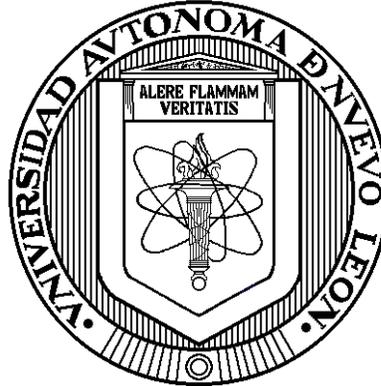


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**ANÁLISIS DEL REFORZAMIENTO DEL FLUJO MAGNÉTICO EN UN
MOTOR DE CD APLICANDO EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO**

TESIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

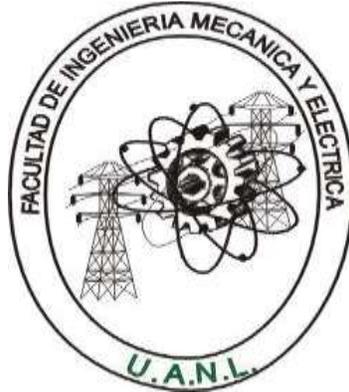
**PRESENTA:
JORGE ALBERTO GUTIÉRREZ ESPINOSA**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L., Diciembre del 2007

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**ANÁLISIS DEL REFORZAMIENTO DEL FLUJO MAGNÉTICO EN UN
MOTOR DE CD, APLICANDO EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO**

TESIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

**PRESENTA:
JORGE ALBERTO GUTIÉRREZ ESPINOSA**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L., Diciembre del 2007

DEDICATORIA

A mi familia

Especialmente a mis padres que siempre me han brindado su apoyo, papá por el hecho de estar lejos y seguir viendo por nosotros, a mamá por su cariño, compañía y ánimo para que siempre vaya hacia adelante, ellos son la constante que sustenta todo mi trabajo, ánimo y esperanza, a mi hermana por esa chispa que tiene y que me contagia.

A mi novia

Por su paciencia y constante apoyo para que dé lo mejor de mí, por las tardes que no he estado con ella y que me han permitido dedicarle a este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A mis amigos

A Lalo, Juan, Jair, Robin y Max, entre otros, que siempre han estado conmigo, aún si ellos no lo saben.

A mis maestros

Por su dedicación a la enseñanza, por ese querer enseñar y más importante: querer educar. Especialmente a mi asesor el Dr. Conde, por su paciencia, amistad y por su invaluable apoyo para terminar, al Dr. Vázquez por su amistad y ánimo.

A mis compañeros

Por los buenos momentos que pasamos, a Giovanni, Alberto, Omar, Ramiro, Edmundo, Vanessa, Castruita, con quienes tuve una convivencia especial y enriquecedora.

Al CONACYT

Por el apoyo económico que nos dio a todos los estudiantes, sin el cual hubiese sido muy difícil dedicarnos completamente al estudio.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **ANÁLISIS DEL REFORZAMIENTO DEL FLUJO MAGNÉTICO EN UN MOTOR DE CD APLICANDO EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO** realizada por el Ing. Jorge Alberto Gutiérrez Espinosa sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

El comité de Tesis

Asesor
Dr. Arturo Conde Enríquez

Coasesor
Dr. Ernesto Vázquez Martínez

Coasesor
M.C. Paz Vicente Cantú Gutiérrez

Vo. Bo.
Dr. Alan Castillo Rodríguez
División de Estudios de Postgrado

Monterrey, N.L. Diciembre del 2007

RESUMEN

ANÁLISIS DEL REFORZAMIENTO DEL FLUJO MAGNÉTICO EN UN MOTOR DE CD APLICANDO EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

Publicación No. _____

Jorge Alberto Gutiérrez Espinosa, M.C. en Ingeniería Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León, 2007

Profesor Asesor: Dr. Arturo Conde Enríquez

El presente trabajo consiste en el análisis de alternativas de aplicación de imanes permanentes como aporte magnético adicional a motores eléctricos de CD; en nuestro estudio tomamos como herramienta el método de elemento finito. La idea es reforzar el flujo magnético que pasa por el rotor, aplicando el concepto de agregar fuentes magnéticas naturales llamadas Imanes Permanentes.

En este trabajo se hace una descripción breve de los conceptos importantes en la formulación de un motor eléctrico y un imán permanente. Se presentan las características, y propiedades de los elementos involucrados. Se propone una metodología para el análisis de la incorporación de imanes permanentes en un motor de CD mediante el uso de elemento finito; se presenta la geometría de nuestro modelo, que es una escala de un motor de CD real, se asumen valores de permeabilidad relativa coherentes con las propiedades magnéticas de cada material, y se indica el procedimiento para el mallado y aplicación de las cargas al modelo. Se analiza el concepto de reforzamiento magnético, adecuando el modelo del motor para analizar las reacciones magnéticas.

Las simulaciones realizadas demostraron que el flujo aportado por el imán seguía la misma trayectoria que la del flujo principal (bobinas) y los valores de densidad de flujo magnético que pasaba por el núcleo aumentaron considerablemente con la inclusión de estos imanes. Se analizó la estructura básica del motor con dos imanes de diferente potencia, y se comprobó que un imán de mayor potencia refuerza más las líneas de flujo que pasan por el rotor.

Se incluyen al final las conclusiones fundamentales del análisis realizado.

ÍNDICE

Agradecimientos	iv
Resumen	vi
Índice de Figuras	ix
Índice de Tablas	xi

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Motivación	4
1.4 Objetivos de la tesis	4
1.5 Estructura de la tesis	5

Capítulo 2. IMANES PERMANENTES EN MOTORES DE CD

2.1 Introducción	6
2.2 Imanes permanentes	7
2.3 Motores de corriente directa	10
2.3.1 Funcionamiento	10
2.3.2 Formulación matemática-conceptos básicos	11
2.3.3 Características principales	17
2.3.4 Tipos de motores de CD	18
2.3.5 Limitaciones de los motores de CD	20

Capítulo 3. ANALISIS DE MOTORES DE CD APLICANDO EL METODO DE ELEMENTO FINITO

3.1 Introducción	21
3.2 Consideraciones de simulación	22
3.3 Caso base 180°	28
3.4 Caso base 90°	32

3.5 Simulación con imán permanente 180°	32
3.6 Simulación con imán permanente con núcleo partido	36
3.7 Estudio comparativo	38

Capítulo 4. CONCLUSIONES

4.1 Introducción	40
4.2 Conclusiones generales	41
4.3 Aportaciones	41
4.4 Recomendaciones para trabajos futuros	41
Referencias	43

ÍNDICE DE FIGURAS

No. de Figura	Descripción	Página
Fig. 2.1	Uso de Imanes Permanentes en motores	7
Fig. 2.2	Conductor bajo la influencia de un campo magnético	12
Fig. 2.3	Fuerza generada en una espira con corriente en un campo magnético	13
Fig. 2.4	Torque generado en la espira por la influencia del campo magnético	14
Fig. 2.5	Colector usado para mantener el Torque máximo	15
Fig. 2.6	Torque generado en una vuelta completa del rotor por efecto del colector	16
Fig. 2.7	Torque máximo generado por dos espiras	17
Fig. 2.8	Torque constante generado por múltiples espiras	17
Fig. 2.9	Gráfica de Par y Velocidad de Motor CD Simple	18
Fig. 2.10	Motor de Devanado en Serie CD: Diagrama Esquemático y de Alambrado	19
Fig. 2.11	Motor de Devanado en Derivación CD: Diagrama Esquemático y de Alambrado	19
Fig. 2.12	Motor Compuesto CD: Diagrama Esquemático y de Alambrado	19
Fig. 3.1	Gráfica de las áreas identificándose a 4 materiales en correspondencia con cada color	23
Fig. 3.2	Gráfica de las áreas unidas las áreas adyacentes del mismo material	24
Fig. 3.3	Gráfica del mallado triangular libre realizado al modelo del motor	25
Fig. 3.4	Gráfica del mallado fino realizado a zonas de importancia para el análisis del modelo	25
Fig. 3.5	Gráfica del camino de las líneas de campo magnético en el motor	26
Fig. 3.6	Gráfica de los vectores de densidad de campo magnético en el motor	27
Fig. 3.7	Gráfica de la solución nodal de la densidad de flujo magnético, donde se pueden apreciar las zonas de mayor densidad de flujo magnético	27
Fig. 3.8	Representación del los polos generados en un motor. a) Sin corriente en el rotor b) Con corriente en la armadura (mismo sentido que en las zapatas del estator)	28
Fig. 3.9	Gráfica del campo magnético en el motor - Sin corriente en el rotor	29
Fig. 3.10	Gráfica del campo magnético en el motor - Con corriente en la armadura (mismo sentido que en las zapatas del estator)	30
Fig. 3.11	Gráfica de los vectores de densidad de campo magnético en el motor - Sin corriente en el rotor	31

Fig. 3.12	Gráfica de los vectores de densidad de campo magnético en el motor - Con corriente en la armadura (mismo sentido que en las zapatas del estator)	31
Fig. 3.13	Gráfica del comportamiento del flujo magnético con el rotor a 90°	32
Fig. 3.14	Representación del los polos generados en un motor con la influencia de un IP a) Con J del IP = 0.7e6 b) Con J del IP = 2.4e6	33
Fig. 3.15	Gráfica de las líneas de campo magnético en el motor con IP (J = 0.7e6 A/mm ²)	33
Fig. 3.16	Gráfica de las líneas de campo magnético en el motor con IP (J = 2.4e6 A/mm ²)	34
Fig. 3.17	Gráfica de los vectores de densidad de campo magnético en el motor con Imán Permanente (J = 0.7e6 A/mm ²)	34
Fig. 3.18	Gráfica de los vectores de densidad de campo magnético en el motor con Imán Permanente (J = 2.4e6 A/mm ²)	35
Fig. 3.19	Gráfica del camino del flujo en una configuración de núcleo partido	37
Fig. 3.20	Gráfica de las densidades de flujo magnético con una configuración de núcleo partido	37

ÍNDICE DE TABLAS

No. de Tabla	Descripción	Página
Tabla I	Propiedades de los Imanes Permanentes	8
Tabla I	Propiedades de los Imanes Permanentes (continuación)	9

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

1.0 INTRODUCCIÓN

El desarrollo constante de nuevas tecnologías para incrementar la eficiencia de motores impone la búsqueda de nuevas herramientas de análisis; las herramientas computacionales de análisis deben tener características que permitan gran flexibilidad, incluir una amplia versatilidad de materiales y la evaluación del motor eléctrico ante diferentes estados operativos y condiciones de operación.

Los motores han sido estudiados a lo largo de la historia, desde el primer motor/generador de corriente directa (CD) llamado Dínamo, hasta los servomotores con aplicaciones de electrónica de potencia que tenemos hoy en día. Entre las compañías que diseñan y fabrican los motores eléctricos, se ha desarrollado una gran lucha por mejorar en cuanto al diseño, materiales, rendimiento o eficiencia, pérdidas, y aplicaciones principalmente. Cuestiones de espacio, su relación directa con la cantidad de materiales y su aplicación estable, llegan a tener una importancia significativa como una diferencia contra los demás motores en el mercado, significando una ventaja competitiva considerable tanto en precio como en desempeño.

La propuesta presentada en este trabajo de tesis consiste en demostrar que ante un reforzamiento de flujo magnético mediante el uso de imanes permanentes se puede lograr

un mayor torque generado, al igual que un aumento en la potencia mecánica y/o disminución en la potencia eléctrica de consumo. Los resultados obtenidos podrán servir para incentivar el estudio a fondo de esta propuesta como una segunda fase la demostración, mediante un prototipo comercial. La ventaja será tener la misma estructura que un motor convencional (punto de comparación), semejante cantidad de materiales, solo se agrega el imán permanente, y debido al incremento del flujo magnético que pasa a través del rotor, se tendrá mayor capacidad que un motor convencional y en determinados casos con una disminución de la energía eléctrica suministrada.

La herramienta utilizada para desarrollar los modelos es el programa ANSYS Multiphysics, con el cual se simula el desplazamiento del flujo magnético en el motor.

1.2 ANTECEDENTES

Fundamentos del método de los elementos finitos. Se trata de un método general para la solución de problemas de contorno gobernados por ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. El método de los elementos finitos es un método para convertir el problema continuo en un problema discreto con un número finito de grados de libertad. Una de las ventajas de este método es su facilidad de implementación en un programa computacional, que a su vez es una condición básica para su utilización ya que para el tratamiento de un problema en particular debe efectuarse un número muy elevado de operaciones para resolver sistemas algebraicos del orden de cientos o miles de ecuaciones. No obstante, esta cantidad no es una limitación con las computadoras estándar de hoy. Las ideas básicas de este método se originaron en avances en el análisis estructural de la industria aeronáutica en la década del '50. En la década del '60 el método fue generalizado para la solución aproximada de problemas de análisis de tensión, flujo de fluidos y transferencia de calor. El primer libro sobre elementos finitos fue publicado en 1967 por Zienkiewicz y Cheung. En la década del '70 el método fue extendido al análisis de problemas no lineales de la mecánica del continuo. Hoy el método permite resolver prácticamente cualquier situación física que pueda formularse mediante un

sistema de ecuaciones diferenciales. En sus principios el método de los elementos finitos no llegó masivamente a la práctica de la ingeniería debido a la no disponibilidad de computadoras en los estudios de ingeniería y por el otro al requisito de conocimientos profundos no solamente de la técnica y de los modelos matemáticos pertinentes sino también de programación computacional. Actualmente, la situación es completamente diferente, ya que las modernas computadoras personales soportan sin inconvenientes poderosos programas de propósito general de fácil utilización. La geometría puede ser definida por el analista o creada a partir de algún programa CAD. El segundo paso consiste en definir el modelo matemático a resolver. Este es el paso fundamental donde se especifica el tipo de ecuaciones a determinar, las condiciones de borde, propiedades materiales, y otros detalles acerca del método en sí mismo. Una vez efectuada dicha definición el programa resuelve automáticamente las ecuaciones pertinentes y provee los resultados en una forma apropiada para el analista.

