que la Fuerza radial es independiente de la corriente axial  $i_z$  cuando el rotor se ha movido 0,1 mm hacia abajo. En nuestro modelo  $i_z$  influye levemente (curva roja contra las demás).

La gráfica (d) muestra la Fuerza axial ( $F_z$ ) en función de la corriente axial ( $i_z$ ) cuando el rotor está centrado, se confirma la linealidad y la independencia respecto de la corriente radial ( $i_y$ ). Sin embargo nuestro modelo produce una fuerza axial un 15% menor. Por supuesto si utilizamos imanes más potentes obtenemos más fuerza axial, pero también aumenta la fuerza radial y sería mayor que la de la bibliografía.

Las gráficas (e) y (f) muestran la fuerza axial ( $F_z$ ) en función del desplazamiento del rotor y de la corriente  $i_z$  (hay tres curvas, para corriente  $i_z$  de 0, 2 o 4 A). En (e) la corriente radial  $i_y$  es 0A, mientras que en (f) la corriente radial  $i_y$  es 4A, por lo que confirmamos que la fuerza axial solo depende de  $i_z$  incluso al mover el rotor.

Sin embargo en las gráficas (e) y (f) vemos discrepancias importantes entre nuestro modelo y el de la referencia [1]. Como hemos dicho antes las fuerzas axiales son menores en nuestro modelo. La relación fuerza-corriente es más lineal en nuestro modelo.

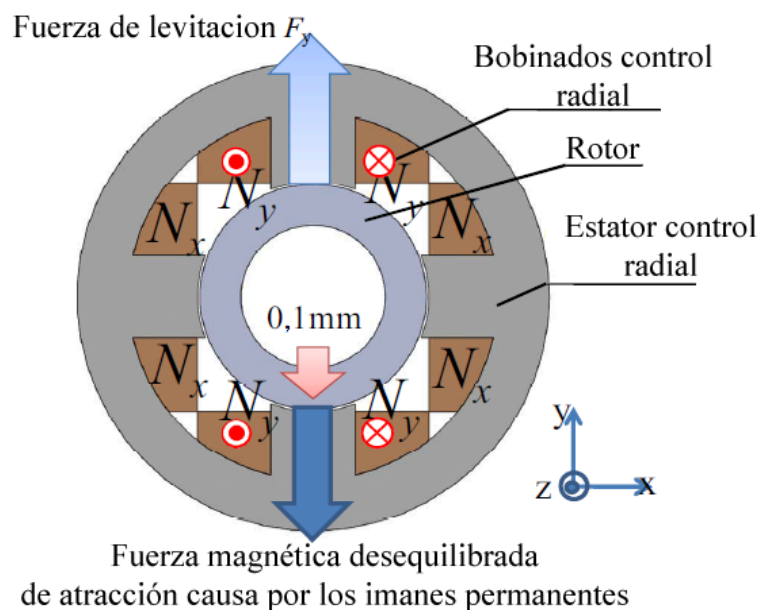
Lo más importante es que en la referencia aparece una fuerza de restauración axial relevante que aumenta con el desplazamiento, esta fuerza aparece incluso cuando no se aplica corriente y parece sumarse a la fuerza producida por el bobinado axial. En nuestro modelo no existe dicha fuerza de restauración axial, de hecho aparece una pequeña fuerza desestabilizadora, al mover el rotor hacia -Z los electroimanes

también tienden a mover la pieza hacia  $-Z$  ( $F_z < 0$ ). Esta diferencia es importante, ya que es deseable que existan fuerzas de restauración (disminuye el consumo de energía).

Las gráficas (g) y (h) son como la gráfica (e), pero se ha cambiado la longitud  $L$  del solapamiento axial a 0 y 1 mm respectivamente (en el standard es 0,5). Volvemos a tener resultados opuestos para la fuerza de autorrestauración axial. Por otro lado nuestro modelo siempre es muy lineal, mientras que la referencia no lo es con  $L=0$ . La gráfica (h) con  $L=1$  presenta más similitud.

En todas las gráficas se comprueba que el rodamiento proporciona fuerza suficiente: la referencia [1] indica 44 N como la fuerza necesaria y 4 A como la corriente máxima más adecuada.

Con la presentación de estas figuras se han comparado todas las gráficas disponibles del modelo de referencia [1] con la simulación de este TFM. En un anexo posterior se mostrarán resultados de nuestra simulación que van más allá de lo mostrado en la referencia.



### *Desplazamiento del rotor -0,1 mm en dirección radial y*

Figura 17. Corte en el plano XY y fuerzas sobre el rotor (flechas azules) cuando el rotor se ha movido 0,1 mm hacia abajo (flecha roja), así como sentido de las corrientes por el bobinado radial.  $N_y$  es el bobinado para controlar el eje Y,  $N_x$  el bobinado para controlar el eje X; notar que solo se ha aplicado corriente a  $N_y$  para esta figura. La Fuerza de levitación es provocada por la corriente que circula por las bobinas. La fuerza magnética desequilibrada hacia abajo es provocada por los flujos de los imanes (no mostrados) que en este caso son asimétricos al haber movido el rotor. Modificado de la referencia [1].

## II. Grados de Libertad

En la introducción se ha dicho que el rodamiento magnético activo estudiado puede controlar la fuerza en los tres ejes y que puede usarse junto a otros dispositivos en configuraciones con control en los cinco grados de libertad.

El rodamiento, por sí solo, puede controlar el movimiento en los tres ejes cartesianos ( $X, Y, Z$ ), pero no es suficiente para dar un movimiento estable al eje de una máquina. Para controlar el movimiento de un eje en los cinco grados de libertad ( $X, Y, Z$ , giros en el plano  $ZX$  y  $ZY$ ) es necesario instalar un rodamiento activo como este en un extremo y un rodamiento radial en el otro lado (Figura 18). El rodamiento magnético simulado no produce pares notables por sí solo, normalmente milésimas de Nm llegando a décimas de Nm cuando el rotor está bastante descentrado y se aplican corrientes máximas.

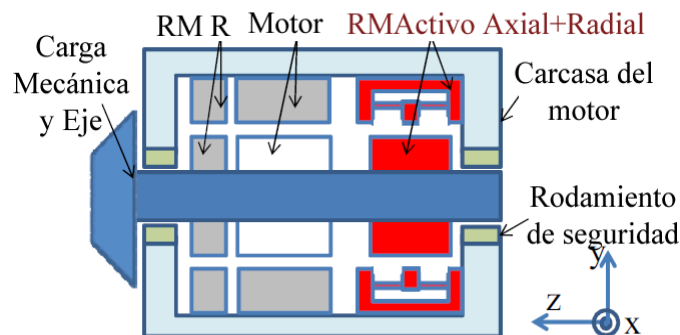


Figura 18. Sistema de levitación magnética para un motor. A la izquierda un sistema convencional con dos rodamientos radiales y uno axial. A la derecha la configuración asociada a este trabajo (en rojo el rodamiento activo). Imagen modificada de [1].

La Figura 19 muestra los movimientos posibles de un rotor, realmente los grados de libertad son seis: traslación  $X, Y, Z$ , giros  $\Psi, \theta$  y  $\Phi$ . Sin embargo no queremos controlar la rotación del rotor  $\Phi$ , de hecho es deseable que el sistema de levitación no produzca Par en ese plano. Por ello se quieren controlar cinco grados de libertad.

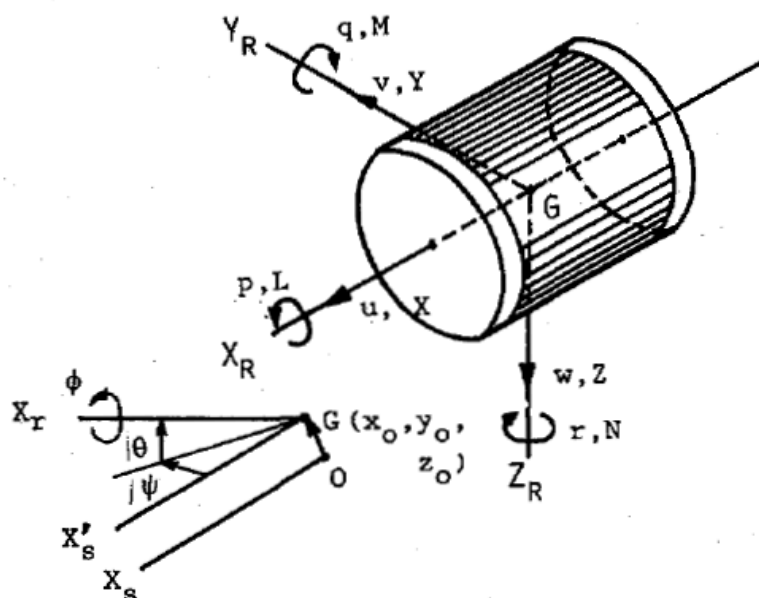


Figura 19. Movimientos posibles de un rotor [3].

### III. Resultados adicionales del modelo

En la memoria y el Anexo I se han mostrado gráficas y figuras que muestran los resultados de la bibliografía [1] y los comparan con los obtenidos del modelo desarrollado en este TFM. Sin embargo el modelo permite obtener más información que la destacada en la bibliografía, permitiéndonos entender mejor las características de este dispositivo.

#### III.I. Mapas del campo B

A continuación se muestran mapas del módulo  $|B|$  (Teslas) en diferentes situaciones.

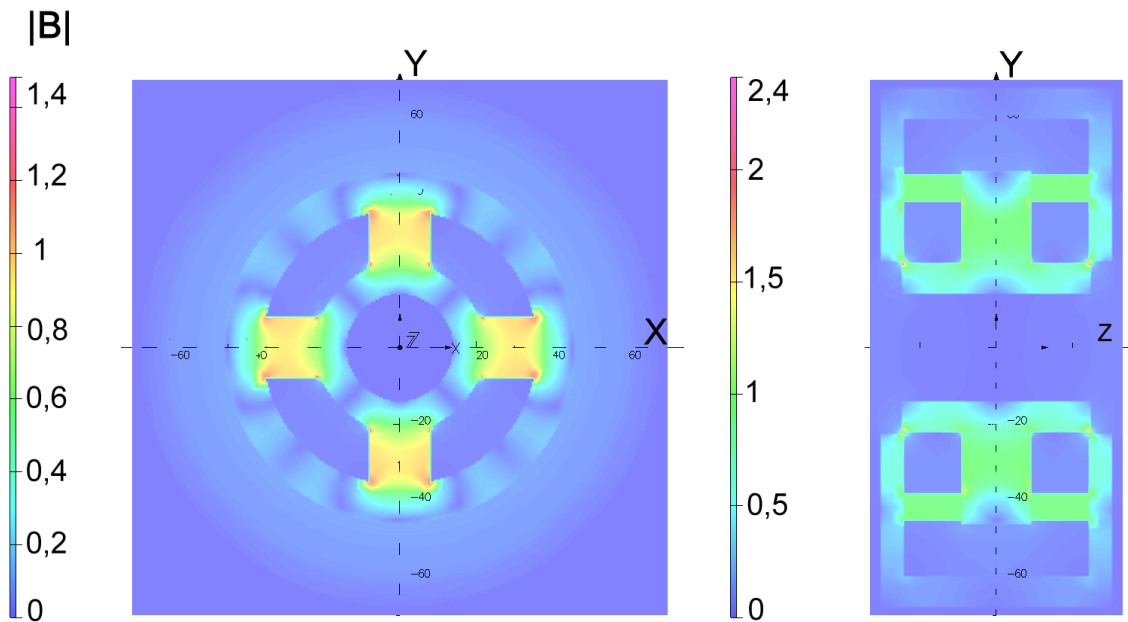


Figura 20. Mapa de  $|B|$  cuando el rotor está centrado y todas las corrientes son cero (cortes en los planos XY -izquierda- y ZY -derecha).

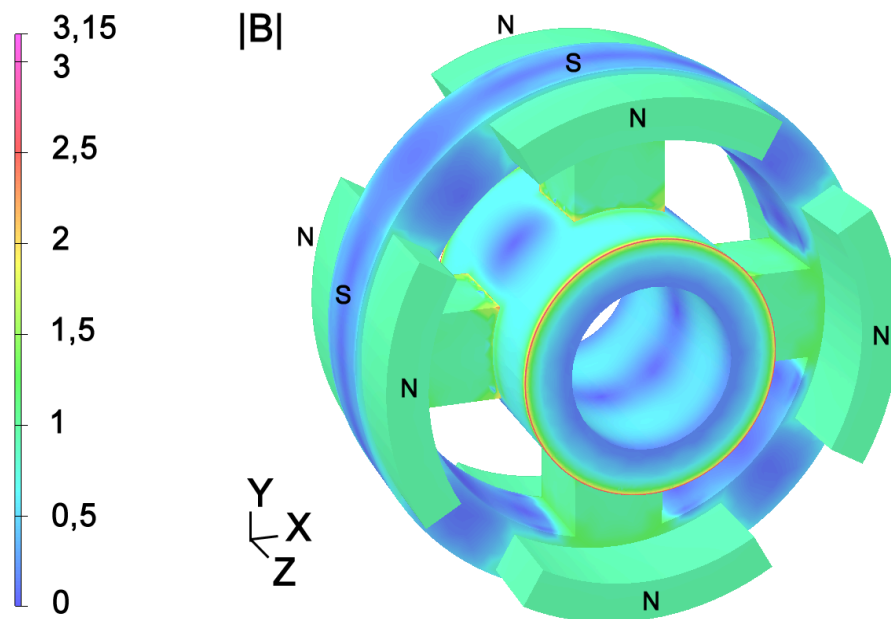


Figura 21. Mapa de  $|B|$  3D cuando el rotor está centrado y todas las corrientes son cero, se muestra estator radial, rotor e imanes. Bobinas y estator axial ocultos.

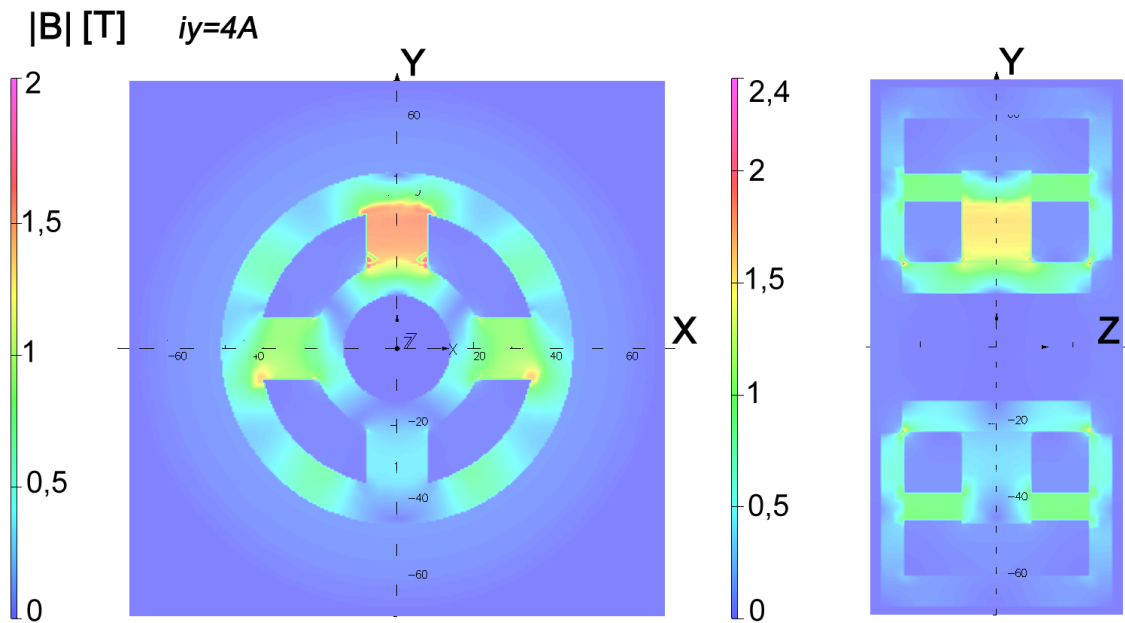


Figura 22. Mapa de  $|B|$  cuando el rotor está centrado y la corriente radial  $i_y=4A$ , resto de corrientes cero (cortes en los planos XY -izquierda- y ZY -derecha).

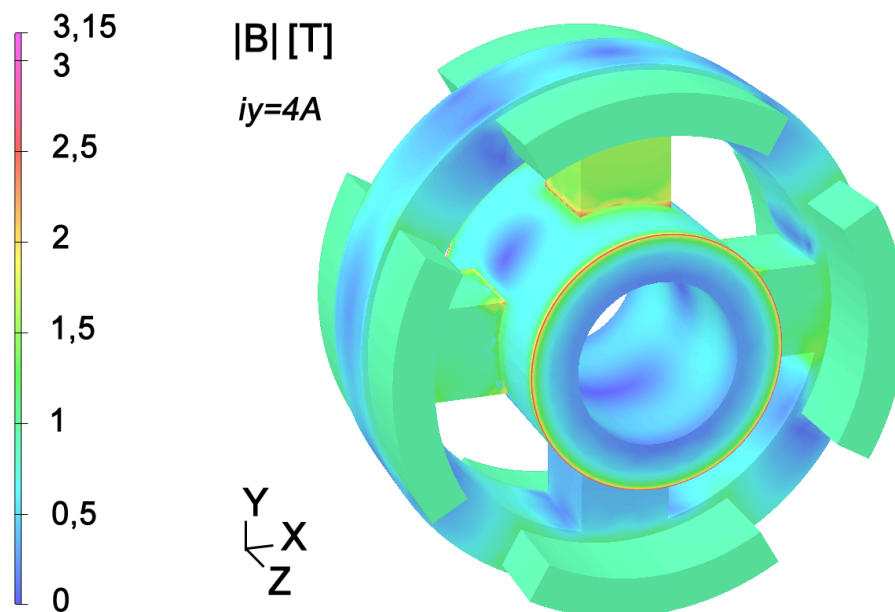


Figura 23. Mapa de  $|B|$  3D cuando el rotor está centrado y la corriente radial  $i_y=4A$ , resto de corrientes cero. Se muestra estátor radial, rotor e imanes; bobinas y estátor axial ocultos.

En la Figura 20 puede observarse el funcionamiento pasivo del rodamiento magnético, cuando no hay corrientes y el rotor está centrado. Se observa que hay simetrías, no se ejercen fuerzas y que el exterior del estátor axial aloja poco flujo. En la Figura 21 se muestra el rodamiento en 3D, pero con el estátor axial y las bobinas ocultas, además se han marcado las direcciones de magnetización de los imanes.

En las figuras 22 y 23 se muestra el mapa de  $B$  cuando se ejerce Fuerza radial  $F_y$  excitando la bobina radial. Se observa la diferencia de campos entre dos polos y mayores campos en el estátor radial.



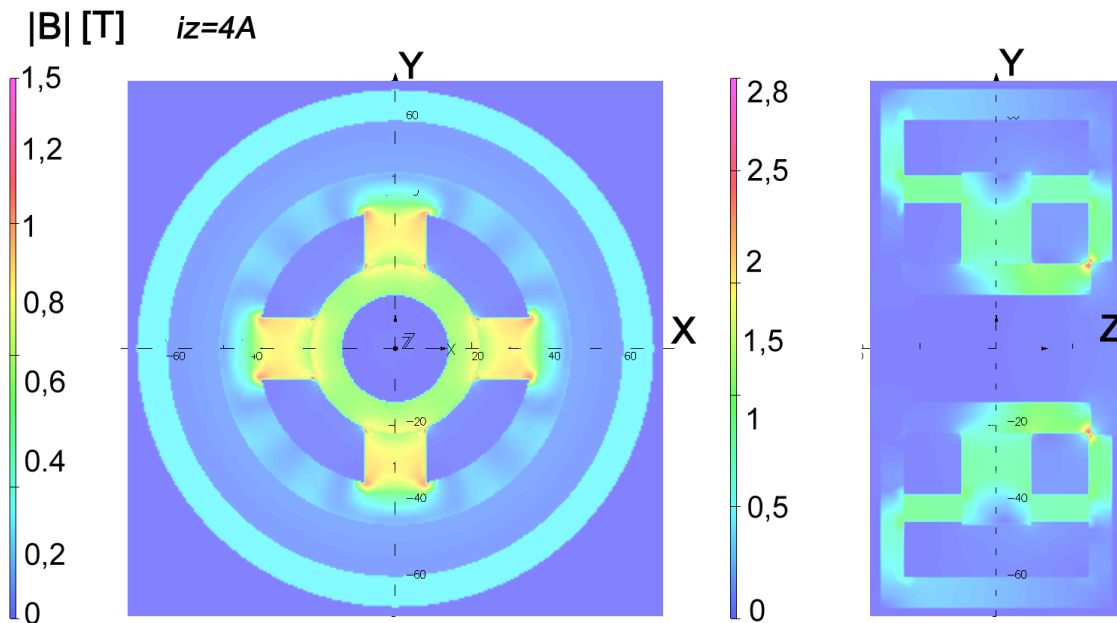


Figura 24. Mapa de  $|B|$  cuando el rotor está centrado y la corriente axial  $i_z=4A$ , resto de corrientes cero (cortes en los planos XY -izquierda- y ZY -derecha). La Fuerza se ejerce en dirección +Z.

En la Figura 24 se puede ver qué sucede cuando se excita la bobina axial cuando el rotor está centrado, se concentra el campo en un extremo del rotor y circulan flujos más importantes por el exterior del estátor axial (debido al flujo de la bobina axial).

La Figura 25 muestra en 3D los campos cuando todas las corrientes ( $i_x$ ,  $i_y$ ,  $i_z$ ) son 4A. La distribución de B en el rotor es igual que en el caso en el que solo se aplica  $i_z$ .

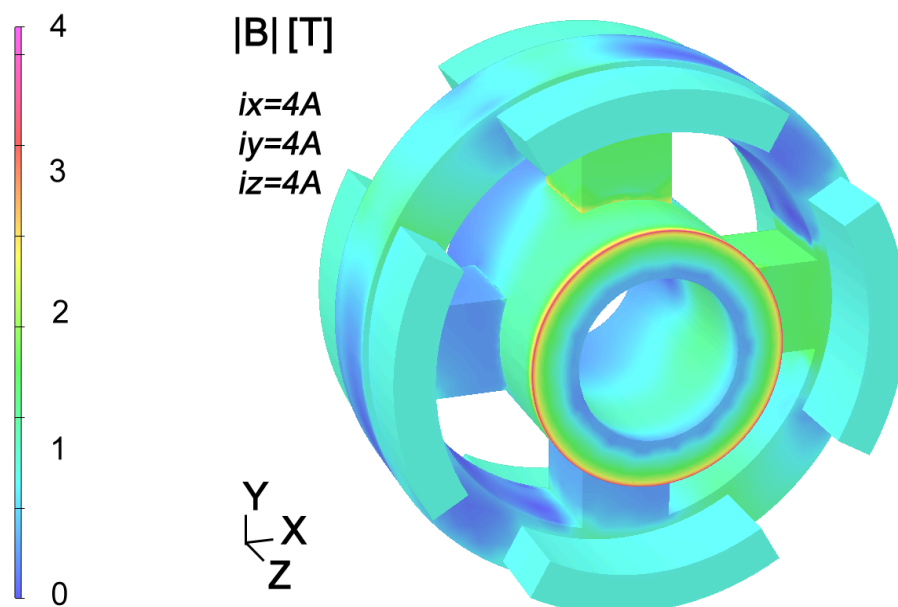


Figura 25. Mapa de  $|B|$  3D cuando el rotor está centrado y todas las corrientes son 4A. Se muestra estátor radial, rotor e imanes; bobinas y estátor axial ocultos.

La Figura 26 muestra el funcionamiento pasivo del rodamiento cuando el rotor se mueve hacia abajo ( $y = -0,1 \text{ mm}$ ), se observa que aparece un campo intenso en el polo inferior que atrae al rotor hacia abajo (esta es una desventaja de este dispositivo).



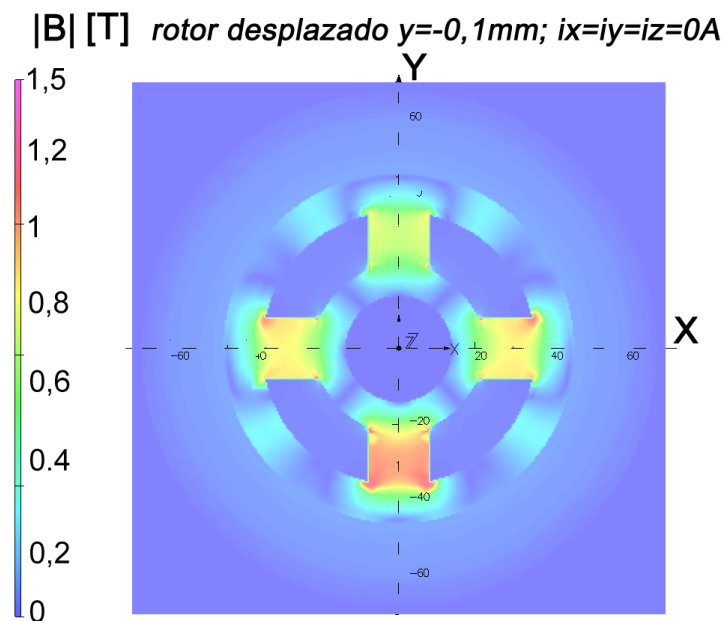


Figura 26. Mapa de  $|B|$  cuando el rotor está desplazado 0,1mm hacia abajo y las corrientes son cero. La Fuerza se ejerce en dirección  $-Y$ .

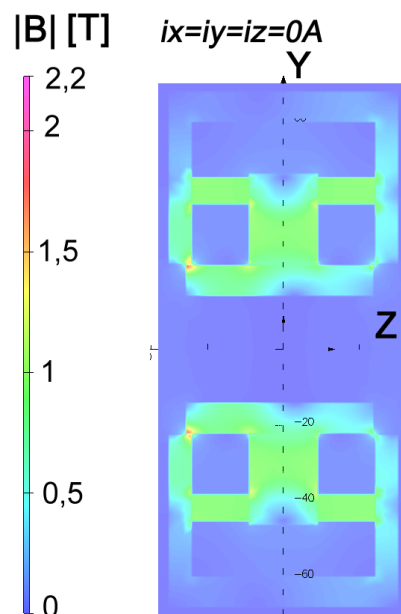


Figura 27. Mapa de  $|B|$  cuando el rotor está desplazado en dirección axial  $z=-1\text{mm}$  y las corrientes son cero. La Fuerza se ejerce en dirección  $-Z$ .

La Figura 27 muestra el funcionamiento pasivo del rodamiento cuando el rotor se mueve en una dirección axial. Se observa que aparece un campo en un extremo del rotor que le mueve hacia ese mismo sentido, por lo que no hay fuerza pasiva de restauración (esta es una desventaja de este dispositivo).

### III.II. Flujos

Las siguientes imágenes muestran los flujos en el rodamiento por medio de vectores del campo B (el tamaño de las flechas es proporcional al módulo de B), obtenidos en Opera. Los vectores se muestran encima de un mapa de la intensidad de campo H [A/m].

Estas figuras corroboran el principio de funcionamiento a partir de flujos superpuestos.

#### Mapa de $|H|$ [A/m], Vectores de B

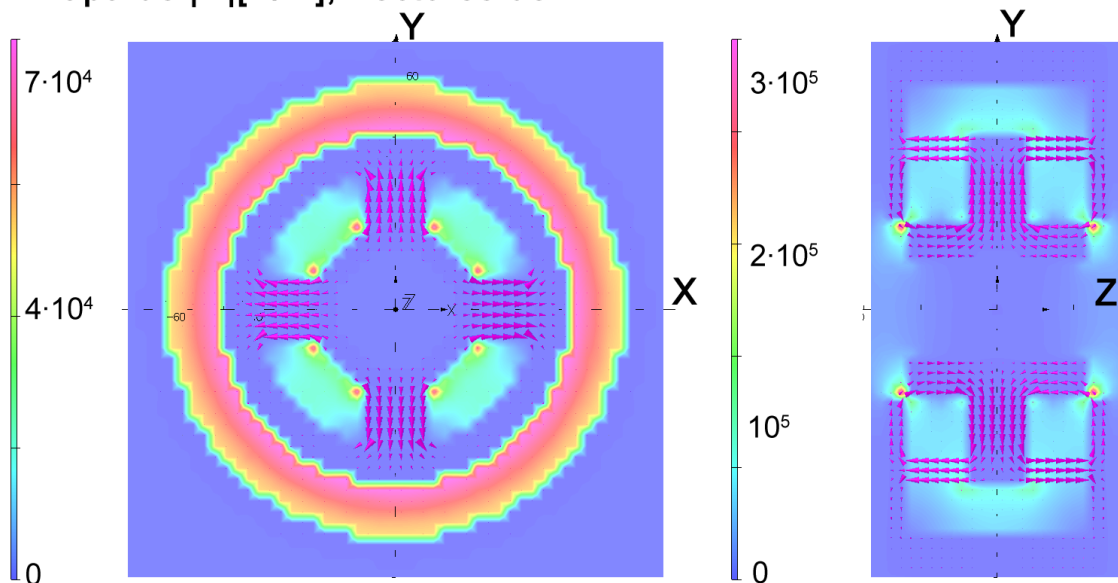


Figura 28. Flujos y mapa de  $|H|$  cuando el rotor está centrado y las corrientes son cero. Cortes en el plano XY y ZY.

En la Figura 28 se aprecia la simetría de los flujos cuando el rotor está centrado y no se excitan las bobinas, estos flujos se producen por los imanes permanentes (por ello los flujos circulan en su mayor parte por los polos y el rotor, pero no por el resto del estátor radial).

En la Figura 28 derecha puede verse con más claridad un hecho que se ha comentado anteriormente al simplificar el modelo a uno 2D, aproximadamente solo la mitad de las líneas de flujo que sale de los imanes vuelve atravesando los entrehierros, la otra mitad circula por el estátor axial y finalmente vuelve atravesando el aire. Este flujo que no vuelve por los entrehierros es inútil, por lo que esta parte del diseño es poco eficiente.

La Figura 29 muestra el efecto de excitar las bobinas radiales del eje Y, los flujos de un polo se restan mientras que los flujos del polo opuesto se suman.

La Figura 30 muestra los flujos al excitar la bobina axial, en esta figura el rotor está desplazado pero la figura es muy similar cuando el rotor está centrado.

