

Diseño del circuito magnético de un rodamiento magnético por medio de elementos finitos

Magnetic Circuit Design of Active Magnetic Bearing by means of Finite Elements

JOSÉ DANILO RAIRÁN ANTOLINES

Docente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ingeniero eléctrico de la Universidad Nacional de Colombia y Magíster en Automatización Industrial de esta. Director del grupo de investigación en control electrónico.

drairan@udistrital.edu.co

JULIO CESAR MORENO CAÑÓN

Tecnólogo en Electricidad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Estudiante de Ingeniería en Distribución y Redes Eléctricas, en la misma universidad.

jerolanc@gmail.com

Fecha de recepción: 14 de septiembre de 2007

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 9 de abril de 2008

Palabras clave: elementos finitos, rodamiento magnético, levitación magnética.

Key words: finite elements, active magnetic bearing, magnetic levitation.

RESUMEN

En este artículo se propone un método para el diseño de un rodamiento magnético. Este rodamiento reemplaza a uno convencional al sustentar el eje de una máquina rotativa por el principio de la levitación magnética, la cual elimina las pérdidas por fricción. El método consiste en observar la influencia de los cambios en un parámetro dimensional del núcleo a la vez, sobre la distribución de densidad de campo magnético, por medio del método de

elementos finitos. Esta densidad define la fuerza magnética, que es el valor que se va a optimizar. La mejor configuración resulta en la conexión de seis electroimanes, cada uno en forma de “C”, alrededor del eje de la máquina.

ABSTRACT

In this paper it was proposed a method for Active Magnetic Bearing design. This bearing replaces a conventional one supporting the shaft of a ro-

tational machine by means of magnetic levitation principle, which eliminates friction losses. The method looks at the influence of changes in core's dimensional parameters, once by time, over the density of magnetic field distribution, using Finite

Element Method. This density defines the magnetic force, which is the value to be optimized. The best configuration results connecting six coils, everyone with "C" shape, around the shaft.

* * *

1. Introducción

La única forma de eliminar las pérdidas por fricción, producidas durante la rotación de una máquina eléctrica es reemplazar el rodamiento convencional por uno que trabaje con el principio de la levitación magnética. En este sentido se han realizado trabajos desde mediados de la década anterior, por ejemplo [1], se realizó cuando aún no se había acuñado el término de rodamiento magnético (AMB, por sus siglas en inglés). Actualmente la historia es otra; se encuentran empresas especializadas que construyen estos rodamientos a la medida; sin embargo, no se puede afirmar que éste sea un problema ya resuelto.

Además de eliminar las pérdidas por fricción, los rodamientos magnéticos minimizan el mantenimiento, dado que no existen partes móviles en este dispositivo; además, se hace posible la construcción de máquinas con velocidades imposibles de alcanzar con los rodamientos clásicos, por el calentamiento que se produce en ellos; así, trabajar a 30.000 rpm no es ninguna dificultad. Otras aplicaciones interesantes son, por ejemplo, facilitar el manejo de la energía almacenada en ruedas volantes [2], o la construcción de mesas XY para el posicionamiento de precisión, como se expone en la presentación de avances de una tesis doctoral en [3]. En esta última el rodamiento magnético no sólo es encargado de sustentar, sino también de producir el desplazamiento lineal. Por último, una aplicación de resaltar es el proyecto de la empresa estadounidense *Maglev Wind Turbine Technologies, Inc*, por lo ambicioso. *Se espera construir un aerogenerador de 1 GW, en el cual los rodamientos magnéticos, además del tamaño, sean la diferencia principal con respecto a las aplicaciones actuales. Su implementación está proyectada para 2012.*

La atracción es el principio por el cual se logra la levitación del eje. El proceso completo implica la vigilancia del valor del entrehierro; cuando éste es mayor al deseado se incrementa el voltaje de alimentación, por lo tanto, la corriente se incrementa, igual que la densidad "J"; como resultado "B" aumenta y la fuerza magnética también. El papel de esta fuerza es oponerse a la gravitacional. Este proceso se repite hasta alcanzar el entrehierro nominal. En caso contrario, cuando el entrehierro es menor al deseado, se anula el voltaje, hasta que por gravedad el eje cae al punto indicado. La vigilancia y toma de decisiones es realizada por un algoritmo de control, que puede ser implementado en una tarjeta electrónica o en un PC.

Este artículo está desarrollado como sigue: en la sección dos se expone la sustentación matemática con respecto a la generación de fuerza magnética por medio de la energía eléctrica; en tres se explica cómo utilizar el programa COMSOL, que fue el seleccionado para realizar las simulaciones con elementos finitos; en la sección cuatro se propone la metodología de diseño, la cual consiste en determinar la forma, eliminar la saturación y optimizar el número de electroimanes alrededor del eje; en la quinta sección se presenta un ejemplo de validación de los resultados. Por último, en la sección seis están las conclusiones.