Fundamentos de la modelación de motores eléctricos. En noviembre de 1998, S.H. Wong y Z.J. Cendes [1] analizan la confiabilidad de los métodos de elemento finito para el análisis modal en problemas de corrientes de eddy de dos y tres dimensiones. Ellos hacen una comparación de los métodos que eliminan completamente la inestabilidad, entre ellos el método de elemento finito con condiciones diferentes de mallado. En Septiembre de 1999, J. Brauer, H. Sadeghi y R. Oesterlei [2] usan el método de elemento finito para realizar una análisis mediante el cual calculan el torque y las corrientes de un motor de inducción, sin la necesidad de hacer un circuito equivalente. En Junio del 2004, Y.G. Soloveychik, M.G. Persova, R.V. Petrov y M.E. Royak [3] proponen un método de modelado numérico de varios tipos de motores eléctricos, el método propuesto considera el movimiento de las partes móviles de los motores eléctricos. En el modelado de motores eléctricos por el método de elemento finito, en Diciembre del 2006 T. Miller, M. Popescu, M.I. Mcgilp, M. Olaru, O.J. Davies, J.P. Sturgess y A.M. Sitzia [4] mencionan la descripción de la teoría detrás de la formulación del método del elemento finito usado en el diseño y análisis de los motores de imanes permanentes saturados. En este artículo se describe la técnica en que una solución de elemento finito se asocia con un modelo

clásico, y se usa el método del elemento finito para la obtención del torque promedio y las inductancias saturadas del motor.

1.3 MOTIVACIÓN

Este trabajo surgió como una respuesta a las necesidades de la industria, donde los fabricantes de máquinas eléctricas tienen una lucha muy cerrada por sacar al mercado los productos más competitivos: en precio, calidad y características.

Además, la tecnología de los motores es una tecnología muy cerrada, el diseño de los motores eléctricos conlleva expresiones analíticas que son muy complejas y con carencias del real comportamiento físico. Esta complejidad, aunada a la poca información detallada de las características y aplicaciones de los imanes permanentes, representa la principal motivación para el desarrollo de este trabajo de tesis.

Este estudio busca contribuir en la investigación aplicada de los motores eléctricos, donde el enlace o retroalimentación entre la investigación desarrollada en los centros de tecnología y las empresas que necesitan esos conocimientos es algo pobre en nuestros días. La investigación como tal, que contenga técnica y método, debe por concepto ser desarrollada para su implementación. Lo anterior nos motivó a realizar este estudio, donde planteamos una metodología de análisis del motor eléctrico, logrando plantear algunos casos a forma de propuesta. Además, está implícita la riqueza obtenida en el manejo del software de elemento finito.

1.4 OBJETIVOS DE LA TESIS

Los objetivos principales del trabajo de tesis son:

- Presentar una metodología de análisis de los motores eléctricos.
- Utilizar técnicas del elemento finito para presentar una propuesta de simulación y resultados.

- Comprobar que mediante la herramienta de elemento finito es posible trabajar con un modelo de una máquina eléctrica, plantear casos y obtener resultados que permitan el análisis de los fenómenos electromagnéticos involucrados, obteniendo finalmente un modelo matemático que exima de la necesidad de un prototipo físico durante la etapa de diseño.
- Aplicar los imanes permanentes para obtener un reforzamiento de flujo, aprovechando el que sean fuentes magnéticas naturales.
- Motivar al uso de la investigación en las empresas que se dedican a la fabricación de motores eléctricos.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el capítulo I se da una introducción del estudio realizado. Se describen los antecedentes, así como las diferentes herramientas utilizadas para el análisis de motores de CD; se puntualiza en la ventaja de realizar el análisis del motor mediante la herramienta utilizada; además se describen los objetivos del trabajo realizado.

En el capítulo II se presenta los componentes y la estructura de los motores de CD, se describen las propiedades de los imanes permanentes; se presentan las características de los imanes y la forma de modelarlos. Se presenta además una teoría básica de la formulación matemática y electromagnética en los motores eléctricos de CD.

En el capítulo III se presentan las simulaciones realizadas, se presenta el estudio variando la alineación del rotor respecto al flujo magnético para 180 y 90 grados. También se presenta en este capítulo una simulación del motor cuando se le agrega un imán permanente para reforzar el flujo que pasa por el rotor. Además, se presenta otra variedad donde agregamos un imán permanente en un núcleo magnético que está seccionado o partido. Por último se realiza un estudio comparativo, donde se explican los resultados obtenidos con cada caso.

En el capítulo IV se presentan las conclusiones del presente trabajo, así como las aportaciones y recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo II

IMANES PERMANENTES EN MOTORES DE CD

2.1 Introducción

Un Imán Permanente es un material capaz de producir un campo magnético exterior y atraer al hierro. Pueden ser naturales o artificiales (aleaciones de diferentes metales). En un imán, la capacidad de atracción es mayor en sus extremos o polos. Estos polos se denominan norte y sur debido a que tienden a orientarse según los polos geográficos de la tierra. Los imanes permanentes tienen muchas aplicaciones, son usados extensivamente en servomotores, robótica, máquinas herramientas, ascensores, etc. Los principales materiales de que están hechos y sus propiedades se presentan en esta sección.

Una de las aplicaciones de los imanes permanentes es el uso en motores eléctricos y generadores eléctricos, tales como el motor de arranque en el automóvil, usan el principio de atracción y repulsión (Fig. 2.1).

Los motores eléctricos se usan para crear una fuente de energía mecánica procedente de una fuente de energía eléctrica. Los generadores crean una fuente de energía eléctrica procedente de una fuente de energía mecánica. La fuerza ejercida sobre un electrón en un campo magnético esta en ángulo recto con relación al campo magnético. Cuando el electrón se coloca en ambos campos, uno magnético y el otro eléctrico, la fuerza ejercida

en el electrón es perpendicular a ambos campos. La regla de la mano derecha se usa para determinar la dirección de la fuerza de los electrones en un campo magnético y eléctrico.

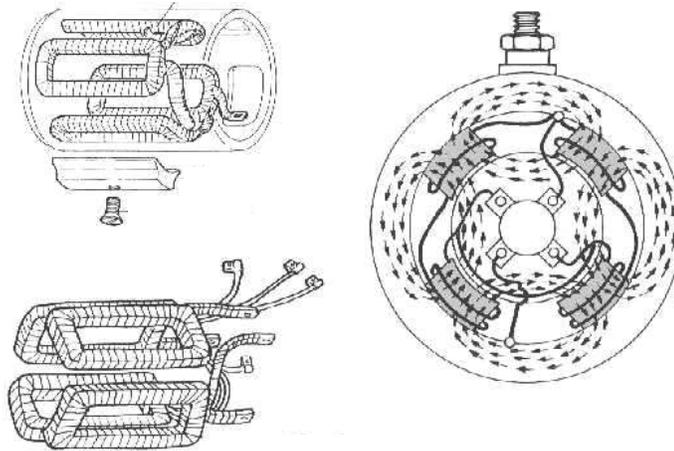


Fig. 2.1. Uso de Imanes Permanentes en motores.

El campo magnético alrededor de un conductor sigue la dirección de las manecillas del reloj. La dirección del campo magnético del imán permanente es del polo norte hacia el polo sur. Las líneas sobre el conductor van en la misma dirección, reforzando el campo sobre el camino de los electrones. Debajo del conductor los campos se oponen mutuamente.

Los electroimanes (en las cuales se aplica e interrumpe la corriente) se emplean para accionar aparatos eléctricos tales como: el solenoide de arranque, bocinas y los relés de las luces. Otros electroimanes (en los cuales se aumenta o disminuye la corriente) se utilizan para el funcionamiento de los limitadores de corriente y voltaje en un regulador de voltaje [5].

2.2 Imanes permanentes

Un imán es un material capaz de producir un campo magnético exterior y atraer el hierro (también puede atraer al cobalto y al níquel). Los imanes que manifiestan sus propiedades de forma permanente pueden ser naturales, como la magnetita (Fe_3O_4) o artificiales, obtenidos a partir de aleaciones de diferentes metales.

La región del espacio donde se pone de manifiesto la acción de un imán se llama campo magnético. Este campo se representa mediante líneas de fuerza, que son unas líneas imaginarias, cerradas, que van del polo norte al polo sur, por fuera del imán y en sentido contrario en el interior de éste. Algunas propiedades de los imanes permanentes se presentan en las Tabla I.

Tabla I. Propiedades de los Imanes Permanentes.

► Neodimio Hierro Boro

Grado del Material	Densidad de Flujo Remanente, Br [mT] mínima	Coercividad, bHc [kA/m] mínima	Coercividad Intrínseca, jHc [kA/m] mínima	Producto de Energía Máxima, BH _{max} [kJ/m ³] mínima
N25	1020	756	2387	199
N28	1050	780	2387	223
N30	1080	835	1353	239
N35	1180	860	1353	279
N40	1270	875	1353	318
N42	1300	955	1592	334
N45	1340	995	955	358
N48	1380	875	955	382

Sufijo del Grado de Material	Temperatura Máxima de Trabajo [°C]
Ninguno	80
H	120
SH	150
UH	180
EH	200

Tabla I. Propiedades de los Imanes Permanentes (Continuación).

► Samario Cobalto

Grado del Material	Densidad de Flujo Remanente, Br [mT] mínima	Coercividad, bHc [kA/m] mínima	Coercividad Intrínseca, jHc [kA/m] mínima	Producto de Energía Máxima, BH _{max} [kJ/m ³] mínima
S18	840	605	1432	143
S22	930	637	1432	175
S24	980	676	1432	191
S26	1030	716	1194	207
S28	1070	756	1194	223
S30	1100	772	1194	239

Sufijo del Grado de Material	Temperatura Máxima de Trabajo [°C]
Ninguno	250
M	300
H	330

► **Álnico**

Grado del Material	Densidad de Flujo Remanente, Br [mT] mínima	Coercividad, bHc [kA/m] mínima	Coercividad Intrínseca, jHc [kA/m] mínima	Producto de Energía Máxima, BH _{max} [kJ/m ³] mínima
A2	700	44	45	12
A3	600	38	40	10
A5	1050	47	48	31
A5-7	1350	59	59	60
A6	1000	56	57	24
A8	800	123	128	32
A8B	850	124	124	44
A9	1050	112	112	72

► **Ferrita Dura (Cerámica)**

Grado del Material	Densidad de Flujo Remanente, Br [mT] mínima	Coercividad, bHc [kA/m] mínima	Coercividad Intrínseca, jHc [kA/m] mínima	Producto de Energía Máxima, BH _{max} [kJ/m ³] mínima
C1	220	136	220	8
C3	350	155	160	24
C5	400	160	185	28
C8	370	240	260	28

2.3 Motores de corriente directa

Los dos componentes básicos de todo motor eléctrico son el rotor y el estator. El rotor es una pieza giratoria, un electroimán móvil, con varios salientes laterales, que llevan cada uno a su alrededor un bobinado por el que pasa la corriente eléctrica. El estator, situado alrededor del rotor, es un electroimán fijo, cubierto con un aislante. Al igual que el rotor, dispone de una serie de salientes con bobinados eléctricos por los que circula la corriente.

El estator da soporte mecánico al aparato y tiene un hueco en el centro generalmente de forma cilíndrica. En el estator además se encuentran los polos, que pueden ser de imanes permanentes o devanados con hilo de cobre sobre núcleo de hierro. El rotor es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, al que llega la corriente mediante dos escobillas [6,7].

También se construyen motores de CD con el rotor de imanes permanentes para aplicaciones especiales.

2.3.1 Funcionamiento

Cuando se introduce una espira de hilo de cobre en un campo magnético y se conecta a una batería, la corriente pasa en un sentido por uno de sus lados y en sentido contrario por el lado opuesto. Así, sobre los dos lados de la espira se ejerce una fuerza, en uno de ellos hacia arriba y en el otro hacia abajo. Si la espira de hilo va montada sobre el eje metálico, empieza a dar vueltas hasta alcanzar la posición vertical. Entonces, en esta posición, cada uno de los hilos se encuentra situado en el medio entre los dos polos, y la espira queda retenida.

Para que la espira siga girando después de alcanzar la posición vertical, es necesario invertir el sentido de circulación de la corriente. Para conseguirlo, se emplea un conmutador o colector, que en el motor eléctrico más simple, el motor de corriente

continua, está formado por dos chapas de metal con forma de media luna, que se sitúan sin tocarse, como las dos mitades de un anillo, y que se denominan delgas. Los dos extremos de la espira se conectan a las dos medias lunas. Dos conexiones fijas, unidas al bastidor del motor y llamadas escobillas, hacen contacto con cada una de las delgas del colector, de forma que, al girar la armadura, las escobillas contactan primero con una delga y después con la otra.

Cuando la corriente eléctrica pasa por el circuito, la armadura empieza a girar y la rotación dura hasta que la espira alcanza la posición vertical. Al girar las delgas del colector con la espira, cada media vuelta se invierte el sentido de circulación de la corriente eléctrica. Esto quiere decir que la parte de la espira que hasta ese momento recibía la fuerza hacia arriba, ahora la recibe hacia abajo, y la otra parte al contrario. De esta manera la espira realiza otra media vuelta y el proceso se repite mientras gira la armadura.