Mapa de  $|H|$ [A/m], Vectores de B  $i_y=4A$

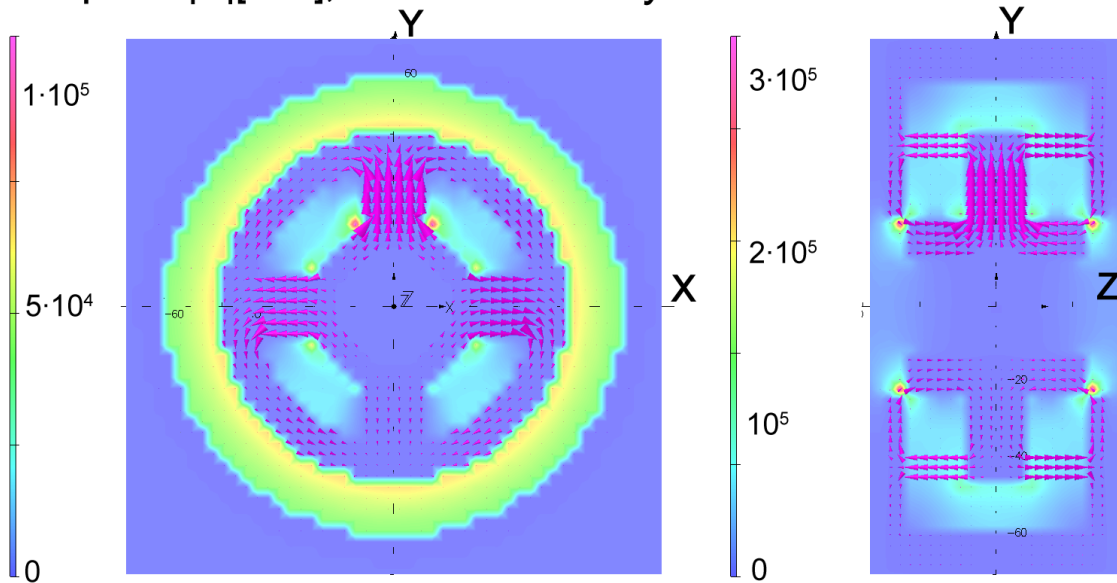


Figura 29. Flujos y mapa de  $|H|$  cuando el rotor está centrado y la corriente radial  $i_y=4A$  (el resto de corrientes son cero). Cortes en el plano XY y ZY.

Mapa de  $|H|$ [A/m], Vectores de B  $i_z=4A$ ; desplazado  $z=-2mm$

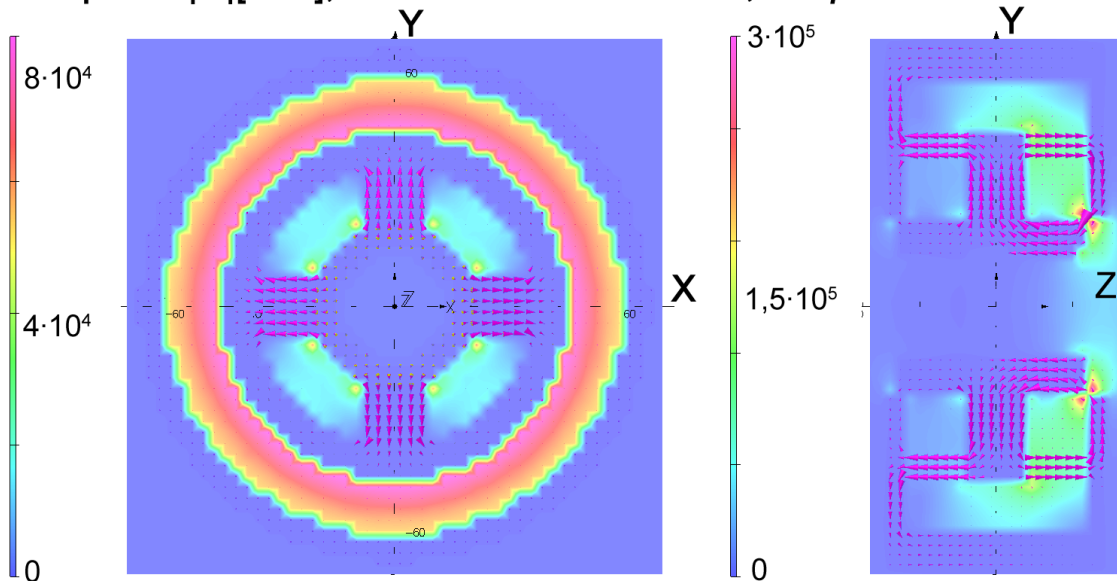


Figura 30. Flujos y mapa de  $|H|$  cuando el rotor se ha desplazado  $z=-2mm$  y la corriente axial  $i_z=4A$  (el resto de corrientes son cero). Cortes en el plano XY y ZY.

### III.III. Gráficas de fuerzas

Las gráficas mostradas en el Anexo I muestran los cálculos de Fuerza más importantes, sin embargo no caracterizan completamente el rodamiento magnético. En esta sección se muestran varias gráficas adicionales que dan más información y revelan algunas características adicionales no nombradas en la bibliografía.

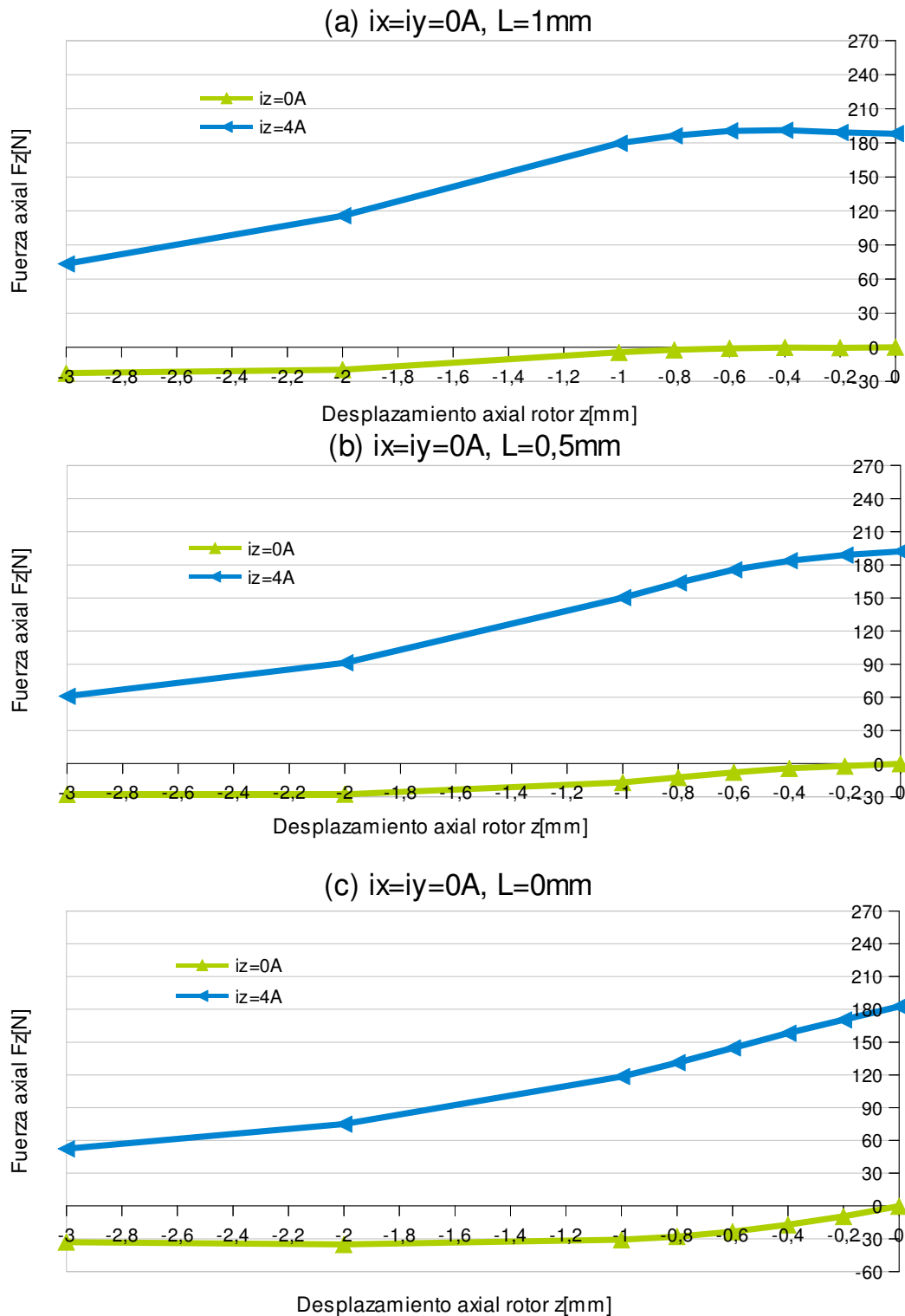


Figura 31. Fuerza axial  $F_z$  [N] en función del desplazamiento axial  $z$  [mm] para una corriente axial determinada (ver leyenda). Cada gráfica corresponde a una longitud  $L$  de solapamiento axial diferente.

La Figura 31 muestra la Fuerza axial para grandes desplazamientos axiales. Se observa que la fuerza desestabilizadora producida por los imanes permanentes (curva  $i_z=0A$ ) apenas aumenta más allá de 30 N pasado cierto punto.

En la Figura 32 también se observa que la fuerza desestabilizadora axial es menor cuando el solapamiento axial es mayor. La Fuerza axial producida por la excitación de la bobina disminuye al desplazar el rotor, sin embargo esta disminución es menos pronunciada cuando el solapamiento axial es mayor. Sin embargo la relación Fuerza axial/Desplazamiento axial es más lineal cuando el solapamiento es más pequeño. Notar que la disminución de  $F_z$  es más pronunciada cuando el desplazamiento es igual al solapamiento axial, esto es por que cuando se desplaza el rotor hasta  $z=L$  un extremo del rotor deja de estar solapado con el estátor axial.

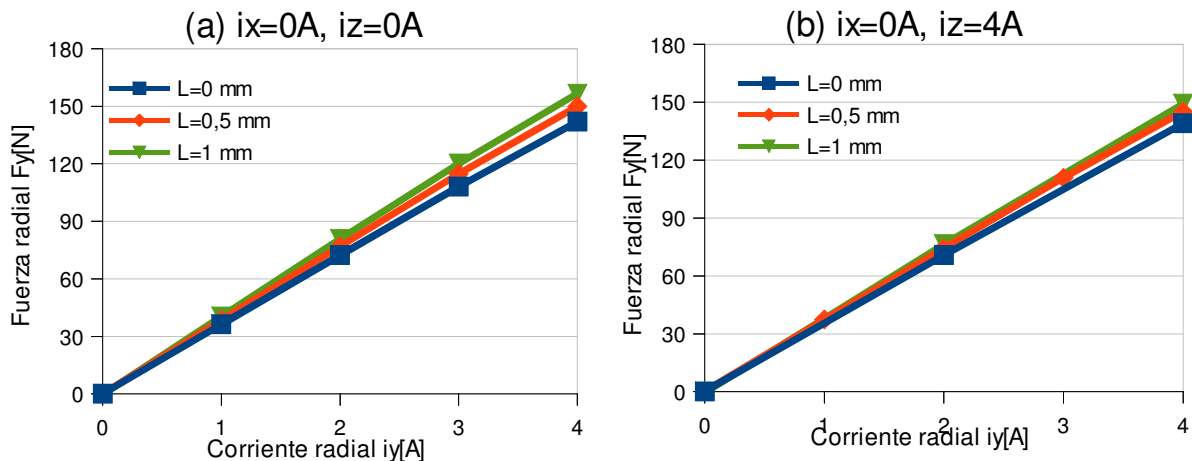


Figura 32. Fuerza radial  $F_y$  [N] en función de la corriente radial  $i_y$  [A] para diferentes solapamientos axiales ( $L$ ). Rotor centrado.

La Figura 32 muestra la dependencia de la Fuerza radial respecto del solapamiento axial y de la corriente axial. Aumentar el solapamiento axial en 0,5 mm aumenta la Fuerza radial  $i_y$  en aproximadamente un 5%. La corriente axial  $i_z$  influye muy levemente en la corriente radial  $F_y$  cuando el rotor está centrado, cumpliendo la característica de ejes independientes.

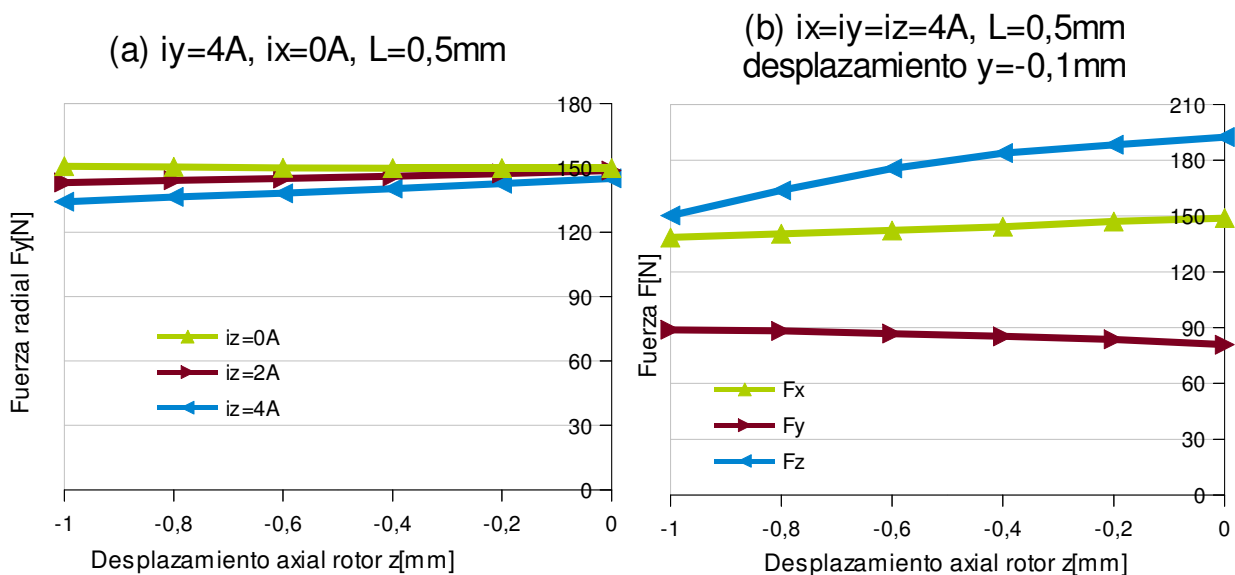


Figura 33. Fuerzas en función del desplazamiento axial en distintas situaciones. A la izquierda calculamos la  $F_y$  con  $i_y=4A$  y probando con diferentes corrientes axiales. A la derecha todas las corrientes son 4A y el rotor se ha movido 0,1 mm hacia abajo.

Las pruebas indican que la Fuerza axial  $F_z$  es independiente de las corrientes radiales y del movimiento en los ejes X e Y (se aprecia comparando la gráfica de  $F_z$  en la Figura 33.b con las gráfica de  $F_z$  en el Anexo I, son iguales a pesar de las diferentes condiciones).  $F_z$  solo depende de la corriente axial  $i_z$  y del movimiento del rotor en el eje Z.

La Fuerza radial ya se ha mostrado que depende de la posición radial y de la corriente radial del eje en cuestión.  $F_y$  es muy independiente de  $i_x$  y bastante independiente de  $i_z$  (ver Anexo I). Sin embargo está independencia esta sometida a algunas sutilezas. La Figura 33.a muestra que  $i_y$  es independiente del desplazamiento radial siempre que  $i_z=0$ , sin embargo cuando se aplica corriente axial se pierde independencia. Esta conclusión puede ser importante para el dimensionamiento dado que la corriente radial puede disminuir al mover el rotor.

La Figura 33.b muestra un caso extremo en el que el rotor no solo se mueve en el eje Z si no que además está desplazado 0,1mm hacia abajo (eje Y) y todas las corrientes se aplican al máximo (por lo que corremos el peligro de saturar los materiales). La fuerza  $F_x$  se ve afectada de la misma manera que la corriente radial en la Figura 33.a, pero vemos que  $F_y$  (recordar que  $y=-0,1\text{mm}$ ) aumenta al mover axialmente el rotor. Este comportamiento de  $F_y$  se explica por que la contribución del flujo de los imanes a la Fuerza radial (recordar que en este caso empujaba al rotor hacia abajo) disminuye al mover el rotor en el eje Z.

Finalmente las figuras 34 y 35 muestran un hecho importante a la hora de pensar como controlar el movimiento del rotor. La Figura 34 muestra la forma correcta de aplicar la corriente axial para mover el rotor, notar que una gráfica es para  $i_z=4\text{A}$  y la otra es para  $i_z=-4\text{A}$  (sentido de corriente inverso). La corriente debe ser aplicada con el sentido correcto según el rotor se mueva hacia un sector o hacia el otro, ya que una corriente positiva siempre mueve el rotor hacia delante y una corriente negativa siempre lo mueve hacia atrás. La Figura 35 muestra la Fuerza axial para  $i_z$  positiva incluyendo el sector en que no se debería aplicar normalmente.

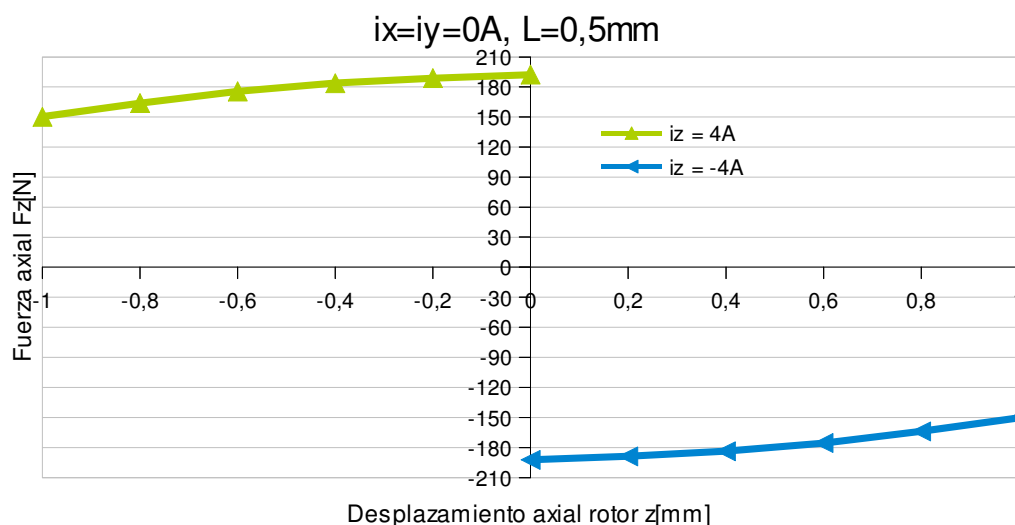


Figura 34. Fuerza axial  $F_z$  en función del desplazamiento axial con las corrientes en sus sectores de aplicación correctos. Notar que una fuerza positiva mueve el rotor hacia  $z>0$ , mientras que una fuerza negativa mueve el rotor hacia  $z<0$ .

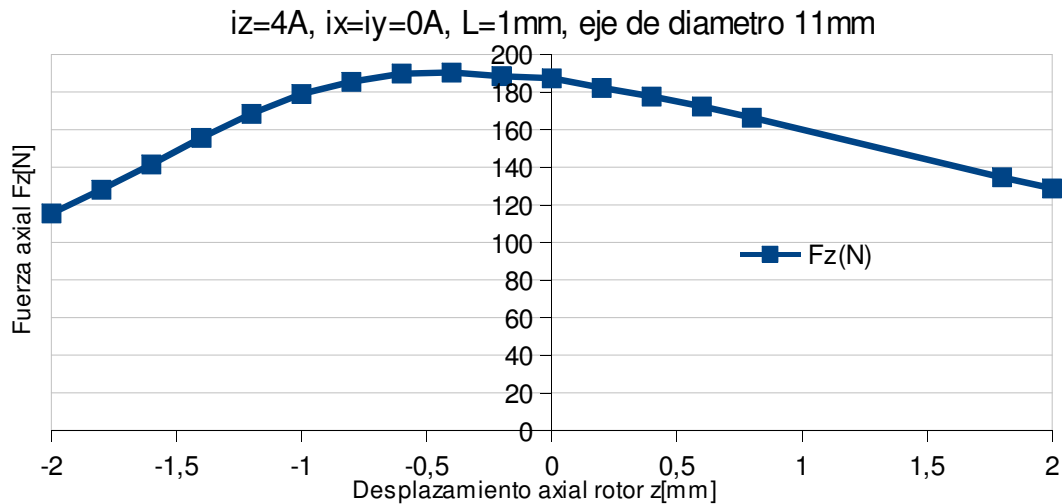


Figura 35. Fuerza axial  $F_z$  en función del desplazamiento axial para  $i_z=4A$ . Notar que una fuerza positiva mueve el rotor hacia  $z>0$ , por lo que esta corriente no debería aplicarse en el cuadrante derecho si queremos mantener el rotor centrado en el cero. Esta gráfica corresponde al modelo para la aplicación del *Flywheel*.

### III.IV. Diferentes materiales magnéticos

El modelo standard utiliza Hierro Puro (*Pure Iron*) como material magnético usado en rotor y estatores, tiene una de las curvas de permeabilidad que permiten mayores campos  $B$  y es similar a algunos aceros (p.e. *Steel 1006*). Dado que en la práctica los materiales tienen costes y propiedades mecánicas determinantes, es importante plantearse que sucede cuando se utiliza un material magnético diferente, para ello se han hecho simulaciones en Opera utilizando un Acero Inoxidable (*Stainless Steel 416*) con una curva de saturación que admite menores campos  $B$ .

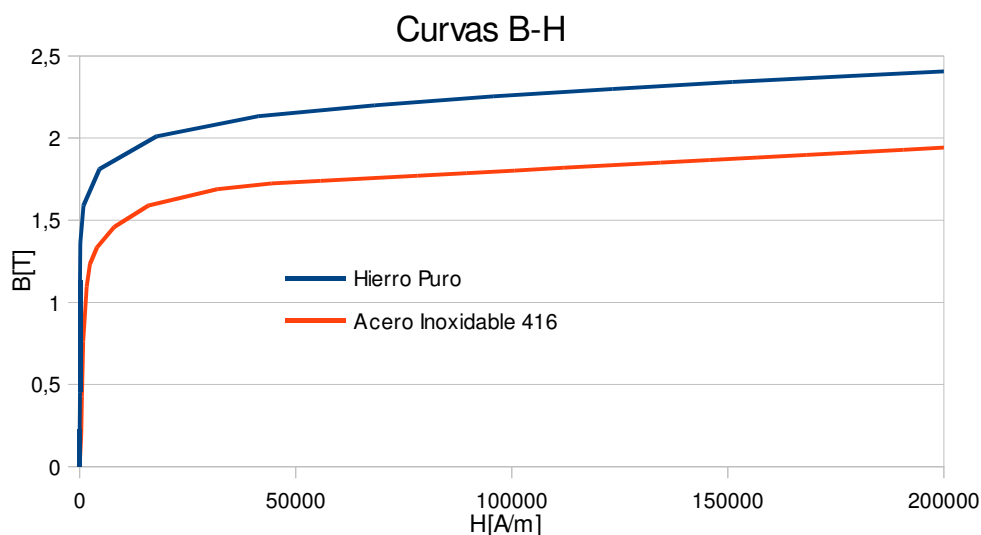


Figura 36. Curvas B-H empleadas en los modelos del trabajo, los datos provienen de la base de datos de materiales de femm 4.2.

A continuación se muestran varias gráficas (Figura 37), similares a las mostradas anteriormente para el modelo standard, en las que se comparan las fuerzas generadas en el modelo con Hierro Puro y el modelo con Acero Inoxidable 416.

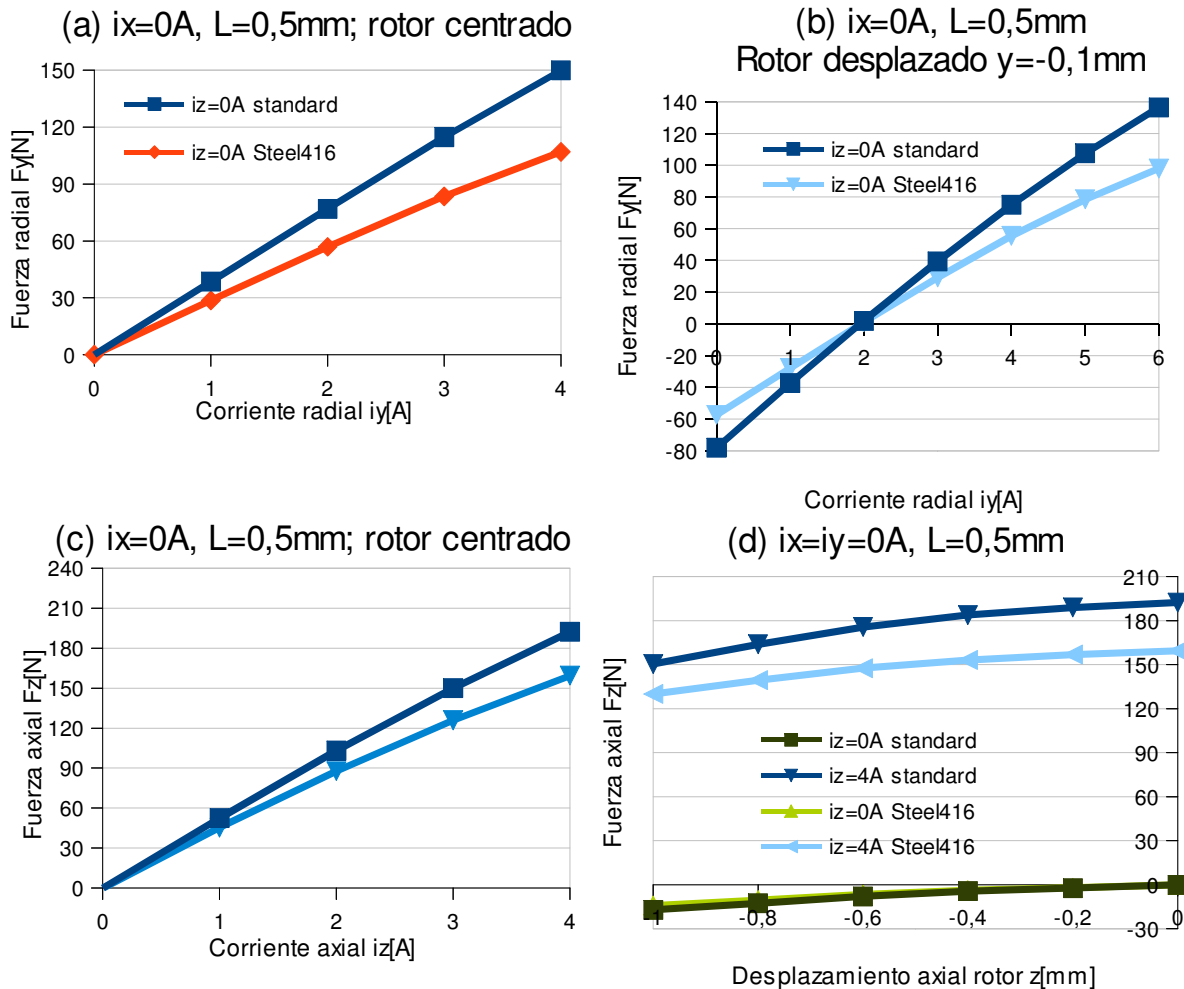


Figura 37. Comparación entre fuerzas obtenidas en el modelo standard (con Hierro Puro) y el modelo *Steel 416* (con Acero Inoxidable 416).

Se ve rápidamente que al usar ese acero como material magnético las fuerzas generadas son menores aunque a penas se pierde linealidad. Notar que la Fuerza desestabilizadora radial que aparece cuando se mueve el rotor hacia abajo (Figura 37.b) es menor, lo cual es una ventaja.

### III.V. Diferentes imanes permanentes

El modelo standard utiliza imanes permanentes de SmCo 24 MGOe, un imán lineal con propiedades similares a algunos imanes de NdFeB. Los imanes son muy caros así que merece la pena plantearse si es posible utilizar imanes con curvas B-H no lineales y que criterios hay que seguir para elegirlos.

Para ello se ha simulado en Opera un modelo con imanes permanentes de Alnico5, un imán no lineal con un campo coercitivo  $H_c$  muy bajo pero capaz de producir un campo B mayor. La Figura 38 muestra las curvas B-H de los imanes (utilizadas las curvas de la biblioteca de materiales de femm 4.2).

A priori un imán más potente producirá fuerzas mayores, pero hay que considerar el campo H al que se somete el imán ya que va a trabajar en esa zona. Viendo las gráficas (Figura 39) se ve que se produce menos Fuerza utilizando Alnico5, por lo que



trabaja en una zona en la que produce menos B que el imán lineal. Además se puede perder linealidad, la extraña forma de la gráfica para Fz nos indica que el imán está sometido a valores de H variables.

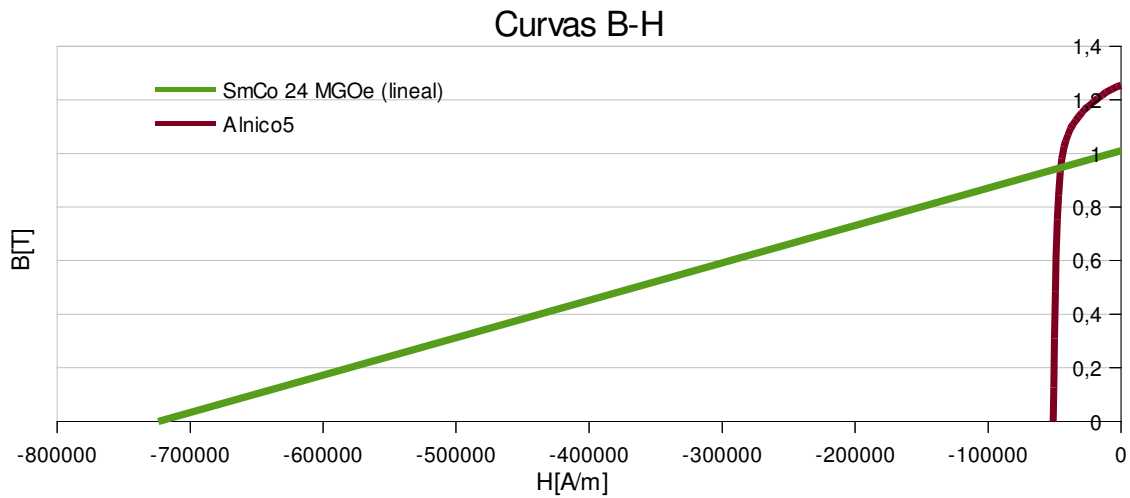


Figura 38. Curvas B-H empleadas en los imanes permanentes del TFM.