2. Determinación de la fuerza magnética

En esta sección se calcula una expresión para la fuerza magnética "F", la cual es ejercida por la bobina sobre el eje que se va a sustentar. El resultado es que ésta depende de la densidad de campo magnético "B"; por lo que se incluyen los fundamentos del método de elementos finitos, dado que éste es usado en el cálculo de la distribución de campo "B".

Suponga un desplazamiento infinitesimal “dl” del eje hacia la bobina, como se presenta en la figura 1. Por el principio de conservación de energía, el cambio de energía en la fuente debe alimentar los cambios de energía mecánica y magnética. El cambio de energía magnética “dUm” se deriva del teorema de Poynting, y se escribe en la ecuación

1)

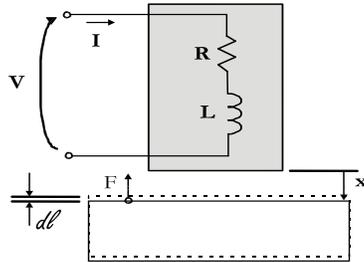


Figura 1. Desplazamiento imaginario “dl” del eje hacia la bobina. Configuración para demostrar la proporcionalidad entre densidad de campo y fuerza magnética.

$$dU_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu} \cdot S \cdot dl \quad (1)$$

El diferencial de energía mecánica “dU” está en (2).

$$dU = F \cdot dl \quad (2)$$

En el circuito eléctrico se desprecian las pérdidas en la resistencia, así que la fuente sólo se le debe oponer al voltaje inducido, descrito por la ley de Faraday. Si se tiene en cuenta la corriente en condiciones estáticas, y que la inductancia cambia, por el desplazamiento imaginario, se llega al cambio de energía en la fuente “dUs” en 3).

$$dU_s = I^2 \cdot dL \quad (3)$$

En este momento se debe recordar que la energía magnética es almacenada en la bobina, e igual a $\frac{1}{2}I^2dL$. Esto significa que “dUs” es el doble del cambio en la energía magnética. Por tanto $dU_m = dU$. Al igualar las ecuaciones (1) y (2) se encuentra la fuerza que ejerce la bobina sobre el eje, como se expresa en la ecuación (4). En ésta “μ” es la

permeabilidad del medio y “S” la superficie de la bobina por la cual el flujo se dirige hacia o desde el eje.

$$F = \frac{B^2 \cdot S}{2\mu} \quad (4)$$

La ecuación (4) indica que la fuerza magnética es proporcional al cuadrado de la densidad de campo, de hay la importancia de calcular “B”. Entonces, ahora el trabajo es encontrar la ecuación diferencial que expresa “B” en el espacio, en términos de la corriente. La ecuación diferencial se soluciona por medio del método de elementos finitos, el cual se apoya de una variable intermedia, denominada potencial magnético vectorial “A”. Éste se define en (5).

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{J} \quad (5)$$

Los campos magnetostáticos, fundamentales en el artículo, se rigen por las ecuaciones de Maxwell en (6) y (7). La no divergencia de “B”, descrita en (6), significa que las líneas de flujo magnético son cerradas. (7) dice que una corriente continua, de densidad “J”, puede ser la fuente de la intensidad de campo “H”.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (7)$$

Una vez se calcula “A” se puede conocer “B” y de ahí “H”, pues la relación B-H es $B = \mu H$. Los párrafos siguientes se dedican a encontrar la ecuación diferencial, en términos de “A” con fuente “J”.

Por medio de la ley de Faraday, y al tener en cuenta que “E” (intensidad de campo eléctrico) es $\Delta V / \Delta X$, es posible encontrar la expresión en la ecuación (8).

$$\vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (8)$$

A fin de llegar a la expresión en (9) se utiliza (7), pero en el caso variante en el tiempo, en combinación con (8). Además se debe recordar que $D = \epsilon E$,

donde “ε” es la permitividad eléctrica del medio y “D” la densidad de campo eléctrico.

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \mu \vec{J} - \mu \epsilon \frac{\partial \nabla \cdot \vec{V}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (9)$$

Luego de algunas identidades trigonométricas de (9) se llega a (10), ver [4].

$$\nabla^2 \vec{A} = \nabla \left(\nabla \cdot \vec{A} + \mu \epsilon \frac{\partial \nabla \cdot \vec{V}}{\partial t} \right) + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} - \mu \vec{J} \quad (10)$$

La simplificación de (10) se debe a la expresión de Lorentz, la cual relaciona “A” con “V”, en (11).

$$\nabla \cdot \vec{A} = \mu \epsilon \frac{\partial \nabla \cdot \vec{V}}{\partial t} \quad (11)$$

Si se reemplaza (11) en (10) se obtiene (12).

$$\nabla^2 \vec{A} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} - \mu \vec{J} \quad (12)$$

Ahora, en el caso magnetostático (12) se convierte en (13).