El esquema descrito corresponde a un motor de corriente continua, el más simple dentro de los motores eléctricos, pero que reúne los principios fundamentales de este tipo de motores.

2.3.2 Formulación matemática – conceptos básicos

Fuerza Electromotriz Inducida en un Conductor

Consideremos una barra conductora desplazándose a una velocidad v a través de un campo magnético de densidad B , ver Fig. 2.2.

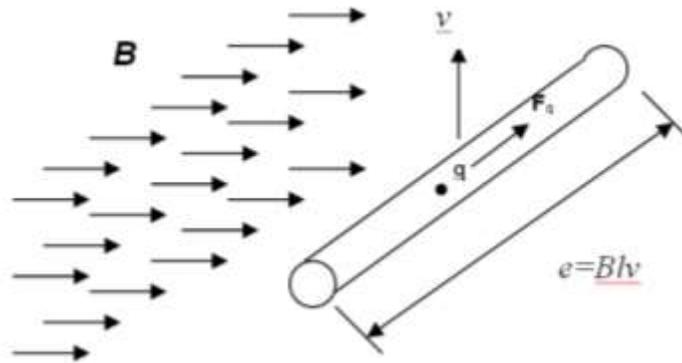


Fig. 2.2. Conductor bajo la influencia de un campo magnético.

Sobre una carga eléctrica q en la barra conductora surge una fuerza F dada por la siguiente expresión:

$$F = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Supongamos que el campo magnético \mathbf{B} , la velocidad \mathbf{v} y la barra conductora son perpendiculares entre si, entonces la fuerza sobre la barra está en la dirección longitudinal a ella y tendrá una magnitud de:

$$F = qvBe_l$$

Recordemos la definición de campo eléctrico:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$$

Entonces se genera un campo eléctrico en el sentido longitudinal a la barra conductora dado por:

$$\mathbf{E} = v\mathbf{B}e_l$$

Más aún, recordemos la definición de diferencia de voltaje V_{12} entre dos puntos, esto es:

$$V_{12} = \int_1^2 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

Luego

$$V_{12} = \int_1^2 v B e_l \cdot dl$$

$$V_{12} = Blv = \varepsilon$$

Entonces por efecto del desplazamiento de un conductor a través de un campo magnético se produce una diferencia de potencial entre los extremos de éste dada por la expresión anterior.

Obtención de Torque

En el punto anterior se ha visto que un conductor por el cual circula una corriente y ante la presencia de un campo magnético experimenta una fuerza en dirección transversal tanto a su eje longitudinal como al campo magnético. Se puede pensar en aprovechar este efecto para convertir energía eléctrica en energía mecánica. Nos interesa particularmente el caso de energía mecánica en forma rotacional por sus aplicaciones.

Entonces podemos pensar en una configuración donde la barra conductora está limitada a girar alrededor de un eje, y por la cual circula una corriente i y además está en la presencia de un campo magnético \mathbf{B} . De este modo la trayectoria de la barra conductora esta contenida en una circunferencia de radio r , como se muestra en la Fig. 2.3.

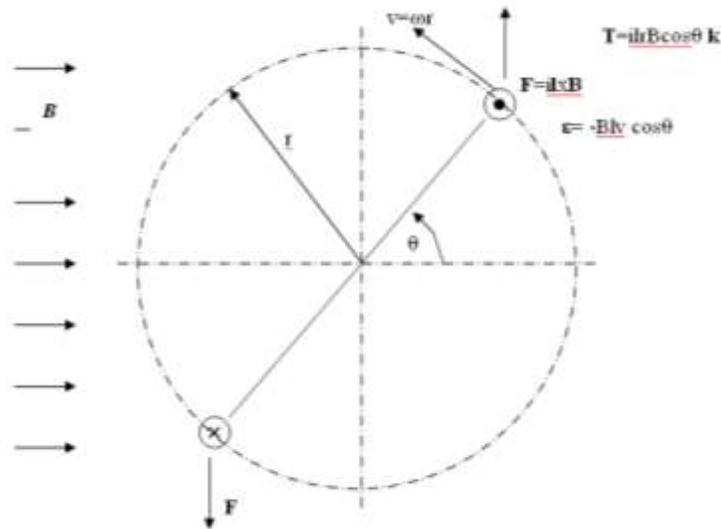


Fig. 2.3. Fuerza generada en una espira con corriente en un campo magnético.

Si la barra conductora se encuentra en una posición angular θ respecto de la horizontal, entonces se produce sobre dicha barra una fuerza mecánica y por ende un torque respecto al eje de rotación dados por las siguientes expresiones:

$$\mathbf{F} = ilB \mathbf{j}$$

$$\mathbf{T} = ilBr \cos \theta \mathbf{k}$$

Vemos que la fuerza \mathbf{F} sobre la barra conductora es constante si la corriente y el campo magnético se mantienen constantes. Sin embargo el torque \mathbf{T} respecto al eje de rotación depende de la posición.

No obstante la configuración anterior no es apropiada para ser utilizada como motor ya que el torque útil al cabo de un giro es cero, tal como se aprecia en la Fig. 2.4 donde se ha graficado el torque \mathbf{T} en función de la posición angular θ :

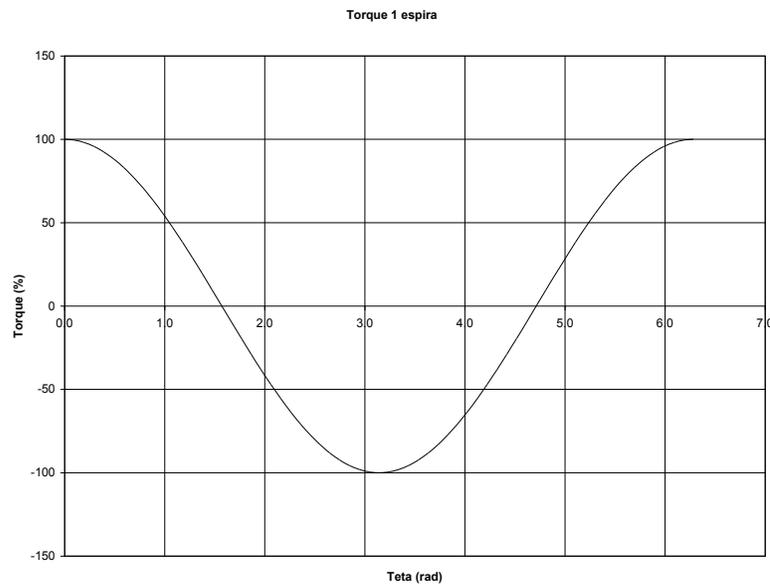


Fig. 2.4. Torque generado en la espira por la influencia del campo magnético.

Para resolver este problema se recurre a un dispositivo que permite invertir el sentido de la corriente justo en el momento en que el torque cambia de signo. De este modo el cambio de signo geométrico debido a $\cos\theta$ se compensa mediante un cambio de signo debido al cambio de sentido de la corriente y así el signo del torque se mantiene constante. Este dispositivo recibe el nombre de colector y su funcionamiento se puede apreciar en la Fig. 2.5.

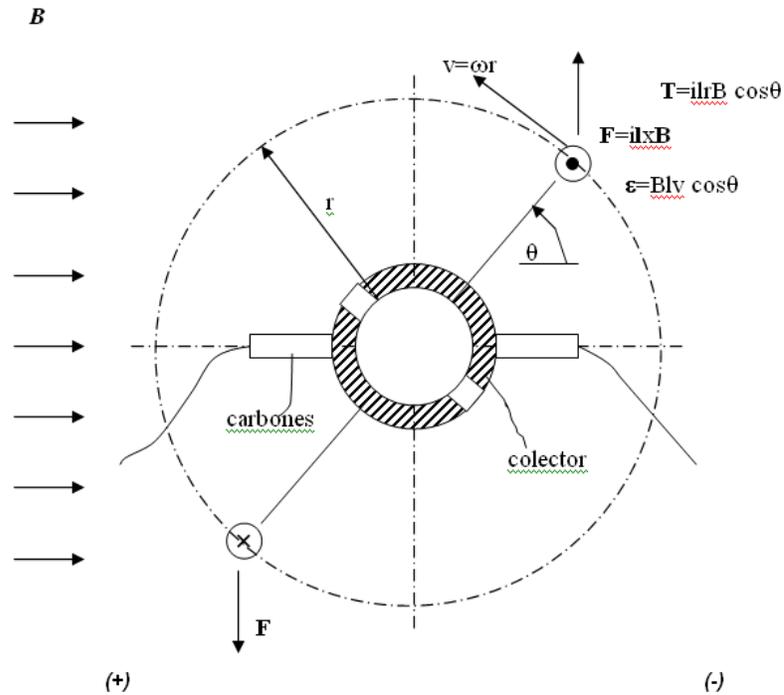


Fig. 2.5. Colector usado para mantener el Torque máximo.

El colector es un anillo que gira solidario al eje del rotor. Está dividido en segmentos no conductores (en blanco) y segmentos conectados a las barras (achurados). El voltaje se entrega a las barras conductoras a través de carbonos fijos sobre los cuales desliza el colector. Estos carbonos están presionados contra el colector a través de resortes. El colector por su parte está conectado a las barras a través de conductores radiales (no se han dibujado), y el circuito eléctrico se completa a través de una barra radial que conecta las barras longitudinales formando lo que se llama una espira. La polaridad de la espira se invierte cuando cruzan la horizontal los segmentos no conductores del colector y de este modo la corriente cambia de sentido, lo que permite mantener constante el signo del torque durante una vuelta completa. Así, con la introducción de un colector el torque a lo largo de una vuelta completa del rotor se ve en la Fig. 2.6.

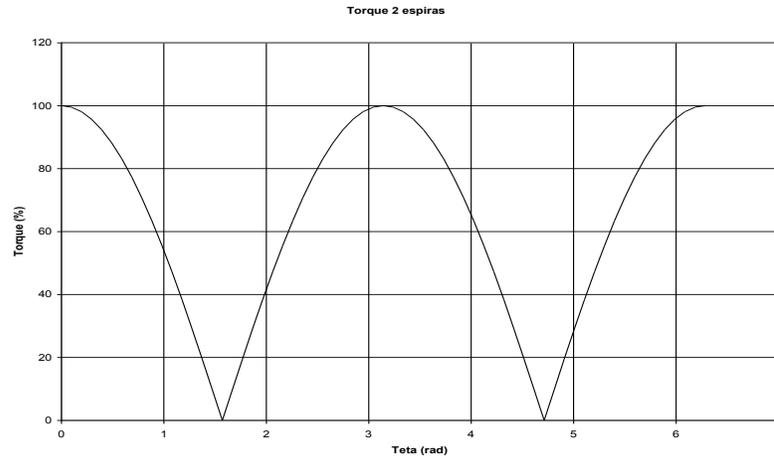


Fig. 2.6. Torque generado en una vuelta completa del rotor por efecto del colector.

Se observa en la figura anterior que el torque es siempre positivo, lo que se logra por efecto del colector y conexión a través de carbones a la fuente de poder. Sin embargo desde el punto de vista mecánico no es conveniente tener un torque pulsante ya que el mecanismo conducido sufriría vibraciones que probablemente lo dañarían. Para resolver este problema se modifica el colector agregando más subdivisiones e incluyendo más espiras.

En la Fig. 2.7 se ha incluido una segunda espira y el colector ha quedado subdividido en cuatro segmentos no conductores y cuatro segmentos conectados a cada uno de los extremos de las espiras conductoras. Nótese que ahora cada espira queda energizada durante la mitad de un giro completo, y se van alternado entre sí. Nótese además que las espiras quedan energizadas durante la porción en que el torque es más alto.

La Fig. 2.8 permite visualizar el efecto de subdividir el colector y añadir más espiras al rotor. Las curvas representan el uso de 4 y 8 subdivisiones en el colector, vale decir 2 y 4 espiras. Cabe indicar que en la práctica el número de espiras y subdivisiones en un motor eléctrico es de 16, 32 o más. Con ello se logra que el torque resultante sea cada vez más constante y sin la presencia de lo que se conoce como “ripple”.

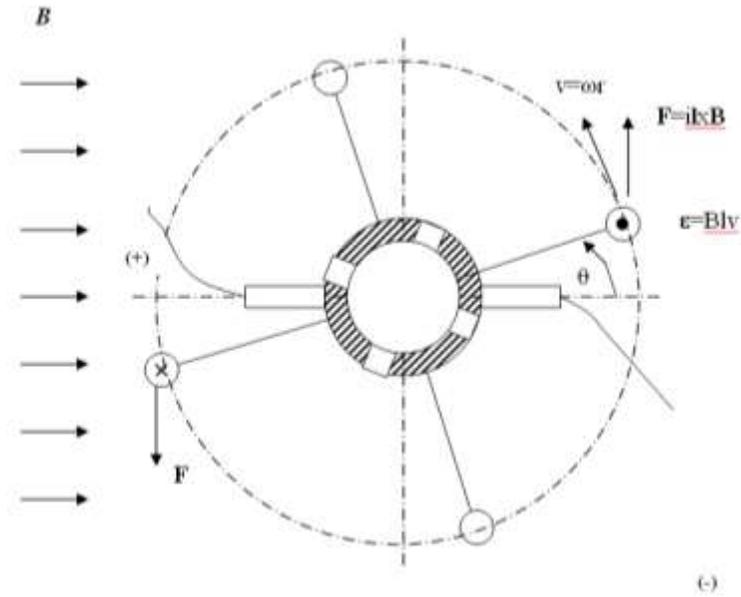


Fig. 2.7. Torque máximo generado por dos espiras.