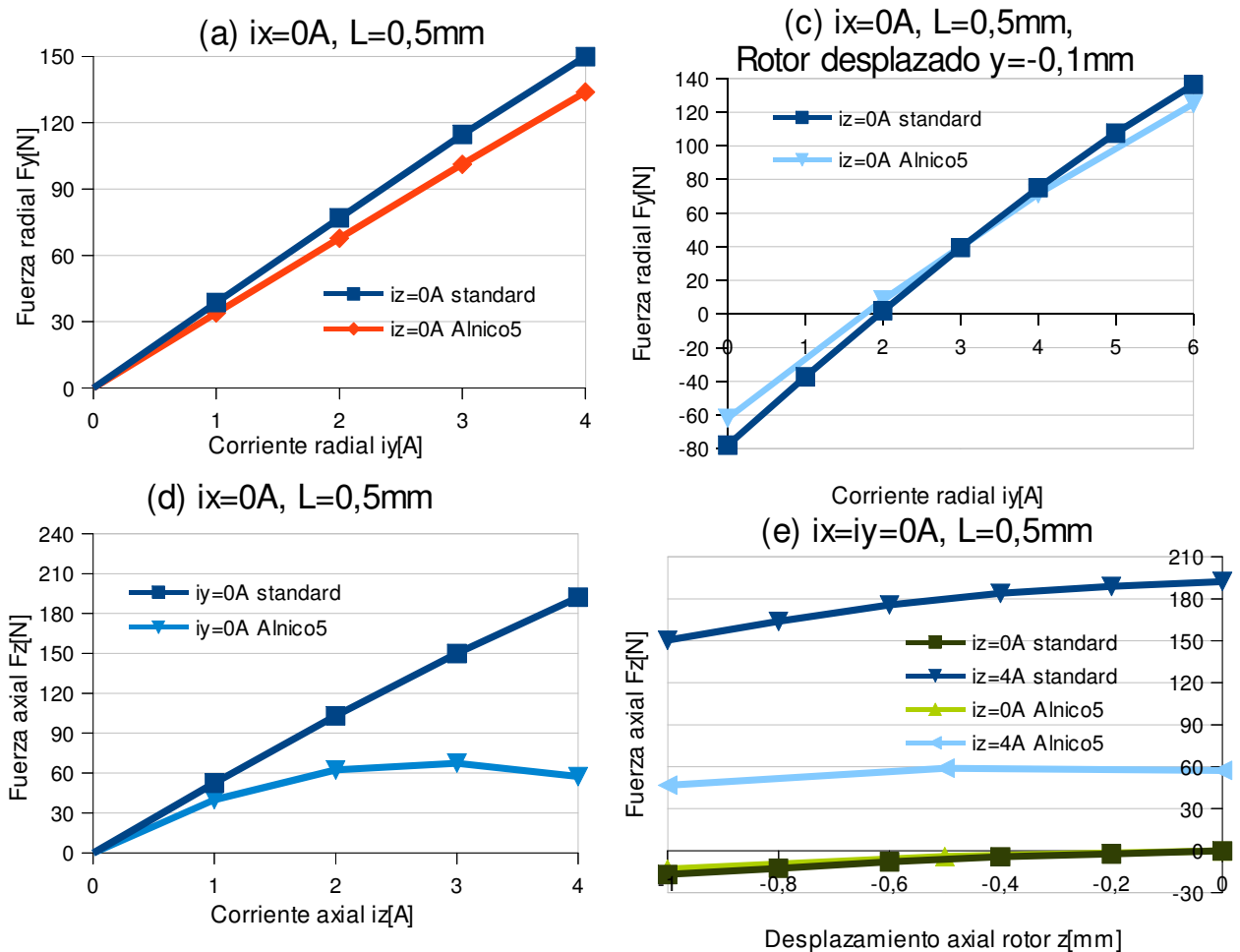


Figura 39. Gráficas comparando resultados de Fuerza con diferentes imanes.

Por tanto solo se pueden usar imanes cuya zona lineal coincida con los rangos de H a los que van a ser sometidos (entre  $2 \cdot 10^4$  y  $10^5$  A/m en el modelo con SmCo).

## IV. Resultados de los modelos 2D

En la memoria se han mostrado algunos resultados comparando el modelo standard 3D en Opera y los modelos 2D en femm 4.2. En este anexo se muestran resultados más extensos y resultados en diferentes condiciones, modificando materiales y dimensiones en ambos modelos.

En estas gráficas de comparación el modelo standard es el modelo 3D.

### IV.I. Calculo 2D de la fuerza axial Fz

En la memoria se ha mostrado la Fuerza axial Fz con el rotor centrado en función de la corriente axial iz (Figura 40), también la Fuerza axial Fz para varias corrientes axiales iz en función del desplazamiento axial en el eje z (hasta un máximo de z=-1mm).

En las figuras 41, 42 y 43 se muestra la Fuerza axial en el modelo standard simulando desplazamientos de hasta z=-3mm y probando varias longitudes de solapamiento axial (L).

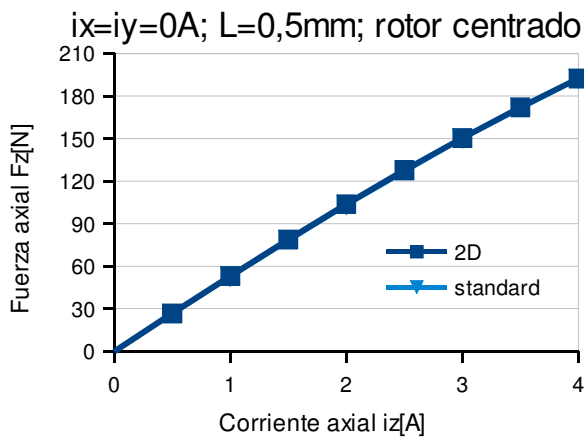


Figura 40. Fuerza axial Fz con el rotor centrado en función de la corriente axial iz.

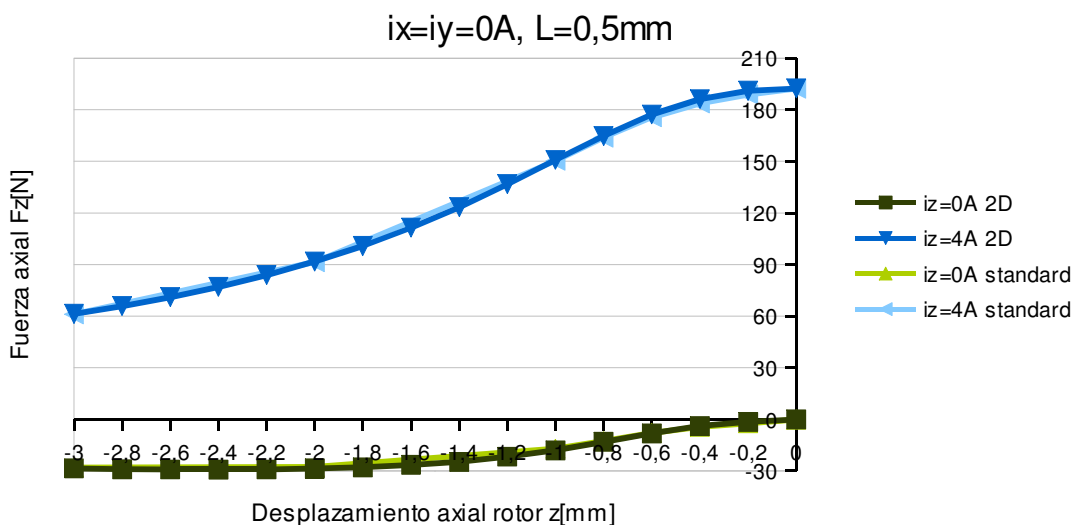


Figura 41. Fuerza axial Fz para varias corrientes axiales iz en función del desplazamiento axial en el eje z. Solapamiento axial 0,5 mm.

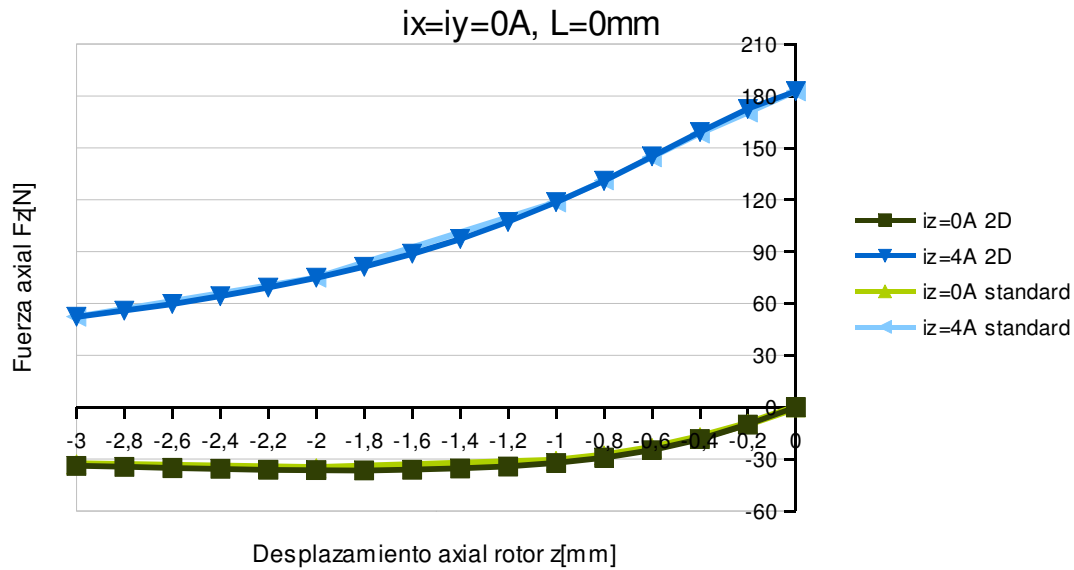


Figura 42. Fuerza axial  $F_z$  para varias corrientes axiales  $i_z$  en función del desplazamiento axial en el eje  $z$ . Solapamiento axial 0 mm.

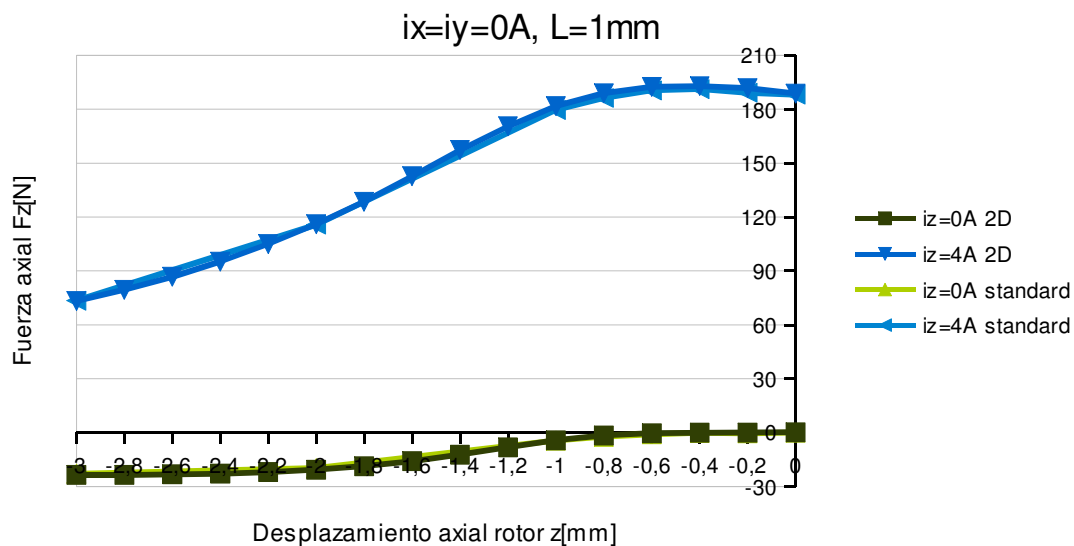


Figura 43. Fuerza axial  $F_z$  para varias corrientes axiales  $i_z$  en función del desplazamiento axial en el eje  $z$ . Solapamiento axial 1 mm.

En la Figura 44 se comparan resultados modificando el material magnético. Se utiliza *Stainless Steel 416* (un acero inoxidable) en vez de Hierro Puro, este acero tiene una permeabilidad magnética menor.

En la Figura 45 se comparan resultados modificando los imanes permanentes. Se utiliza *Alnico5* (un imán con curva de magnetización no lineal) en vez de Samario-Cobalto (un imán lineal con mayor valor de campo coercitivo  $H_c$ ). Notar que una de las gráficas presenta algunas desviaciones notables.

Se puede concluir que el modelo 2D axisimétrico utilizado para este rodamiento magnético predice bastante bien la fuerza axial  $F_z$  para diferentes materiales y modificaciones geométricas sencillas.

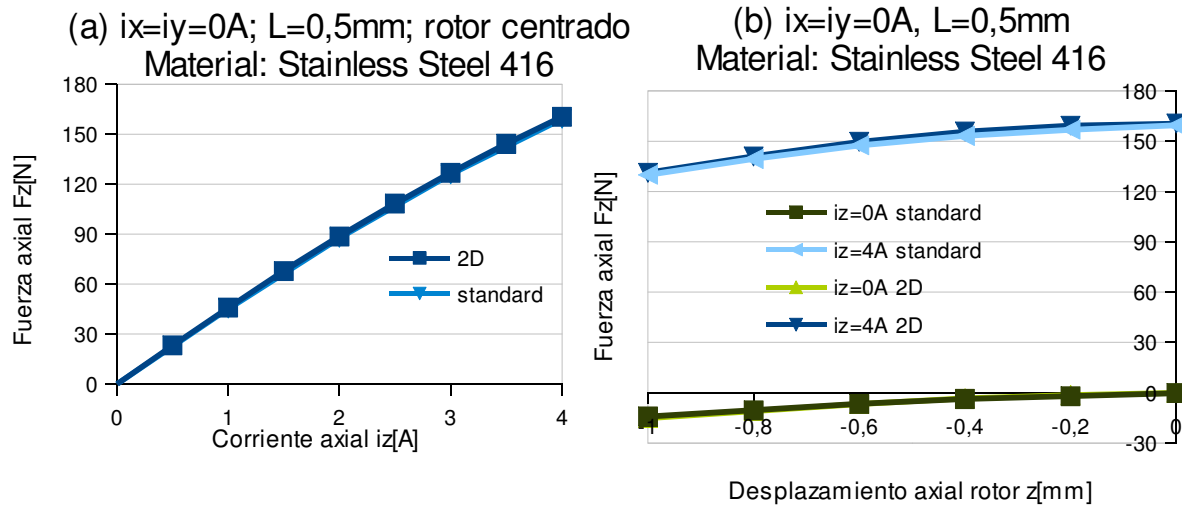


Figura 44. Resultados cuando el material magnético es acero inoxidable 416. A la izquierda Fuerza axial  $F_z$  con el rotor centrado, en función de la corriente axial  $i_z$ . A la derecha Fuerza axial  $F_z$  para varias corrientes axiales  $i_z$  en función del desplazamiento axial en el eje  $z$ .

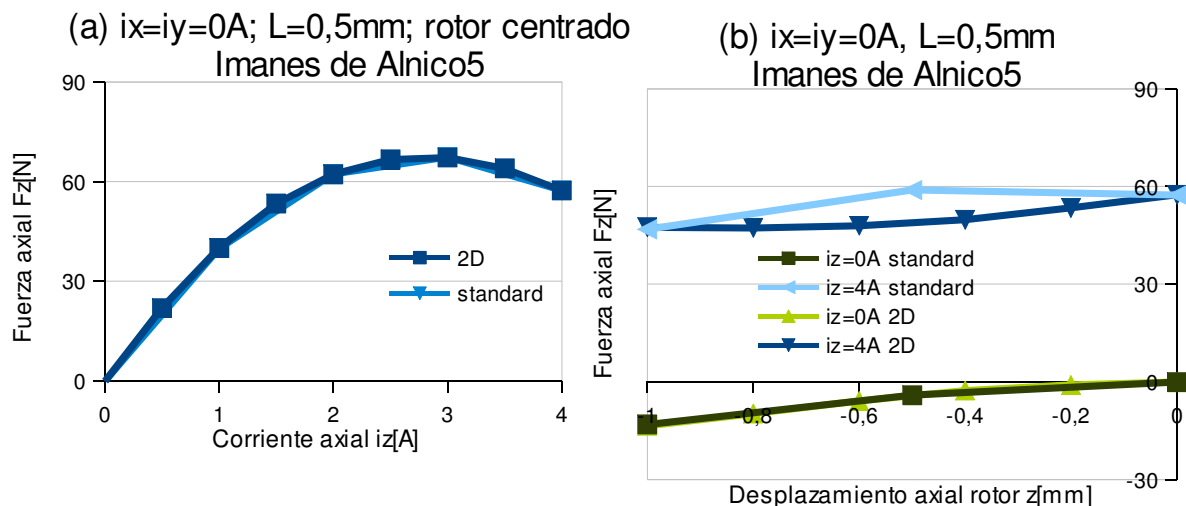


Figura 45. Resultados cuando los imanes permanentes son de Alnico5. A la izquierda Fuerza axial  $F_z$  con el rotor centrado, en función de la corriente axial  $i_z$ . A la derecha Fuerza axial  $F_z$  para varias corrientes axiales  $i_z$  en función del desplazamiento axial en el eje  $z$ .

#### IV.II. Cálculo 2D de la fuerza radial $F_y$

En la memoria se ha mostrado la Fuerza radial  $F_y$  en función de la corriente radial  $i_y$  para el rotor centrado y el rotor desplazado  $Y=-0,1$  mm (Figura 13).

En la Figura 46 se comparan los resultados 2D y 3D (standard) cuando el material magnético es acero inoxidable 416 en vez de hierro puro. En la Figura 47 se vuelven a comparar los resultados 2D y 3D para la fuerza radial, pero esta vez se han cambiado los imanes permanentes de Samario-Cobalto por unos de Alnico5.

Aunque los resultados son similares los errores pueden ser del 10% aprox.

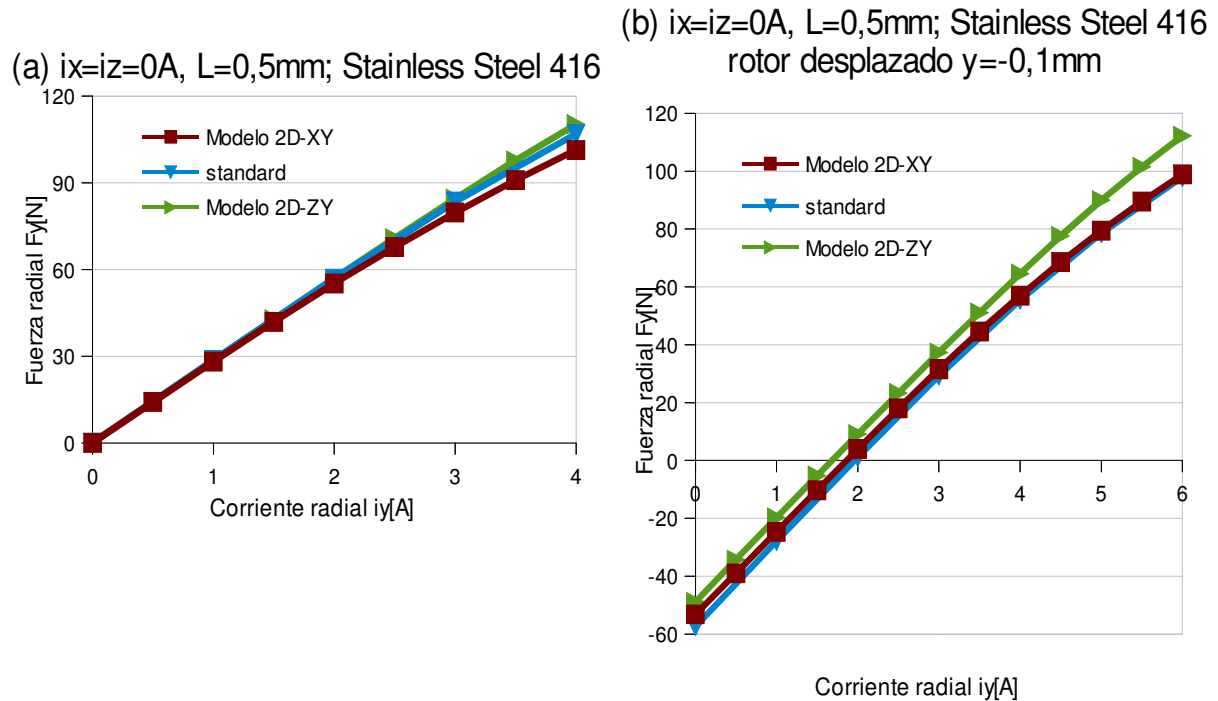


Figura 46. Resultados cuando el material magnético es acero inoxidable 416. A la izquierda Fuerza radial  $F_y$  con el rotor centrado, en función de la corriente radial  $i_y$ . A la derecha el rotor está desplazado  $-0,1mm$  hacia abajo.

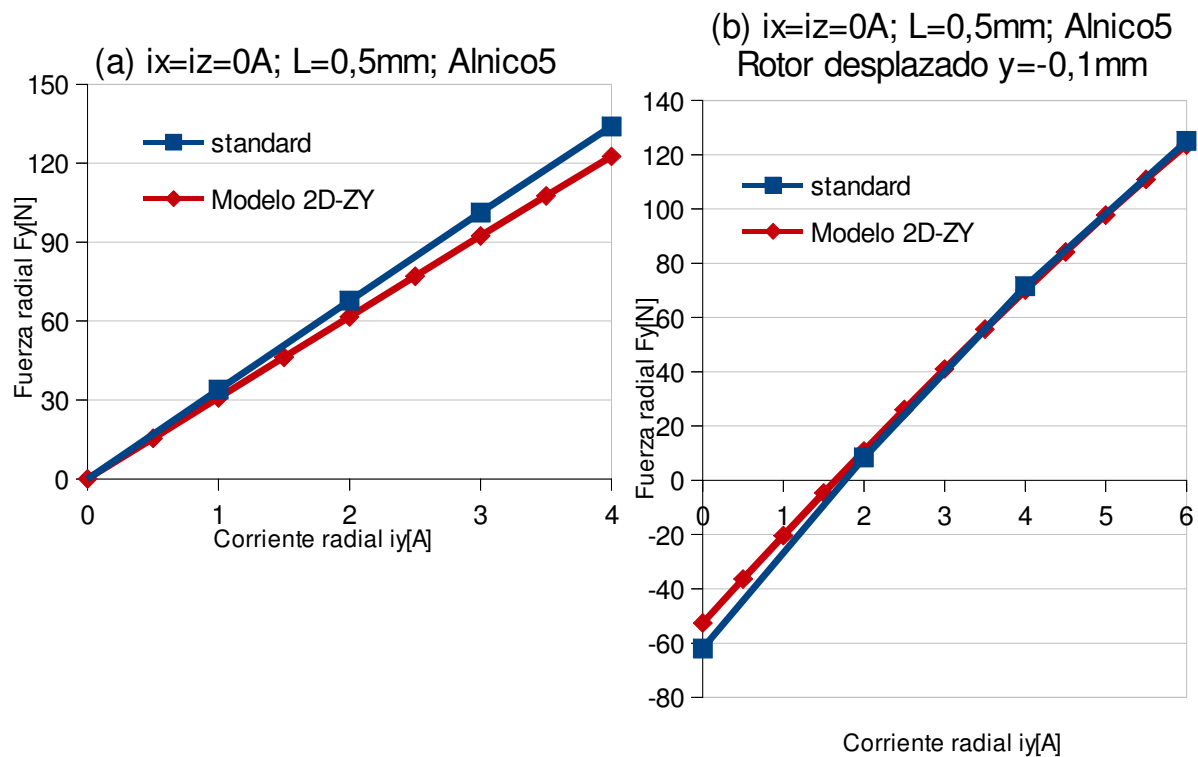


Figura 47. Resultados cuando los imanes permanentes son de Alnico5. A la izquierda Fuerza radial  $F_y$  con el rotor centrado, en función de la corriente radial  $i_y$ . A la derecha el rotor está desplazado  $-0,1mm$  hacia abajo.

## V. Cálculo de fuerzas en Opera y femm 4.2.

En el punto 4.3. se ha dicho que calcular fuerzas por varios métodos y comprobar que dan el mismo resultado no es necesariamente una forma válida de valorar la calidad de un modelo [17]. Además el método más apropiado puede depender del dispositivo simulado, hemos concluido que el mejor método para realizar este cálculo en Opera es el *Maxwell Stress Tensor*. A continuación se va a mostrar como se llega a dicha conclusión, en otros puntos explicaremos brevemente cada método.

En primer lugar hay que comprobar si efectivamente se obtienen resultados diferentes al utilizar métodos de cálculo de fuerzas diferentes. Los métodos comparados son los habitualmente disponibles:

- El método de los trabajos virtuales, calculando fuerza en función de la diferencia de energías al realizar un desplazamiento.
- El método del Tensor de Stress de Maxwell, integrando campos magnéticos en una superficie.

Aunque sirve cualquier modelo, hemos escogido un circuito magnético clásico similar a un altavoz. El circuito se ha modelado de forma axisimétrica en 2D (femm 4.2), para mayor similitud con el modelado del mismo en 3D (Opera). El circuito clásico contiene una bobina que al ser excitada produce el movimiento de una pieza metálica; en las pruebas se ha simulado esa versión, un modelo alternativo que contiene un imán permanente y un modelo que tiene imán y bobina (Figura 48).

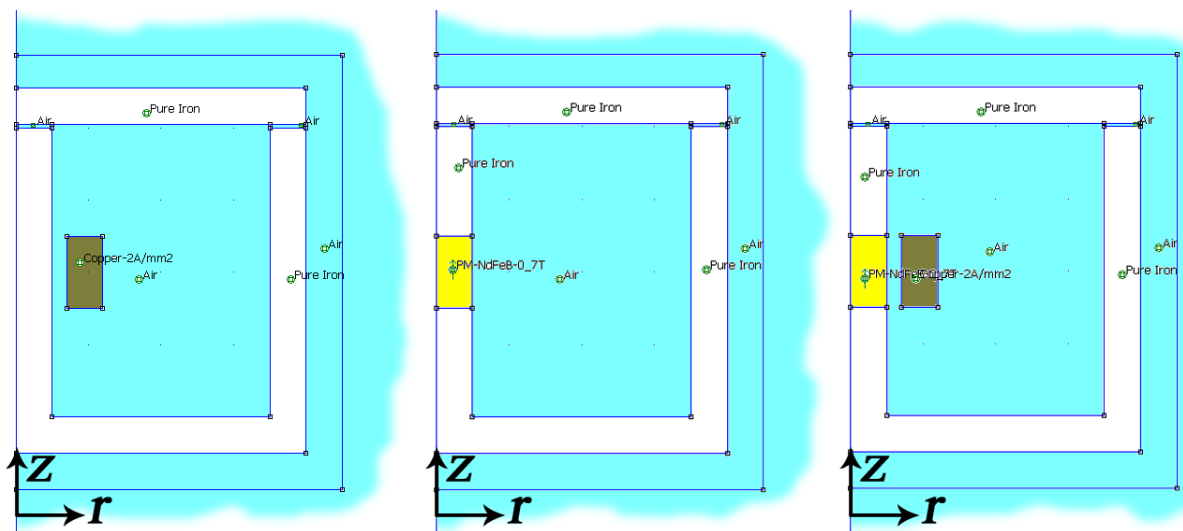


Figura 48. Modelos 2D axisimétricos del altavoz de prueba, coloreados según materiales (imán en amarillo, cobre en marrón, hierro en blanco, aire en azul). A la izquierda modelo con bobina, en el centro modelo con imán, a la derecha modelo con imán y bobina.

Las dimensiones se pueden ver en la figura 49. La bobina tiene sección  $50 \text{ mm}^2$  y densidad de corriente  $J=2 \text{ A/mm}^2$ . El imán es de NdFeB de  $0,7 \text{ T}$  ( $H_c=-435000 \text{ A/m}$ ,  $\mu_r=1,28$ ) imantado en dirección axial. El modelo 3D en Opera utiliza conductores modelados como conductores de Biot & Savart.

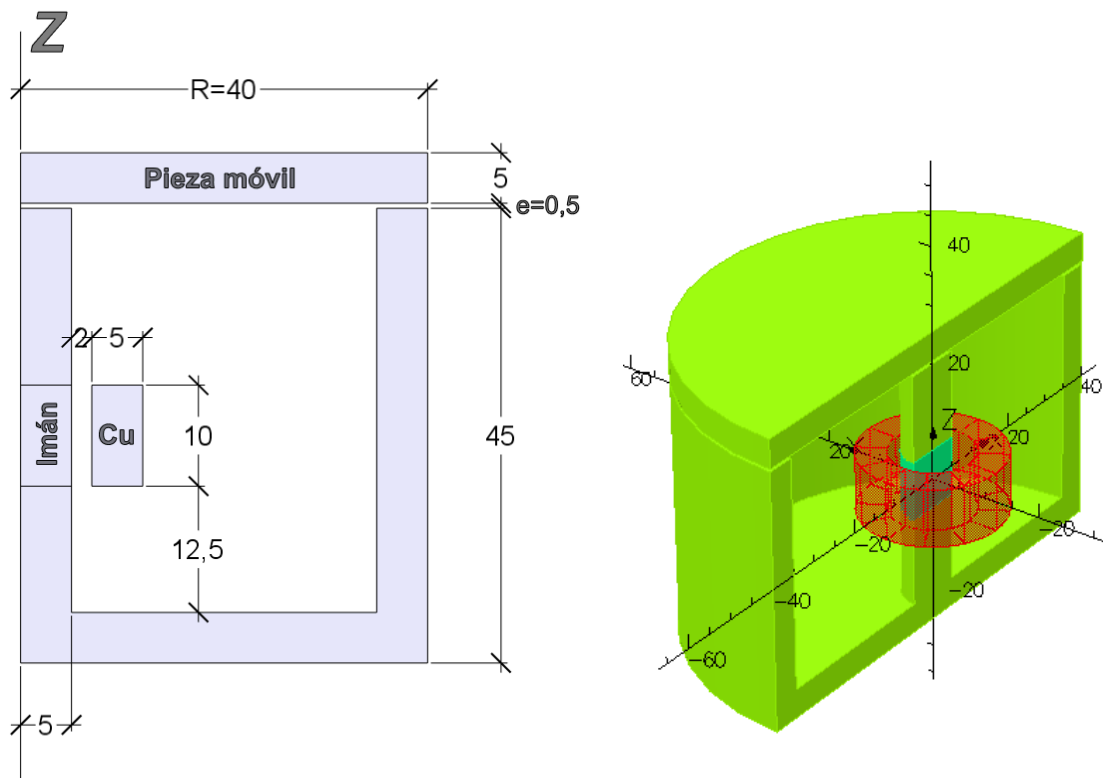


Figura 49. Altavoz axisimétrico para las pruebas. A la izquierda corte Z-r con dimensiones en milímetros. A la derecha corte en el plano ZX del modelo 3D del altavoz en Opera.

La Tabla 3 resume los resultados más importantes para las simulaciones. La diferencia de coenergías es la diferencia entre el cálculo de coenergía [J] con femm 4.2 y Opera, porcentualmente respecto del cálculo en Opera que suele ser menor. Las diferencias 2D-3D indican la diferencia en el cálculo de la fuerza  $F_z$  con femm 4.2 y Opera para el método indicado, porcentualmente respecto del cálculo en Opera. La diferencia entre los dos métodos en Opera es la diferencia porcentual entre el cálculo de  $F_z$  con el Tensor de Stress de Maxwell y con Trabajos Virtuales, ambos en Opera. La diferencia entre métodos en femm 4.2 no se ha indicado pero es siempre menor del 3%.

Las simulaciones iniciales en Opera se han realizado con elementos de geometría lineal, las simulaciones con "más detalle" utilizan geometría de elementos curvos y un mallado más fino, la simulación con "mucho más detalle" utiliza además un mallado mucho más fino (mucho más fino que en el modelo standard que usamos para el rodamiento, pero este modelo se puede resolver con simetrías).

En femm 4.2. (MEF 2D) se comprueba rápidamente que ambos métodos dan resultados muy similares en todo caso. En Opera (MEF 3D) ambos métodos solo dan resultados similares cuando en el modelo no hay imanes y corrientes a la vez, cuando hay imanes y bobinas activas (como en nuestro rodamiento, en donde las diferencias eran muy grandes) ambos métodos pueden dar resultados muy diferentes, sobre todo si el mallado no es muy fino.