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (13)$$

La ecuación (13) es la ecuación de Poisson para campos magnetostáticos [5]. Es usual trabajar (13) como se presenta en (14): ésta es la ecuación diferencial a solucionar.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} \right) + \vec{J} = 0 \quad (14)$$

En la solución de (14) se requieren dos condiciones de frontera, conocidas como Dirichlet y de Neumann [6]. En la ecuación (15) éstas se suponen como cero, como ejemplo. Las condiciones de Dirichlet equivalen al potencial de la parte externa de la configuración, y las de Neumann, a los cambios en la dirección de “A” en la frontera.

$$\vec{A} = 0 \quad \frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = 0 \quad (15)$$

Una vez se conoce “A” se puede calcular “B”, como se muestra en (16); en la cual se supone una distribución de campo en el plano XY [7 y 8].

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} \quad \therefore \quad B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (16)$$

En resumen, en la ecuación (4) se demuestra que la fuerza en el rodamiento depende de la densidad de campo magnético. En (16), “B” se calcula a partir del potencial magnético vectorial “A”; a su vez, “A” es el resultado de la aplicación del método de elementos finitos en la solución de la ecuación diferencial en (14).

3. Programa de simulación: COMSOL Multyphysics 3.2

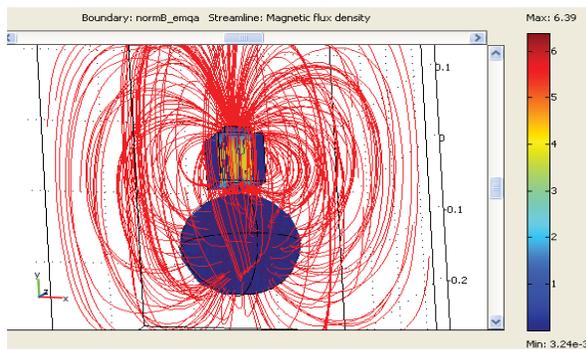
Esta herramienta computacional está diseñada para realizar el modelado y la simulación de fenómenos físicos en 2D y 3D. Algunas de sus aplicaciones son: la acústica, el electromagnetismo, la dinámica de fluidos, la transferencia de calor, el cálculo de esfuerzos, entre otros. En cada uno de ellos es posible hacer análisis estacionario, lineal o no lineal, y en alta frecuencia. Otra característica de este programa es que permite realizar la simulación de dos fenómenos físicos a la vez; de esta manera, por ejemplo, es posible evaluar la distribución de campo magnético, junto con la transferencia de calor [9].

El procedimiento para simular una distribución de campo magnético en 3D es el siguiente:

- Se asigna el nombre y el valor de las constantes de la configuración. Por ejemplo, el ancho de un núcleo, su altura, el área que ocupa una bobina, así como sus dimensiones; el diámetro del conductor, la corriente, su densidad, etc.
- Se realiza el esquema físico en 2D. Por medio de la unión de rectángulos, junto con otras formas simples, en combinación con funciones booleanas, las cuales permiten unir o excluir una región de otra.
- De la configuración en 2D se pasa a 3D. Este procedimiento lo hace el programa de manera

automática, mediante una instrucción que realiza la extrusión de la configuración.

- Se asignan las condiciones de frontera, asimismo, el material y la densidad de corriente de cada sub-dominio u objeto. Por ejemplo, a la bobina se le asigna “J” (del paso uno); también se puede asignar hierro al núcleo de la bobina, aire al contorno y cobre a la bobina.
- Se enmalla la configuración. Este paso es fundamental para el método de elementos finitos, pues el método calcula el valor del potencial magnético vectorial de los vértices de los triángulos y realiza una interpolación, la cual puede ser lineal, de un vértice a otro [10]. Este proceso también es automático.
- Por último se simula la distribución de campo, por medio de la opción “solve”. En la gráfica 1 está el resultado del seguimiento de estos seis pasos sobre una bobina, la cual crea un campo que atraviesa una esfera metálica, y por lo tanto, la atrae.