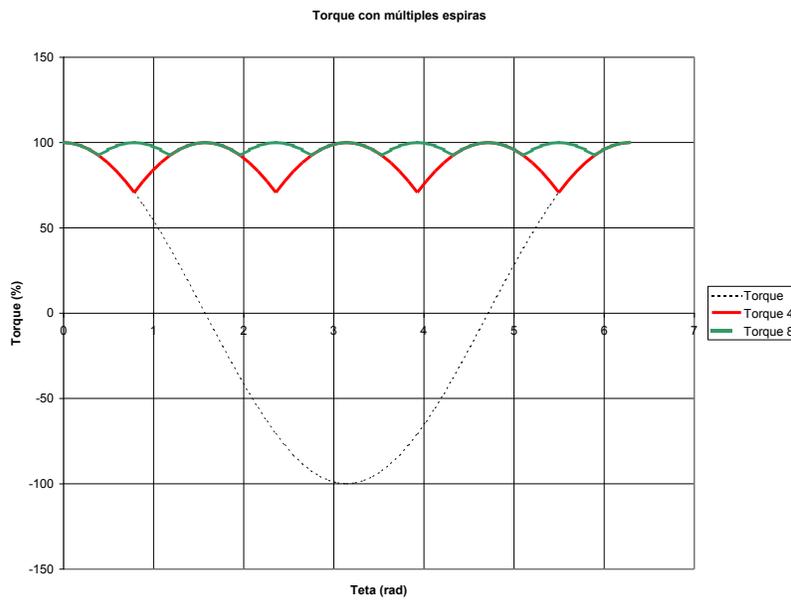


Fig. 2.8 Torque constante generado por múltiples espiras.

2.3.3 Características principales

Para conformar los polos de campo normalmente se utilizan muchas vueltas (o devanados). Entre mayor son los polos, más fuerte es el campo. Entre mayor es el número

de devanados utilizados en un motor CD, más suavemente funcionará el motor. Sin embargo, el número de devanados de campo debe siempre ser par. Cada conjunto de devanados consiste de un polo norte y un polo sur.

La mayoría de los dispositivos requiere de un motor que gire a una velocidad uniforme, de tal manera que un motor CD simple (2 polos) no sería adecuado para obtener un margen amplio de velocidades. Incrementando o disminuyendo el número de polos se obtienen velocidades en un amplio margen (Fig. 2.9).

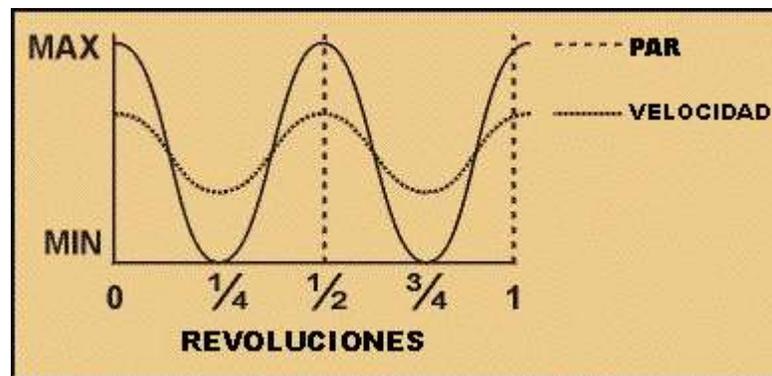


Fig. 2.9 Gráfica de Par y Velocidad de Motor CD Simple.

La principal característica del motor de corriente continua es la posibilidad de regular la velocidad desde vacío a plena carga.

2.3.4 Tipos de motores de C.D.

Existen básicamente tres tipos de motores de CD: el Motor de Devanado en Serie, el Motor de Devanado en Derivación, y el Motor Compuesto. Interna y externamente, son prácticamente iguales. La diferencia entre ellos es la forma del alambrado de los circuitos de devanado de campo y devanado de armadura.

El motor de devanado en serie (Fig. 2.10) tiene el devanado de campo alambrado en serie con la armadura. Se conoce también como motor universal puesto que puede utilizarse tanto en aplicaciones CD como CA. Tiene un alto par de arranque y una

característica de velocidad variable. El motor puede arrancar cargas pesadas, pero la velocidad se eleva conforme se reduce la carga.

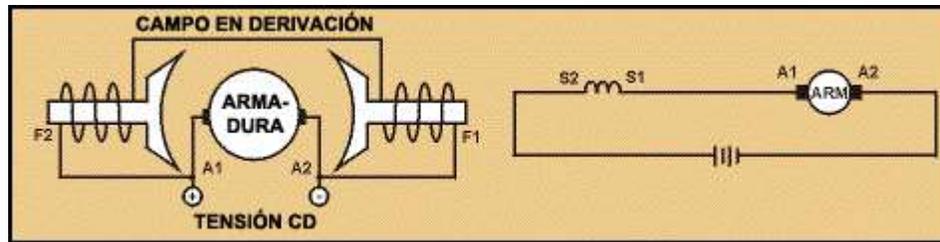


Fig. 2.10 Motor de Devanado en Serie CD: Diagrama Esquemático y de Alambrado.

El motor de devanado en derivación tiene los circuitos de armadura y campo alambrados en paralelo, proporcionando una fuerza de campo y velocidad de motor esencialmente constantes (Fig. 2.11).

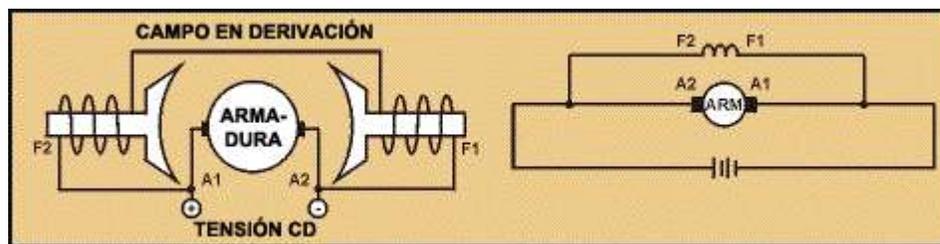


Fig. 2.11 Motor de Devanado en Derivación CD: Diagrama Esquemático y de Alambrado.

El motor compuesto (Figura 2.12) combina las características de los motores de devanado en derivación y de devanado en serie. Un motor compuesto tiene un alto par de arranque y características relativamente buenas de par de velocidad a carga nominal. Debido a que se requieren de circuitos complicados para controlar los motores compuestos, este arreglo de alambrado se utiliza habitualmente solamente en grandes motores bi-direccionales.

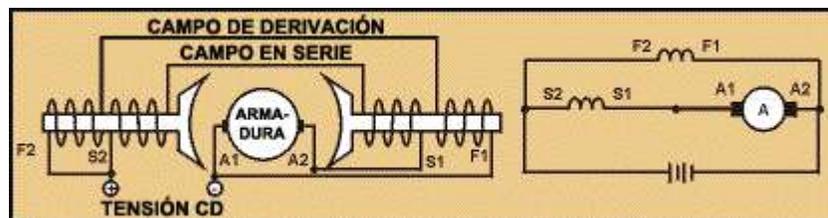


Fig. 2.12 Motor Compuesto CD: Diagrama Esquemático y de Alambrado.

2.3.5 Limitaciones de los motores de CD

Los motores de CD tienen algunas limitaciones. Cada vez que la armadura se encuentra en una posición paralela con relación al campo magnético (se conoce como Posición Neutral), no se produce par.

Recordando que cuando la armadura está en una posición tal que los lados del devanado estén a ángulos rectos con relación al campo magnético, se ejerce un par. Pero, puesto que la armadura gira en un círculo, existen dos puntos en los cuales se encuentra en un estado paralelo con relación al campo magnético – en una vuelta – y no se genera par.

Otro problema con un motor CD simple es que no arranca fácilmente. Esto es particularmente cierto si el devanado se encuentra en o cerca de una posición neutral. La armadura debe ser desplazada fuera de la posición neutral para que arranque el motor.

Motor CD Práctico

En el caso de un motor CD práctico, la armadura nunca se encuentra en una posición neutral y el par siempre está en su máximo. Esto se logra utilizando una armadura con más que un devanado, donde cada devanado de la armadura está conectado a un par de segmentos de conmutador.

Usualmente los motores CD prácticos no utilizan imanes permanentes; utilizan en su lugar electroimanes. Los electroimanes funcionan de manera muy similar a los imanes permanentes. Para fabricar un electroimán, basta con envolver una varilla de hierro con un alambre aislado y suministrar corriente a través del alambre, como se muestra en la Figura 2.12. La varilla de hierro desarrolla un campo magnético, y polos magnéticos norte y sur.

El electroimán tiene dos ventajas en comparación con el imán permanente: la primera es que mediante el ajuste de la cantidad de corriente que fluye a través del alambre, se puede controlar la fuerza del electroimán, y la segunda es que cambiando la dirección de flujo de corriente, los polos del electroimán pueden ser invertidos. Esto último es que, el cambio de los conductores en las terminales de la batería cambia la dirección de flujo de la corriente.

ANÁLISIS DE MOTORES DE CD APLICANDO EL METODO DE ELEMENTO FINITO

3.1. Introducción

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico muy general para la resolución de ecuaciones diferenciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física [8].

El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) -sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema- en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «malla».

Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o

conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de difusión del calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (fluidodinámica CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

3.2 Consideraciones de simulación

La forma de trabajar se presentará a continuación. Mostraremos las distintas configuraciones geométricas del motor, y explicaremos brevemente el porqué manejarlo de dicha forma. Igualmente explicaremos la forma de hacer el mallado.

La simulación en ANSYS [9] se llevó a cabo mediante una geometría que se seleccionó de un motor prototipo de CD. En la Fig. 3.1 muestran las áreas formadas en el modelo.

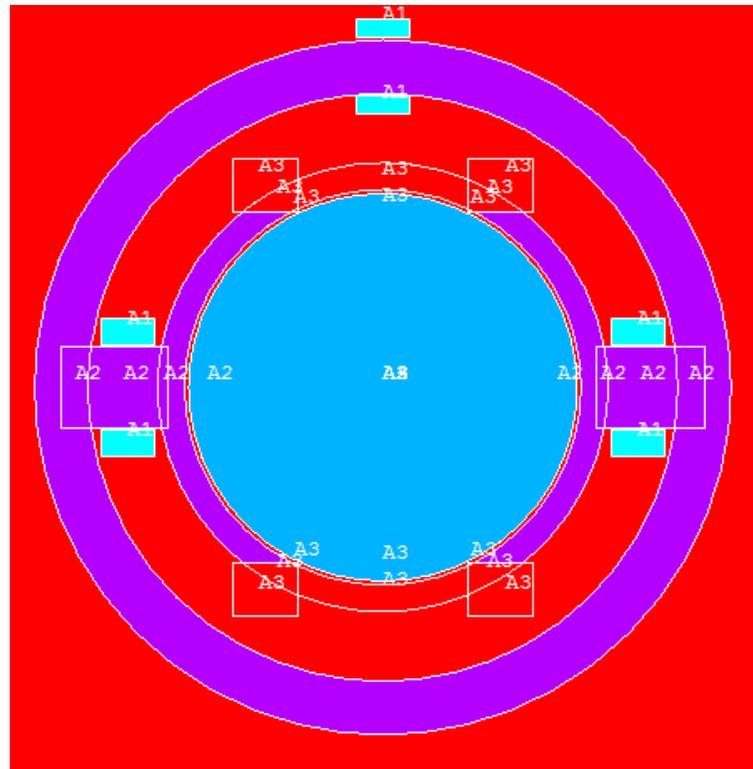


Fig. 3.1 Gráfica de las áreas identificándose a 4 materiales en correspondencia con cada color.

Se explica la forma en que podemos trabajar con el ANSYS mostrando imágenes sin un significado más que para explicar o mostrar la herramienta. En la Fig. 3.1 se muestran en color rojo las áreas de material aire, en color morado las áreas que forman el núcleo de acero al silicio de alta permeabilidad, en color azul claro las áreas de material cobre y en color azul oscuro las áreas de material de acero de baja permeabilidad. Los materiales seleccionados en los diferentes casos son una aproximación de la realidad, donde lo más importante es el comportamiento de los modelos, el cual puede determinarse sin que los valores sean tan aproximados.

Las geometrías mostradas se definieron buscando representar una vista transversal del motor, y el análisis que nos interesa bajo esta consideración es plano. Las áreas se unieron como se muestra en la Fig. 3.2 para una mejor simplicidad y manejo del modelo.