Simulación	Diferencia Coenergía	Diferencia 2D-3D con Tensor de Stress de Maxwell	Diferencia 2D-3D con método de trabajos virtuales	Diferencia entre los dos métodos en Opera.
Solo bobina	3,3%	-4,03%	1,22%	3,15%
Dos bobinas	-0,5%	-4,31%	-1,68%	0,83%
Solo imán	3967%	14,62%	16,84%	3,33%
Solo imán, más detalle	3181%	1,89%	1,13%	-0,00%
Imán y bobina	3300%	2,94%	14%	11,47%
Imán y bobina, más detalle	3188%	1,10%	10%	9,04%
Imán y bobina, mucho más detalle.	3169%	0,98%	8,79%	7,93%

Tabla 3. Resumen de resultados de las pruebas de cálculo de energías y fuerzas en femm 4.2 y Opera, usando dos métodos de cálculo.

Hay más de una razón para que femm 4.2. y Opera se comporten de forma diferente en este aspecto. En primer lugar Opera utiliza su propio algoritmo de cálculo para acelerar la solución (ver referencia [23] para una descripción del cálculo de campos magnéticos en Opera). Según la referencia [17] las aproximaciones numéricas utilizadas por los programas de MEF para solucionar las ecuaciones de los campos magnéticos es una de las causas de que diferentes métodos no den la misma solución. En segundo lugar, hemos observado que al mallar mejor en Opera las soluciones de los dos métodos tienden a converger; hay que mallar mucho mejor que en femm, tal vez por que el proceso de mallado en 2D es mucho más simple y fiable que en 3D. Finalmente femm 4.2 y Opera dan resultados muy diferentes al calcular la Coenergía cuando hay imanes permanentes en el modelo, de dos ordenes de magnitud. Sin embargo la diferencia no es tanta al calcular la Fuerza por medio de las energías, además la fuerza que calcula Opera tiende a converger con la de femm al mallar más y más fino.

He aquí una posible explicación por la que el método de los trabajos virtuales da peores resultados que el Tensor de Stress en Opera: El método de los trabajos virtuales requiere calcular la energía contenida en todo el modelo, en dos simulaciones diferentes en las que la pieza se mueve. Aunque la relación entre energía magnética y densidad de campo sea el múltiplo de dos magnitudes (B·H) lo cierto es que grandes volúmenes con pequeños campos son relevantes para el cálculo de la energía total. Al aplicar el Método del Tensor de Stress basta con mallar muy bien el volumen cercano a la superficie de integración (normalmente entrehierros), pero al aplicar el método de los trabajos virtuales también se deben mallar bien los volúmenes cruzados por flujos dispersos. Dadas las dificultades del mallado en 3D es razonable que los errores sean mayores al integrar en volumen (p.e. energías). Respecto a por que los resultados son mucho peores cuando hay imanes permanentes en el modelo no hay una explicación convincente, aunque tampoco sabemos con exactitud la manera que tiene Opera de integrarlos en el cálculo.

Como conclusión, se ha elegido el Tensor de Stress de Maxwell para calcular fuerzas en femm 4.2. ya que es más rápido y cómodo que el método de trabajos virtuales. En Opera se ha tenido que determinar qué método es más preciso para el tamaño de mallado que se podía emplear, para ello se han construido modelos axisimétricos en 2D y 3D, usando como objetivo los resultados de los modelos 2D con el mallado más fino. De nuevo el Tensor de Stress de Maxwell ha sido el método elegido ya que el método de los trabajos virtuales no da buenos resultados con un mallado razonable en Opera.

## V.I. El método del Tensor de Stress de Maxwell

El método del Tensor de Stress de Maxwell es empleado frecuentemente en el cálculo de Fuerzas y Pares por métodos numéricos. Debido a inexactitudes numéricas (por ejemplo en MEF) el Par obtenido puede ser impreciso. Para calcular el Par existen métodos alternativos, p.e. el método de Arkkio y el método de la corriente magnetizante, ambos variantes del Tensor de Stress de Maxwell [19].

Este método es rápido y solo requiere el uso de una simulación (el método de trabajos virtuales requiere dos o más).

El método parte de la ley de Faraday y define el tensor de stress  $\sigma_F$  como una presión en una dirección que depende de las líneas de flujo. El tensor es función de la mitad de la permeabilidad magnética del medio y del cuadrado de la intensidad de campo magnético H (Formula 1)

$$\sigma_F = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \quad (\text{Formula 1}) [19]$$

Descomponiendo el tensor en sus componentes normal y tangencial podemos calcular Fuerza y Par, tras integrar sobre la superficie de interés.

Realizando sustituciones el método puede aplicarse de diferentes maneras, la forma habitual es integrar los tensores de stress sobre una superficie de aire (con permeabilidad magnética igual a la del vacío) muy cercana a la pieza sobre la que se calcula la Fuerza. La Fuerza magnética se expresa además en función de la integral de superficie del cuadrado de la densidad de flujo magnético B.

La Formula 2 muestra el cálculo de fuerzas en femm 4.2, es la fuerza normal a una superficie diferencial. La Fuerza total se obtiene integrando a lo largo de una superficie cerrada de integración en el aire (representada en 2D por una camino lineal), descomponiendo el vector en componentes se obtienen las fuerzas en cada dirección (Fx y Fy para simulaciones 2D planares, Fz para simulaciones axisimétricas) [20].

$$dF = \frac{1}{2} (H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - (H \cdot B)n) \quad (\text{Formula 2}) \text{ "n" denota la normal [20]}$$

La Figura 50 muestra el cálculo de fuerzas para simulaciones magnéticas en Opera (3D). Como la superficie de integración suele ser aire o el vacío,  $\mu$  es normalmente  $\mu_0$ . Opera permite la opción de integrar los tensores de stress a lo largo de superficies que cruzan materiales de diferentes permeabilidades magnéticas, pero eso requiere programar manualmente el proceso [21].

$$F_x = \int_s \left[ \frac{1}{\mu} B_x (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n}) - \frac{1}{2\mu} |\mathbf{B}|^2 n_x \right] ds$$

$$F_y = \int_s \left[ \frac{1}{\mu} B_y (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n}) - \frac{1}{2\mu} |\mathbf{B}|^2 n_y \right] ds$$

$$F_z = \int_s \left[ \frac{1}{\mu} B_z (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n}) - \frac{1}{2\mu} |\mathbf{B}|^2 n_z \right] ds$$

Figura 50. Formulas del método del Tensor de Stress de Maxwell en Opera [21].

Conceptualmente el método del Tensor de Stress sobre una superficie cerrada permite valorar de forma aproximada la dirección hacia la que se mueve una pieza rodeada de aire tras determinar donde aparecen los mayores campos magnéticos; para que exista Fuerza deben existir campos magnéticos de diferente magnitud en extremos opuestos como ya sabemos. Notar que los tensores de stress usados son normales a la cara exterior de la superficie y habitualmente positivos, es decir, el sentido del flujo total no es relevante en muchos casos, lo más relevante es el módulo del flujo total en la superficie (Figura 51). Sin embargo un tensor de stress puede tener sentido negativo (hacia dentro de la pieza), por ejemplo si H es tangente a la superficie [22].

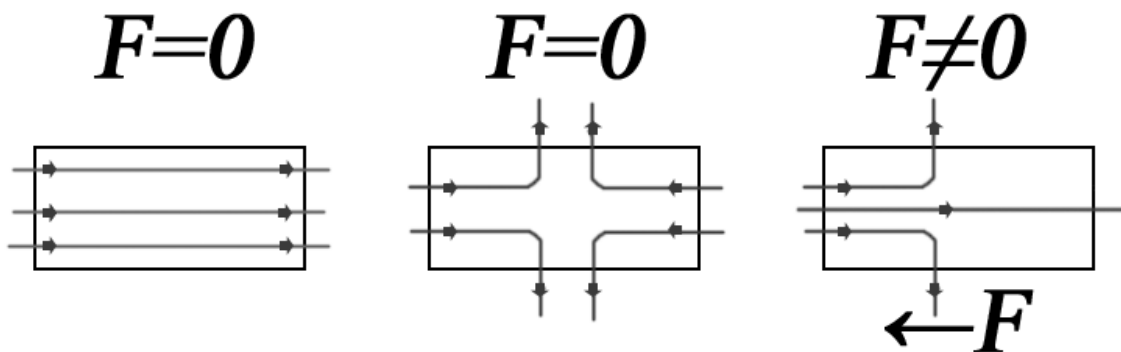


Figura 51. Relación entre flujos y fuerzas ilustrada en varios ejemplos simples. Los flujos que se superponen se restan o suman entre sí según su dirección (no ilustrado) pero de los flujos totales resultantes lo más relevante para el cálculo de la Fuerza es la magnitud del campo magnético normal a la superficie de la pieza móvil.

De cara al usuario de un programa de MEF hay varias consideraciones a tener en cuenta al utilizar el método del Tensor de Stress de Maxwell para calcular fuerzas en su modelo.

- El tensor de stress se integra a lo largo de una superficie cerrada que envuelve la pieza en la que se evalúa la Fuerza. La precisión de este cálculo depende del error en los cálculos de los campos magnéticos (B y/o H), por lo que hay que procurar que los cálculos sean más precisos en el volumen que cruza la superficie de integración [20][21].
- En el método habitual nunca se debe elegir como superficie de integración la superficie del objeto en estudio. Esa superficie es la frontera o *interface*

entre dos materiales con diferentes permeabilidades y el programa va a utilizar la permeabilidad magnética del vacío o aire. Además las soluciones de B y H tienen mayor error en los lugares donde los campos varían más rápido de un elemento a otro; este error es particularmente notable en los puntos adyacentes a las fronteras entre materiales, especialmente en el cálculo de la componente tangencial (se usa para calcular el Par). Los errores en el cálculo de B también son particularmente notables en las esquinas [20][21].

- En teoría (si la solución del campo magnético ha sido exacta) el método del Tensor de Stress debe dar los mismos resultados independientemente de la superficie de integración elegida. Esto significa que podemos elegir una superficie de integración alejada de la pieza, y de cualquier material distinto del aire. Femm 4.2 aconseja elegir una superficie de integración alejada al menos 2 elementos de cualquier frontera o *interface* (cada elemento es un triángulo usado en el mallado del problema)[20].
- En la práctica diferentes superficies de integración proporcionan soluciones diferentes. Esta diferencia puede usarse para estimar cualitativamente el error cometido. Es aconsejable integrar más de una superficie y después promediar los resultados [17]
- Hay que utilizar un mallado fino en el volumen que cruza la superficie de integración elegida. Por un lado necesitamos espacios con muchos elementos para poder escoger una superficie alejada de todas las *interfaces*. Por otro lado el cálculo depende de B<sup>2</sup>, lo que implica mayores errores, la única forma de recuperar ese error es mejorar la precisión del cálculo de B (p.e. mallando mejor, en Opera tenemos esta y otras opciones como usar elementos cuadráticos en vez de lineales). Un mallado es lo suficientemente fino cuando cambiar el tamaño del mallado apenas altera la solución [20].

En el modelo usado en este Trabajo Fin de Máster se han seguido la mayoría de recomendaciones arriba señaladas. En Opera no se traza una superficie de integración si no que se elige el objeto de interés, se escoge una o más capas de elementos alrededor del objeto y se utiliza la superficie exterior resultante como superficie de integración. No se han realizado cálculos en múltiples superficies para después promediarlas, el mallado de los entrehierros que se podía hacer en Opera no era lo bastante fino y fiable como para permitirlo. En Opera la superficie de integración está alejada un elemento desde el rotor, las comparaciones en modelos axisimétricos indican que esa era la mejor superficie de integración. La superficie de integración en Opera no tiene esquinas de 90° (se ha forzado a Opera a mallar el aire alrededor del tubo del rotor de una forma determinada, en forma de tubo con esquinas biseladas).

Como conclusión, en esta sección se ha explicado brevemente el método de cálculo de fuerzas empleado en la simulación, así como la forma en que debe aplicarse y la forma en que se ha podido aplicar en la simulación de este TFM.

## V.II. El método de los trabajos virtuales

El método de los trabajos virtuales es un método general para calcular fuerzas a partir del cálculo de energías. Se basa en la relación Fuerza igual a Energía por desplazamiento (siendo esa energía la empleada en desplazar el objeto), o al hecho de que un movimiento causará una variación en la energía total del sistema. Por tanto la Fuerza es igual a la diferencia de energías en el sistema al realizar un desplazamiento, dividido entre la magnitud de dicho desplazamiento (Formula 3) para movimientos unidimensionales en un problema magnético).

$$F = \frac{Wc(p+\delta) - Wc(p)}{\delta}$$

(Formula 3) "p" es la posición inicial, "δ" es el desplazamiento, "Wc" es la coenergía magnética de todo el sistema en la posición apropiada [20].

El método supone que la fuerza no varía significativamente durante el desplazamiento, por lo que este desplazamiento debe ser pequeño [17]. También supone que la diferencia de energía se emplea en mover la pieza (p.e. no hay pérdidas por rozamiento ni se inducen corrientes). Según las referencias [20][22] la corriente debe ser constante para emplear este método.

Al emplear MEF surgen errores por el cálculo de la energía (que depende de los campos magnéticos), el error es especialmente notable al trabajar con pequeñas fuerzas. Este error mejora si todas las simulaciones utilizan un mallado similar [17]. Por otro lado cualquier mejora en el cálculo de B (p.e. mallando más fino) hará más preciso el cálculo de la Energía.

El cálculo también puede mejorarse creando una curva suavizada a partir de las energías calculadas y utilizar esta curva para calcular la Fuerza. Por otro lado la Fuerza calculada solo se correspondería a la Fuerza en los dos puntos donde se calcula la Energía si el desplazamiento es infinitesimal o la Fuerza apenas varía, en otro caso la Fuerza calculada corresponde más bien a punto medio en la trayectoria del desplazamiento virtual.

En un problema magnético se puede calcular la Energía magnética (con la formulación lineal  $BH/2$  o la no lineal, según los materiales sean lineales o no) y la Coenergía magnética. La Energía se puede emplear para calcular la inductancia [20] pero para calcular Fuerza y Par se utiliza la Coenergía (si bien la Coenergía es igual a la Energía en problemas lineales) [22].

La Coenergía en un punto es una integral de B y H, para un volumen se integra en el espacio. Para este método debe aplicarse la integral a todo el volumen del sistema (Formula 4). La Figura 52 muestra gráficamente los conceptos de Energía y Coenergía magnética almacenada en un punto con una curva de permeabilidad determinada.

$$Wc = \int \left( \int_0^H B \cdot dH' \right) dV$$

(Formula 4) Coenergía magnética contenida en un volumen.

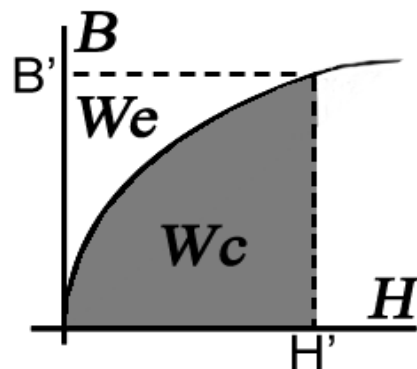


Figura 52. Explicación gráfica de Energía ( $W_e$ ) y Coenergía ( $W_c$ ) magnética contenida en un punto con una curva de magnetización no lineal en el que hay una intensidad de campo  $H'$ .

Este método es computacionalmente más costoso, requiere dos o más simulaciones (una inicial, más otra para el desplazamiento en cada eje). En Opera (3D) el cálculo de la Energía en todo el volumen es mucho más lento que el cálculo del Tensor de Stress de Maxwell sobre una superficie cerrada.

Este método no ha dado buenos resultados en Opera en modelos que tienen bobinas activas e imanes (Figura 53). Para dar buenos resultados se requiere mallar mucho más fino, no solo los entrehierros si no también volúmenes con flujos dispersos. Todo volumen cuya coenergía contenida varíe con el desplazamiento requiere un buen mallado para que este método de buenos resultados.

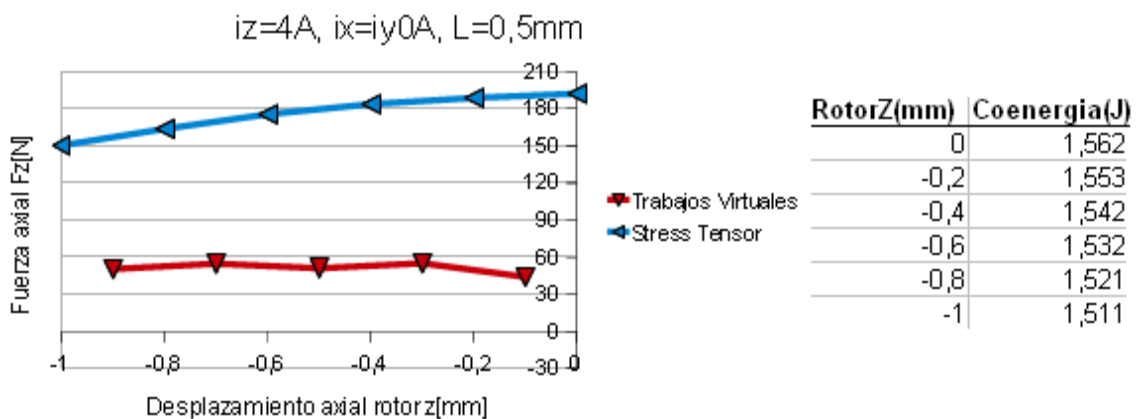


Figura 53. Comparación entre los resultados del cálculo de fuerzas obtenido mediante el Tensor de Stress de Maxwell y el Método de Trabajos Virtuales. Se ha cálculo  $F_z$  en función del desplazamiento axial ( $z$ ) cuando  $i_z=4A$ .

Como conclusión, en esta sección se ha explicado brevemente cómo se aplica el método de los trabajos virtuales a un problema magnetoestático y cuales son los problemas que se presentan al utilizarlo en un programa de MEF 3D como Opera.

## **VI. Modificaciones del rodamiento**

En este anexo se van a mostrar y comentar varias modificaciones propuestas en la patente [16] asociada a la referencia [1].

La Figura 54 contiene los esquemas de las tres modificaciones, representados con cortes en el plano ZY. Se han coloreado los imanes en verde y las bobinas en marrón.

**Figura 54.a:** Imanes permanentes finos (en su dimensión z), para ello el estátor axial tiene protuberancias (pieza 4c) en forma de anillos a la altura de los imanes. Los imanes siguen estando encajados en la misma posición. La protuberancia podría colocarse también en el estátor radial.

El objetivo es reducir los costes de fabricación al utilizar imanes más finos.

Se han realizado algunas simulaciones y se ha determinado que reducir el volumen del imán reduce la Fuerza que puede producir el rodamiento, pero no en la misma proporción. En el modelo standard, si reducimos el volumen de imán a la mitad realizando esta modificación, las fuerzas producidas se reducen en aprox. un 25% (incluso las desestabilizadoras). Por tanto la dimensión Z de los imanes es un parámetro con el que se puede jugar para optimizar los costes o para alterar las fuerzas producidas por el dispositivo.

**Figura 54.b:** Se ha cambiado la disposición de los imanes y de los bobinados axiales, ahora todos los imanes son un único anillo pero tenemos dos bobinas axiales. Notar que las bobinas axiales siguen teniendo su eje en Z. El Conjunto se sigue sosteniendo con adhesivos como p.e. resina epoxy.

El principio de funcionamiento sigue siendo muy similar, la referencia[16] asegura que al reducir el número de imanes se puede reducir el coste de fabricación.

**Figura 54.c:** Esta es posiblemente la modificación de mayor interés. El objetivo es que el rodamiento produzca fuerza axial en una dirección incluso cuando la corriente axial  $i_z$  es cero (introduce un *offset* a la Fuerza axial).

Se ha modificado un lado del estátor axial de manera que no sea simétrico, de esa manera se crea una fuerza natural hacia la derecha del diagrama. El dispositivo se ha pensado para equipos que introducen perturbaciones constantes hacia un lado, pero parece que podría ser de utilidad para máquinas con eje vertical.

Se han realizado algunas simulaciones y efectivamente aparece una Fuerza axial notable hacia la protuberancia marcada con dimensiones 4d. en la Figura 54.c.



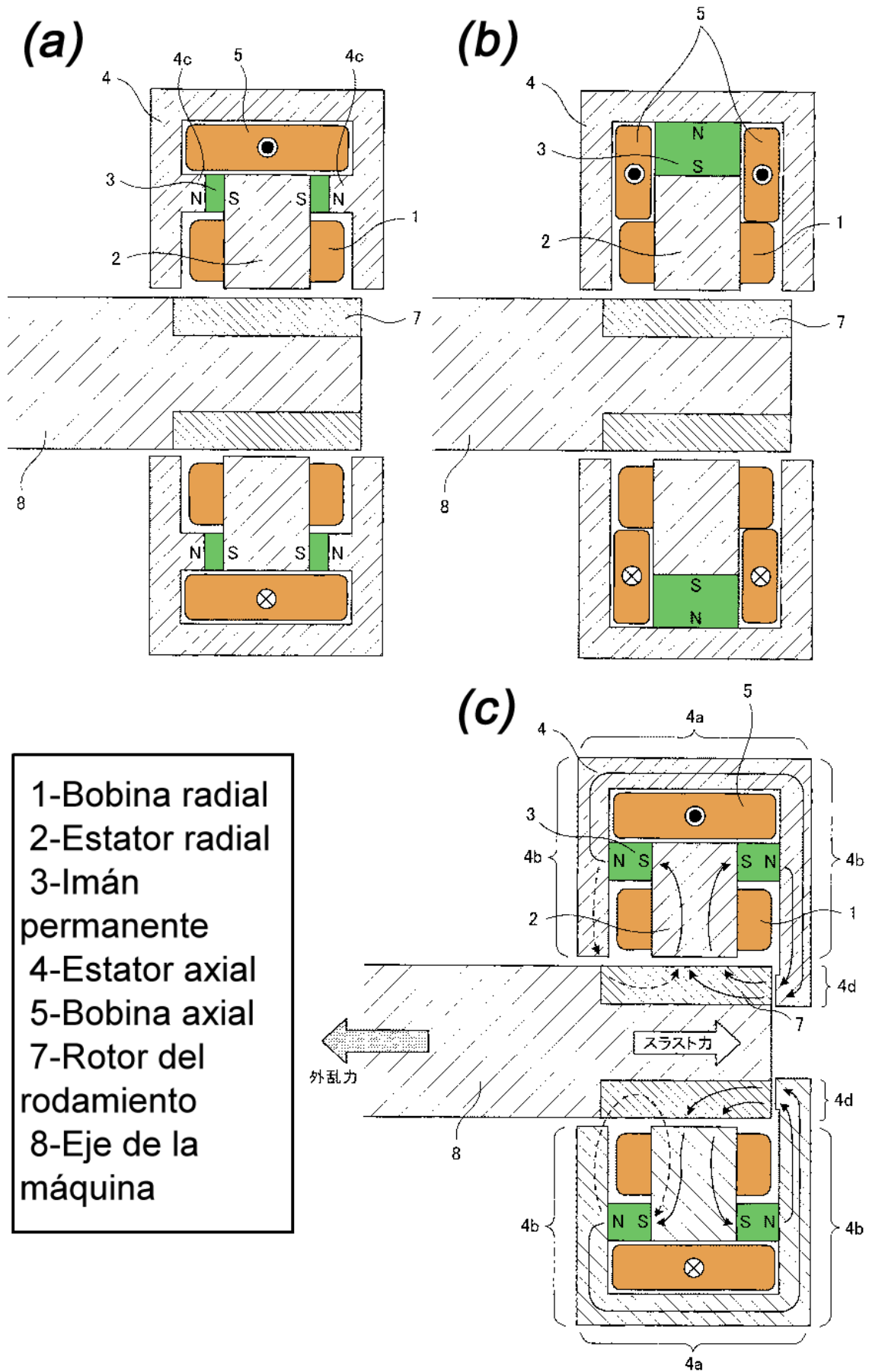


Figura 54. Modificaciones propuestas en la patente, imagen modificada de [16].

## **VII. Referencias**

Referencias utilizadas exclusivamente en los anexos.

[19] Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen, Valéria Hrabovcová; "Design of Rotating Electrical Machines"; John Wiley & Sons Ltd, Wiltshire; 2008

[20] David Meeker; "Finite Element Method Magnetics Version 4.2 User's Manual"; Octubre, 2010

[21] "Opera-3d Reference Manual Version 13.0", Cobham Technical Services, Vector Fields Software.

[22] Joao Pedro A. Bastos, Nelson Sadowski; "Electromagnetic Modelling by Finite Element Methods"; 2003

[23] Antonio Usón Sardaña; "Aplicación del Método de Elementos Finitos al Perfeccionamiento de Pinzas Amperimétricas"; tesis doctoral de la Universidad de Zaragoza; 2007.

### VIII. Códigos fuente en Opera

A continuación se incluyen los dos *scripts*.comi más importantes en Opera, a estos se le podría añadir un tercero utilizado exclusivamente para volver a realizar el postprocesado de varios archivos ya resueltos utilizando opciones adicionales.

El enfoque utilizado a sido realizar un proceso secuencial en el que se programan una serie de simulaciones con ciertas características, por ejemplo para una corriente dada se van simulando varias posiciones del rotor.

El script principal (RodaMagActivo.comi) se ejecuta en el programa *Modeller*, este crea el modelo, lo malla, crea la base de datos y llama al programa *Solver* que ejecuta el algoritmo de solución TOSCA, *Modeller* queda esperando con el *script* en pausa. La ejecución de *Solver* consume la mayor parte del tiempo utilizado, una vez terminada la solución *Solver* se cierra y *Modeller* llama al programa de Postprocesado haciendo que este se abra ejecutando el script de postprocesado (RodaMagActivoPostProc). Una vez completado el postprocesado *Modeller* vuelve a empezar con un nuevo modelo.

La experiencia indica que este enfoque no ha sido el más adecuado. Por un lado no hace un uso muy eficiente de las licencias de Opera, ya que estas funcionan por programa (*Modeller*, *Solver*, *Post-processor*) y con este enfoque tenemos que emplear una licencia de *Modeller* cuando mantiene el *script* en espera mientras *Solver* hace su trabajo. En segundo lugar *Solver* es un programa que solo funciona en un procesador, por lo que no saca partido de los procesadores actuales con múltiples núcleos. Otro problema es que cualquier error rompe el proceso secuencial y volver a empezar desde cierto punto complica la programación. Finalmente es frecuente que se tengan que volver a postprocesar las simulaciones a posteriori para extraer nuevos datos o cambiar el formato, por lo que el proceso secuencial no da muchas ventajas.

Un error que se ha encontrado con frecuencia es que *Modeller* no ha podido emplear suficiente memoria RAM para mallar un modelo, tras realizar varias simulaciones (el problema desaparece cuando se reinicia *Modeller*). Esto sugiere que Opera tiene un *Memory Leak*, lo que hace desaconsejable utilizar un largo proceso secuencial, especialmente en SO Windows de 32 bits (que tienen una gestión de memoria RAM limitada). Windows XP (el utilizado en este TFM) solo permite que un proceso acceda a aproximadamente 2 GB de RAM, en la práctica esto permite solucionar y postprocesar archivos de solución de hasta 1GB aproximadamente.

Para futuros usos se aconseja:

- Utilizar un SO Windows de 64 bits.
- Modelar, mallar y crear las bases de datos en un proceso secuencial con un *script* *Modeller*, pero no solucionar inmediatamente.
- Opera permite dejar los archivos a solucionar en una cola que gestiona el mismo. Se pueden ir añadiendo a la cola por medio del *script* de *Modeller* y solucionarse cuando el usuario quiera, sin tener que utilizar licencias de *Modeller* y *Solver* a la vez.
- Una vez solucionadas todas las simulaciones, postprocesarlas con un script de posprocesado.