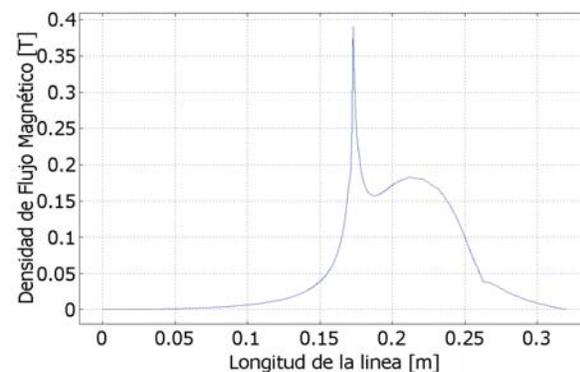
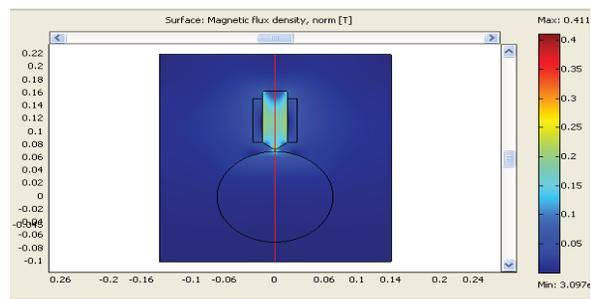
Gráfica 1. Resultado de una simulación en COMSOL Multiphysics. La bobina en forma de cubo crea un campo que envuelve y atrae a la esfera.

La simulación en la figura 2 supone materiales lineales. En lugar de esto, ellos son no lineales; por ejemplo, el parámetro “ μ ” no es una constante, sino función de la intensidad magnética “H”. COMSOL permite asignar ese tipo de relación de tres maneras:

- Por medio de una ecuación;
- Con una tabla, durante la simulación, la cual puede ser el resultado de datos experimentales, o

- Con un archivo de texto. Esta última fue la metodología usada, porque guarda los datos y resulta fácil de leer a partir de una curva característica del material.

Además del archivo de relación entre “H” y “B” se debe asignar un tipo de interpolación entre datos, el cual puede ser lineal; también, el método de extrapolación, por ejemplo, supone el último valor de la lista. Asimismo, es importante consignar el valor de “B” primero, y en seguida “H”; esto se debe al procedimiento de cálculo del programa, el cual comienza con la determinación de “A”, del cual se obtiene “B” (como se explica en la ecuación 16), y finalmente “H”. En la gráfica 2 está una simulación con “ μ ” no lineal, con la curva característica del hierro común [11].



Gráfica 2. Comportamiento con un material no lineal. a) Simulación de la distribución de “B”, b) “B” en el centro de la configuración. Los máximos corresponden a la punta del núcleo y a la superficie de la esfera.

En la parte b) de la figura 3 se observa el valor de “B”, sobre una línea imaginaria que va desde arriba hasta abajo de la configuración en la parte a), y por el centro de la misma. El máximo de campo (en 0,17 m) corresponde a la punta del núcleo; de esta manera se observa que la forma del núcleo permite concentrar el campo magnético, lo cual ayuda en la estabilidad de este tipo de sistemas. El máximo local en 0,22 m corresponde a la superficie de la esfera.

4. Diseño del rodamiento magnético

La función objetivo del diseño maximiza la fuerza que produce el rodamiento al usar cierta cantidad de energía eléctrica. La medida de fuerza es indirecta, a través de “B”, y la de energía, a través de “J”. Se parte de la simulación de la configuración en la gráfica 2, y se llega a un sistema con seis electroimanes distribuidos alrededor del eje.

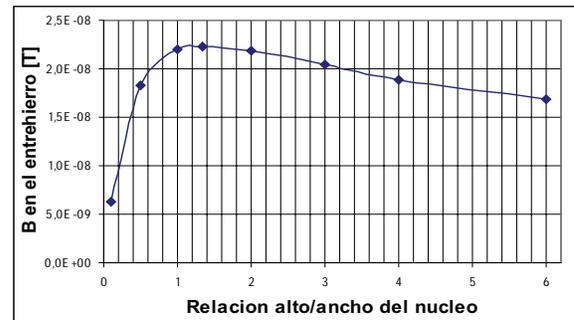
El diseño se divide en tres partes:

- Se encuentra la forma del electroimán (compuesto por una bobina y su núcleo), en relación con el tamaño del eje que se va a sustentar;
- Se tiene en cuenta el efecto de la saturación en el hierro; así se refina la forma por medio de la eliminación de las esquinas donde se concentra el campo; y
- Se unen los electroimanes alrededor del eje y se calcula el entrehierro óptimo, en función del radio del eje.

4.1 Definición de la forma del electroimán

En primera medida se simulan cambios en el diámetro del eje, con la configuración en la figura 3, entre 0,5 y 30 veces el ancho del núcleo, y se mide el campo en el entrehierro en cada caso. Se selecciona la razón ocho, porque valores superiores no presentan incrementos significativos de campo en el entrehierro.

En seguida se analiza la relación alto-ancho en el núcleo, para lo cual se mantiene fija el área de la bobina, aunque su alto se iguale al del núcleo. El resultado de las simulaciones se presenta en la gráfica 3; se concluye que 1,33 es la mejor relación.