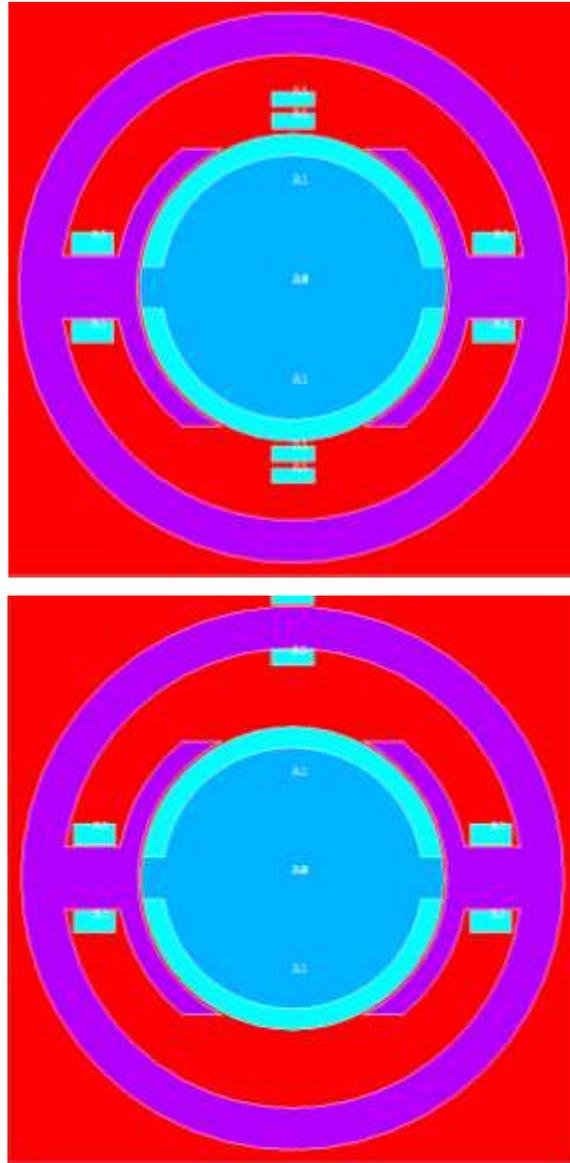


Fig. 3.2 Gráfica de las áreas unidas las áreas adyacentes del mismo material.

La geometría y el mallado son muy importantes para nuestro modelo. El programa de elemento finito nos permite mallar el programa de varias formas, nosotros elegimos el mallado triangular libre, que para nuestra aplicación nos da un buen grado de precisión en los resultados. Un mallado realizado se presenta en la Fig. 3.3. El mallado en la zona del entrehierro es importante para nuestro modelo, por lo cual se hace un mallado más fino en esa zona. Entre más fino es el mallado, mayor es la exactitud de los resultados en esa zona. Además, requiere una mayor capacidad de recursos de nuestro equipo de cómputo. Un mallado fino se presenta en la Fig. 3.4.

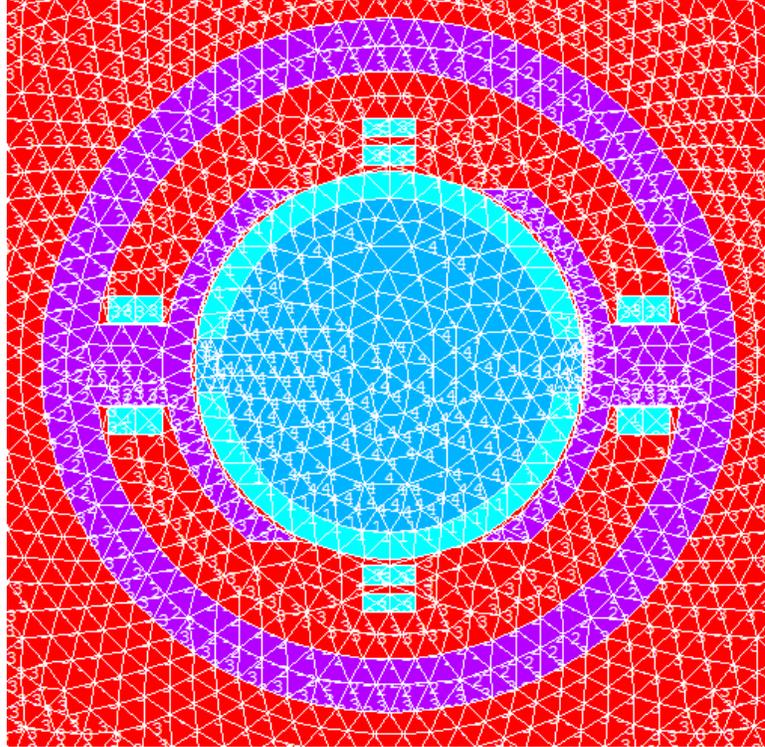


Fig. 3.3 Gráfica del mallado triangular libre realizado al modelo del motor.

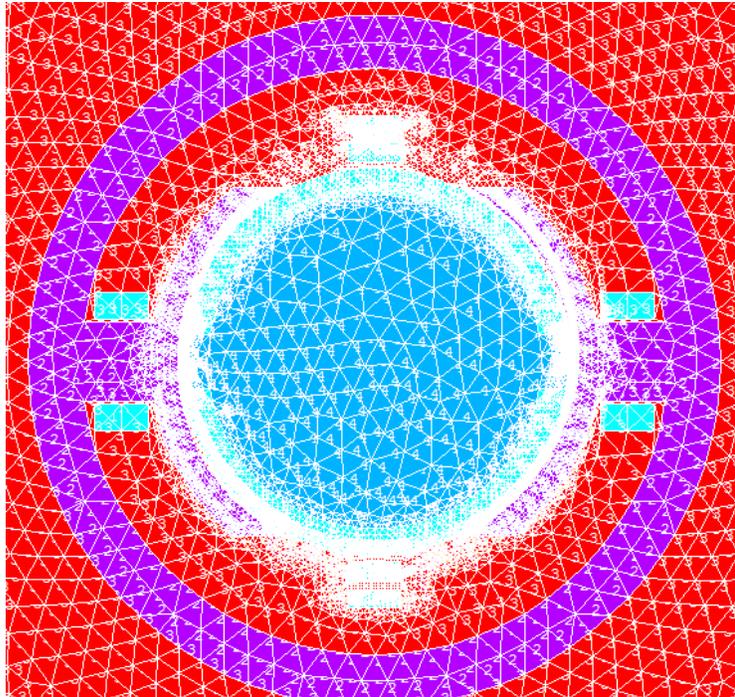


Fig. 3.4 Gráfica del mallado fino realizado a zonas de importancia para el análisis del modelo.

Otro punto importante de la simulación son las cargas, donde se especifican las densidades de corriente y las condiciones frontera del modelo. En el modelo, las fuentes electromagnéticas se representan como electroimanes (devanados de campo en las zapatas polares y las espiras de cobre del rotor). Los imanes permanentes también se simularon como electroimanes, que para los propósitos de la simulación, se obtiene un comportamiento similar al de un imán permanente, ya que no consideramos los efectos de saturación y la pérdida de propiedades al paso del tiempo por efectos de las condiciones de operación, que son la diferencias apreciables y que no nos afectan para los propósitos de nuestro modelo. Para las condiciones frontera del modelo, consideramos que no hay flujo hacia el exterior, lo cual es una aproximación válida para el análisis que hicimos.

En nuestro modelo se obtiene una solución electromagnética de análisis estático en 2 dimensiones. Una vez resulto nuestro modelo, el post-procesamiento del programa de elemento finito nos permite ver los resultados de varias formas. Podemos ver el comportamiento del flujo magnético en la Fig. 3.5, donde se muestra además una escala, que representa los valores de AZ, siendo esta una herramienta matemática interna del programa. En la Fig. 3.6 se muestra una gráfica de los vectores de densidad de flujo magnético, donde aparece una escala que presenta los valores de densidad de flujo magnético en Teslas. Esta gráfica es la que utilizaremos para indicar que hay más o menos flujo magnético ante diferentes condiciones de simulación.

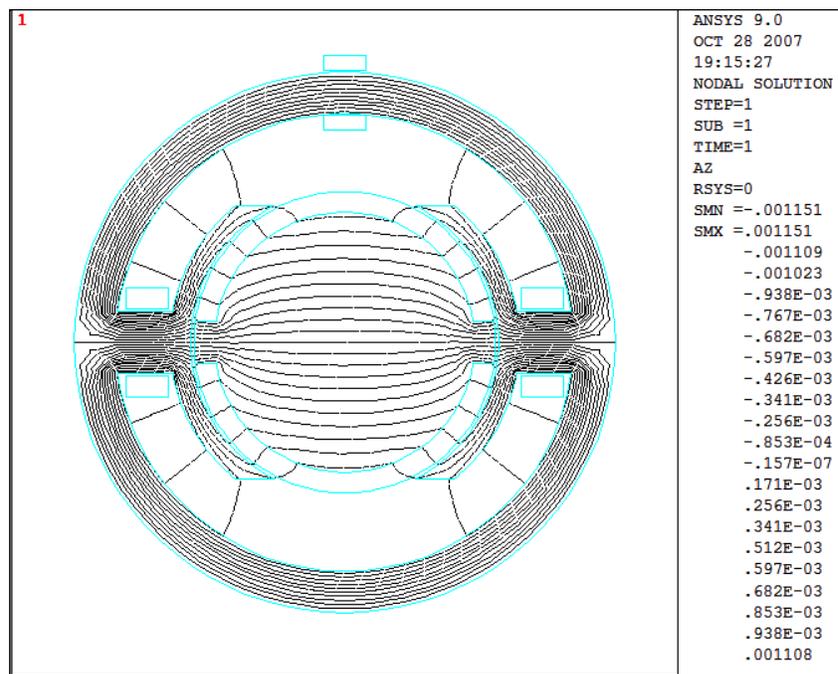


Fig. 3.5 Gráfica del camino de las líneas de campo magnético en el motor.

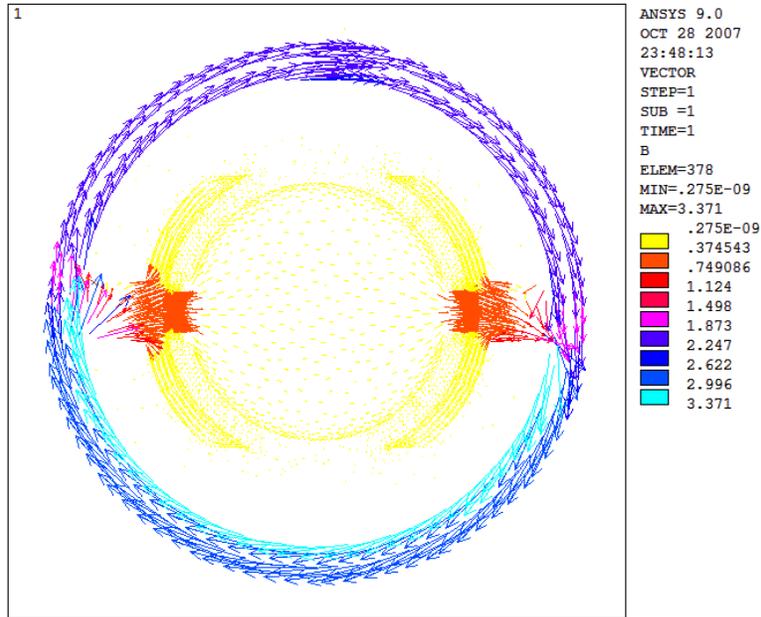


Fig. 3.6 Gráfica de los vectores de densidad de campo magnético en el motor.

En la Fig. 3.7 mostramos una gráfica que muestra la solución nodal de la suma vectorial de la densidad de flujo magnético, las cual nos sirve para ver las zonas con una mayor influencia de flujo magnético. Esta gráfica además de servirnos para ver cuál es el comportamiento de la densidad de flujo en el modelo, nos sirve para ver de forma didáctica las zonas de mayor densidad de flujo magnético, lo cual es muy importante en las consideraciones de diseño para la construcción de un prototipo, como una continuación del estudio en una segunda fase.

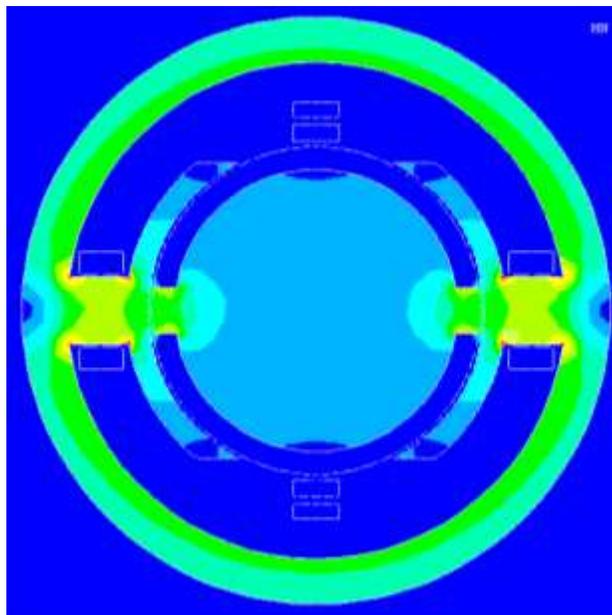


Fig. 3.7 Gráfica de la solución nodal de la densidad de flujo magnético, donde se pueden apreciar las zonas de mayor densidad de flujo magnético.

Finalmente, en la interpretación de resultados, es muy importante tomar en cuenta los materiales utilizados, así como los valores de permeabilidad relativa de los materiales. Las simulaciones presentadas no dejan de ser una buena aproximación, que al coincidir con la teoría, nos sirve de base para decir que la simulación del comportamiento del motor mediante un programa de elemento finito es una buena herramienta de análisis.

3.3 Caso base 180°

Primeramente se comenzó con una geometría base, en la cual se hizo un análisis estático en 2D del motor. Las características del modelo son las siguientes: Materiales (permeabilidad relativa): Cobre (1), Acero al silicio (30,000), Aire (1), Acero al carbón de baja permeabilidad (100).

Se hizo una estimación para el devanado de campo (en el estator) y las zapatas polares, donde se simularon de acero al silicio de alta permeabilidad ($\mu=30,000$), el motor se conectó en serie, con los devanados en las zapatas polares con una densidad de corriente (J) de $1.2e6$ A/mm². Se simularon de tal forma que quedarán los polos de la forma que se muestra en la Fig. 3.8. El sentido de la corriente se muestra con “x” y “o” indicando que la corriente entra o sale respectivamente, y se muestran los polos generados en los electroimanes.