**VIII.I. Script RodaMagActivo.comi**

```
//-----
//-----
//MAGNETIC BEARING - SCRIPT PRINCIPAL PARA MODELLER
//v. 12-Febrero-2013
//Isaac Royo Silvestre, 2012. Universidad de Zaragoza.
//-----
//Rodamiento Magnético Activo.-
//Script .comi de Opera para ejecutar desde Modeller.
//Genera un modelo de rodamiento magnetico activo en Opera y lo modifica y analiza
//de forma automatizada.
//Se tiene que haber definido previamente el directorio de las simulaciones 3D en Opera ya
//que utiliza el directorio ya definido en Opera.
//El programa consta de varios archivos (colocar en el directorio 3D elegido en Opera):
// * Script .comi para Modeller (este archivo), el script principal
// * Script .comi para el PostProcesador, será llamado por el script para Modeller.
// * Archivos .bh con las curvas BH de los materiales
//El script genera multiples archivos durante su funcionamiento:
// * Los archivos habituales .opc y .op3 de Opera
// * Un archivo temporal para comunicar el .comi de Modeller y del postprocesador (.tmp por defecto)
// * Archivos de texto con resultados (.dat por defecto)
// * Archivos de imagen con resultados (.png por defecto)
// * Archivo tipo Log con datos de ejecucion del script (.log por defecto)
//Nota: Los archivos de texto resultantes son tablas en formato separado por espacios, los numeros tienen formato de decimales
//con punto y notacion cientifica (p.e. 1.2365E-3). La forma más sencilla de convertir los decimales a formato con coma, es
//simplemente reemplazar los puntos por comas, una vez abierto el archivo de texto en una programa de hoja de calculo.
//Debido a como funcionan las funciones de texto de Opera seguramente aparezcan multiples espacios seguidos. Así que al
//abrir los archivos en una hoja de calculo usar la opción "agrupar separadores" o similar que de la hoja de calculo.
//-----
//-----

//-----
//-----
//INICIALIZACION (Borramos el modelo anterior)
//Esta declaracion tambien borra constantes declaradas anteriormente por un script, así que este comando debe ir primero.
//Limitamos el Historial a 500 pasos para no consumir demasiada RAM
//-----
//Nota: Este metodo puede fallar si el usuario ha hecho muchas operaciones en Modeller
//sin tener un historial con capacidad infinita. En ese caso dara un error, pero al menos
//eso obligara al usuario a reiniciar Modeller manualmente para ejecutar este script.
UNDO STATE=ROOT | HISTORY STATES=500
//-----

//-----
//-----
//PARAMETROS DE LA GEOMETRIA
//Los nombres de las variables/constantes tienen que ser de longitud 16 caracteres, maximo
//-----

//¿Resolver con simetria? (default 0)
//0 (no, modelo completo) o 1 (sí, simetria alrededor del eje Z, campos tangenciales al eje)
//Realmente esto afecta a la creacion del body y la resolución, no a la geometria propiamente dicha.
//Sin embargo solo tiene sentido utilizar simetria cuando la geometria y corrientes usadas lo hacen conveniente.
//La simetria tambien permite hacer un corte limpio al objeto para ver como se esta mallando el aire.
//Si se esta utilizando simetria conviene ver el comando BACKGROUND más adelante para cambiar el numero de copias
//al que sea apropiado a la geometria.
$constant #SIMETRIA 0

//Dimensiones del estator de control Radial
//EstatorRadialL es la longitud en el eje z, en el modelo original esta longitud debería
//ser igual que la dimension Z de los polos (variable #PoloLong). Notar que este parametro
//tambien varía la dimension Z de los imanes permanentes (van encajados entre los dos estatores).
$constant #EstatorRadialL 18

//Dimensiones de los polos del estator de control Radial. Default grosor 16 y long 18.
//El cambio del grosor por encima de 16mm es problematico por que hay poco espacio y es posible que las bobinas radiales
//colisionen con la estructura del estator radial, en ese caso habría que rediseñar manualmente la posicion de las bobinas.
//Tras un cambio de longitud por encima de 18 conviene revisar la geometria resultante
//de las bobinas radiales y del aire que las contiene.
//Grosor: Dimension X o Y (mm)
```

```
//Longitud: Dimension Z (mm)
$constant #PoloGrosor 16
$constant #PoloLong 18

//Radio del eje de la máquina a la que se le acopla el rodamiento. Default 14 mm. No puede ser menor que 1mm.
//Este es por tanto el radio INTERIOR del tubo del rotor/acople del rodamiento.
$constant #EjeRadio 14

//Dimensiones del rotor
//AxialOverlap: o Axial Gap o entrehierro axial o solapamiento axial (L), es la distancia (normalmente entre 0 y 1mm) que sobresale en el eje z
//el rotor respecto del interior de estator de control axial cuando el rotor esta centrado. Default 0.5
//Es decir, la longitud del rotor es la longitud en el eje z del interior del estator axial más 2*AxialOverlap
$constant #AxialOverlap 0.5

//Tamaño mallado de los entrehierros de los polos, 2 es un buen tamaño cuando solo se quiere Fz (usar 1 para buenos resultados de Fx y Fy).
//Si se usan varias corrientes a la vez el calculo de B en los polos puede no ser bueno (sera evidente al ver el mapa de Bmod en el plano XY),
//en ese caso usar 0.75 o mejorar el mallado del estator radial y del aire interior.
$constant #PoleGapMeshSize 1
//Tamaño mallado del entrehierro en forma de tubo entre rotor y estator (envuelve la parte esquinada del rotor)
//tipico 0.2 para resultados buenos de Fz (para resultados de Fx y Fy deberia bastar con 0. o 0.5)
$constant #GapMeshSize 0.2
//Tamaño mallado general (es decir para el aire entre los objetos y la frontera), a mallar grueso. Default 25
$constant #GeneralMeshSize 25

//Esta variable conmuta la geometría de los imanes (default 0)
//La forma standard (0) utiliza 8 imanes curvos (4 en cada direccion)
//La forma en anillos (1) tiene dos imanes formando dos únicos anillos, para probar. Los anillos son más estrechos para usar el mismo volumen y sección que la opcion standard.
$constant #formaPMAnillo 0

//Esta variable conmuta la geometría de los polos (default 0)
//La forma standard (0) son 4 polos con sus 4 bobinas de control radial.
//La forma en anillo (1) tiene un unico anillo alrededor del rotor en vez de los polos, y no tiene las bobinas de control radial (por tanto las corrientes X e Y no tienen sentido)
//(La forma en anillo solo sirve para hacer ciertas pruebas al simplificar el modelo a equivalentes simetricos simplificados).
$constant #formaPolos 0

//Controla la cantidad de planos de corte que usamos.
//0- los imprescindibles alrededor del rotor. 1-Algunos más para acelerar el mallado. 2-bastantes más para acelerar el mallado.
//Los planos de corte aceleran y facilitan el mallado, pero también pueden deformar las geometrías perdiendo algo de precision.
//Recomiendo dejarlo a 0 (planos de corte imprescindibles) cuando queramos más precision en Fz, ya que los bordes del rotor son
//más susceptibles a verse deformados (las pruebas además muestran más precision asi)
$constant #PLANOS_CORTE 0
//-----
//-----
//-----
//NOMBRES DE FICHEROS
//Los nombres de las variables/constantas tienen que ser de longitud 16 caracteres, maximo
//-----

//Nombre y extension del archivo temporal que contiene las opciones de postprocesado y sirve para
//comunicar el script de Modeller con el script del PostProcesador (asi que debe coincidir en ambos scripts)
//Normalmente conviene dejar el nombre por defecto ya que no es necesario guardarselo con los resultados.
$string sRodaMagActTemp 'RodaMagActivoTemp.tmp'

//Nombre y extension del archivo comi que es el script que ejecutará el PostProcesador al ser
//invocado por este script para Modeller
$string sPostProcComi 'RodaMagActivoPostProc.comi'

//Nombre de los archivos op3, opc (cuando se hagan varias simulaciones, se le añadira
//un sufijo indicando el numero de simulacion). El programa añadira la extension apropiada.
$string sNombre 'RodaMagActivo'

//Nombre del archivo tipo log que irá creando el script. Notar que hay indicar nombre y extension,
//normalmente .log, pero puede cambiarse la extension a .txt por ejemplo.
//El log simplemente refleja horas y datos adicionales, no son resultados. NO DEFINIR VACIO (")
```

```

$string sNombreLog 'RodaMagActivo.log'

//Nombre y extension de los archivos de texto que van a almacenar los datos correspondientes a las simulaciones
//Si el nombre se define vacio con "", no se realizará el postprocesado para esos datos ni se registraran
$string sBHPoloSupDat 'BHPoloSuperior.dat'
$string sBHPoloInfDat 'BHPoloInferior.dat'
$string sBHPoloIzqDat 'BHPoloIzquierda.dat'
$string sBHPoloDerDat 'BHPoloDerecha.dat'
$string sFParRotorDat 'FuerzasParesRotor.dat'

//Nombre de los ficheros de imagenes que almacenaran impresiones de los datos correspondientes a las simulaciones.
//Notar que el programa añadirá la extension adecuada, así como sufijos que numeren las simulaciones
//ya que cada simulacion hará una imagen para cada tipo de dato solicitado.
//Si el nombre se define vacio con "", no se guardará esa imagen.
$string sBModEjeZ 'BModEjeZ'
$string sBModEjeY 'BModEjeY'
$string sBModEjeX 'BModEjeX'
$string sBModPlanoXY 'BModPlanoXY'
$string sBModPlanoZY 'BModPlanoZY'
$string sBModPlanoZX 'BModPlanoZX'
$string sBModZYGiro45g 'BModPlanoZYGiro45grados'
$string sBModEstatorCRad 'BModEstatorControlRadial'
$string sHModPlanoXY 'HModPlanoXY'
$string sHModPlanoZY 'HModPlanoZY'
//-----

//-----
//-----
//VALORES CORRIENTES Y POSICION ROTOR. VALORES DE LAS SIMULACIONES MULTIPLES
//Aquí se define numero de simulaciones, y que diferencias hay entre cada simulacion
//El numero total de simulaciones es #ejeNumDesplaz * #JnumSimulac, es decir: el numero
//de posiciones del rotor por el numero de simulaciones variando las corrientes
//
//P.e. si se mueve 100 veces el rotor y se prueban 50 corrientes diferentes, para cada posicion
//del rotor se harán 50 simulaciones con corrientes diferentes por las bobinas, para un total de
//50*100=5000 simulaciones
//
//Cuidado al desplazar el rotor, para que no colisione con otros objetos (los estatores)
//-----

//Titulo a mostrar en pantalla al abrir los archivos opc en Modeller (luego se modifica en tiempo real con datos sobre numero de
simulacion)
$string sTitulo 'Magnetic Bearing (unit: mm)'

//Decirle a Tosca que solucione con superficies curvadas o lineas. Las opciones son las del
//parametro SURFACES de la funcion SOLVERS de Opera, que es la que va a recibir esta opcion:
//MIXED, LINEAR, CURVED, QUADRATIC
//Linear resuelve más rapido, pero Curved es más preciso (sobre todo en modelos con elementos redondeados pero con
mallado grueso). Uso Curved para resultados precisos.
$string sSurface 'CURVED'

//Este parametro se utiliza para las representaciones graficas del postprocesador, indica la escala a utilizar
//al representar el campo B en los graficos e imagenes por medio de un maximo y un minimo.
//Notar que es una cadena de texto, que contiene un numero (p.e. '-2' o el caracter '*' que significa que Opera asigna
automaticamente la escala)
//Por defecto el valor es '*', lo que suele dar escalas diferentes para cada simulacion. Si se quieren hacer varias simulaciones es
//es conveniente asignar una escala a mano (sabiendo los campos B aprox.) para obtener graficas facilmente comparables entre
simulaciones.
$string sB_MIN '*'
$string sB_MAX '*'

//Tolerancias en el mallado de superficies (Mesh) y en el mallado de
//Volumen (Fill). El valor por defecto en Opera es 1.0E-06
//Si los valores son pequeños, la calidad y fidelidad del mallado es mejor, pero es más probable que el programa de mallado en
volumen de fallo.
//Si los valores son grandes será más facil mallar, pero la calidad del mallado será peor, tanto que puede dar error critico al
intentar resolver con Tosca por duplicidad de elementos.
$ constant #MESH_TOL 1.0E-06
$ constant #FILL_TOL 1.0E-06
//Tolerancia angular al mallar en superficies (Mesh). Por defecto 30.0 grados, tambien uso 15 para más detalle
//Uno de los efectos secundarios que tiene es que las superficies redondeadas se mallan en más trozos y hace que parezcan más
curvas, pero puede dificultar el mallado.

```

```

$ constant #MESH_NORMALTOL 30.0

//Posicion inicial del centro del Rotor (habitualmente 0,0,0)
$ constant #ejelniX 0.0
$ constant #ejelniY 0.0
$ constant #ejelniZ 0.0

//Numero de combinaciones de simulaciones en base a posicion del rotor (1 para una unica simulacion en la posicion inicial)
$ constant #ejeNumDesplaz 1

//Desplazamiento del rotor en cada simulacion despues de la inicial, en mm (recordar decimales con punto)
//Notar que cada simulacion lo desplaza en los tres ejes al mismo tiempo
//Mucho cuidado, por que si el rotor colisiona con otros objetos se producirá un error al intentar
//mallar el objeto, tambien puede dar error si el rotor se queda muy cerca de otros objetos y el mallado es demasiado
//grueso (se poligoniza mal)
$ constant #ejeDesplazX 0.0
$ constant #ejeDesplazY 0.0
$ constant #ejeDesplazZ 0.0

//DENSIDADES DE CORRIENTE INICIALES POR LAS BOBINAS DE LOS RESPECTIVOS EJES EN A/mm2 (X e Y son las radiales, THRUST
es la axial)
//No confundir con la corriente por el conductor y la corriente por el area de toda la bobina.
//Pe.Si pasan 4 A por una bobina hecha de cable de sección 0.5mm2, con 100 vueltas, la densidad de corriente es 8A/mm2
//y la sección total 50mm2 (corriente total 8x50=400A).
//Densidad de Corriente inicial por las bobinas (habitualmente 0)
$ constant #JiniX 0.0
$ constant #JiniY 0.0
$ constant #JiniZ 0.0

//Numero de combinaciones de simulaciones en base a densidad de corriente (1 para una unica simulacion con las corrientes
iniciales)
$ constant #JnumSimulac 1

//Variacion de las corrientes en cada simulacion despues de la inicial, en A/mm2 (recordar decimales con punto)
//Notar que cada simulacion varia las tres corrientes al mismo tiempo
$ constant #JdeltaX 0
$ constant #JdeltaY 0
$ constant #JdeltaZ 0

//¿Reiniciar los archivos que guardan los datos (0) o añadir datos a los ficheros existentes (1)?
//Default 0
//La opcion 1 se utiliza cuando el script falla a mitad y debe reiniciarse desde cierta simulacion
//(para que la opcion 1 funcione los archivos de datos deben haber sido inicializados previamente)
$ constant #ficheros 0
//-----

//-----
//-----
//DECLARACIONES DE VARIABLES
//
//Algunas variables usadas y actualizadas por el script durante el runtime
//-----

//Densidades de corriente usadas en cada momento
$ constant #currentY 0
$ constant #currentX 0
$ constant #currentZ 0

//Variables para guardar el calculo de la posicion del rotor que debe tener la simulacion en curso
$ constant #rotorX 0
$ constant #rotorY 0
$ constant #rotorZ 0

//Inicializacion de variables y contadores
//Default: Todos a 0
//Es interesante modificar el valor inicial cuando el script se ha colgado en cierta simulacion
//de una ejecucion multiple y queremos que reinicie desde cierto numero de simulacion
//En ese caso hay que modificar #i, #n se calcula a partir de i y j
//Para saber en que #i se colgó el script, ver el log (no es posible iniciar en una #j distinta)
//
//numero total de simulacion

```



```

$ constant #n 0
//numero de paso de posicion del rotor simulada
$ constant #i 0
//numero de paso de corriente simulada
$ constant #j 0
//-----

//-----
//-----
//VARIABLES DE SISTEMA MODIFICABLES
//-----

//Esta es una variable de sistema que al modificarse cambia el comportamiento del Solver de Opera
//(ver manual de referencia, Advanced Features de Analysis Programs).
//$ CONSTANT #MAXEDGEHDLPTS 256
//-----

//-----
//-----
//CREAR E INICIALIZAR EL ARCHIVO LOG
//Inicializacion del fichero de texto que guarda el log
//Se sobrescribe o crea, y se le añaden algunos datos iniciales
//-----
$ IF #ficheros E 0
    $ string Cabecera 'Archivo Log para una serie de simulaciones del Rodamiento Magnético Activo, creado por scripts
comi en Opera.'
    $ open 1 &NombreLog& overwrite
    $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE
    $ assign 1 1
    $ write 1 Cabecera
    $ close 1

    //COMIBASENAME, TODAY, NOW, VERSION es una variable de sistema
    $ open 1 &NombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1
    $ string Cabecera 'Fecha y hora de inicio de ejecución (hh:mm:ss dd:mm:year) &NOW& &TODAY&'
    $ write 1 Cabecera
    $ string Cabecera 'Versión de Opera: &VERSION&. Comi en Ejecucion: &COMIBASENAME&'
    $ write 1 Cabecera
    $ string Cabecera 'CPU: %ENV(CPU), Sistema Operativo: %ENV(OS)'
    $ write 1 Cabecera
    $ close 1
$ END IF
//-----

//-----
//-----
//CREAR E INICIALIZAR LOS ARCHIVOS DE TEXTO QUE GUARDARAN LOS DATOS
//Inicializacion de los ficheros de texto que guardaran los resultados numericos de las simulaciones
//Se sobrescriben o crean, y se les añade la cabecera correcta indicando el dato de cada columna
//-----

$ IF #ficheros E 0
    // B-Densidad de flujo magnetico, H-Fuerza del campo magnetico, Punto-Posicion del punto donde se mide el campo
B
    // Rotor-Posicion del centro del rotor, J-Densidad de corriente por las bobinas correspondientes (Jz-Thrust stator)
    $ string Cabecera 'NumSim RotorX(mm) RotorY(mm) RotorZ(mm) Jx(A/mm2) Jy(A/mm2) Jz(A/mm2) PuntoX(mm)
PuntoY(mm) PuntoZ(mm) BMod(T) Bx By Bz H0 HMod(A/m) Hx Hy Hz'

    $ IF %COMPARE(&sBHPoloSupDat&,"") NE 0
        $ open 1 &sBHPoloSupDat& overwrite
        $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE
        $ assign 1 1
        $ write 1 Cabecera
        $ close 1
    $ END IF
    $ IF %COMPARE(&sBHPoloInfDat&,"") NE 0
        $ open 1 &sBHPoloInfDat& overwrite
        $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE
        $ assign 1 1
        $ write 1 Cabecera

```

```

    $ close 1
$ END IF
$ IF %COMPARE(&sBHPololzqDat&,") NE 0
    $ open 1 &sBHPololzqDat& overwrite
    $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE
    $ assign 1 1
    $ write 1 Cabecera
    $ close 1
$ END IF
$ IF %COMPARE(&sBHPoloDerDat&,") NE 0
    $ open 1 &sBHPoloDerDat& overwrite
    $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE
    $ assign 1 1
    $ write 1 Cabecera
    $ close 1
$ END IF
$ IF %COMPARE(&sFParRotorDat&,") NE 0
    // F-Fuerza      Par-(Torque) Rotor-Posicion del centro del rotor en esa simulacion
    $ string Cabecera 'NumSim RotorX(mm) RotorY(mm) RotorZ(mm) Jx(A/mm2) Jy(A/mm2) Jz(A/mm2) FX(N)
FY(N) FZ(N) ParX(Nm) ParY(Nm) ParZ(Nm) EnergiaLineal(J) Coenergia(J) EnergiaNoLineal(J)'
    $ open 1 &sFParRotorDat& overwrite
    $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE
    $ assign 1 1
    $ write 1 Cabecera
    $ close 1
$ END IF
//Escribir en el log
$ string Cabecera 'Archivos de resultados inicializados &NOW& &TODAY&'
$ open 1 &sNombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1 | $ write 1 Cabecera
$ close 1
$ END IF
//-----

//-----
//-----
//DEFINIR MATERIALES
//Asignar las curvas BH de los materiales (o definirlos lineales)
//Los ficheros fisicos BH cargados para cada curva BH se indican en una sección posterior.
//-----

//Materiales en unidades del SI (no afecta a las unidades de las curvas BH,
//que indican sus unidades en el fichero .bh) Esta eleccion de unidades afecta solo a los
//materiales definidos lineales.
MATERIALS OPTION=METRE

//Ver las curvas BH de hierros disponibles en la siguiente seccion, se cambia en el parametro BH
MATERIALS PICK 'Iron'
MATERIALS OPTION=MODIFY MULINEARITY=NONLINEAR MUANISOTROPY=ISOTROPIC BH='PureIron'
MATERIALS UNPICK 'Iron'

//Comentar y descomentar (o modificar) la linea adecuada para utilizar un iman lineal o no-lineal.
MATERIALS PICK 'PM'
    //MATERIALS OPTION=MODIFY MULINEARITY=NONLINEAR MUANISOTROPY=ISOTROPIC BH='Alnico6'
    //MATERIALS OPTION=MODIFY MULINEARITY=NONLINEAR MUANISOTROPY=ISOTROPIC BH='PM-NdFeB-0_7T'
    //MATERIALS OPTION=MODIFY MULINEARITY=LINEAR MUANISOTROPY=ISOTROPIC MU=1.28 HC=-435000.0
    MATERIALS OPTION=MODIFY MULINEARITY=LINEAR MUANISOTROPY=ISOTROPIC MU=1.11 HC=-724000
MATERIALS UNPICK 'PM'
//-----

//-----
//-----
//CREAR O CARGAR LAS CURVAS BH
//Definiciones de las curvas BH (o ficheros que las contienen)
//-----

//BHDATA OPTION=LOAD LABEL='IronBH' FILE='tnten.bh'
//BHDATA OPTION=LOAD LABEL='PM-NdFeB-0_7T' FILE='PM-NdFeB-0_7T.bh'
//BHDATA OPTION=LOAD LABEL='Alnico6' FILE='Alnico6.bh'
BHDATA OPTION=LOAD LABEL='PureIron' FILE='PureIron.bh'
//BHDATA OPTION=LOAD LABEL='Steel' FILE='MagneticStainlessSteel416.bh'
//BHDATA OPTION=LOAD LABEL='Steel1006' FILE='Steel1006.bh'

```

```
//-----
//-----
//-----
//DIRECCIONES DE MAGNETIZACION
//Segun el documento ASK de Opera (hablando de los angulos Euler) la direccion de
//magnetizacion por defecto de un Iman Permanente es el eje Z direccion positiva.
//-----
//El comando VOLUME PICK crea la etiqueta de Volumen aunque ningun objeto la utilice.
//Otra forma de crear etiquetas de volumen es asignarlo cuando se crea un objeto.
VOLUME PICK 'Back Magnetization Direction'
VOLUME OPTION=MODIFY THETA=180 PHI=0 PSI=0
VOLUME UNPICK 'Back Magnetization Direction'
VOLUME PICK 'Front Magnetization Direction'
VOLUME OPTION=MODIFY THETA=0 PHI=0 PSI=0
VOLUME UNPICK 'Front Magnetization Direction'
//-----

//-----
//-----
//DEFINIR LOS PARAMETROS DEL ANALISIS
//Solver, numero de iteraciones, tipo de integracion, etc.
//-----
//Tipo de analisis (Tosca Magnetic)
ANALYSIS OPTION=ACTIVATE PROGRAM=TOSCAMAGN
ANALYSISDATA OPTION=SET PROGRAM=TOSCAMAGN LINEAR=NO NLITERTYPE=NEWTON NITERATIONS=21 TOLERANCE=1.0E-
03 HX=0 HY=0 HZ=0 RHS=ADAPTIVE POTENTIALCUT=YES

//Tolerancias geométricas al hacer los cuerpos (no confundir con las tolerancias de mallado)
//poco documentado en la documentacion de Opera, default 1.0E-06
//PRECISIONDATA ABSTOL=1.0E-06 SMALLFACE=1.0E-06
//-----

//-----
//-----
//BUCLE DE SIMULACIONES
//Hemos definido materiales, variables y otros datos generales.
//Ahora prepararemos las simulaciones (con la geometría, el desplazamiento
//del rotor y la corriente adecuadas) y las iremos resolviendo en un bucle.
//El proceso es secuencial, preparamos una simulacion, la resolvemos, preparamos la siguiente, etc..
//-----

//-----
//Bucle de simulaciones en funcion de la posicion del rotor
//Mientras el numero de posiciones de rotor simulados sea menor que el numero deseado.. (i se inicializa en 0)
//Notar que cada vez que avanzamos en este bucle la geometría cambia al moverse el rotor.
//-----
$ WHILE #i LT #ejeNumDesplaz

    //Primero borrar el Model Body si existe, ya que en caso contrario no se permite mover los objetos
    //MODELBODY es una system variable del programa Modeller (0 si no se ha creado el Model Body, 1 si el Body esta
creado)
    $ IF MODELBODY E 1
        MODEL DELETE
    $ END IF

//-----
//CREAR EL MODELO GEOMETRICO (SALVO BOBINAS)
//La experiencia demuestra que tiene algo de importancia el orden en que se crean los objetos,
//parece que Modeller ajusta los objetos complejos según se van creando. Es mejor hacer
//los objetos importantes y pequeños primero.
//-----

//calcular la posicion del centro del rotor en funcion del numero de simulacion
$ constant #rotorX #ejeDesplazX*#i+#ejeIlniX
$ constant #rotorY #ejeDesplazY*#i+#ejeIlniY
$ constant #rotorZ #ejeDesplazZ*#i+#ejeIlniZ

//-----
//Borrar el modelo de la simulacion anterior, a menos que sea la primera simulacion (en cuyo caso no hay nada que
```

```

borrar)
//BODIES y CONDUCTORS son variables de sistema de Modeller (numero de cuerpos y numeros de conductores
presentes)
$ IF (BODIES+CONDUCTORS) NE 0
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Rotor'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotorExt'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorExtCent'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorPolGapX'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorPolGapY'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotorInt'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorGap1'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorGap2'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotorBisela'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotorBiselB'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotorA'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotorB'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Radial Control Stator'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Thrust Control Stator'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireGrueso'
  PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireBobinaAxial'

  $ IF #formaPMAnillo E 0
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Back Up'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Back Left'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Back Down'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Back Right'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front Up'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front Left'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front Down'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front Right'
  $ END IF
  $ IF #formaPMAnillo E 1
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Back'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front'
  $ END IF

  PICK OPTION=TOGGLE TYPE=COND N=1
  $ IF #formaPolos E 0
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireBobinasRadial'
    PICK OPTION=TOGGLE TYPE=COND N=2
    PICK OPTION=TOGGLE TYPE=COND N=3
    PICK OPTION=TOGGLE TYPE=COND N=4
    PICK OPTION=TOGGLE TYPE=COND N=5
  $ END IF

  $IF #PLANOS_CORTE GT 0
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CortePlano0XY'
  $END IF
  $IF #PLANOS_CORTE GT 1
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotor0YZ'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotor0XZ'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CortePlano0XZ_1'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CortePlano0XZ_2'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CortePlano0YZ_1'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CortePlano0YZ_2'
  $END IF

  DELETE REGULARISE=NO EXTERNAL=NO
$ END IF

//-----
//ROTOR
//Hacer el TUBO que forma la sujeccion del eje de la máquina (este tubo se llama rotor del del rodamiento en la
bibliografía). Recordar que el eje axial es el eje Z.
CYLINDER Name='Rotor' X0=0 Y0=0 Z0=-24-#AxialOverlap X1=0 Y1=0 Z1=24+#AxialOverlap +TUBE
SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=22 MINORRADIUS=22 TOPRADIUS=22 THICKNESS=22-#EjeRadio SIDES=2
//El rotor se mueve despues

//-----
//CAPAS Y CORTES DE AIRE ALREDEDOR DEL ROTOR (PARA MALLAR FINO ENTREHIERROS Y DEMAS)
//Cada vez que cambiamos la posicion del rotor hay que borrar varias piezas de aire y hacerlas nuevas para que

```

## TFM - Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

encajen bien entre ellas u optimizar el calculo  
//A veces confiar en los levels y las intersecciones y subtracciones automaticas que hace el programa mientras malla es mejor aunque es lento,  
//hacer las piezas bien antes de malla a veces provoca errores de mallado por que Modeller no debe hacer muy bien todas las subtracciones.  
//  
//Los Cortes para forzar mallado son planos y estructuras tridimensionales de grosor cero, lo que provocan es forzar el mallado por su superficie.  
//Estos planos aseguran que se va a mallar razonablemente bien cerca de la pieza movil, sobre todo en  
//la zona critica cercana a los entrehierros. Esto es fundamental para usar el tensor de stress de Maxwell con precision.  
//(requiere aun asi un muy buen mallado adicional en entrehierros y sobre todo en sitios donde haya piezas muy anguladas como los vertices de un rectangulo)  
//Tambien se usan para mejorar y hacer más rapido el mallado en general al partir la pieza en sectores.  
//  
//Los tubos con pared de grosor 0 funcionan, los cilindros con altura 0 tambien.  
//Es importante evitar cruces o huecos muy pequeños entre estos elementos de grosor 0 o darán problemas o fallos al mallar,  
//lo mejor es que se unan en sus aristas como su fuesen parte de un objeto 3D

Maxwell  
//Corte al aire exterior del rotor, para forzar un mallado muy fino cerca del rotor (para calcular el tensor de stress de Maxwell)  
CYLINDER Name='CorteRotorExt' X0=0 Y0=0 Z0=-24-#AxialOverlap X1=0 Y1=0 Z1=24+#AxialOverlap +TUBE  
SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=22+0.1 MINORRADIUS=22+0.1 TOPRADIUS=22+0.1 THICKNESS=0.0 SIDES=1  
//El corte del rotor se mueve despues

//Piezas de aire para el entrehierro entre los polos radiales y el rotor, para mallar fino solamente los entrehierros (y un poco expandido para captar flujos dispersos), es decir el radialgap.  
//Notar que no hay que mover estas piezas de aire, ya que conectan la parte fija (estator) con la movil (rotor), lo que hacemos es crear un volumen de aire y restarle el rotor.  
//CYLINDER Name='AireRotorPolGapY' X0=0 Y0=0 Z0=(-1-#PoloLong/2) X1=0 Y1=0 Z1=(1+#PoloLong/2) +TUBE  
MAJORRADIUS=22.5 MINORRADIUS=22.5 TOPRADIUS=22.5 THICKNESS=1 SIDES=2  
CYLINDER Name='AireRotorPolGapY' X0=0 Y0=0 Z0=(-1-#PoloLong/2) X1=0 Y1=0 Z1=(1+#PoloLong/2) -TUBE  
MAJORRADIUS=22.5 MINORRADIUS=22.5 TOPRADIUS=22.5 SIDES=2  
CYLINDER Name='Cilindro' X0=0 Y0=0 Z0=-50 X1=0 Y1=0 Z1=50 -TUBE MAJORRADIUS=22  
MINORRADIUS=22 TOPRADIUS=22 SIDES=2  
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Cilindro'  
TRANSFORM OPTION=APPLY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=#rotorX DV=#rotorY DW=#rotorZ  
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorPolGapY'  
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Cilindro'  
COMBINE OPERATION=SUBTRACT +REGULAR  
BLOCK Name='Bloque' X0=-1-#PoloGrosor/2 Y0=-70 Z0=-1-#PoloLong/2 X1=1+#PoloGrosor/2 Y1=70  
Z1=1+#PoloLong/2  
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorPolGapY'  
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Bloque'  
COMBINE OPERATION=INTERSECT +REGULAR  
//CYLINDER Name='AireRotorPolGapX' X0=0 Y0=0 Z0=(-1-#PoloLong/2) X1=0 Y1=0 Z1=(1+#PoloLong/2) +TUBE  
MAJORRADIUS=22.5 MINORRADIUS=22.5 TOPRADIUS=22.5 THICKNESS=1 SIDES=2  
CYLINDER Name='AireRotorPolGapX' X0=0 Y0=0 Z0=(-1-#PoloLong/2) X1=0 Y1=0 Z1=(1+#PoloLong/2) -TUBE  
MAJORRADIUS=22.5 MINORRADIUS=22.5 TOPRADIUS=22.5 SIDES=2  
CYLINDER Name='Cilindro' X0=0 Y0=0 Z0=-50 X1=0 Y1=0 Z1=50 -TUBE MAJORRADIUS=22  
MINORRADIUS=22 TOPRADIUS=22 SIDES=2  
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Cilindro'  
TRANSFORM OPTION=APPLY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=#rotorX DV=#rotorY DW=#rotorZ  
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorPolGapX'  
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Cilindro'  
COMBINE OPERATION=SUBTRACT +REGULAR  
BLOCK Name='Bloque' X0=-70 Y0=-1-#PoloGrosor/2 Z0=-1-#PoloLong/2 X1=70 Y1=1+#PoloGrosor/2  
Z1=1+#PoloLong/2  
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorPolGapX'  
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Bloque'  
COMBINE OPERATION=INTERSECT +REGULAR

//Tubo para mallado medio para rodear la cara exterior del rotor en la parte central (es decir, aire entre los entrehierros de los polos radiales)  
//(notar que dejamos huecos para poner las piezas de aire para los entrehierros)  
//Notar que no hay que mover estas piezas de aire, ya que conectan la parte fija (estator) con la movil (rotor), lo que hacemos es crear un volumen de aire y restarle el rotor.  
//CYLINDER Name='AireRotorExtCent' X0=0 Y0=0 Z0=(-1-#PoloLong/2) X1=0 Y1=0 Z1=(1+#PoloLong/2) +TUBE  
SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=22.5 MINORRADIUS=22.5 TOPRADIUS=22.5 THICKNESS=1 SIDES=2  
CYLINDER Name='AireRotorExtCent' X0=0 Y0=0 Z0=-1-#PoloLong/2 X1=0 Y1=0 Z1=1+#PoloLong/2 -TUBE  
MAJORRADIUS=22.5 MINORRADIUS=22.5 TOPRADIUS=22.5 SIDES=2  
CYLINDER Name='Cilindro' X0=0 Y0=0 Z0=-50 X1=0 Y1=0 Z1=50 -TUBE MAJORRADIUS=22  
MINORRADIUS=22 TOPRADIUS=22 SIDES=2  
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Cilindro'  
TRANSFORM OPTION=APPLY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=#rotorX DV=#rotorY DW=#rotorZ  
BLOCK Name='Bloque1' X0=-70 Y0=-1-#PoloGrosor/2 Z0=-1-#PoloLong/2 X1=70 Y1=1+#PoloGrosor/2  
Z1=1+#PoloLong/2