Gráfica 3. Selección de la relación alto-ancho del núcleo. El óptimo está en 1,33.

En seguida se cambia la forma del núcleo; se lleva a una “C”, se agrega una bobina y se anexan tapas en los brazos del núcleo, como se explica en [4]. Esto aumenta el campo útil para crear fuerza, pues ahora los dos extremos del núcleo están cerca del eje, como se presenta en la figura 2 y en la gráfica 4. Sin embargo, se hace una corrección más: ésta consiste en dar curva a la superficie activa de las tapas; así la distribución de campo se hace más uniforme. En este paso también se realizan simulaciones para determinar la separación entre las tapas; el resultado es que este es tres veces el entrehierro.

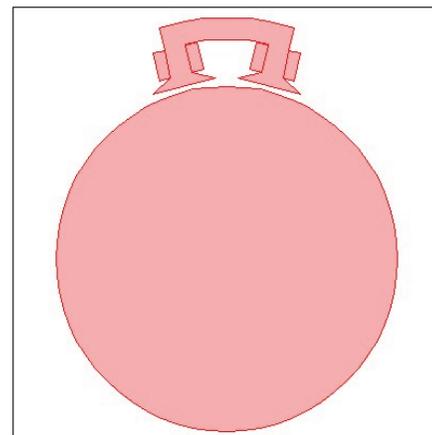
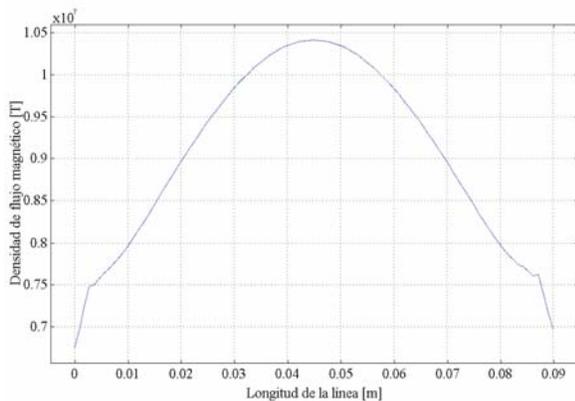
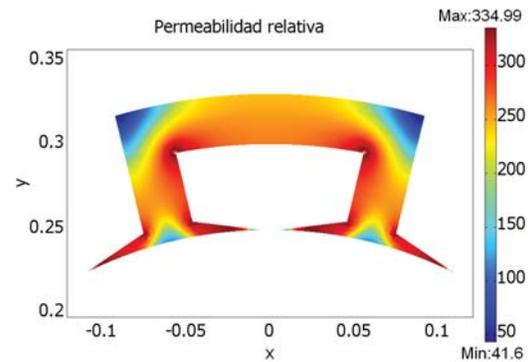


Figura 2. Núcleo en forma de “C”. Esquema.

Por último, se optimiza el tamaño de las tapas. En esta decisión se tienen en cuenta dos parámetros: el primero es la uniformidad del campo, medida como la diferencia entre el campo en el centro de la tapa y en sus extremos; el segundo es la fuerza que



Gráfica 4. Núcleo en forma de “C”. Campo en el entrehierro, su distribución no es homogénea porque la distancia entre la tapa y el eje cambia en cada punto.



Gráfica 5. Permeabilidad magnética relativa en el núcleo. Se observa que en los extremos de las tapas y en las curvas internas del núcleo se alcanza la permeabilidad relativa máxima.

produce el campo promedio. Mientras el primero disminuye si las tapas son más largas, el segundo aumenta; por lo cual su producto genera un máximo, el cual corresponde a un ancho de la tapa de 2,7 veces el ancho del brazo del núcleo.

4.2 Reducción de los efectos de la saturación

La influencia de la saturación no se observa en las simulaciones de la sección anterior, porque se trabajan materiales lineales. Al suponerlos no lineales, en este caso con permeabilidad magnética variable, el campo se concentra en las esquinas; tanto, que el material entra en saturación. En consecuencia, se obtiene menos densidad de campo magnético al mismo valor de densidad de corriente.

En la gráfica 5 se presenta la variación de permeabilidad relativa para la configuración con la cual se terminó la sección anterior, pero con permeabilidad variable. En este artículo se asume que la curva de permeabilidad comienza en $\mu_r = 35$ cuando “B” es cero; además, μ_r máximo de 350, en 1,1 Teslas; y al campo máximo, 1,7 Teslas, $\mu_r = 140$.