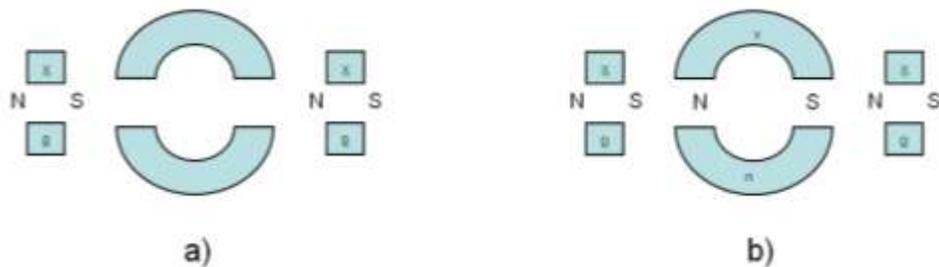


Fig. 3.8 Representación de los polos generados en un motor. a) Sin corriente en el rotor b) Con corriente en la armadura (mismo sentido que en las zapatas del estator).

El devanado de armadura (en el rotor) se simuló para un motor de rotor devanado de CD, lo cual implica que tiene una alimentación de CD, en este caso conectado en serie logrando que el flujo magnético fluya a través de él, para nuestro ejemplo se simuló con

una densidad de corriente (J) de $1.1e6 \text{ A/mm}^2$, cuya influencia podemos ver en los resultados presentados en la figura 3.11 y 3.12. En estas figuras se muestra la comparación de la densidad del flujo magnético que pasa por el motor con el rotor desenergizado para confirmar que efectivamente el flujo debido a la interacción de los electroimanes generados es mayor con el devanado del rotor energizado.

Los materiales del rotor son láminas de acero de permeabilidad media ($\mu=100$), como se mencionó anteriormente, la densidad de corriente del cobre (J) del rotor es de magnitud igual a $1e6 \text{ A/mm}^2$. Debido a la orientación de la corriente eléctrica, se logra la configuración magnética mostrada en la Fig. 3.9 para el caso donde el rotor está desenergizado.

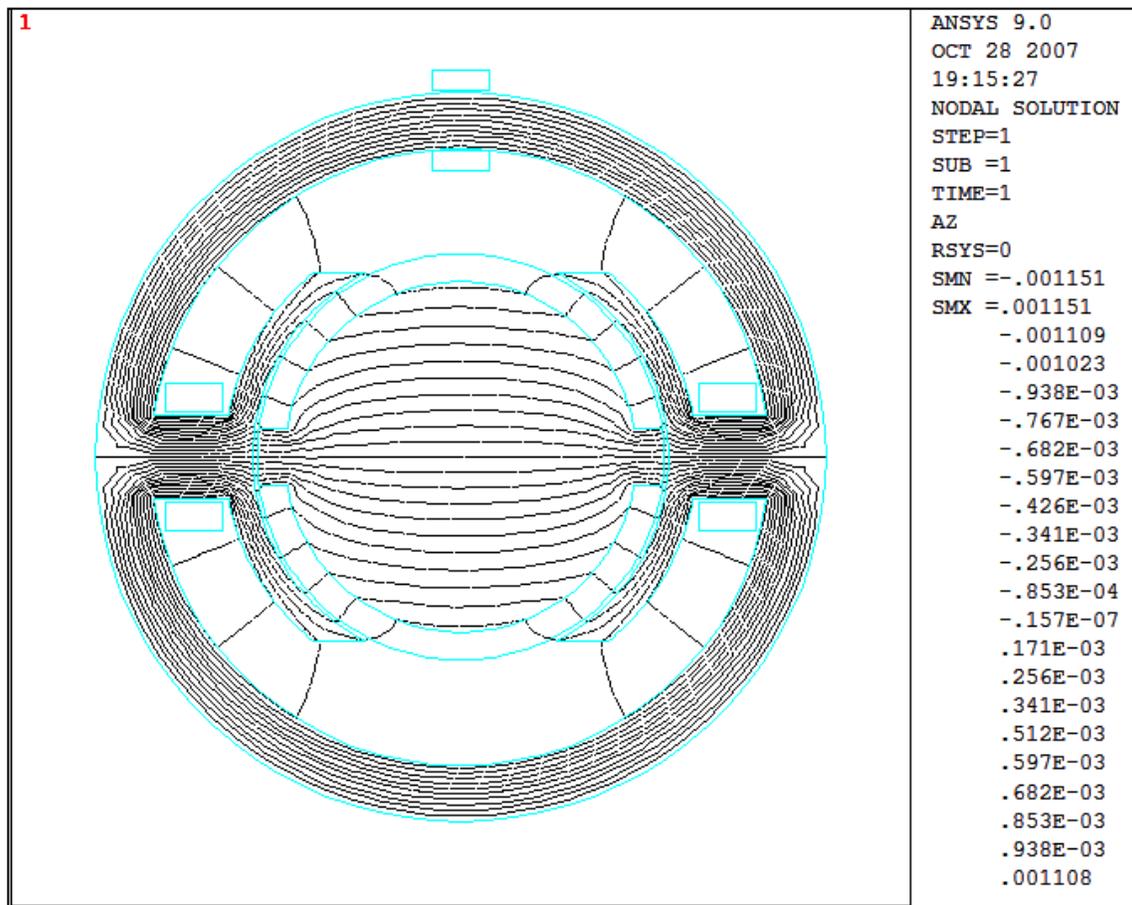


Fig. 3.9 Gráfica del campo magnético en el motor sin corriente en el rotor.

En esta figura se presenta el camino seguido por el flujo magnético. La escala presentada es usada por una herramienta matemática del programa (AZ) por lo que no se tomarán en cuenta sus valores. En la Fig. 3.10 se muestra también el comportamiento del flujo magnético para la configuración del motor cuando el rotor está energizado.

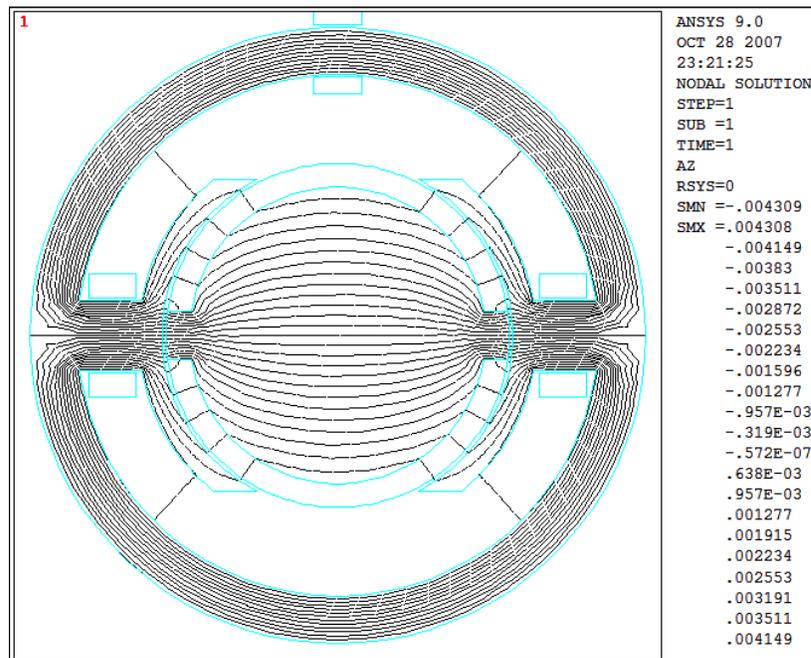


Fig. 3.10 Gráfica del campo magnético en el motor con corriente en la armadura (mismo sentido que en las zapatas del estator).

En la Fig. 3.11 y 3.12 se muestran las gráficas de los vectores de densidad de flujo magnético para las dos condiciones señaladas en los incisos “a” y “b” de la Fig. 3.8. En estas gráficas aparece una escala de los valores de densidad de campo magnético, representándose gráficamente su magnitud y sentido. La magnitud está representada por el tamaño de la flecha (vector) y el sentido por su dirección. Además, la escala de la derecha de cada figura muestra el valor de la densidad de corriente en Teslas, donde se muestra que es mayor el de la Fig. 3.12 (0.80 T) que el de la Fig. 3.11 (0.23 T) demostrándose de esta forma que los polos generados por el rotor obligan a que pasen por él una mayor cantidad de líneas de flujo magnético.

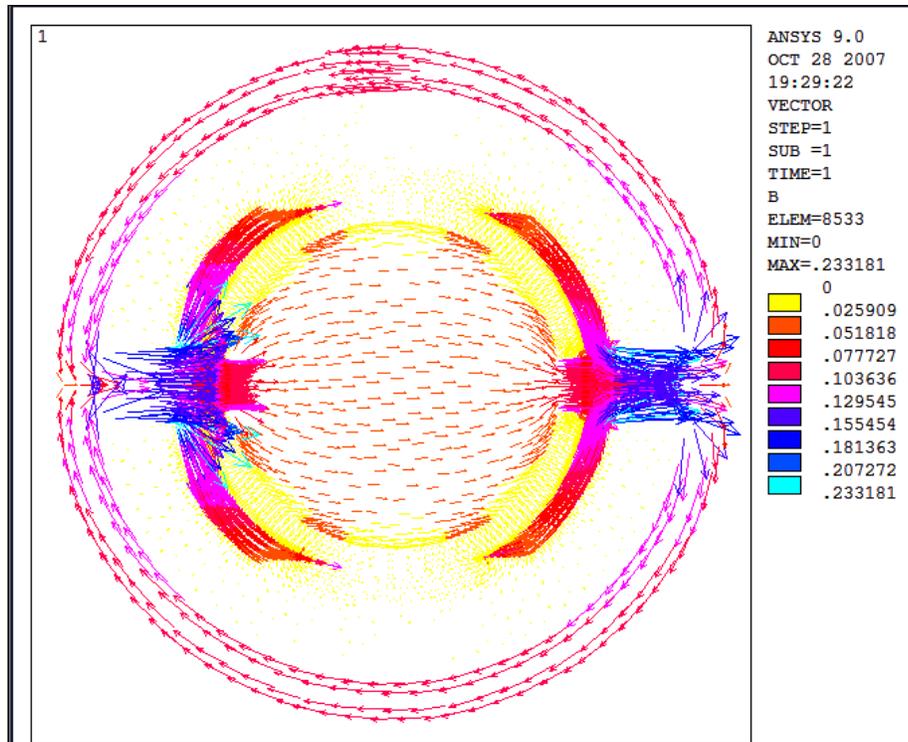


Fig. 3.11 Gráfica de los vectores de densidad de campo magnético en el motor, sin corriente en el rotor.

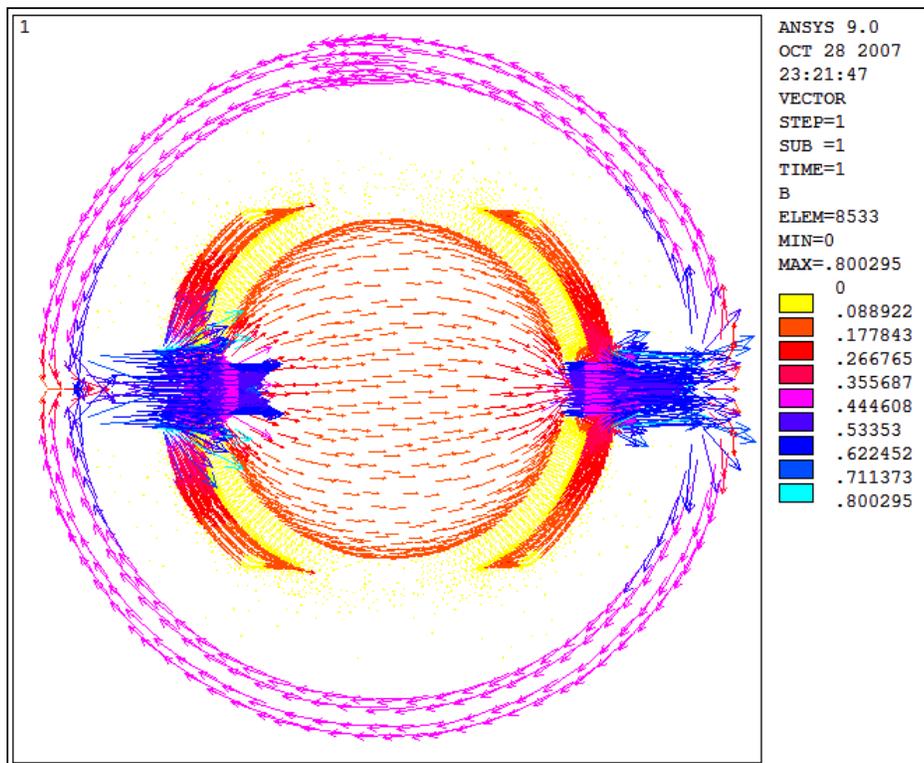


Fig. 3.12 Gráfica de los vectores de densidad de campo magnético en el motor, con corriente en la armadura (mismo sentido que en las zapatas del estator).