## TFM - Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

```

Z1=1+#PoloLong/2
BLOCK Name='Bloque2' X0=-1-#PoloGrosor/2 Y0=-70 Z0=-1-#PoloLong/2 X1=1+#PoloGrosor/2 Y1=70
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorExtCent'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Cilindro'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Bloque1'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Bloque2'
COMBINE OPERATION=SUBTRACT +REGULAR

//Otros cortes al rotor, los biselos son fundamentales para un buen mallado cerca de las esquinas.
CYLINDER Name='CorteRotorBiselA' X0=0 Y0=0 Z0=-24-#AxialOverlap-0.1-0.1 X1=0 Y1=0 Z1=-24-#AxialOverlap
+TUBE SHAPECONTROL=GENERAL MAJORRADIUS=22 MINORRADIUS=22 TOPRADIUS=22+0.1 THICKNESS=0 SIDES=2
CYLINDER Name='CorteRotorBiselB' X0=0 Y0=0 Z0=24+#AxialOverlap+0.1+0.1 X1=0 Y1=0 Z1=24+#AxialOverlap
+TUBE SHAPECONTROL=GENERAL MAJORRADIUS=22 MINORRADIUS=22 TOPRADIUS=22+0.1 THICKNESS=0 SIDES=2
CYLINDER Name='CorteRotorInt' X0=0 Y0=0 Z0=-24-#AxialOverlap-0.1-0.1 X1=0 Y1=0 Z1=24+#AxialOverlap+0.1+0.1
+TUBE SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=#EjeRadio-0.5 MINORRADIUS=#EjeRadio-0.5 TOPRADIUS=#EjeRadio-0.5
THICKNESS=0.0 SIDES=1
CYLINDER Name='CorteRotorA' X0=0 Y0=0 Z0=-24-#AxialOverlap-0.1-0.1 X1=0 Y1=0 Z1=-24-#AxialOverlap-0.1-0.1
SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=22 MINORRADIUS=22 TOPRADIUS=22 THICKNESS=22-#EjeRadio+0.5 SIDES=1
CYLINDER Name='CorteRotorB' X0=0 Y0=0 Z0=24+#AxialOverlap+0.1+0.1 X1=0 Y1=0 Z1=24+#AxialOverlap+0.1+0.1
SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=22 MINORRADIUS=22 TOPRADIUS=22 THICKNESS=22-#EjeRadio+0.5 SIDES=1
//Los planos de corte planares 0XZ y 0XY al rotor hacen más rapido el mallado, pero restan un poco de precisión.
$ IF #PLANOS_CORTE GT 1
BLOCK Name='CorteRotor0XZ' X0=-22 Y0=0 Z0=-24-#AxialOverlap-0.1-0.1 X1=22 Y1=0
Z1=24+#AxialOverlap+0.1+0.1
BLOCK Name='CorteRotor0YZ' X0=0 Y0=-22 Z0=-24-#AxialOverlap-0.1-0.1 X1=0 Y1=22
Z1=24+#AxialOverlap+0.1+0.1
$ END IF
//Los cortes del rotor se mueven despues

//MOVER EL ROTOR Y SUS PLANOS DE CORTE
//Mover el rotor y los planos que cortan el aire a su alrededor a su posicion inicial (i==0), o a la que le corresponda en
la simulacion
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Rotor'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotorBiselA'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotorBiselB'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotorExt'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotorInt'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotorA'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotorB'
$IF #PLANOS_CORTE GT 1
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotor0XZ'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='CorteRotor0YZ'
$END IF
TRANSFORM OPTION=APPLY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=#rotorX DV=#rotorY DW=#rotorZ

//Tubos que cubren las esquinas exteriores del rotor, para mallar muy fino los entrehierros que existen entre el estator
de control axial y el rotor
//(no confundir con los entrehierros de los polos), este seria un axialgap.
//La experiencia indica que es mejor que el volumen de aire colisione con el volumen de metal del rotor, por medio
de los LEVELS
//el programa de mallado se quedará con la geometría correcta con mayor precisión que si restamos el volumen de
metal en Modeller.
//Notar que el Overlap esta expresado como (#AxialOverlap-0.5), esto es por que originalmente el script y la
geometria se probó para #AxialOverlap=0.5
$ IF #rotorZ GT 0
CYLINDER Name='AireRotorGap1' X0=0 Y0=0 Z0=-24.75-(#AxialOverlap-0.5) X1=0 Y1=0 Z1=-
24.25+#rotorZ-(#AxialOverlap-0.5) +TUBE SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=22.5 MINORRADIUS=22.5 TOPRADIUS=22.5
THICKNESS=1 SIDES=2
$ ELSE
CYLINDER Name='AireRotorGap1' X0=0 Y0=0 Z0=-24.75+#rotorZ-(#AxialOverlap-0.5) X1=0 Y1=0 Z1=-
24.25-(#AxialOverlap-0.5) +TUBE SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=22.5 MINORRADIUS=22.5 TOPRADIUS=22.5
THICKNESS=1 SIDES=2
$ END IF
CYLINDER Name='Cilindro' X0=0 Y0=0 Z0=-24-#AxialOverlap X1=0 Y1=0 Z1=24+#AxialOverlap -TUBE
MAJORRADIUS=22 MINORRADIUS=22 TOPRADIUS=22 SIDES=2
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Cilindro'
TRANSFORM OPTION=APPLY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=#rotorX DV=#rotorY DW=#rotorZ
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorGap1'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Cilindro'
COMBINE OPERATION=SUBTRACT +REGULAR
$ IF #rotorZ GT 0
CYLINDER Name='AireRotorGap2' X0=0 Y0=0 Z0=24.75+#rotorZ+(#AxialOverlap-0.5) X1=0 Y1=0
Z1=24.25+(#AxialOverlap-0.5) +TUBE SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=22.5 MINORRADIUS=22.5 TOPRADIUS=22.5
THICKNESS=1 SIDES=2
$ ELSE
CYLINDER Name='AireRotorGap2' X0=0 Y0=0 Z0=24.75+(#AxialOverlap-0.5) X1=0 Y1=0

```

## TFM - Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

```

Z1=24.25+#rotorZ+(#AxialOverlap-0.5) +TUBE SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=22.5 MINORRADIUS=22.5
TOPRADIUS=22.5 THICKNESS=1 SIDES=2
$ END IF
        CYLINDER Name='Cilindro' X0=0 Y0=0 Z0=-24-#AxialOverlap X1=0 Y1=0 Z1=24+#AxialOverlap -TUBE
MAJORRADIUS=22 MINORRADIUS=22 TOPRADIUS=22 SIDES=2
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Cilindro'
        TRANSFORM OPTION=APPLY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=#rotorX DV=#rotorY DW=#rotorZ
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorGap2'
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Cilindro'
        COMBINE OPERATION=SUBTRACT +REGULAR

//-----
//ESTRUCTURA DEL RADIAL CONTROL STATOR Y POLOS

//Forma standard (4 polos para 4 bobinas de control radial)
$ IF #formaPolos E 0
        //Hago uno de los polos metalicos del Radial Control Stator. Consiste en hacer un rectangulo (block) y
restarle un cilindro para redondear la cara del polo cercana al rotor.
        //La otra cara del rotor no hace falta redondearla por que luego uniremos el polo a otra pieza por ese lado.
        BLOCK Name='Polo' X0=36 Y0=#PoloGrosor/2 Z0=#PoloLong/2 X1=0 Y1=#PoloGrosor/2 Z1=#PoloLong/2
        CYLINDER Name='Cilindro' X0=0 Y0=0 Z0=10 X1=0 Y1=0 Z1=-20 -TUBE SHAPECONTROL=SIMPLE
MAJORRADIUS=22.5 MINORRADIUS=22.5 TOPRADIUS=22.5 SIDES=2
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Polo'
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Cilindro'
        COMBINE OPERATION=SUBTRACT +REGULAR
        //Recordar que al sustraer objetos, el objeto resultante tiene el nombre del primer objeto picked, y los
objetos usados se borran.

        //Multiplico y giro el polo creado para crear multiples polos alrededor del eje.
        //Notar que el original no se borra, y que el parametro COUNT indica cuantos polos adicionales se crean.
Por lo que si quiero 4 polos, COUNT sera 3.
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Polo'
        TRANSFORM OPTION=COPY KEEP=NO TYPE=ROTATE ROTU=0 ROTV=0 ROTW=1 ANGLE=90 COUNT=3
LABEL='Polo'

        //Hacer el Radial Control Stator (el estator pequeño interior de control radial) a partir de los polos creados
antes y un estrecho tubo que une todos los polos por la parte exterior.
        CYLINDER Name='Radial Control Stator' X0=0 Y0=0 Z0=#EstatorRadialL/2 X1=0 Y1=0
Z1=#EstatorRadialL/2 +TUBE SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=46 MINORRADIUS=46 TOPRADIUS=46 THICKNESS=10
SIDES=2
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Radial Control Stator'
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='Polo1'
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='Polo2'
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='Polo3'
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Polo'
        COMBINE OPERATION=UNION +REGULAR
        //Borro las Label que hayan podido quedar asociadas al objeto final
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Radial Control Stator'
        LABEL OPTION=CLEAR
$ END IF

//Forma en anillo (1 unico anillo, realmente sin polos, no habrá donde poner las bobinas de control radial)
$ IF #formaPolos E 1
        CYLINDER Name='Radial Control Stator' X0=0 Y0=0 Z0=#EstatorRadialL/2 X1=0 Y1=0
Z1=#EstatorRadialL/2 +TUBE SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=46 MINORRADIUS=46 TOPRADIUS=46 THICKNESS=10
SIDES=2
        CYLINDER Name='Polo' X0=0 Y0=0 Z0=#PoloLong/2 X1=0 Y1=0 Z1=#PoloLong/2 +TUBE
SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=36 MINORRADIUS=36 TOPRADIUS=36 THICKNESS=13.5 SIDES=2
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Radial Control Stator'
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Polo'
        COMBINE OPERATION=UNION +REGULAR
$ END IF

//-----
//IMANES PERMANENTES DEL RADIAL CONTROL STATOR

//Forma standard con 8 imanes curvos (4 en cada dirección)
$ IF #formaPMAnillo E 0
        //Hacer un iman permanente. Se hace un tubo en forma de anillo estrecho, se quitan las
//partes sobrantes para quedar con una parte de corona del angulo adecuado que sera un unico PM
        CYLINDER Name='Permanent Magnet' X0=0 Y0=0 Z0=#EstatorRadialL/2 X1=0 Y1=0 Z1=24 +TUBE
SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=45 MINORRADIUS=45 TOPRADIUS=45 THICKNESS=7 SIDES=2
        BLOCK Name='Block' X0=0 Y0=0 Z0=0 X1=100 Y1=100 Z1=100
        PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Block'

```



```

TRANSFORM OPTION=APPLY KEEP=NO TYPE=ROTATE ROTU=0 ROTV=0 ROTW=1 ANGLE=-30
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Block'
TRANSFORM OPTION=COPY TYPE=ROTATE ROTU=0 ROTV=0 ROTW=1 ANGLE=150 COUNT=1
LABEL='Block'

PICK OPTION=RESET
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Block'
COMBINE OPERATION=SUBTRACT +REGULAR
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='Block1'
COMBINE OPERATION=SUBTRACT +REGULAR
BLOCK Name='Block' X0=-100 Y0=-100 Z0=-100 X1=100 Y1=0 Z1=100
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Block'
COMBINE OPERATION=SUBTRACT +REGULAR
//Borro las Label que hayan podido quedar asociadas al objeto final
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet'
LABEL OPTION=CLEAR

//Copiar y rotar el iman permanente para hacer los de un lado. Tambien se cambia el nombre unico de
cada iman.
PICK OPTION=RESET
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet'
TRANSFORM OPTION=COPY KEEP=NO TYPE=ROTATE ROTU=0 ROTV=0 ROTW=1 ANGLE=90 COUNT=3
LABEL='PM'

PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet'
RENAME NAME='Permanent Magnet' UNIQUENAME='Permanent Magnet Front Up'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='PM1'
RENAME NAME='Permanent Magnet' UNIQUENAME='Permanent Magnet Front Right'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='PM2'
RENAME NAME='Permanent Magnet' UNIQUENAME='Permanent Magnet Front Down'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='PM3'
RENAME NAME='Permanent Magnet' UNIQUENAME='Permanent Magnet Front Left'

//Ahora copiar y mover todos los imanes de un lado para hacer los imanes del otro lado, y renombrarlos.
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front Left'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front Down'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front Right'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front Up'
TRANSFORM OPTION=COPY KEEP=NO TYPE=DISPLACE DU=0 DV=0 DW=-33 COUNT=1 LABEL='Front'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='PM'
PICK OPTION=REMOVE PROPERTY=Label LABEL='Front'
RENAME NAME='Permanent Magnet' UNIQUENAME='Permanent Magnet Back Up'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='PM1'
PICK OPTION=REMOVE PROPERTY=Label LABEL='Front'
RENAME NAME='Permanent Magnet' UNIQUENAME='Permanent Magnet Back Right'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='PM2'
PICK OPTION=REMOVE PROPERTY=Label LABEL='Front'
RENAME NAME='Permanent Magnet' UNIQUENAME='Permanent Magnet Back Down'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='PM3'
PICK OPTION=REMOVE PROPERTY=Label LABEL='Front'
RENAME NAME='Permanent Magnet' UNIQUENAME='Permanent Magnet Back Left'
//Borro las Label que hayan podido quedar asociadas a los objetos finales
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='Front'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=Label LABEL='Front'
LABEL OPTION=CLEAR

$ END IF

//si los imanes deben formar dos únicos anillos (en vez de 8 piezas)
$ IF #formaPMAnillo E 1
//Hacer un iman permanente. Se hace un tubo en forma de anillo estrecho, se quitan las
//partes sobrantes para quedar con una parte de corona del angulo adecuado que sera un unico PM
CYLINDER Name='Permanent Magnet Front' X0=0 Y0=0 Z0=#EstatorRadial/2 X1=0 Y1=0 Z1=24 +TUBE
SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=42.79 MINORRADIUS=42.79 TOPRADIUS=42.79 THICKNESS=4.79 SIDES=2
CYLINDER Name='Permanent Magnet Back' X0=0 Y0=0 Z0=-#EstatorRadial/2 X1=0 Y1=0 Z1=-24 +TUBE
SHAPECONTROL=TUBE MAJORRADIUS=42.79 MINORRADIUS=42.79 TOPRADIUS=42.79 THICKNESS=4.79 SIDES=2
$ END IF

//-----
//ESTRUCTURA DEL ESTATOR DE CONTROL AXIAL (THRUST)
//
//Crear el Estator de control axial (Thrust Control Stator).

```

## TFM - Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

```
//Se trata de un cilindro hueco (para alojar el estator axial y en realidad todo el conjunto) con un agujero en su centro
para que lo atraviese el rotor.
//Para construirlo se hace un tubo (con el agujero central para el rotor) y se le resta un cilindro mas pequeño para
hacer el hueco (para visionar bien todo en Modeller, hacer este objeto transparente)
CYLINDER Name='Thrust Control Stator' X0=0 Y0=0 Z0=-30 X1=0 Y1=0 Z1=30 +TUBE SHAPECONTROL=TUBE
MAJORRADIUS=67.5 MINORRADIUS=67.5 TOPRADIUS=67.5 THICKNESS=45 SIDES=2
CYLINDER Name='Thrust Control Stator Inner' X0=0 Y0=0 Z0=24 X1=0 Y1=0 Z1=-24 -TUBE SHAPECONTROL=SIMPLE
MAJORRADIUS=59.5 MINORRADIUS=59.5 TOPRADIUS=59.5 SIDES=2
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Thrust Control Stator'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Thrust Control Stator Inner'
COMBINE OPERATION=SUBTRACT +REGULAR

//-----
//CAPA DE AIRE DE MALLADO MEDIANO QUE LLENA EL INTERIOR DE LA PIEZA
//
//Esta capa de aire llena el interior de la pieza y parte del exterior, asi podemos mallar el aire dentro con un grosor
mediano
//y mallar el exterior hasta la frontera con un grosor mayor
CYLINDER Name='AireGrueso' X0=0 Y0=0 Z0=-39 X1=0 Y1=0 Z1=39 -TUBE SHAPECONTROL=SIMPLE
MAJORRADIUS=77.5 MINORRADIUS=77.5 TOPRADIUS=77.5 SIDES=2

//-----
//CAPAS DE AIRE ALREDEDOR DE LAS BOBINAS
//Segun el manual de Opera los conductores de Biot & Savart (los unicos que podemos usar para este
//tipo de simulacion es TOSCA) deben estar contenidos en un volumen de aire con
//Potencial escalar Reducido. Además los modelos deben tener una interface potencial total-reducido
//(es decir el aire alrededor de un volume de potencial reducido deberia ser total) aunque con la asignacion
//y cortes automaticos debería ser suficiente si se asigna que el aire de las bobinas es potencial reducido.
//
//Aire alrededor de la gran bobina de control axial
CYLINDER Name='AireBobinaAxial' X0=0 Y0=0 Z0=-22 X1=0 Y1=0 Z1=22 +TUBE SHAPECONTROL=TUBE
MAJORRADIUS=58.5 MINORRADIUS=58.5 TOPRADIUS=58.5 THICKNESS=11.44 SIDES=2

//Aire alrededor de las bobinas de control radial, para asegurar que envuelve a las bobinas aunque su geometria varie
un poco
//este aire es un cilindro al que le restamos un cubo o cilindro en su centro, de manera que el aire envuelve la mayor
parte de los polos asi
//como una parte sustancial del aire contenido dentro del estator, pero no envuelve el rotor.
//Usamos una variable temporal para calcular el tamaño adecuado de este volumen, desgraciadamente no se puede
borrar una vez usada como dimension de una geometria.
$ IF #formaPolos E 0
    $ constant #zTemp 0
    $ constant #zTemp #PoloLong/2+10
    $ IF #zTemp GT 24
        //el volumen de aire no puede superar la dimension z del estator que lo contiene.
        $ constant #zTemp 24
    $ END IF
    CYLINDER Name='AireBobinasRadial' X0=0 Y0=0 Z0=#zTemp X1=0 Y1=0 Z1=-#zTemp -TUBE
SHAPECONTROL=SIMPLE MAJORRADIUS=36 MINORRADIUS=36 TOPRADIUS=36 SIDES=2
    //BLOCK Name='Caja' X0=24 Y0=24 Z0=30 X1=-24 Y1=-24 Z1=-30
    CYLINDER Name='Caja' X0=0 Y0=0 Z0=30 X1=0 Y1=0 Z1=-30 -TUBE SHAPECONTROL=SIMPLE
MAJORRADIUS=24 MINORRADIUS=24 TOPRADIUS=24 SIDES=2
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireBobinasRadial'
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Caja'
    COMBINE OPERATION=SUBTRACT +REGULAR
    // $ constant #zTemp +delete
    //Recordar que al sustraer objetos, el objeto resultante tiene el nombre del primer objeto picked, y los
objetos usados se borran.
$ END IF

//-----
//PLANOS PARA FORZAR MALLADO EN LOS ESTADORES
//Piezas de grosor cero cuyo unico objetivo es forzar el mallado por su superficie,
//y cortar la pieza en trozos de modo que sea más rápido el mallado.
$ IF #PLANOS_CORTE GT 0
    //Corte al plano XY: De interes para cortar los polos por la mitad, ya que muchas lineas de flujo deberían
pasar tangencialmente al plano XY.
    CYLINDER Name='CortePlano0XY' X0=0 Y0=0 Z0=0 X1=0 Y1=0 Z1=0 -TUBE MAJORRADIUS=70
MINORRADIUS=70 TOPRADIUS=70 SIDES=1
    $ END IF
    $ IF #PLANOS_CORTE GT 1
        //cortes a los planos XZ así como YZ por similares razones, pero evitamos cortar el rotor por que el rotor se
mueve y querriamos cortarlo pasando por su centro
        //Estos planos degeneran algo la geometria del rotor (aparecen campos mayores cerca de donde se
cortarian los planos y el rotor, pero no parece que afecte a los resultados)
```

```

BLOCK Name='CortePlano0XZ_1' X0=22.5 Y0=0 Z0=30 X1=67.5 Y1=0 Z1=-30
BLOCK Name='CortePlano0XZ_2' X0=-22.5 Y0=0 Z0=30 X1=-67.5 Y1=0 Z1=-30
BLOCK Name='CortePlano0YZ_1' X0=0 Y0=22.5 Z0=30 X1=0 Y1=67.5 Z1=-30
BLOCK Name='CortePlano0YZ_2' X0=0 Y0=-22.5 Z0=30 X1=0 Y1=-67.5 Z1=-30
$ END IF

//-----
//Llegados a este punto la geometría del objeto ha sido definida y existen los objetos con estos nombres:
//Radial Control Stator, Thrust Control Stator, Rotor, Permanent Magnet Front Up, Permanent Magnet Back Up (y los
otros imanes permanentes con Right, Left y Down en vez de Up).
//Además varios bloques de aire: AireGrueso, AireBobinaAxial, AireBobinasRadial
//Más adelante haremos piezas de aire para el rotor y entrehierros: AireRotorExt, AireRotorInt, AireRotorPolGapY (y X),
AireRotorGap1 (y 2), AireRotorEst1 (y 2), AireRotorA (y B)
//Y los planos de corte: CorteRotorExt, CorteRotorInt, CorteRotorA, CorteRotorB
//Sin embargo hay que aplicar materiales, bobinas, direcciones de magnetización, otros detalles, las condiciones de
frontera y preparar la simulación
//-----

//-----
//ASIGNACIONES DE MATERIALES, LEVELS, DIRECCIONES DE MAGNETIZACIÓN, MESH SIZES Y VOLUME LABELS
//Asignaciones de materiales a los objetos, niveles de preferencia (level) y etiquetas de dirección de magnetización
//Las asignaciones de "Volume Labels" se utilizan para asignar direcciones de magnetización o para poder ciertas
operaciones mas adelante
//-----

//-----
//Materiales metalicos
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Thrust Control Stator'
CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='Iron' POTENTIAL=Automatic ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=10
VOLUMELABEL='Thrust Control Stator' SIZE=5

//Si en los polos aparecen elementos deformados al ver el mapa de B, usar tamaño 2.5 (sucede cuando se saturan
mucho los polos con 2 o 3 corrientes a la vez)
PICK OPTION=ADD PROPERTY=UniqueName LABEL='Radial Control Stator'
CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='Iron' POTENTIAL=Automatic ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=9 SIZE=5

PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Rotor'
CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='Iron' POTENTIAL=Automatic ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=8
VOLUMELABEL='Rotor' SIZE=5

//-----
//Imanes
//Segun el manual los imanes *deberian* tener Potencial Total.
$ IF #formaPMAnillo E 0
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Back Up'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Back Left'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Back Down'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Back Right'
CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='PM' POTENTIAL=TOTAL ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=11
VOLUMELABEL='Back Magnetization Direction' SIZE=5

PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front Up'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front Left'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front Down'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front Right'
CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='PM' POTENTIAL=TOTAL ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=11
VOLUMELABEL='Front Magnetization Direction' SIZE=5
$ END IF
$ IF #formaPMAnillo E 1
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Back'
CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='PM' POTENTIAL=TOTAL ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=11
VOLUMELABEL='Back Magnetization Direction' SIZE=5
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='Permanent Magnet Front'
CELLDATA OPTION=MODIFY MATERIALLABEL='PM' POTENTIAL=TOTAL ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=11
VOLUMELABEL='Front Magnetization Direction' SIZE=5
$ END IF

//-----
//Aire grueso y aire bobinas
//
//Aire a malla grueso dentro y justo alrededor de la pieza (tamaño de aprox. 5 o 7.5)
//Total por que debe existir una interface TOTAL-REDUCIDO en el modelo (la bobina tiene aire con potencial
reducido)

```

## TFM - Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

```
//Antonio Uson ha recomendado alternar aire con potencial reducido y total
//Dejar el tamaño en 7.5, con la geometría usada finalmente un aire más grueso provoca errores de mallado en
volumen.
//Se puede reducir a 5 para mejorar los calculos en general, sobre todo si el mapa de B en los polos parece tener
defectos.
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireGrueso'
CELLDATA OPTION=MODIFY POTENTIAL=Total ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=2 SIZE=7.5

//Aire alrededor de las bobinas (mallar decentemente, o dará Warnings en Solver y avisos de mal mallado) es bueno
que tenga el mismo meshsize que el metal
//(segun manual, potencial escalar reducido para conductores por Biot & Savart)
//Usar tamaño 2.5 si los campos B en los polos parecen tener defectos
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireBobinaAxial'
$ IF #formaPolos E 0
    PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireBobinasRadial'
$ END IF
CELLDATA OPTION=MODIFY POTENTIAL=Reduced ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=3 SIZE=5

//-----
//Aire alrededor del rotor - materiales y levels

//entrehierros de los polos-rotor, mallar bien para calculo de Fuerzas X e Y
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorPolGapY'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorPolGapX'
CELLDATA OPTION=MODIFY POTENTIAL=Automatic ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=5 SIZE=#PoleGapMeshSize

PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorExtCent'
$ IF #formaPolos E 0
    //el mallado del aire entre los polos no puede ser muy diferente del entrehierro o dará errores de mallado
    //Tambien he observado que un mallado grueso en esa zona NO acelera la solución, le cuesta más
iteraciones converger
    CELLDATA OPTION=MODIFY POTENTIAL=Automatic ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=3
    SIZE=#PoleGapMeshSize
    $ END IF
    $ IF #formaPolos E 1
        CELLDATA OPTION=MODIFY POTENTIAL=Automatic ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=3
        SIZE=#PoleGapMeshSize
    $ END IF

//entrehierros del rotor con el estator, mallar bien para el calculo de Fuerzas Z.
//requiere un mallado especialmente fino al haber esquinas y mucho campo magentico en poca superficie relevante
//0.2 deberia ser suficiente para muchas simulaciones, pero si el gap se vuelve más pequeño que 0.4mm o se quiere
mucha precision
//es preferible un mallado de 0.1mm (más lento).
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorGap1'
PICK OPTION=TOGGLE PROPERTY=UniqueName LABEL='AireRotorGap2'
CELLDATA OPTION=MODIFY POTENTIAL=Automatic ELEMENTTYPE=Linear LEVEL=6 SIZE=#GapMeshSize

//-----
//BOBINAS
//Crear bobinas y dejar la corriente a cero A/mm2
//-----

//-----
//BOBINAS DEL ESTATOR DE CONTROL RADIAL (CUATRO BOBINAS)
//
//Hacer las bobinas para la forma polar standard (en otras formas ni siquiera hay bobinas radiales)
//Dado que las bobinas deben estar totalmente rodeadas y contenidas en aire con potencial reducido, las
//bobinas no deben colisionar con otros objetos, ni siquiera compartir caras. Por eso hay una pequeña separacion
//entre la bobina y el polo alrededor del cual se arrolla, esa separación debe ser suficientemente grande
//para evitar warnings al ejecutar el Solver.
$ IF #formaPolos E 0
    //Hacer una de las bobinas del estator radial.
    RACETRACK OPTION=NEW -KEEP XP1=#PoloGrosor/2+0.2 YP1=-3.2 WIDTH=7 THICKNESS=6.4
    H1=#PoloLong/2+0.1 R1=0.1 INCIRCUIT=NO CIRCUITELEMENT= CURD=1 TOLERANCE=0 REVERSE=NO DRIVELABEL='Radial-
    Winding-Y' LCNAME='Global coordinate system' XCEN2=0 YCEN2=28 ZCEN2=0 THETA2=0 PHI2=0 PSI2=180 RXY=0 RYZ=0
    RZX=0 SYMMETRY=0 MODELCOMPONENT=NO

    //Copiar la bobina original y rotarla para hacer todas las bobinas del estator radial
    //Además se asocian las bobinas a los Drives correspondientes (para asociar diferentes bobinas que estan
    en el mismo circuito)
    PICK OPTION=TOGGLE TYPE=COND N=1
    TRANSFORM OPTION=COPY KEEP=NO TYPE=ROTATE ROTU=0 ROTV=0 ROTW=1 ANGLE=90 COUNT=3
```

```

//Correccion de las direcciones de las corrientes por las bobinas (angulos)
PICK OPTION=TOGGLE TYPE=COND N=3
RACETRACK OPTION=MODIFY -KEEP XP1=#PoloGrosor/2+0.2 YP1=-3.2 WIDTH=7 THICKNESS=6.4
H1=#PoloLong/2+0.1 R1=0.1 INCIRCUIT=NO CIRCUITELEMENT= CURD=1 TOLERANCE=0 DRIVELABEL='Radial-Winding-Y'
LCNAME='Global coordinate system' XCEN2=-28 YCEN2=0 ZCEN2=0 THETA2=0 PHI2=0 PSI2=180 RXY=0 RYZ=0 RZX=0
SYMMETRY=0 MODELCOMPONENT=NO
PICK OPTION=TOGGLE TYPE=COND N=2
RACETRACK OPTION=MODIFY -KEEP XP1=#PoloGrosor/2+0.2 YP1=-3.2 WIDTH=7 THICKNESS=6.4
H1=#PoloLong/2+0.1 R1=0.1 INCIRCUIT=NO CIRCUITELEMENT= CURD=1 TOLERANCE=0 DRIVELABEL='Radial-Winding-X'
LCNAME='Global coordinate system' XCEN2=-28 YCEN2=0 ZCEN2=0 THETA2=0 PHI2=0 PSI2=90 RXY=0 RYZ=0 RZX=0
SYMMETRY=0 MODELCOMPONENT=NO
PICK OPTION=TOGGLE TYPE=COND N=4
RACETRACK OPTION=MODIFY -KEEP XP1=#PoloGrosor/2+0.2 YP1=-3.2 WIDTH=7 THICKNESS=6.4
H1=#PoloLong/2+0.1 R1=0.1 INCIRCUIT=NO CIRCUITELEMENT= CURD=1 TOLERANCE=0 DRIVELABEL='Radial-Winding-X'
LCNAME='Global coordinate system' XCEN2=28 YCEN2=0 ZCEN2=0 THETA2=0 PHI2=0 PSI2=90 RXY=0 RYZ=0 RZX=0
SYMMETRY=0 MODELCOMPONENT=NO
$ END IF

//-----
//BOBINA DEL ESTATOR DE CONTROL AXIAL (THRUST O EJE Z)
//
//Bobina grande del estator axial exterior. Puede tener diferentes dimensiones,
//lo importante es la sección y que quepa en el volumen de aire de potencial reducido.
SOLENOID OPTION=NEW -KEEP XP1=49.06 YP1=20 XP2=49.06 YP2=-20 XP3=56.5 YP3=-20 XP4=56.5 YP4=20 CP1=0
CP2=0 CP3=0 CP4=0 INCIRCUIT=NO CIRCUITELEMENT= CURD=1 TOLERANCE=0 DRIVELABEL='Thrust-Windings'
LCNAME='Global coordinate system' XCEN2=0 YCEN2=0 ZCEN2=0 THETA2=90 PHI2=-90 PSI2=-90 RXY=0 RYZ=0 RZX=0
SYMMETRY=0 MODELCOMPONENT=YES MESH SIZE=10
//SOLENOID OPTION=NEW -KEEP XP1=52.1 YP1=24 XP2=52.1 YP2=-24 XP3=58.3 YP3=-24 XP4=58.3 YP4=24 CP1=0
CP2=0 CP3=0 CP4=0 INCIRCUIT=NO CIRCUITELEMENT= CURD=1 TOLERANCE=0 DRIVELABEL='Thrust-Windings'
LCNAME='Global coordinate system' XCEN2=0 YCEN2=0 ZCEN2=0 THETA2=90 PHI2=-90 PSI2=-90 RXY=0 RYZ=0 RZX=0
SYMMETRY=0 MODELCOMPONENT=NO

//-----
//ESCRIBIR EN EL LOG
//CONDUCTORS es variable de sistema
$ open 1 &NombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1
$ string Cabecera '//-----'
$ write 1 Cabecera
$ string Cabecera '//-----'
$ write 1 Cabecera
$ string Cabecera 'Geometría definida para simulacion i%INT(##), hay %INT(CONDUCTORS) bobinas, script
&COMBASENAME&, &NOW& &TODAY&'
$ write 1 Cabecera
$ close 1

//-----
//CONDICIONES CONTORNO, CREAR/VOLVER A CREAR BODY (CONTENEDOR)
//
//Forma del contenedor y de las condiciones de contorno.
//Notar que la escala Z escala toda la dimension en el eje Z, mientras que la escala R escala el Radio, no el Diametro
del Cilindro contenedor.
//-----

//Sin simetria (lo habitual en este modelo)
$ IF #SIMETRIA E 0
BACKGROUND OPTION=SET SHAPE=CYLINDER SCALEZ=5 SCALER=5 RXY=NONE RYZ=NONE RZX=NONE
ROTZTYPE=NONE BCFRONT=TANGMAGN BCBACK=TANGMAGN BCRADIUS=TANGMAGN
$ END IF
//Opcional: Con simetria (ROTZNUM indica el numero de sectores)
$ IF #SIMETRIA E 1
BACKGROUND OPTION=SET SHAPE=CYLINDER SCALEZ=5 SCALER=5 RXY=NONE RYZ=NONE RZX=NONE
ROTZTYPE=TANGMAGN ROTZNUM=16 BCFRONT=TANGMAGN BCBACK=TANGMAGN BCRADIUS=TANGMAGN
$ END IF

//Crear el Body
MODEL CREATE

//-----
//MALLADO EN SUPERFICIE Y VOLUMEN
//-----
//Mallado de superficies y despues en Volumen
MESH SIZE=#GeneralMeshSize NORMALTOL=#MESH_NORMALTOL SURFACETOL=0.0 TOLERANCE=#MESH_TOL
//Escribir en el log, NODES es variable del sistema
$ string Cabecera 'Mallado de superficie terminado, hay %INT(NODES) nodos, &NOW& &TODAY&'
$ open 1 &NombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1 | $ write 1 Cabecera