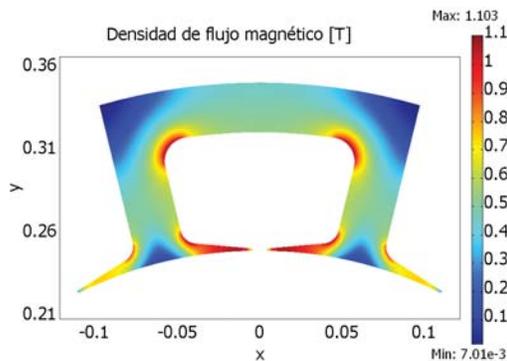
Se comienza con la eliminación de las puntas terminales en las tapas, pero se tiene cuidado de no alterar las proporciones ya calculadas en la sección anterior (4.1). Entonces se aumenta el grueso de las tapas: muy poco y la punta se satura, mucho y la

reluctancia del circuito magnético aumenta y reduce “B”. Se selecciona la quinta parte del entrehierro.

En seguida se suaviza la esquina que se forma en la unión de la tapa con el brazo del núcleo. Se encuentra que el radio de curvatura óptimo es igual a la cuarta parte del ancho del núcleo. Cuando el radio es menor se incrementa la saturación, si es superior aumenta la cantidad de material y la reluctancia hace que “B” disminuya.

Las esquinas internas, sobre las bobinas, también son suavizadas. Si la curvatura es muy grande, entonces el flujo magnético puede circular con mayor facilidad; esto hace que la saturación disminuya, pero se aumenta la separación entre las tapas, por tal razón la cantidad de material se incrementa y se alarga el camino que debe recorrer el flujo. El resultado final es que “B” decrece. Al tener esto en cuenta y por las simulaciones, se decide definir el radio de curvatura igual a la mitad del ancho del brazo.

En la gráfica 6 se observan los cambios realizados a la forma del núcleo de la gráfica 5, los cuales son: 1) aumento del grueso de la tapa; 2) suavización con una curva del punto que une la tapa con el brazo; y por último, 3) suavización de las esquinas internas encima de las bobinas.



Gráfica 6. Disminución de la saturación en el núcleo. Se ha logrado reducir el campo máximo de manera que no se alcanza saturación, además resulta una distribución de campo magnético más uniforme.

4.3 Unión de varios electroimanes

Antes de unir los electroimanes se busca el entrehierro óptimo, en función del radio del eje. Se fija un radio del eje y se simula la configuración con entrehierros diferentes, luego se cambia el radio del eje y se repiten las mediciones. De esta forma se genera una grafica en 3D, de la cual “X” y “Y” son la dimensión del entrehierro y el radio del eje; “Z” es la densidad de campo en el entrehierro. La conclusión es que un valor adecuado de entrehierro es $r/30$. Valores menores incrementan el campo, pero resultan difíciles de controlar. Así que esta decisión es una combinación entre el resultado de las simulaciones y la experiencia con el control de posición del sistema.

En seguida se estudia el efecto de utilizar de entre tres hasta seis electroimanes, distribuidos alrededor del eje. El resultado es que con seis electroimanes la distribución de campo es más uniforme. No se agregaron más electroimanes porque las proporciones del núcleo no lo permiten; por ejemplo, porque el ángulo entre los brazos es de $52,5^\circ$.

Además se tuvo en cuenta que algunas líneas en la parte superior del electroimán se cierran en el aire y que éstos requieren un sustento mecánico, por lo cual, para finalizar, se anexa material y se unen los seis electroimanes. Una simulación de esta distribución se presenta en la figura 3. También se puede observar que las líneas de campo que atraviesan el eje no llegan hasta el centro del mismo.

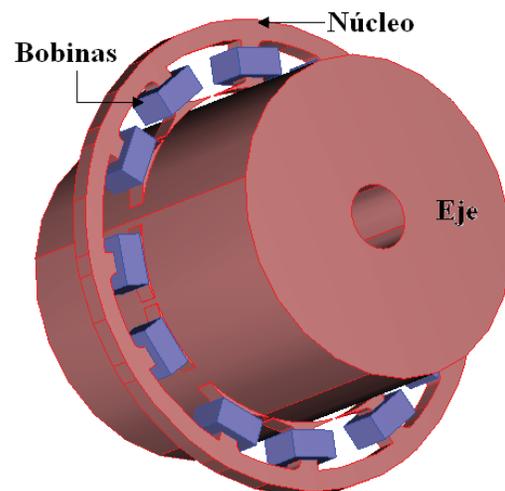
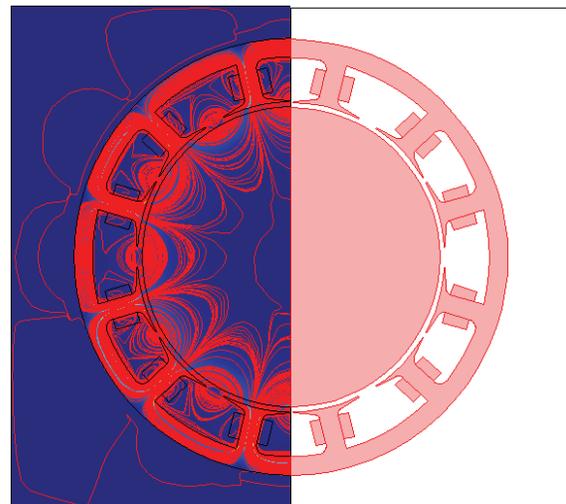


Figura 3. Rodamiento magnético final. a) Electroimanes unidos. Configuración física y curvas de densidad de campo magnético, b) Vista en 3D.