3.4 Caso base 90°

Se quiso mostrar el comportamiento del campo magnético cuando el rotor va dando la vuelta por efecto de la fuerza generada en el rotor con corriente bajo la influencia de un campo magnético ($F = B \times I$). Los resultados se muestran en la Fig. 3.13, donde se esperaba que las fuentes representadas por los electroimanes de las zapatas y el del rotor tuvieran un efecto diferente al de la sección 3.3. Esta imagen muestra al rotor ante una posición ficticia, ya que por la acción del colector sabemos que no se va a presentar, pero nosotros simulamos una espira en un recorrido donde el sentido de la corriente es paralelo al sentido de las líneas de flujo magnético. En esta figura se ve que el flujo no pasa por el rotor, sino que debido a la configuración de los polos, se desvía trazando otro camino.

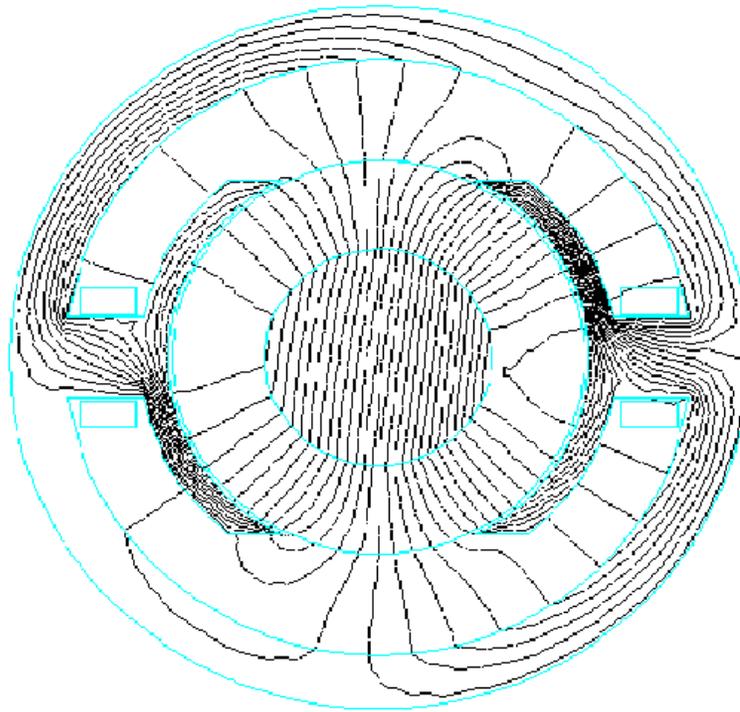


Fig. 3.13 Gráfica del comportamiento del flujo magnético con el rotor a 90°.

3.5 Simulación con imán permanente 180°

Con este análisis se pretende demostrar o no, que el tener un IP en el motor, aumenta la densidad de corriente que pasa por el rotor, lo cual implica que a la misma corriente en las zapatas polares y en el rotor, la densidad de flujo es mayor y por consiguiente la del

par de fuerza generado, derivando en una mayor potencia suministrada. Se deja para una fase 2 de este análisis la propuesta de espacio, donde con un cambio mínimo de las dimensiones del motor (debido al IP) se tiene un motor con mayor potencia.

Se hicieron dos simulaciones para mostrar el impacto de los IP a diferentes valores de magnetización. De aquí, el esquema de los polos generados por las densidades de corriente propuesto es el mostrado en la figura 3.14:

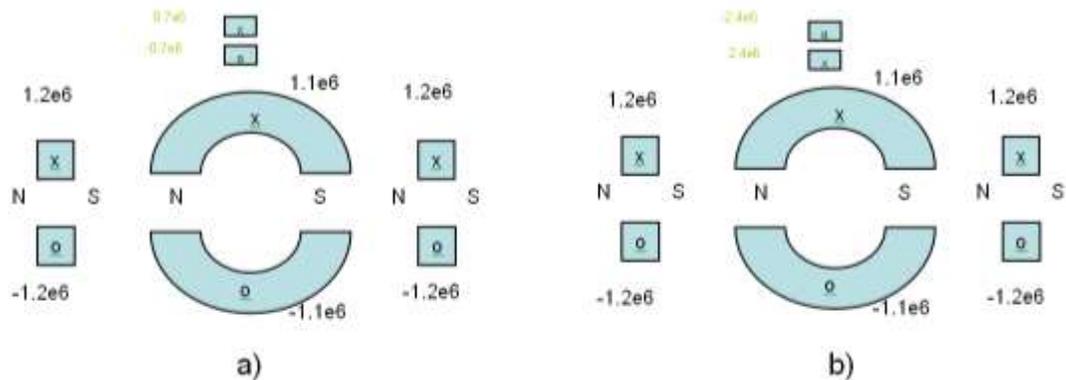


Fig. 3.14 Representación de los polos generados en un motor con la influencia de un IP
a) Con J del IP = 0.7e6 b) Con J del IP = 2.4e6.

Las líneas de flujo generadas en los modelos presentados en la Fig. 3.14, incisos “a” y “b”, se muestran en la figura 3.15 y 3.16 respectivamente.

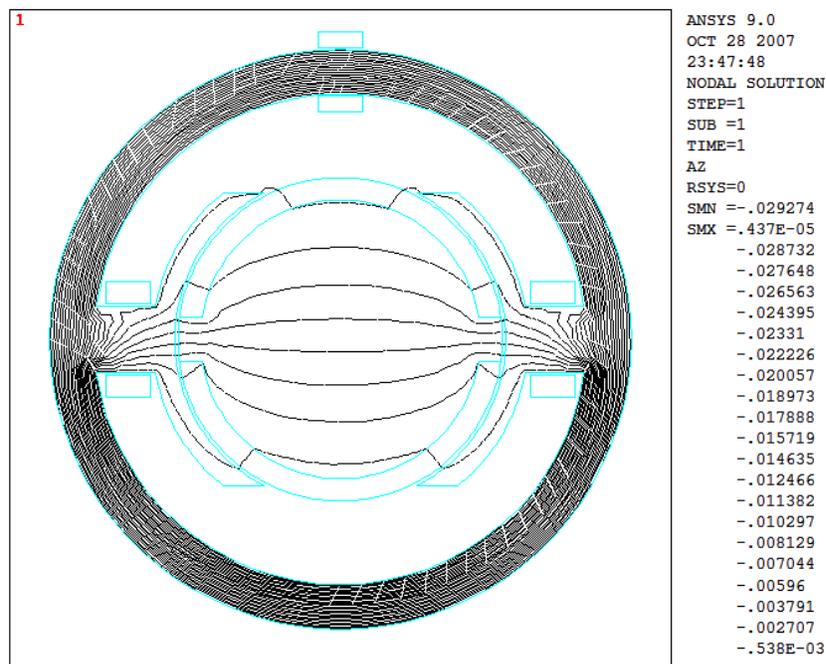


Fig. 3.15 Gráfica de las líneas de campo magnético en el motor con IP ($J = 0.7e6$ A/mm²).

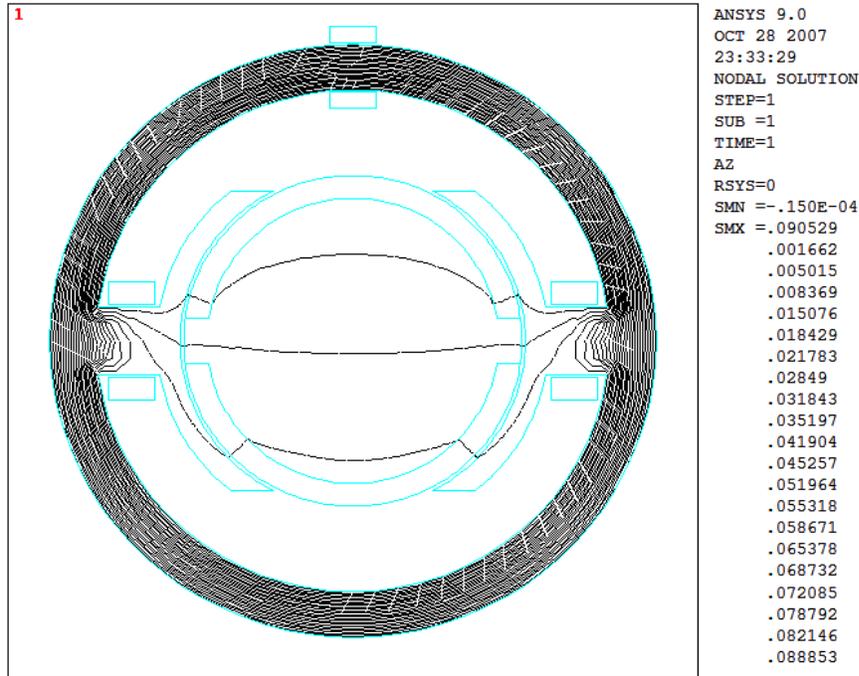


Fig. 3.16 Gráfica de las líneas de campo magnético en el motor con IP, ($J = 2.4e6$ A/mm²).

En las figuras 3.17 y 3.18 se muestran las gráficas de los vectores de campo magnético, donde aparecen los valores de densidad flujo magnético, generados por las configuraciones de los electroimanes.

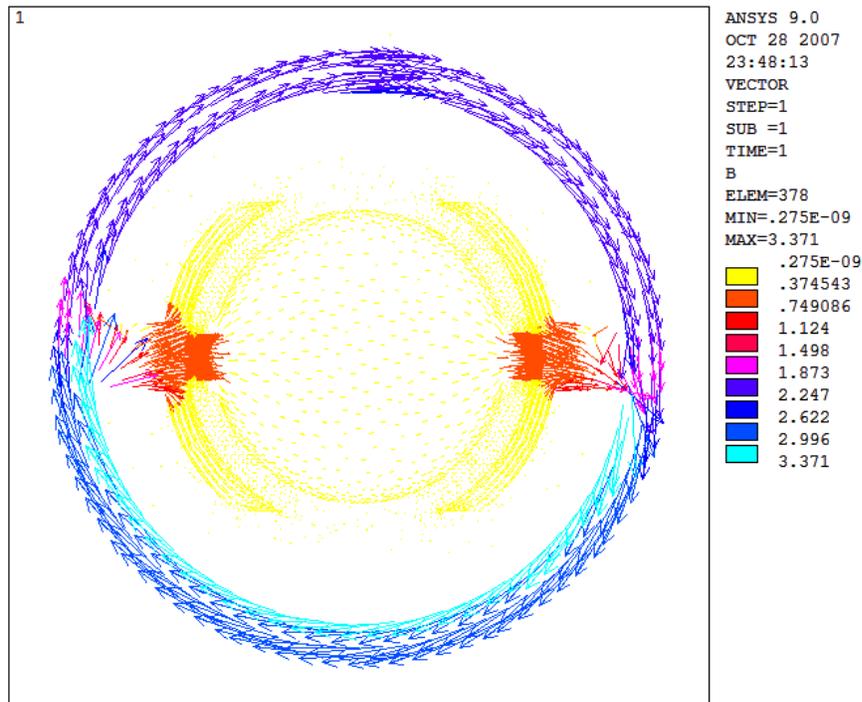


Fig. 3.17 Gráfica de los vectores de densidad de campo magnético en el motor con Imán Permanente ($J = 0.7e6$ A/mm²).

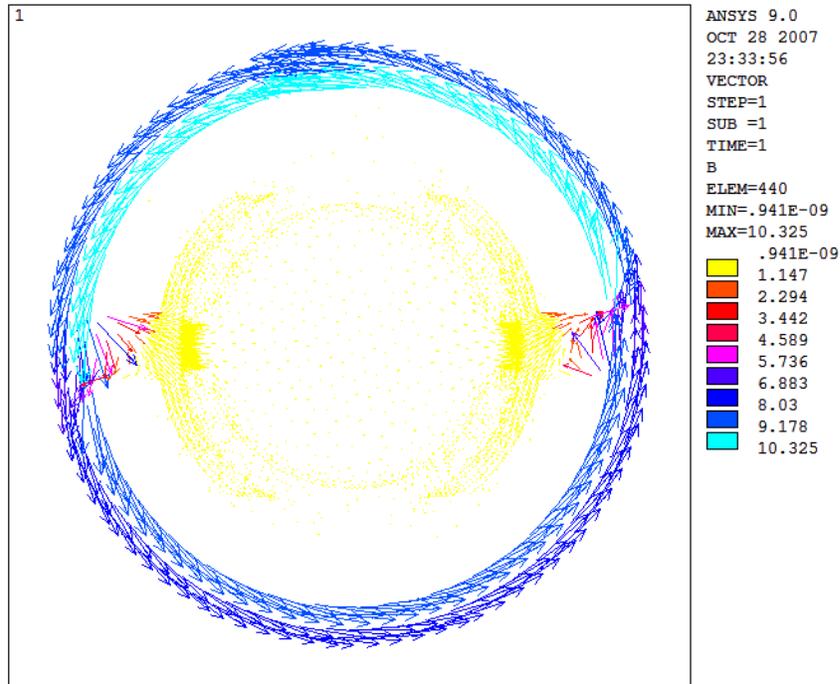


Fig. 3.18 Gráfica de los vectores de densidad de campo magnético en el motor con Imán Permanente, ($J = 2.4e6$ A/mm²).

Las Fig. 3.17 y 3.18 presentan los vectores de densidad de flujo magnético donde se simulan dos imanes permanentes de diferente aportación. En el primer caso (Fig. 3.17), el Imán Permanente aporta como fuente electromagnética $0.7e6$ A/mm², mientras que en el segundo caso (Fig. 3.18) la aportación del imán es mayor, de $2.4e6$ A/mm². Estas gráficas muestran el mismo comportamiento, con diferentes valores de densidad de flujo magnético. En estas gráficas se presenta la simulación de un imán permanente, la cual se logra por medio de un electroimán que representa el mismo comportamiento que un imán permanente.