```

```

$ close 1
FILL TOL=#FILL_TOL
//Escribir en el log, NODES es variable del sistema
$ string Cabecera 'Mallado de Volumen terminado, hay %INT(NODES) nodos, &NOW& &TODAY&'
$ open 1 &sNombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1 | $ write 1 Cabecera
$ close 1

//-----
//Bucle de simulaciones en funcion de las densidades de corriente por las bobinas
//Mientras el numero de configuraciones de corriente simuladas PARA UNA POSICION DEL ROTOR CONCRETA sea
menor que el numero deseado...
//(j se inicializa en 0)
//Notar que en este bucle la geometría no cambia, solo la corriente por las bobinas.
//-----
$ constant #j 0
//
$ WHILE #j LT #JnumSimulac
//Calcular el numero de simulacion (solo utilizado para numerar los resultados y algunos ficheros)
//Notar que n siempre empezará en 1 (inicializa en 0 y ahora le sumamos 1 antes de usarlo en cualquier
expresión)
$ constant #n #i*#JnumSimulac+#j+1

//Titulo a mostrar en la ventana del modelo (se modifica para cada simulacion multiple, con datos
adicionales)
TITLE POSITION=TOPLEFT STRING='&sTitulo&. Simulacion num%iNT(#n)' DATE=TOPRIGHT

//-----
//CAMBIAR LA CORRIENTE A LA ADECUADA PARA ESTE PASO DE SIMULACION
//Excepto si es el numero de simulacion de corrientes j==0 (corriente inicial)
//en cuyo caso simplemente configuraremos la corriente inicial
$ IF #j E 0
//Simulacion cero, aplicar corrientes iniciales
$constant #currentX      #JiniX
$constant #currentY      #JiniY
$constant #currentZ      #JiniZ
$ELSE
//Simulacion posterior, requiere cambiar la corriente los pasos necesarios
$constant #currentX      #JiniX+(#j*#JdeltaX)
$constant #currentY      #JiniY+(#j*#JdeltaY)
$constant #currentZ      #JiniZ+#j*#JdeltaZ
$ END IF

//-----
//CAMBIAR LA DENSIDAD DE CORRIENTE POR LAS BOBINAS A/mm2
//
//Densidad de Corriente por las bobinas: Las bobinas se han construido con 1A/mm2 por defecto y estan
asociadas a un "Drive"
//Así las dos bobinas diferentes por las que realmente debe pasar la misma corriente, tendrán la misma
corriente.
//Cambiando el factor de escalado del Drive podemos cambiar la densidad de corriente de las bobinas
//(la corriente es función de sección del cable, nº de vueltas y densidad de corriente;
//pero en Opera no indicamos ni corriente ni vueltas ni sección del cable; solo la seccion total del
bobinado y la densidad de corriente, cuidado)
//El factor de escala del Drive simplemente multiplica la corriente por defecto, por lo que un escalado 0
dejara la corriente en 0, y escala 10 nos dara 10 A.
DRIVE PICK 'Radial-Winding-X'
DRIVE OPTION=MODIFY SCALE=#currentX
DRIVE UNPICK 'Radial-Winding-X'
DRIVE PICK 'Radial-Winding-Y'
DRIVE OPTION=MODIFY SCALE=#currentY
DRIVE UNPICK 'Radial-Winding-Y'
DRIVE PICK 'Thrust-Windings'
DRIVE OPTION=MODIFY SCALE=#currentZ
DRIVE UNPICK 'Thrust-Windings'

//-----
//OTROS PARAMETROS
//Aunque la simulacion original cambia las corrientes, nada impide hacer unos pequeños cambios y probar
diferentes materiales
//para la misma geometría, por ejemplo. Simplemente hay que configurar correctamente la simulacion
para que no modifique la geometria
//ni las corrientes, pero que intente simular diferentes corrientes.

```





## TFM - Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

```
$ string Cabecera 'Base de datos creada, &NOW& &TODAY&'
$ open 1 &sNombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1 | $ write 1 Cabecera
$ close 1

//-----
//RESOLVER/ANALIZAR EL MODELO
//
que se termina de analizar el modelo.
//Llamamos al programa de analisis TOSCA, al llamarlo de esta manera Modeller y el script se pausan hasta
//Ademas al terminar de analizar, TOSCA se cerrara. Así el proceso es secuencial.
$ OS operaanl TOSCA '&sNombre&%INT(#n).op3' FORE

//Escribir en el log
$ string Cabecera 'Modelo resuelto/analizado, &NOW& &TODAY&'
$ open 1 &sNombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1 | $ write 1 Cabecera
$ close 1

//-----
SOBRE ELLOS //LLAMAR AL POSTPROCESADOR PARA QUE ABRA LOS RESULTADOS Y EJECUTE OTROS SCRIPT COMI
//
postprocesador hace su trabajo. //Y una vez terminado el analisis, llamamos al Postprocesador. Modeller queda pausado mientras el
//Notar que le indico tanto la base de datos (op3) a abrir, como el script a ejecutar con ella (comi)
$ OS operapost FORE '&sNombre&%INT(#n).op3' &sPostProcComi&

//Escribir en el log
$ string Cabecera 'El PostProcesador ha terminado sus tareas, &NOW& &TODAY&'
$ open 1 &sNombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1 | $ write 1 Cabecera
$ close 1

//-----
//Hacer avanzar el contador del bucle de simulaciones de corrientes
$ constant #j #j+1

//Fin del bucle en funcion de la configuracion de corrientes por las bobinas
$ END WHILE
/--

//-----
//Hacer avanzar el contador del bucle del desplazamiento del rotor
$ constant #i #i+1

//Fin del bucle en funcion de posicion del rotor
$ END WHILE
//-----

//-----
//CERRAR MODELLER AL FINALIZAR TODO
//-----
//Escribir en el log
$ open 1 &sNombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1
$ string Cabecera '//-----'
$ write 1 Cabecera
$ string Cabecera '//-----'
$ write 1 Cabecera
$ string Cabecera 'Script comi finalizado, &NOW& &TODAY&'
$ write 1 Cabecera
$ close 1

//Eliminar el Body, no es imprescindible, pero al terminar de ejecutar el comi a veces
//no es posible quitar el body manualmente para revisar el modelo.
$ IF MODELBODY E 1
MODEL DELETE
$ END IF
//-----
```

## VIII.II. RodaMagActivoPostProc.comi

```
//-----
//-----
//
//MAGNETIC BEARING - SCRIPT PARA EL POSTPROCESADOR, NORMALMENTE LLAMADO POR OTRO SCRIPT
//
//v. 26-Noviembre-2012
//
//Isaac Royo Silvestre, 2012. Universidad de Zaragoza.
//-----
//
//Script para el Postprocesador, solicitará la información permanente y la guardará en ficheros de texto
//e imagenes.
//
//Este script se debe ejecutar (automaticamente, llamado por otro script) en el PostProcesador de Opera con una única
simulación abierta previamente.
//Solo se capturan correctamente las imagenes si el PostProcesador está seleccionado en primer plano cuando hace estas
tarefas.
//
//Lo habitual es que en un proceso automatizado otro script ejecutado en Modeller haya creado el modelo y haya abierto el
postprocesador,
//abriendo la simulacion apropiada e invocando este script para postprocesar esa simulacion.
//Se espera que la simulacion a postprocesar este en mm (el script cambiara el sistema de unidades cuando sea necesario)
//
//En un proceso automatizado el script de Modeller habrá creado un archivo temporal .tmp que contiene opciones necesarias
para cada
//ejecucion de este script del PostProcesador (así se comunica el script para Modeller con este script para el PostProcesador.
//Puede usarse un segundo .tmp opcional con más opciones.
//El script no está pensado para usarse manualmente sin modificaciones.
//
//El script puede usarse manualmente desde el postprocesador para analizar una unica simulacion ya simulada y abierta.
//Pero entonces no creara los archivos .dat que guardan los resultados, solo añadira datos si estan presentes
//(deben estar inicializados, añadira los datos al final de los archivos de resultados)
//Si el archivo .tmp principal no está presente se usaran los valores por defecto indicados en este script (por defecto
//no se guarda ninguna imagen)
//Si se indica en nombre de un archivo log, ese archivo .log ya debe existir.
//
//-----
//-----

//-----
//VALORES POR DEFECTO
//-----

//Nombre y extension del archivo temporal que contiene las opciones de postprocesado y sirve para
//comunicar el script de Modeller con este otro script (asi que debe coincidir en ambos scripts)
//Normalmente conviene dejar el nombre por defecto, no puede ser cadena vacia
$string sRodaMagActTemp 'RodaMagActivoTemp.tmp'

//Nombre y extension del archivo temporal opcional que contiene las opciones de postprocesado opcionales
//(suele usarse con otro script de postprocesado en lotes opcional).
//No hace falta que el archivo este presente, si no esta en el directorio simplemente se ignora y se aplican los valores por
defecto.
//Normalmente conviene dejar el nombre por defecto, no puede ser cadena vacia.
$string sRodaMagActTemp2 'RodaMagActivoTempOpcional.tmp'

//cadena vacia, es para poder comparar cadenas de texto con la cadena vacia (no es posible usar " en la funcion
//de comparacion ni nada parecido, ya que lo interpreta como una cadena con dos comillas)
$string sEmptyString ""

//-----
//VARIABLES PARA ESTE SCRIPT
//-----

//Variables que se usaran para guardar los campos B maximos y minimos registrados en las
//graficas e imagenes en el log (puede ser de utilidad en ciertos casos y lo guardamos en el log)
$constant #BMin 0
$constant #BMax 0

//Variables de configuracion por defecto con nombres de archivos, etc..
//Normalmente la cadena vacia (no hacer fichero) excepto para los valores de campos B que es * (automatico)
//La idea es leer el archivo temporal de configuracion con esta informacion, pero
//si se quiere usar este script sin dicho archivo se puede configurar aqui.
$string sBHPoloSupDat ""
$string sBHPoloInfDat ""
$string sBHPoloIzqDat ""
$string sBHPoloDerDat ""
$string sFParRotorDat ""
$string sBModEjeZ ""
$string sBModEjeY ""
$string sBModEjeX ""
$string sBModPlanoXY ""
$string sBModPlanoZY ""
$string sBModPlanoZX ""
$string sBModZYGiro45g ""
$string sBModEstatorCRad ""
$string sB_MIN '*'
$string sB_MAX '*'
$string sNombreLog ""
$string sHModPlanoXY ""
```

```

$string sHModPlanoZY "
//Estos son valores por defecto para las variables del segundo archivo de configuracion
//normalmente la cadena vacia " o 'no' para los valores de B (que significa usar el valor indicado por sB_MIN y sB_MAX)
//sBejeZ permite controlar individualmente el rango de la grafica de B en el eje Z, mientras que sBejeXY controla las dos graficas
de B para ejes X e Y
//sB3D controla el rango de B en la foto 3D
//sFuerzas por defecto es 'si' pero vale cualquier valor salvo 'no'; si se cambia a 'no' entonces no se calcularán Fuerzas, Pares y
Energias (para ahorrar tiempo)
$string sHModPlanoZX "
$string sMurPlanoXY "
$string sMurPlanoZY "
$string sMurPlanoZX "
$string sBejeZ_MIN 'no'
$string sBejeZ_MAX 'no'
$string sBejeXY_MIN 'no'
$string sBejeXY_MAX 'no'
$string sB3D_MIN 'no'
$string sB3D_MAX 'no'
$string sFuerzas 'si'

//-----
//OPCIONES DEL POSTPROCESADOR
//Este comando es útil para configurar las capturas de pantalla en las imagenes.
//Consoleview: La consola nunca se muestra en los screenshots, pero sin consola la resolucion es mayor
//Consoledock: Si la consola NO esta docked (-), esta aparece en una ventana aparte, esto permite
//capturas con una resolucion mayor si se usa el buffer 3D, sin tener que quitar la consola
//Extrasview: Si la opcion es - entonces no aparece la lista de unidades, pero da más resolucion
//Print3DCard: Si es + entonces se capturan imagenes de la tarjeta grafica, con - del buffer 2D.
// Por defecto +, ya que con el 2D se captura toda la pantalla incluyendo p.e. el punto del raton y los menus
// del programa. Con la tarjeta grafica solo se captura la imagen en sí y la tabla de unidades.
//-----
GUIOPTIONS OPTION=SET +CONSOLEVIEW -CONSOLEDOCK CONSOLEBUFFER=200 +EXTRASVIEW +PRINT3DCARD
+BACKINGSTORE +WINDOWPOSSAVE

//-----
//LEER OPCIONES DE POSTPROCESADO DEL ARCHIVO TEMPORAL PRINCIPAL
//El script .comi principal de Modeller ha guardado opciones relevantes tipo string en un archivo temporal
//(nombres de archivo, etc.)
//
//Recordar que las variables numericas se han guardado en el fichero op3:
// #n Numero de simulacion; #i paso de desplazamiento del rotor en simulacion (empieza en 0)
// #ejeDesplazX Desplazamiento del rotor en cada paso de simulacion tras el inicial, en el eje X
// #ejeIniX Posicion inicial X del centro del rotor en la posición inicial (#i=0)
// y otras (ver el fichero .comi principal)
//-----
$ EXIST &sRodaMagActTemp&
//Si el archivo temporal existe, leerlo. (FILEEXISTS es una variable de sistema modificada por el comando $EXIST)
$ IF FILEEXISTS NE 0
    $open 1 &sRodaMagActTemp& read
    $cons #a 1
    $errorhandler no
    $read 1 sBHPoloSupDat sBHPoloInfDat sBHPoloIzqDat sBHPoloDerDat sFParRotorDat sBModEjeZ sBModEjeY
sBModEjeX sBModPlanoXY sBModPlanoZY sBModPlanoZX sBModZYGiro45g sBModEstatorCRad sB_MIN sB_MAX sNombreLog
sHModPlanoXY sHModPlanoZY
    $close 1
$ END IF

//Escribir en el log
$ IF %COMPARE(&sNombreLog&, &EmptyString&) NE 0
    $ string Cabecera 'Ejecutando comi para el Postprocesador &COMIBASENAME&, &NOW& &TODAY&'
    $ open 1 &sNombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1 | $ write 1 Cabecera
    $ close 1
$ END IF

//-----
//LEER OPCIONES DE POSTPROCESADO DEL ARCHIVO TEMPORAL OPCIONAL
//Un script .comi principal de Modeller puede haber guardado opciones adicionales en un segundo
//archivo temporal opcional
//-----
$ EXIST &sRodaMagActTemp2&
//Si el archivo temporal opcional existe, leerlo. (FILEEXISTS es una variable de sistema modificada por el comando $EXIST)
$ IF FILEEXISTS NE 0
    $open 1 &sRodaMagActTemp2& read
    $cons #a 1
    $errorhandler no
    $read 1 sHModPlanoZX sMurPlanoXY sMurPlanoZY sMurPlanoZX sBejeZ_MIN sBejeZ_MAX sBejeXY_MIN
sBejeXY_MAX sB3D_MIN sB3D_MAX sFuerzas
    $close 1
    //Escribir en el log
    $ IF %COMPARE(&sNombreLog&, &EmptyString&) NE 0
        $ string Cabecera 'Usando archivo de configuracion opcional &sRodaMagActTemp2&'
        $ open 1 &sNombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1 | $ write 1 Cabecera
        $ close 1
    $ END IF
$ END IF

//-----
//SI EL MODELO ES SIMETRICO, MOSTRARLO ENTERO
//
//Si el modelo se resolvió con simetria (indicado con la opcion #SIMETRIA)
//hay que mostrarlo entero antes de tomar datos.
//De todos modos habra que hacer lo mismo al hacer otros comandos.

```

```

//-----
$ IF #SIMETRIA E 1
  SELECT ACTION=SELECT OPTION=SURFACES ACCURACY=0 SYMMETRY=Full | THREEED OPTION=REFRESH
$ END IF

//-----
//ESCRIBIR DATOS MAGNETICOS DE LOS POLOS, EN ARCHIVOS DE TEXTO
//Recordar que
//la primera linea de los ficheros de texto (con la leyenda de la tabla)
//se ha inicializado en el comi de Modeller.
//Notar que el modelo se espera que este en mm y Teslas
//
//Nota: Las cadenas de texto se han partido en varios trozos por que si se supera el tamaño maximo
//del string (no documentado, supongo que 255) se cuelga el postprocesador sin indicar codigo de error.
//Por otro lado usar el limitador de width (funcion de Opera) para formatear los numeros no sirve, por que con numeros
//pequeños
//introduce espacios en el numero, en vez de ceros, creando espacios multiples.
//
//Nota: La comparacion %COMPARE debe hacerse con el formato indicado (con espacio tras la coma),
//si no da error cuando la segunda cadena es una cadena vacia. Cosas de Opera.
//-----

//Calculo de Valores magneticos en el punto en el centro del polo superior del estator radial
//Si se ha definido un nombre para el archivo de texto.
$ IF %COMPARE(&sbHPoloSupDat&, &EmptyString&) NE 0
  POINT XP=0.0 YP=29.25 ZP=0.0
  //Registro de datos en fichero de texto
  $ string Datos '%INT(#n) %REAL(#rotorX,8) %REAL(#rotorY,8) %REAL(#rotorZ,8)'
  $ string Datos2 ' %REAL(#currentX,8) %REAL(#currentY,8) %REAL(#currentZ,8)'
  $ string Datos3 ' %REAL(X,8) %REAL(Y,8) %REAL(Z,8)'
  $ string Datos4 ' %REAL(BMod,8) %REAL(Bx,8) %REAL(By,8) %REAL(Bz,8)'
  $ string Datos5 ' %REAL(H0,8) %REAL(HMod,8) %REAL(Hx,8) %REAL(Hy,8) %REAL(Hz,8)'
  $ EXIST &sbHPoloSupDat&
  $ IF FILEEXISTS NE 0
    $ open 1 &sbHPoloSupDat& append
    $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE
    $ assign 1 1 1 1 1
    $ write 1 Datos Datos2 Datos3 Datos4 Datos5
    $ close 1
  $ END IF
$ END IF

//Calculo de Valores magneticos en el punto en el centro del polo inferior del estator radial
//Si se ha definido un nombre para el archivo de texto.
$ IF %COMPARE(&sbHPoloInfDat&, &EmptyString&) NE 0
  POINT XP=0.0 YP=-29.25 ZP=0.0
  //Registro de datos en fichero de texto
  $ string Datos '%INT(#n) %REAL(#rotorX,8) %REAL(#rotorY,8) %REAL(#rotorZ,8)'
  $ string Datos2 ' %REAL(#currentX,8) %REAL(#currentY,8) %REAL(#currentZ,8)'
  $ string Datos3 ' %REAL(X,8) %REAL(Y,8) %REAL(Z,8)'
  $ string Datos4 ' %REAL(BMod,8) %REAL(Bx,8) %REAL(By,8) %REAL(Bz,8)'
  $ string Datos5 ' %REAL(H0,8) %REAL(HMod,8) %REAL(Hx,8) %REAL(Hy,8) %REAL(Hz,8)'
  $ EXIST &sbHPoloInfDat&
  $ IF FILEEXISTS NE 0
    $ open 1 &sbHPoloInfDat& append
    $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE
    $ assign 1 1 1 1 1
    $ write 1 Datos Datos2 Datos3 Datos4 Datos5
    $ close 1
  $ END IF
$ END IF

//Calculo de Valores magneticos en el punto en el centro del polo superior del estator radial
//Si se ha definido un nombre para el archivo de texto.
$ IF %COMPARE(&sbHPoloIzqDat&, &EmptyString&) NE 0
  POINT XP=29.25 YP=0.0 ZP=0.0
  //Registro de datos en fichero de texto
  $ string Datos '%INT(#n) %REAL(#rotorX,8) %REAL(#rotorY,8) %REAL(#rotorZ,8)'
  $ string Datos2 ' %REAL(#currentX,8) %REAL(#currentY,8) %REAL(#currentZ,8)'
  $ string Datos3 ' %REAL(X,8) %REAL(Y,8) %REAL(Z,8)'
  $ string Datos4 ' %REAL(BMod,8) %REAL(Bx,8) %REAL(By,8) %REAL(Bz,8)'
  $ string Datos5 ' %REAL(H0,8) %REAL(HMod,8) %REAL(Hx,8) %REAL(Hy,8) %REAL(Hz,8)'
  $ EXIST &sbHPoloIzqDat&
  $ IF FILEEXISTS NE 0
    $ open 1 &sbHPoloIzqDat& append
    $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE
    $ assign 1 1 1 1 1
    $ write 1 Datos Datos2 Datos3 Datos4 Datos5
    $ close 1
  $ END IF
$ END IF

//Calculo de Valores magneticos en el punto en el centro del polo superior del estator radial
//Si se ha definido un nombre para el archivo de texto.
$ IF %COMPARE(&sbHPoloDerDat&, &EmptyString&) NE 0
  POINT XP=-29.25 YP=0.0 ZP=0.0
  //Registro de datos en fichero de texto
  $ string Datos '%INT(#n) %REAL(#rotorX,8) %REAL(#rotorY,8) %REAL(#rotorZ,8)'
  $ string Datos2 ' %REAL(#currentX,8) %REAL(#currentY,8) %REAL(#currentZ,8)'
  $ string Datos3 ' %REAL(X,8) %REAL(Y,8) %REAL(Z,8)'
  $ string Datos4 ' %REAL(BMod,8) %REAL(Bx,8) %REAL(By,8) %REAL(Bz,8)'
  $ string Datos5 ' %REAL(H0,8) %REAL(HMod,8) %REAL(Hx,8) %REAL(Hy,8) %REAL(Hz,8)'
  $ EXIST &sbHPoloDerDat&
  $ IF FILEEXISTS NE 0
    $ open 1 &sbHPoloDerDat& append

```

```

$ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE
$ assign 1 1 1 1 1
$ write 1 Datos Datos2 Datos3 Datos4 Datos5
$ close 1
$ END IF
$ END IF

//-----
//CREAR Y GUARDAR IMAGENES DEL CAMPO MAGNETICO
//Notar que el modelo se espera que este en mm y Teslas
//
//Cuidado con el campo TITLE, si se vuelve demasiado grande la cadena de texto, Opera
//se colgará sin emitir un mensaje de error.
//-----

//Comparar las configuraciones específicas y generales y elegir la prioritaria
$ IF %COMPARE(&sBejeZ_MIN&,no) E 0
  $string sBejeZ_MIN &sB_MIN&
$ END IF
$ IF %COMPARE(&sBejeZ_MAX&,no) E 0
  $string sBejeZ_MAX &sB_MAX&
$ END IF

$ IF %COMPARE(&sBejeXY_MIN&,no) E 0
  $string sBejeXY_MIN &sB_MIN&
$ END IF
$ IF %COMPARE(&sBejeXY_MAX&,no) E 0
  $string sBejeXY_MAX &sB_MAX&
$ END IF

$ IF %COMPARE(&sB3D_MIN&,no) E 0
  $string sB3D_MIN &sB_MIN&
$ END IF
$ IF %COMPARE(&sB3D_MAX&,no) E 0
  $string sB3D_MAX &sB_MAX&
$ END IF

//Grafico del Modulo de B en el eje Z
//Si se ha definido un nombre para el archivo de imagen.
//Nota, el titulo se escribe de dos formas distintas, ya que el titulo en el grafico solo se ve entero en funcion de la configuracion
//y la resolucio de pantalla. El titulo en letras pequeñas de Opera es más fiable.
$ IF %COMPARE(&sBModEjeZ&, &EmptyString&) NE 0
  $string sTitulo 'ModB ejeZ. Sim n°%INT(#n), Pos rotor XYZ mm (%REAL(#rotorX,8), %REAL(#rotorY,8), %REAL(#rotorZ,8)). J bobin XYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,8), %REAL(#currentY,8), %REAL(#currentZ,8)):'
  title string='&sTitulo&' position=topleft date=topleft
  LINE X1=0 X2=X1 Y1=0 Y2=Y1 Z1=-33 Z2=33 NP=1000 BUFFER=Line
  PLOT FILE=TEMP COMPONENT=Bmod TITLE='&sTitulo&' YMINIMUM=&sBejeZ_MIN& YMAXIMUM=&sBejeZ_MAX&
  PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sBModEjeZ&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF
//MIN y MAX son funciones de Opera, MINIMUM y MAXIMUM son variables de sistema del Postproc
$constant #BMin MIN(#BMin;MINIMUM)
$constant #BMax MAX(#BMax;MAXIMUM)

//Grafico del Modulo de B en el eje Y
$ IF %COMPARE(&sBModEjeY&, &EmptyString&) NE 0
  $string sTitulo 'ModB ejeY. Sim n°%INT(#n), Pos rotor XYZ mm (%REAL(#rotorX,8), %REAL(#rotorY,8), %REAL(#rotorZ,8)). J bobin XYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,8), %REAL(#currentY,8), %REAL(#currentZ,8)):'
  title string='&sTitulo&' position=topleft date=topleft
  LINE X1=-70 X2=X1 Y1=-70 Y2=70 Z1=0 Z2=0 NP=1000 BUFFER=Line
  PLOT FILE=TEMP COMPONENT=Bmod TITLE='&sTitulo&' YMINIMUM=&sBejeXY_MIN& YMAXIMUM=&sBejeXY_MAX&
  PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sBModEjeY&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF
$constant #BMin MIN(#BMin;MINIMUM)
$constant #BMax MAX(#BMax;MAXIMUM)

//Grafico del Modulo de B en el eje X
$ IF %COMPARE(&sBModEjeX&, &EmptyString&) NE 0
  $string sTitulo 'ModB ejeX. Sim n°%INT(#n), Pos rotor XYZ mm (%REAL(#rotorX,8), %REAL(#rotorY,8), %REAL(#rotorZ,8)). J bobin XYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,8), %REAL(#currentY,8), %REAL(#currentZ,8)):'
  title string='&sTitulo&' position=topleft date=topleft
  LINE X1=-70 X2=70 Y1=0 Y2=0 Z1=0 Z2=0 NP=1000 BUFFER=Line
  PLOT FILE=TEMP COMPONENT=Bmod TITLE='&sTitulo&' YMINIMUM=&sBejeXY_MIN& YMAXIMUM=&sBejeXY_MAX&
  PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sBModEjeX&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF
$constant #BMin MIN(#BMin;MINIMUM)
$constant #BMax MAX(#BMax;MAXIMUM)

//Mapa de B en el plano XY central
//Nota: Los angulos de la vista de los ejes no son exactamente 0 por que en ese caso no se muestra correctamente el eje de
//coordenadas
$ IF %COMPARE(&sBModPlanoXY&, &EmptyString&) NE 0
  title string='ModB plano XY. Sim n°%INT(#n) PosRotorXYZ mm(%REAL(#rotorX,6),%REAL(#rotorY,6),%REAL(#rotorZ,6)). J bobXYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,6),%REAL(#currentY,6),%REAL(#currentZ,6))' position=topleft
  CARTESIAN X1=-70 X4=X1 Y1=-70 Y2=Y1 X3=70 X2=X3 Y3=70 Y4=Y3 Z1=0 Z2=Z1 Z3=Z1 Z4=Z1 CORNERS=4 N1=280
  N2=280 BUFFER=Cartesian
  MAP FILE=TEMP COMPONENT=BMOD MIN=&sB_MIN& MAX=&sB_MAX& CONTOUR=ZONES
  THREED OPTION=SETVIEW SIZE=70 | THREED OPTION=SETVIEW ROTX=0.0001 ROTY=0.0001 ROTZ=0.0001
  PERSPECTIVE=NO
  WINDOW SOLID=NO OUTLINE=NO AXES=YES
  PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sBModPlanoXY&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF
$constant #BMin MIN(#BMin;MINIMUM)
$constant #BMax MAX(#BMax;MAXIMUM)

//Mapa de B en el plano ZY central