El resultado en la figura 3 brinda estabilidad mecánica, debido a que el trabajo de subir o bajar el eje se reparte entre dos o tres juegos de electroimanes. En la aplicación de este diseño en la construcción de un rodamiento, se debe tener en cuenta no sólo el peso del eje, sino también el del rotor de la máquina; asimismo, los desequilibrios que pueden causar algunos tipos de carga. También es importante la resistencia del devanado, porque ésta define la energía usada para hacer levitar al eje.

5. Validación de resultados

A continuación se relacionan los resultados de un ejemplo de validación. En éste se diseña el rodamiento magnético para un motor DC. Las especificaciones del motor son las siguientes: radio del eje = 4 cm, longitud del eje = 20 cm, potencia nominal = 1 kW, corriente nominal = 6 A, tensión nominal = 230 V.

El objetivo del rodamiento es sustentar el eje del motor, en forma horizontal, y además brindar al rodamiento capacidad de carga suficiente para el trabajo del motor en condiciones nominales.

- Parámetros iniciales: peso del eje: 7,87 kg, radio del eje (r): 4 cm.
- Relaciones eje- electroimán: ancho del núcleo (k) = r/8 = 5 mm, alto del núcleo y de la bobina (v) = k*1,333 = 6,6 mm, ancho de la bobina (ab) = v/2,37 = 2,81 m.
- Parámetros eléctricos: calibre del conductor = 28 AWG, corriente = 0,9 A, densidad de corriente = 8,73 x 10⁶ A/m².
- Curvaturas y grosor de puntas para evitar saturación: grueso de las tapas (b) = 0,19*g = 2,533 x 10⁻⁴ m, curvatura parte superior de las tapas (c) = 0,22*k = 1,1 mm, curvatura esquinas interiores del núcleo (f) = 0,525*k = 2,62 mm.
- Relación eje y entrehierro: entrehierro (g) = r/30 = 1,3 mm.

- Recorte del eje: r₀ = r/5 = 8 mm, nuevo peso del eje = 7,6 kg.
- Parámetros en 3D: fondo del núcleo (z) = k = 5 mm.

El último parámetro puede ser cambiado para que el rodamiento tenga más fuerza de soporte. Los datos recopilados para el ejemplo de validación se consignan en la tabla 1. En ella la masa sustentada por cada rodamiento se obtuvo de las fuerzas desarrolladas por cada rodamiento en contra de la fuerza gravitacional, como se muestra en la ecuación (17).

$$F = \frac{NeB^2A}{\mu_0} \quad (17)$$

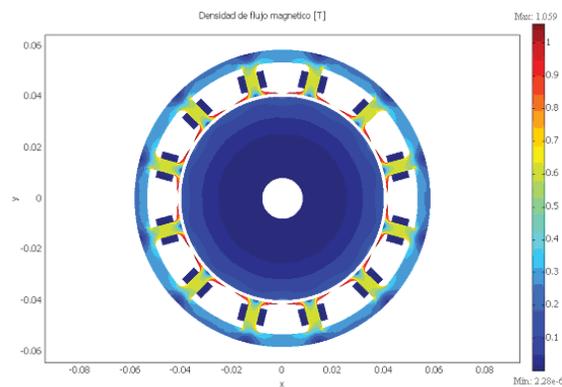
En la ecuación (17) el número de electroimanes energizados por rodamiento es *Ne*, “*B*” es la densidad de flujo magnético en el entrehierro y *A* es el área de la sección transversal del entrehierro. Es importante anotar que para obtener el peso sustentado por cada rodamiento se utilizan sólo las componentes en el eje “y” de la fuerza desarrollada y se divide la ecuación 17 por 9,8. Es preciso anotar que el número de electroimanes energizados por rodamiento (*Ne*) es de tres, porque éstos son los que desarrollan fuerzas en contra de la gravedad.

B entrehierro [T]	B máx [T]	Masa sustentada por cuatro rodamientos [kg]	Potencia utilizada [W]
0,128	1,066	9,6	19,4

Tabla 1. Datos obtenidos de la simulación realizada para la aplicación del diseño.