En la Fig. 3.17 podemos observar que los vectores de densidad de flujo magnético tienen valores máximos de 3.371 Teslas, teniendo valores aproximados de 0.374 Teslas en la parte del rotor. En la Fig. 3.18 se observa que ante un comportamiento similar, los valores máximos de densidad de flujo magnético dado por los vectores de la figura son de 10.325 Teslas, teniendo vectores de densidad de flujo magnético pasando por el rotor con un valor aproximado de 1.147 Teslas para el caso estudiado. De lo anterior podemos deducir dos cosas: la primera que es posible simular imanes permanentes mediante la

estrategia del electroimán, y la segunda, que va relacionada con la primera, es que la influencia de los imanes se representó adecuadamente en las lecturas de las escalas de las gráficas de los vectores de flujo magnético. En el primer caso (Fig. 3.17) los valores de densidad de flujo magnético fueron menores que en el caso mostrado en la Fig. 3.18. Aquí se demuestra que ante un imán de mayor potencia, los vectores de densidad de flujo son mayores. Y si el imán es menos potente, la densidad de flujo magnética que pasa por el rotor es menor. Como ya se mencionó, lo anterior nos dice que podemos simular imanes permanentes de diferentes valores magnéticos.

3.6 Simulación con imán permanente con núcleo partido

Se ha planteado otro caso usando un imán permanente, pero con el núcleo seccionado o partido. Se agregó un material aislante de permeabilidad relativa ligeramente menor a la unidad pero para propósitos de simulación, es adecuado darle una permeabilidad igual a 1. Este caso se planteó para ver si seccionando el núcleo se tenía un mejor comportamiento del flujo. Ya vimos en el caso anterior que la densidad de flujo magnético aumentaba con el flujo magnético, en el caso del núcleo partido, se pretende direccionar el flujo magnético de forma que este tome el camino del rotor, mientras que donde está el núcleo partido, circule el flujo del imán permanente, reforzando las líneas de flujo que pasan por el rotor. El comportamiento de las líneas de flujo magnético se muestra en la Fig. 3.19.

Los resultados muestran en la Fig. 3.20 que a pesar de que los valores de densidad de flujo aumentan con respecto al caso base a 180 grados, son menores que los del caso donde solo se inserta el imán permanente. Además, el flujo magnético solo se distribuye en una mitad de la trayectoria del núcleo magnético, por lo cual es más fácil que se sature el material. Sin embargo, para propósitos de análisis, podemos tomar el aprendizaje que nos ha dejado este caso: el flujo magnético puede dirigirse de la forma que mencionamos.

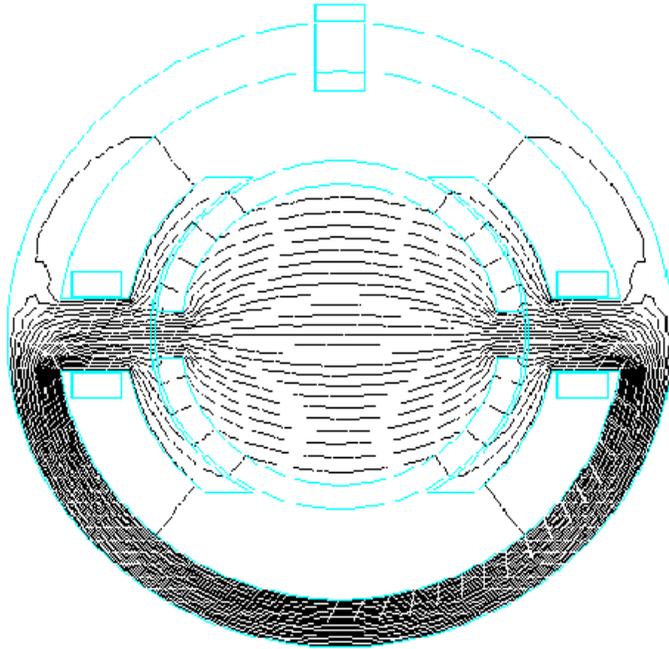


Fig. 3.19 Gráfica del camino del flujo en una configuración de núcleo partido.

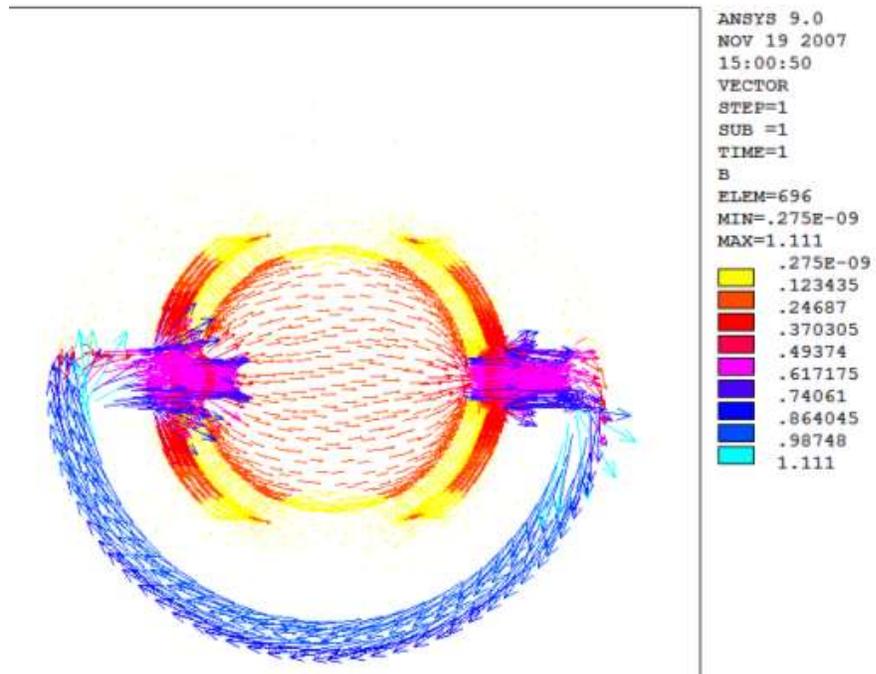


Fig. 3.20 Gráfica de las densidades de flujo magnético con una configuración de núcleo partido.

3.7 Estudio comparativo

Uno de los propósitos de este estudio es el empleo de la herramienta de elemento finito al compendio de opciones para usarla en el análisis de máquinas eléctricas. La iniciativa presentada nos da una pauta para el uso del elemento finito. Las simulaciones presentadas además tienen una propuesta: el mejoramiento de los motores eléctricos mediante la inserción adecuada de imanes permanentes en la construcción del rotor. Los imanes son vistos como reforzadores de flujo natural, propensos a saturación y a situaciones de riesgo en caso de un diseño inadecuado. Por ello, es muy importante definir la forma de simulación, la representación adecuada de las geometrías, los materiales para la construcción de un prototipo y las pruebas a realizar.

En los casos presentados, el caso del rotor a 180 grados se mostró como caso base, donde el comportamiento del flujo magnético en el motor se dio tal como esperábamos, los polos generados por las cargas del motor hicieron que el flujo pasara por el núcleo y el rotor. Se presentó el caso donde el rotor estaba energizado y otro caso donde estaba desenergizado. En el caso donde el rotor estaba energizado y había polos generados en el mismo sentido que en las zapatas polares, la densidad de flujo magnético del rotor era mayor que en el caso donde no estaba energizado, lo cual coincide con la teoría conocida.

En el caso del rotor a 90 grados, las configuraciones de los polos son diferentes, por lo que el comportamiento del flujo magnético es diferente también. Esta posición simula la posición en que el motor no produce torque por efecto de la densidad del flujo magnético y de la corriente que circula por el rotor. Este caso refuerza nuestro conocimiento obtenido del caso base a 180 grados.

En los casos posteriores se agrega una fuente magnética llamada Imán Permanente. Para lograrlo se simula utilizando una fuente electromagnética llamada electroimán, el cual desarrolla un comportamiento muy similar al del imán permanente. El efecto esperado por el electroimán fue predecible y confirma lo que esperábamos: que el imán permanente reforzara al flujo magnético que pasaba por el rotor. Se mostraron dos casos,

en el primero con un imán permanente de poca potencia, y en el segundo, uno mayor potencia. En ambos casos se mostró que los valores de densidad de flujo magnético aumentaron, y además, en el segundo caso, aumentó más que en el primero.

Finalmente se mostró el caso del imán permanente con núcleo partido. El caso del rotor de núcleo partido se hizo con la premisa de lograr una aportación debido al imán mas dirigida hacia el rotor del motor a través del núcleo y debido al efecto combinado de las fuentes magnéticas involucradas. En esta simulación se observó que el flujo solo sigue la mitad de la trayectoria del núcleo, lo cual provoca incertidumbre en su uso debido a la alta tendencia a saturarse. Si embargo los vectores de densidad de flujo magnético muestran que hubo un aumento o aportación a las líneas de flujo magnético que pasan por el rotor, que sin ser tan significativo como en el caso base a 180 grados, marca una pauta para su estudio en nuestro análisis. En este caso para una segunda fase podemos plantear el caso de modificar el material de núcleo magnético debido a que el flujo realmente no pasa por todo el núcleo, sino solo en la mitad. Como idea, para el diseño podemos utilizar un acero de mayor permeabilidad en esa mitad y en la otra mitad un acero de mucha menor permeabilidad, más barato y que sea fácil de ensamblar con el imán permanente. Esto en una fase 2 donde seleccionemos un prototipo para trabajar.

Conclusiones

4.1 Introducción

El estudio realizado utilizando el elemento finito como herramienta de simulación ha sido satisfactorio. Hemos podido simular un motor en una vista plana o transversal, mostrando la trayectoria del campo magnético a través del núcleo y las zapatas polares. Además, hemos podido simular un imán permanente y mostrar su aportación. Este caso alienta al uso de los imanes permanentes, no para hacer un motor de imanes permanentes, sino para utilizar un imán permanente como un reforzador del núcleo que pasa por el rotor de un motor de CD, en el cual, al aumentar las líneas de flujo magnético que lo atraviesan, aumenta la fuerza generada llamada torque, lo cual significa que tenemos una mayor potencia disponible.

La opción de partir el núcleo puede servir en motores donde se busque un diseño especial donde no se tengan problemas de saturación y se pueda ahorrar la mitad de material de acero al silicio de alta permeabilidad (material del núcleo) en compensación de la inserción del imán permanente, mientras que el tamaño del motor se mantiene prácticamente igual.

4.2 Conclusiones generales

Las conclusiones generales de este trabajo son:

- Es posible analizar un motor eléctrico representando sus cargas como electroimanes.
- El elemento finito es una herramienta útil para analizar el comportamiento de un motor ante diferentes variantes de diseño sin la necesidad de un prototipo físico.
- Los imanes permanentes colocados apropiadamente pueden reforzar las líneas de flujo que pasan por el rotor, lo que resulta en un aumento del torque y la potencia.

4.3 Aportaciones principales

Las aportaciones principales de este trabajo son:

- La metodología empleada para el análisis de un motor eléctrico de CD.
- El uso de la herramienta de elemento finito en la simulación de motores eléctricos.
- La demostración de que los imanes permanentes pueden reforzar el flujo magnético de un motor, con la colocación y orientación adecuadas.

4.4 Recomendaciones para trabajos futuros

Para trabajos futuros, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Realizar un refinamiento en las propiedades de los materiales, para conseguir resultados aún más precisos, a la vez que se puede plantear una geometría más detallada del rotor.

- Plantear más casos donde se confirme que los imanes permanentes son una opción viable en para el objetivo perseguido, estando latente la formulación de una patente.
- Afinar el modelo, considerando la dispersión del flujo y otros efectos que pueden llegar a ser representativos según el caso planteado, como son las pérdidas, etc.
- Hacer una análisis económico competo, donde se tomen en cuenta los materiales utilizados, las pérdidas obtenidas y la factibilidad del cambio que conlleva cada propuesta.
- Utilizar la herramienta de elemento finito para el análisis de otras máquinas eléctricas como transformadores, generadores, etc.

REFERENCIAS

- [1] T. Miller, M. Popescu, C. Cossar, M.I. Mcgilp, M. Olaru, A.J. Davies, J.P. Sturgess, A.M. Sitzia, “Embedded Finite-element Solver for Computation of Permanent-Magnet Brushless Motors”, *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*, vol. 3, pp. 1478 – 1485, Tampa, FL, 2006
- [2] S.H. Wong, S.H. Cendes, Z.J., “Combined finite element-modal solution of three-dimensional eddy current problems”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, pp. 2685 – 2687, Vancouver, BC, 1988
- [3] J. Brauer, H. Sadeghi, R. Oesterlei, “Polyphase induction motor performance computed directly by finite elements”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, pp. 583 – 588, 1999
- [4] Y.G. Soloveychik, M.G. Persova, R.V. Petrov, M.E. Royak, “Finite element modelling of electrodynamic processes in electric motors”, *Symposium on Science and Technology”, KORUS 2004. Proceedings. The 8th Russian-Korean International*, vol. 1, pp. 304 – 308, 2004
- [5] T.J. Maloney, *Electrónica industrial moderna*, 3ra Ed., Prentice Hall, 1997.
- [6] I.L. Kosow, *Máquinas Eléctricas y Transformadores*, 2da Ed., Prentice-Hall, 1991.
- [7] S.J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, 3ra Ed., Mc Graw Hill, 2000.
- [8] N. De Vries, *An Introduction to Finite Element Analysis*, Ed. Academic Press. 1978
- [9] *ANSYS Tutorials, ANSYS Release 9.0 Documentation*