```

## TFM - Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

```
$ IF %COMPARE(&sBModPlanoZY&, &sEmptyString&) NE 0
  title string='ModB plano ZY. Sim n%INT(#n) PosRotorXYZ mm(%REAL(#rotorX,6),%REAL(#rotorY,6),%REAL(#rotorZ,6)).
J bobXYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,6),%REAL(#currentY,6),%REAL(#currentZ,6))' position=topleft
  CARTESIAN Y1=-70 Y4=Y1 Z1=-33 Z2=Z1 Y3=70 Y2=Y3 Z3=33 Z4=Z3 X1=0 X2=X1 X3=X1 X4=X1 CORNERS=4 N1=280
N2=132 BUFFER=Cartesian
  MAP FILE=TEMP COMPONENT=BMOD MIN=&sB_MIN& MAX=&sB_MAX& CONTOUR=ZONES
  THREED OPTION=SETVIEW SIZE=70 | THREED OPTION=SETVIEW ROTX=0.0001 ROTY=90.0000 ROTZ=0.0001
PERSPECTIVE=NO
  WINDOW SOLID=NO OUTLINE=NO AXES=YES
  PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sBModPlanoZY&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF
$constant #BMin MIN(#BMin;MINIMUM)
$constant #BMax MAX(#BMax;MAXIMUM)

//Mapa de B en el plano ZX central (deberia ser muy similar a ZY)
$ IF %COMPARE(&sBModPlanoZX&, &sEmptyString&) NE 0
  title string='ModB plano ZX. Sim n%INT(#n) PosRotorXYZ mm(%REAL(#rotorX,6),%REAL(#rotorY,6),%REAL(#rotorZ,6)).
J bobXYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,6),%REAL(#currentY,6),%REAL(#currentZ,6))' position=topleft
  CARTESIAN Z1=-33 Z4=Z1 X1=-70 X2=X1 Z3=33 Z2=Z3 X3=70 X4=X3 Y1=0 Y2=Y1 Y3=Y1 Y4=Y1 CORNERS=4 N1=132
N2=280 BUFFER=Cartesian
  MAP FILE=TEMP COMPONENT=BMOD MIN=&sB_MIN& MAX=&sB_MAX& CONTOUR=ZONES
  THREED OPTION=SETVIEW SIZE=70 | THREED OPTION=SETVIEW ROTX=-90 ROTY=0.0001 ROTZ=0.0001
PERSPECTIVE=NO
  WINDOW SOLID=NO OUTLINE=NO AXES=YES
  PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sBModPlanoZX&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF
$constant #BMin MIN(#BMin;MINIMUM)
$constant
#BMax MAX(#BMax;MAXIMUM)

//Mapa de H y Vectores de B en el plano XY central
//Nota: Los angulos de la vista de los ejes no son exactamente 0 por que en ese caso no se muestra correctamente el eje de
coordenadas
$ IF %COMPARE(&sHModPlanoXY&, &sEmptyString&) NE 0
  title string='ModH VectorB OXY. Sim n%INT(#n) PosRotorXYZ mm(%REAL(#rotorX,6),%REAL(#rotorY,6),
%REAL(#rotorZ,6)). J bobXYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,6),%REAL(#currentY,6),%REAL(#currentZ,6))' position=topleft
  CARTESIAN X1=-70 X4=X1 Y1=-70 Y2=Y1 X3=70 X2=X3 Y3=70 Y4=Y3 Z1=0 Z2=Z1 Z3=Z1 Z4=Z1 CORNERS=4 N1=50
N2=50 BUFFER=Cartesian
  MAP FILE=TEMP COMPONENT=HMOD MIN=* MAX=* CONTOUR=ZONES GRID=NO VECTOR=YES VX=Bx VY=By VZ=Bz
SCALE=4 VECSBYSIZE=YES VMIN=* VMAX=* ERASE=YES PRINT=NO
  THREED OPTION=SETVIEW SIZE=70 | THREED OPTION=SETVIEW ROTX=0.0001 ROTY=0.0001 ROTZ=0.0001
PERSPECTIVE=NO
  WINDOW SOLID=NO OUTLINE=NO AXES=YES
  PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sHModPlanoXY&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF

//Mapa de H y Vectores de B en el plano ZY central
//Nota: Los angulos de la vista de los ejes no son exactamente 0 por que en ese caso no se muestra correctamente el eje de
coordenadas
$ IF %COMPARE(&sHModPlanoZY&, &sEmptyString&) NE 0
  title string='ModH VectorB OZY. Sim n%INT(#n) PosRotorXYZ mm(%REAL(#rotorX,6),%REAL(#rotorY,6),
%REAL(#rotorZ,6)). J bobXYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,6),%REAL(#currentY,6),%REAL(#currentZ,6))' position=topleft
  CARTESIAN Y1=-70 Y4=Y1 Z1=-33 Z2=Z1 Y3=70 Y2=Y3 Z3=33 Z4=Z3 X1=0 X2=X1 X3=X1 X4=X1 CORNERS=4 N1=56
N2=26 BUFFER=Cartesian
  MAP FILE=TEMP COMPONENT=HMOD MIN=* MAX=* CONTOUR=ZONES GRID=NO VECTOR=YES VX=Bx VY=By VZ=Bz
SCALE=4 VECSBYSIZE=YES VMIN=* VMAX=* ERASE=YES PRINT=NO
  THREED OPTION=SETVIEW SIZE=70 | THREED OPTION=SETVIEW ROTX=0.0001 ROTY=90.0000 ROTZ=0.0001
PERSPECTIVE=NO
  WINDOW SOLID=NO OUTLINE=NO AXES=YES
  PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sHModPlanoZY&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF

//Mapa de H y Vectores de B en el plano ZX central
$ IF %COMPARE(&sHModPlanoZX&, &sEmptyString&) NE 0
  title string='ModH VectorB OZX. Sim n%INT(#n) PosRotorXYZ mm(%REAL(#rotorX,6),%REAL(#rotorY,6),
%REAL(#rotorZ,6)). J bobXYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,6),%REAL(#currentY,6),%REAL(#currentZ,6))' position=topleft
  CARTESIAN Z1=-33 Z4=Z1 X1=-70 X2=X1 Z3=33 Z2=Z3 X3=70 X4=X3 Y1=0 Y2=Y1 Y3=Y1 Y4=Y1 CORNERS=4 N1=26
N2=56 BUFFER=Cartesian
  MAP FILE=TEMP COMPONENT=HMOD MIN=* MAX=* CONTOUR=ZONES GRID=NO VECTOR=YES VX=Bx VY=By VZ=Bz
SCALE=4 VECSBYSIZE=YES VMIN=* VMAX=* ERASE=YES PRINT=NO
  THREED OPTION=SETVIEW SIZE=70 | THREED OPTION=SETVIEW ROTX=-90 ROTY=0.0001 ROTZ=0.0001
PERSPECTIVE=NO
  WINDOW SOLID=NO OUTLINE=NO AXES=YES
  PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sHModPlanoZX&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF

//Mapa de MuR (permeabilidad magnetica relativa) en el plano XY central
//Nota: Los angulos de la vista de los ejes no son exactamente 0 por que en ese caso no se muestra correctamente el eje de
coordenadas
$ IF %COMPARE(&sMurPlanoXY&, &sEmptyString&) NE 0
  title string='MuR (perm mag rel) OXY. Sim n%INT(#n) PosRotorXYZ mm(%REAL(#rotorX,6),%REAL(#rotorY,6),
%REAL(#rotorZ,6)). J bobXYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,6),%REAL(#currentY,6),%REAL(#currentZ,6))' position=topleft
  CARTESIAN X1=-70 X4=X1 Y1=-70 Y2=Y1 X3=70 X2=X3 Y3=70 Y4=Y3 Z1=0 Z2=Z1 Z3=Z1 Z4=Z1 CORNERS=4 N1=280
N2=280 BUFFER=Cartesian
  MAP FILE=TEMP COMPONENT=BMOD/(HMOD*mu0) MIN=* MAX=* CONTOUR=ZONES GRID=NO VECTOR=NO
  THREED OPTION=SETVIEW SIZE=70 | THREED OPTION=SETVIEW ROTX=0.0001 ROTY=0.0001 ROTZ=0.0001
PERSPECTIVE=NO
  WINDOW SOLID=NO OUTLINE=NO AXES=YES
  PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sMurPlanoXY&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF

//Mapa de MuR (permeabilidad magnetica relativa) en el plano ZY central
$ IF %COMPARE(&sMurPlanoZY&, &sEmptyString&) NE 0
  title string='MuR (perm mag rel) OZY. Sim n%INT(#n) PosRotorXYZ mm(%REAL(#rotorX,6),%REAL(#rotorY,6),
%REAL(#rotorZ,6)). J bobXYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,6),%REAL(#currentY,6),%REAL(#currentZ,6))' position=topleft
  CARTESIAN Y1=-70 Y4=Y1 Z1=-33 Z2=Z1 Y3=70 Y2=Y3 Z3=33 Z4=Z3 X1=0 X2=X1 X3=X1 X4=X1 CORNERS=4 N1=280
```



## TFM - Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

```

N2=132 BUFFER=Cartesian
MAP FILE=TEMP COMPONENT=BMOD/(HMOD*mu0) MIN=* MAX=* CONTOUR=ZONES
THREED OPTION=SETVIEW SIZE=70 | THREED OPTION=SETVIEW ROTX=0.0001 ROTY=90.0000 ROTZ=0.0001
PERSPECTIVE=NO
WINDOW SOLID=NO OUTLINE=NO AXES=YES
PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sMurPlanoZY&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF

//Mapa de MuR (permeabilidad magnetica relativa) en el plano ZX central
$ IF %COMPARE(&sMurPlanoZX&, &sEmptyString&) NE 0
  title string='MuR (perm mag rel) 0ZX. Sim n%INT(#n) PosRotorXYZ mm(%REAL(#rotorX,6),%REAL(#rotorY,6),
%REAL(#rotorZ,6)). J bobXYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,6),%REAL(#currentY,6),%REAL(#currentZ,6))' position=topleft
  CARTESIAN Z1=-33 Z4=-Z1 X1=-70 X2=X1 Z3=33 Z2=Z3 X3=70 X4=X3 Y1=0 Y2=Y1 Y3=Y1 Y4=Y1 CORNERS=4 N1=280
N2=132 BUFFER=Cartesian
MAP FILE=TEMP COMPONENT=BMOD/(HMOD*mu0) MIN=* MAX=* CONTOUR=ZONES
THREED OPTION=SETVIEW SIZE=70 | THREED OPTION=SETVIEW ROTX=-90 ROTY=0.0001 ROTZ=0.0001
PERSPECTIVE=NO
WINDOW SOLID=NO OUTLINE=NO AXES=YES
PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sMurPlanoZX&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF

//Mapa de B en un plano ZY girado 45° alrededor del eje Z, de manera que vemos un corte que no
//corta ni los polos del estator radial ni los imanes permanentes
$ IF %COMPARE(&sBModZYGiro45g&, &sEmptyString&) NE 0
  title string='ModB ZY 45grados ejeZ. Sim n%INT(#n) Pos rotor XYZ mm(%REAL(#rotorX,6),%REAL(#rotorY,6),
%REAL(#rotorZ,6)). J bobXYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,6),%REAL(#currentY,6),%REAL(#currentZ,6))' position=topleft
  CARTESIAN CORNERS=4, X1=70 Y1=70 Z1=33 X2=-70 Y2=-70 Z2=33 X3=-70 Y3=-70 Z3=-33 X4=70 Y4=70 Z4=-33
N1=132 N2=280 BUFFER=Cartesian
MAP FILE=TEMP COMPONENT=BMOD MIN=&sB_MIN& MAX=&sB_MAX& CONTOUR=ZONES
WINDOW AXES=NO
THREED OPTION=SETVIEW SIZE=70 | THREED OPTION=SETVIEW ROTX=0.0001 ROTY=90 ROTZ=45 PERSPECTIVE=NO
WINDOW SOLID=NO OUTLINE=NO
PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sBModZYGiro45g&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF
$constant #BMin MIN(#BMin;MINIMUM)
$constant #BMax MAX(#BMax;MAXIMUM)

//Dibujo 3D del estator de control radial con colores segun campo B
$ IF %COMPARE(&sBModEstatorCRad&, &sEmptyString&) NE 0
  title string='ModB 3D est c.radial. Sim n%INT(#n) Pos rotor XYZ mm(%REAL(#rotorX,6),%REAL(#rotorY,6),
%REAL(#rotorZ,6)). J bobXYZ A/mm2 (%REAL(#currentX,6),%REAL(#currentY,6),%REAL(#currentZ,6))' position=topleft
  WINDOW AXES=NO
  WINDOW SOLID=YES OUTLINE=NO
  MAP FILE=TEMP COMPONENT=BMOD CONTOUR=NO GRID=NO VECTOR=NO ERASE=YES PRINT=NO
  SELECT ACTION=RESET
  SELECT ACTION=ADD, | SELECT LABEL=IRON
  SELECT ACTION=HIDE, | SELECT LABEL=THRUST_CONTROL_S
  SELECT ACTION=ADD, | SELECT LABEL=PM
  SELECT ACTION=SELECT OPTION=SURFACES ACCURACY=0 SYMMETRY=None | THREED OPTION=REFRESH
  THREED TYPE=COMP LINECOLOUR=YES COMPONENT=Bmod MIN=&sB3D_MIN& MAX=&sB3D_MAX& VECTOR=NO
  VECSBYSIZE=YES XORIGIN=0 YORIGIN=0 ZORIGIN=0 ROTX=20 ROTY=20 ROTZ=0 SIZE=46 FACETANGLE=10 PERSPECTIVE=YES
  XASPECT=1 YASPECT=1 ZASPECT=1 OPTION=SETVIEW
  THREED OPTION=SETVIEW SIZE=0
  PICTURE SAVE=YES FILENAME='&sBModEstatorCRad&%INT(#n).png' TYPE=PNG
$ END IF
$constant #BMin MIN(#BMin;MINIMUM)
$constant #BMax MAX(#BMax;MAXIMUM)

title string="" position=none

$ IF %COMPARE(&sNombreLog&, &sEmptyString&) NE 0
  //Escribir en el log
  $ string Cabecera 'Imágenes, graficas y campos B tomados en Postproc., &NOW& &TODAY&'
  $ open 1 &sNombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1 | $ write 1 Cabecera
  $ close 1
  //Escribir en el log
  $ string Cabecera 'Campos B extremos registrados en imágenes y graficas de esta simulación, BModmin:
%REAL(#BMin) BModmax:%REAL(#BMax)'
  $ open 1 &sNombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1 | $ write 1 Cabecera
  $ close 1
$ END IF

//-----
//ESCRIBIR DATOS DE FUERZAS, ENERGÍAS Y PARES EN EL ROTOR, A UN ARCHIVO DE TEXTO
//Recordar que la primera línea de los ficheros de texto (con la leyenda de la tabla)
//se ha inicializado en el comi de Modeller.
//Notar que el modelo se espera que este en mm y Teslas, pero este código lo pasa al SI
//en metros para tener los pares en N-m
//-----
$ IF %COMPARE(&sFuerzas&,no) NE 0
$ IF %COMPARE(&sFParRotorDat&, &sEmptyString&) NE 0
  //Seleccionamos la superficie del tubo del Rotor para poder calcular Fuerzas en el
  SELECT ACTION=RESET
  SELECT ACTION=TOGGLEADD, | SELECT LABEL=ROTOR
  $ IF #SIMETRIA E 0
    SELECT ACTION=SELECT OPTION=ADD LAYERS=1 ACCURACY=0 SYMMETRY=None | THREED
  OPTION=REFRESH
  $ END IF
  $ IF #SIMETRIA E 1
    SELECT ACTION=SELECT OPTION=ADD LAYERS=1 ACCURACY=0 SYMMETRY=Full | THREED
  OPTION=REFRESH
  $ END IF

  //Cambio de unidad (metros en vez de milímetros) para calcular el Par en N-m
  UNITS LENG=METRE FLUX=TESLA FIEL=AM SCAL=AMP VECT=WBM DISP=CM2 ELEC=VM COND=SM CURD=AM2

```



## TFM - Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

POWE=WATT FORC=NEWTON ENER=JOULE MASS=KG

```
//Maxwell Stress Tensor en las superficies seleccionadas (las coordenadas son las del punto alrededor del cual se
determina el par, debería ser el centro del rotor)
//Recordar pasar de mm a m cuando sea necesario!
INTEGRATE X0=(#rotorX)/1000 Y0=(#rotorY)/1000 Z0=(#rotorZ)/1000
//Metemos los datos en una cadena de texto
$ string Datos '%iNT(#n) %REAL(#rotorX,8) %REAL(#rotorY,8) %REAL(#rotorZ,8)'
$ string Datos2 '%REAL(#currentX,8) %REAL(#currentY,8) %REAL(#currentZ,8)'
$ string Datos3 '%REAL(FX,8) %REAL(FY,8) %REAL(FZ,8)'
$ string Datos4 '%REAL(TORQX,8) %REAL(TORQY,8) %REAL(TORQZ,8)'

//Escribir en el log
$ IF %COMPARE(&sNombreLog&, &sEmptyString&) NE 0
    $ string Cabecera 'Fuerza por Tensor de stress calculada en Postproc., &NOW& &TODAY&'
    $ open 1 &sNombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1 | $ write 1 Cabecera
    $ close 1
$ END IF

//Calculo de Energias en todo el modelo para tomar nota (asi se podría calcular fuerzas por medio de variaciones
de energia en un proceso posterior).
//Cuidado por que este comando ENERGY tambien actualiza FX FY FZ con nuevos datos diferentes a los que da el
Tensor de Maxwell, y con un significado diferente
//Notar que nuestras pruebas han demostrado que cuando un modelo tiene Bobinas e Imanes a la vez, el calculo de
Fuerzas por medio del teorema de trabajos virtuales
//(energias) no es el mejor método en Opera, y posiblemente el calculo de Coenergias no sea fiable.
ENERGY ACTION=RESET
ENERGY ACTION=INTEGRATE ADAPT=YES MULTIPOLE=NO
//ENERGY ACTION=INTEGRATE ADAPT=NO MULTIPOLE=NO
//Completamos la cadena de texto con datos
$ string Datos5 '%REAL(ENERGY) %REAL(COENERGY) %REAL(NLENERGY)'

//Escribir en el log
$ IF %COMPARE(&sNombreLog&, &sEmptyString&) NE 0
    $ string Cabecera 'Energias calculadas en Postproc., &NOW& &TODAY&'
    $ open 1 &sNombreLog& append | $ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE | $ assign 1 1 | $ write 1 Cabecera
    $ close 1
$ END IF

//Registro de datos de fuerzas, pares y energias del Rotor en fichero de texto
$ open 1 &sFParRotorDat& append
$ format 1 CHARACTER 0 +VARIABLE
$ assign 1 1 1 1 1 1
$ write 1 Datos Datos2 Datos3 Datos4 Datos5
$ close 1
$ END IF
$ END IF

//-----
//Cerramos el PostProcesador
//-----
END
```

## IX. Scripts para femm 4.2.

Para las simulaciones en femm 4.2 se ha utilizado un proceso secuencial en el que un único *script* lua va simulando y organizando los resultados. Este enfoque no ha dado problemas dado que la ejecución de la simulación 2D es más rápida y robusta que en 3D al demandar menos recursos al ordenador.

Notar que en este caso el script no crea la geometría, solo la modifica (moviendo el rotor y cambiando corrientes). La geometría "base" se define en un archivo habitual de femm.

### IX.I. MagBearingZ.lua

- Creación automatizada de modelos de Rodamiento Magnetico Simplificado Axisimetrico para el calculo de Fz
- Requiere un archivo FEM de acompañamiento con el caso base (el script no crea toda la geometría)
- Simplemente coge el archivo base y lo modifica y analiza cambiando posición del rotor y poniendo la corriente adecuada.
  
- Script para lenguaje Lua 4.0 integrado sobre Femm 4.2
- Isaac Royo Silvestre           463790@unizar.es (o ikeroyo@gmail.com )
- Noviembre 2012
- Desarrollado para el Trabajo de Fin de Master
- Master de Energías Renovables y Eficiencia Energética
- Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza (EINA), Universidad de Zaragoza
  
- Los comandos específicos de Femm están descritos en el manual de Femm 4.2. ( <http://www.femm.info/wiki/HomePage> )
- Los comandos genéricos de LUA están definidos en el manual de referencia de Lua 4.0 ( <http://www.lua.org> )
- Recordar que LUA es case-specific y los nombres tipo `_X` son para palabras reservadas, `PI` también es reservado. En Lua 4.0 no hay tipos booleanos.
- Script escrito con Notepad++
  
- Codificación de texto ANSI
  
- BUGs: Según el sistema operativo parece que la escritura del archivo de texto o la conversión de número a string puede introducir errores en las cadenas de texto (pero no he podido reproducir el error)

#### -- INSTRUCCIONES

- 1. Se requiere este script LUA para femm y el archivo .fem con el caso básico (el script no crea íntegramente el modelo, solo lo modifica en tiempo real)
- Ambos deben estar en el mismo directorio.
- 2. Cambiar las variables `maxSim` y `deltaZ` para definir las simulaciones cambiando la posición del rotor (solo posición z)
- 3. Cambiar la densidad de corriente a usar para el Cobre (variable `cobreJ`), esto cambia la densidad de corriente `J` por la bobina (p.e. `-4A/mm2`).
- 4. Cambiar el nombre de los ficheros que se van a generar (ficheros `fem` y un fichero `.txt` con resultados)
- 5. Ejecutar el script lua en femm
  
- El fichero base puede modificarse para probar diferentes dimensiones geometrías etc. Simplemente hay que asegurarse de
- que el rotor está centrado y de que las líneas y puntos que delimitan el rotor se asignan al grupo 1 (para que los pueda mover
- el script) También asegurarse de que el aire alrededor del rotor no tiene una geometría compleja para poder mover las líneas
- sin que interseccionen con nada.
- Notas: Si el rotor se mueve demasiado, hasta salirse del estator, habrá intersecciones entre materiales (modificar el fichero base para poder hacer ese tipo de simulaciones)

#### -- CONFIGURACION

ficheroBase="MagBearingZ-base.fem"    --fichero base con modelo base a modificar

name="MagBearingZ"                   --prefijo del nombre que recibirán los nuevos archivos creados (p.e. "MagBearingZ4A")

cobreJ=0   --densidad de corriente `J` que pasa por el cobre en `A/mm2`. Notar que los sentidos de las corrientes son inversos en mi modelo 3D de Opera, por lo que `4A` en Opera serían `-4A` en femm2D en este caso

## TFM - Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

```
maxSim=2 --numero de simulaciones para cada configuracion de corriente por la bobina (es decir, numero de
posicion del rotor simuladas)

deltaZ=-4 --desplazamiento del rotor en el eje z en cada simulacion siguiente a la inicial (en mm)
-----

-- Abrir nuevo documento y preparar el entorno.
newdocument(0) -- Crea un nuevo documento de Femm, 0 indica que es un problema magnético. Función de Femm.

-- Dejamos el modo de compatibilidad por defecto con Femm 4.1
-- setcompatibilitymode(0) -- Un valor de 0 (el valor por defecto) activa la compatibilidad con FEMM 4.1. Un valor 1 utiliza
las definiciones de FEMM 4.2 para varios comandos de magnetics, en FEMM 4.2 estos comandos tienen argumentos complejos.
Función de Femm.

showconsole() -- Muestra en una ventana la consola de Lua. Función de Femm.
clearconsole() -- Borra la información de la ventana de Lua. Función de Femm.
hidepointprops() -- Oculta la ventana de Femm que muestra propiedades. Función de Femm.
--- hideconsole() -- Para ocultar la consola. Función de Femm.
-----

-----

-- BLOQUES DE ITERACIONES DE SIMULACION Y ANALISIS

mResultados={} --Inicializar matriz (tabla en Lua) donde guardaremos los resultados (en este primer bucle solo
guardaremos z, J y Fuerza)

-- Bucle, en cada iteracion se abre el archivo base, se modifica, se guarda un archivo con la geometria correspondiente para su
coordenada z y se analiza, se guarda el archivo (para comprobación manual) y se almacenan los resultados de los análisis en una
variable
iSim=1 -- Contador del número de simulaciones realizadas, empezamos por la primera.
while(iSim<=maxSim) do
-- calcular movimiento del rotor correspondiente a la simulacion
z=(iSim-1)*deltaZ

-----

-- Crear el fichero del problema
open(ficheroBase) -- Abrir el fichero base
mi_setfocus(ficheroBase)
mi_saveas(name.."_z".z..".fem") -- Guardar el fichero modificado del problema con otro nombre. Función de Femm.
mi_setfocus(name.."_z".z..".fem")-- Pone el foco sobre el fichero creado. Función de Femm.
hideconsole() -- Oculta la consola de Lua. Función de Femm.
mi_close() --Cierra ventana del problema temporal creado. Función de Femm

open(name.."_z".z..".fem") -- Abrimos el fichero que acabamos de crear con el nombre que indicó el usuario
mi_setfocus(name.."_z".z..".fem")-- Enfocamos el problema que acabamos de abrir

showconsole() -- Asegura que mostramos la consola de Lua. Función de Femm.
-----

-----

-- Modificar la Geometría del problema
-- Los nodos y lineas que definen la geometria relevante del rotor están asignados al grupo 1 en el modelo base.
mi_selectgroup(1)
mi_movetranslate(0,z)
mi_clearselected() --deseleccionar cualquier objeto antes de continuar
-----

-----

-- Definir propiedades del material Cobre (y la corriente por el)

-- Cargar el material Cobre desde la biblioteca de materiales por defecto de Femm.
mi_getmaterial("Copper")

-- Modificar el material Cobre con la densidad de corriente J A/mm2 indicada por el usuario
mi_modifymaterial("Copper",4,cobreJ)
cobreMaterial="Copper: ".cobreJ.."A/mm2"
```

## TFM - Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes

```
mi_modifymaterial("Copper",0,cobreMaterial)    -- cambiamos nombre para recordar que se ha modificado
-----

-- Modificar los Blocks, indicando la corriente a utilizar
mi_selectlabel(53,0) -- Selecciona la etiqueta Block cercana a esa posicion (la de la bobina)
mi_setblockprop(cobreMaterial,0,5,0,0) -- Editar propiedades del bloque seleccionado: Nombre, automesh (1),
meshsize (si automesh es 0), circuito, direccion de magnetizacion (180: Hacia la izquierda, 0: no es iman). Hay más parametros
opcionales, función de Femm.
mi_clearselected()
-----

-- Guardar modelo finalizado
mi_saveas(name."_z".z:".fem")
-----

-- ANALIZAR EL PROBLEMA (CALCULAR FUERZA)
mi_analyze(0) -- Analizar el problema focalizado, 0 para que se vea la ventana de analisis, 1 para minimizarla.
Notar que antes de analizar este comando crea la malla.
mi_loadsolution() -- Muestra la solución del problema en el post-procesador

mo_seteditmode("area") -- Modo de seleccion de bloques

mo_selectblock(17,0) -- Selecciono un bloque (el rotor)
force = mo_blockintegral(19) -- Parte axial (en eje z) de la Fuerza calculada en el bloque por medio de un Weighted
Stress Tensor. La parte radial se calcula con parametro 18, pero no nos interesa y debería ser 0)
mo_clearblock() -- Cancela la seleccion de bloques actual
print("Iteracion ".iSim.", Distancia z = ".z." mm, Fuerza z = "..force.." N")

mResultados[iSim]={z,force} -- Guardamos z y resultado de Fuerza en una matriz o tabla
-----

-- Cerrar ventana de los archivos que hemos terminado de analizar en esta iteracion
mo_close()
mi_close()

-- Mover el contador de iteraciones de simulación un paso
iSim=iSim+1
end -- fin de while
-----

-----

-- CALCULAR AXIAL STIFFNESS (RIGIDEZ)
-- Ya hemos terminado todas las simulaciones y tenemos los resultados en una matriz
-- La rigidez k es la Fuerza dividida entre el desplazamiento *causado por esa fuerza*. Se mide en N/m
-- La rigidez axial k se puede calcular como menos la derivada de la Fuerza axial respecto de z (siendo z la distancia axial entre
los centros de los anillos)
-- Es decir, la rigidez es la pendiente de la curva formada por los puntos (z,Fuerza)
-- Así que para calcular la rigidez en un punto z, vamos a usar las Fuerzas calculadas en los puntos z anterior y siguiente (a
menos que no esten calculados, como para el primer y último punto) y dividiremos entre el intervalo z correspondiente.
iSim=1
while(iSim<=maxSim) do

    if( iSim==1 ) then -- Si no hay un punto anterior calculado a este, usar los valores del punto actual (notar que esto
es preciso para calcular stiffness en z=0, por que la curva de fuerza es simétrica al eje z, siempre)
        zAnterior=mResultados[iSim][1]
        forceAnterior=mResultados[iSim][2]
    else
        zAnterior=mResultados[iSim-1][1]
        forceAnterior=mResultados[iSim-1][2]
    end

    if( iSim==maxSim ) then -- Si no hay un punto siguiente calculado a este, usar los valores del punto actual
(notar que esto no es muy preciso para calcular stiffness en el último punto z=zMax)
        zSiguiente=mResultados[iSim][1]
        forceSiguiente=mResultados[iSim][2]
        print("Notar que el cálculo de Stiffness para el último punto z = zMáxima no es tan preciso como en los
otros al no haber un punto siguiente para calcular la tangente")
    else
        zSiguiente=mResultados[iSim+1][1]
```

```

        forceSiguiente=mResultados[iSim+1][2]
    end

    stiffness = -1*(forceSiguiente-forceAnterior)/(zSiguiente-zAnterior) -- calcular rigidez
    mResultados[iSim][3]=stiffness -- insertar rigidez en la matriz de resultados

    iSim=iSim+1
end -- fin de while
-----

-----

-----

-- Convertir la Matriz de Resultados en una cadena de Texto

sInforme='z[mm];F[N];k[N/mm]\n' -- Cadena en la que guardaremos con texto el informe con datos que despues
tendremos que guardar en un archivo. La primera fila es la cabecera de tabla y un salto de linea.
if ( (formato=="s") or (formato=="S") ) then
    sInforme='z[mm],F[N],k[N/mm]\n' -- Version para formato separado por comas
end

iSim=1
while(iSim<=maxSim) do
    -- Cadena de texto para guardar los datos
    if ( (formato=="s") or (formato=="S") ) then
        sInforme=sInforme..tostring(mResultados[iSim][1])..tostring(mResultados[iSim]
[2])..tostring(mResultados[iSim][3]) -- Guardamos en la cadena de texto los datos relevantes en formato separado-por-
comas, y decimales con puntos
    else
        sInforme=sInforme..gsub(tostring(mResultados[iSim]
[1]),"%."".""")..','..gsub(tostring(mResultados[iSim][2]),"%."".""")..','..gsub(tostring(mResultados[iSim][3]),"%."".""") -- Guardamos en la
cadena de texto los datos relevantes en formato separado por punto-y-coma, y decimales con comas. Notar que usamos % en
vez de . por que . es un caracter especial cuando se hacen reemplazos en cadenas de Lua.
        -- En Lua los elementos de array se numeran por defecto desde el número 1. Antes hemos
guardado la posicion z en [1], la Fuerza en [2] y la Rigidez o stiffness en [3]
    end
    -- Si no es la última iteración, insertar un salto de linea para separar la siguiente fila de datos
    if(iSim<maxSim) then
        sInforme=sInforme.."\n"
    end

    iSim=iSim+1
end -- fin de while
-----

-----

-----

-- GUARDAR ARCHIVO DE TEXTO CON INFORME Y RESULTADOS
-- Formato Comma-Separated-Values
fError= writeto(name.."_csv.txt") -- Escribir el archivo (en realidad crearlo). Notar que si un archivo con el mismo nombre existe,
será sobrescrito y se perderá su información.
if(fError==nil) then -- Exception Handling
    messagebox("Error en writeto(nombre archivo).")
    mi_close()
    return
end

fError=write(sInforme) -- Escribir información en el archivo abierto para escritura
if(fError==nil) then -- Exception Handling
    messagebox("Error al grabar datos en archivo.")
    mi_close()
    return
end

closefile(_OUTPUT) -- Cerrar el archivo creado por que hemos terminado de trabajar con él. _OUTPUT contiene el filehandle.
-----

-----

```