De acuerdo con los resultados del diseño se necesitan dos rodamientos de cinco milímetros de espesor o uno de 10 mm, en cada extremo del eje. Estos consumen 19,4 Vatios y desarrollan la fuerza suficiente para sustentar el eje del rodamiento, además brindan una capacidad de carga de 1,73 kg.

El rodamiento diseñado se muestra en la gráfica 7; en esta se puede ver la densidad de flujo magnético del rodamiento y la configuración geométrica final se presentan en 2D.



Gráfica 7. Densidad de flujo magnético del rodamiento utilizado en la validación.

6. Conclusiones

El análisis de las simulaciones realizadas por medio del método de elementos finitos permite incrementar la fuerza del rodamiento magnético. Al comparar la fuerza magnética de la configuración en la gráfica 2 y la final, se observa un incremento de 3,8 veces por cada electroimán. Este resultado demuestra que el método asumido para solucionar el problema es correcto, es decir, el hecho de realizar simulaciones en las que se cambia un parámetro dimensional de la configuración a la vez; como una altura o un ancho, en función del tamaño del eje o del entrehierro, hasta que se alcanza el campo máximo a cierta densidad de corriente. En este artículo se comienza con un electroimán en forma de “I” y se termina con seis electroimanes unidos alrededor del eje, a los cuales se les denomina rodamiento magnético.

En las tapas de los brazos es donde se realiza la mayor cantidad de cambios. Se comienza con la forma plana que se cambia a un arco con la misma curvatura del eje, a fin de aumentar la uniformidad de campo; se calcula el ancho de la tapa que produce mejores resultados; se incrementa el grueso de las tapas, con el objeto de disminuir la saturación causada por su terminación en punta; se suaviza la unión entre la tapa y el brazo del electroimán, así se disminuye el efecto de la saturación por el campo que se acumula en ella; y se encuentra la distancia óptima entre tapas, en relación con el valor del entrehierro. Todos estos cambios en un solo elemento del rodamiento permiten afirmar que a éste se le debe dedicar más esfuerzo de diseño. Algunas ideas para otros trabajos son: estudiar el efecto de usar un material con una permeabilidad magnética mejor a la del núcleo, analizar el efecto mecánico que implica la sujeción de las tapas con los brazos del núcleo, entre otras.

En este artículo se suponen condiciones estacionarias para la corriente, esto influye en el comportamiento de la densidad de campo y de la fuerza, porque los transitorios hacen que aparezcan pérdidas en el eje, expresadas como corrientes parásitas. Es importante que un diseño más detallado incluya estos cambios, debido a que siempre que el motor se activa aparece un transitorio, asimismo, cuando el régimen de carga cambia.

Referencias bibliográficas

- [1] Trejo, H. (Diciembre de 1996) *Utilización de la ingeniería asistida por computación para el diseño y construcción de un sistema de levitación magnética*. Tesis de Maestría en Ciencias Computacionales, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- [2] Pradhananga, S. (August, 2004) *Experimental Validation of a Smart-Bias Active Magnetic Bearing Controller*. Tesis de Maestría, Louisiana State University, Master of Science in Mechanical Engineering.
- [3] Molenaar, L.; Zaaier, E.H. and Van Beek, H. F. (June, 1998) A novel lons stroke planar magnetic bearing configuration. *Proceeding Conference Actuator 98*. pp 541-544, Bremen.
- [4] Rairán, D.; Aguirre, C. y Castañeda, J. (2005) Diseño de un electroimán mediante el método de elementos finitos. *Tecnura*, 17, 38-46.
- [5] Johnk, C. (1975) *Engineering Electromagnetic Fields & Waves*. USA: Wiley International Edition.
- [6] Meeker, D. (2004) *Finite Element Method. Magnetic User's Manual*, version 4.0.
- [7] Amaya, M. y Roldán, C. (Febrero de 1998) Estudio de una máquina sincrónica de imanes permanentes por el método de elementos finitos. *Energía y Computación*, 7 (1), 45-50.
- [8] Rairán, D.; Aguirre, C. y Castañeda, J. (2005) Programa didáctico para el cálculo de campo magnético estático, mediante elementos finitos, usando matlab. *Revista Científica*, 7, 657-686.
- [9] COMSOL Inc. (2004) *Femlab 3 – User's Guide, Model Library, Modeling Guide*. Los Angeles – California.
- [10] Pilat A. (2004) FEMLAB Software Applied To Active Magnetic Bearing Analysis. *International Journal of Appl. Math. Comput. Sci.*, 14 (4), 497-501.
- [11] Kraus, J. y Fleish, D. (1999) *Electromagnetismo con aplicaciones* (5ª edición). McGraw-Hill, Interamericana.