

ANALISIS DEL CAMPO MAGNETICO EN UN MOTOR MONOFASICO CON ESPIRA DE SOMBRA

Agüero, A.C.

Centro de Investigación de Materiales y Metrología del Sistema INTI
CC. 884 - (5000) Córdoba - Argentina

Tel.: (+54) (051) 60-1334; Fax: (+54) (051) 69-9459

RESUMEN

Se estudia el comportamiento de un motor monofásico con espira de sombra de uso en la industria de electrodomésticos, para determinar las variables de diseño tales como las corrientes inducidas en el rotor en cortocircuito y en las espiras de sombra, empleando el método de análisis de circuitos magnéticos por medio de elementos finitos en dos dimensiones.

Primero se realiza un estudio de variación en el tiempo y luego un magnetoestático para un modelado completo de la máquina.

Se analiza la distribución del flujo magnético, la variación de la intensidad de campo H y la densidad de flujo B , para la región entre las expansiones polares y en el estator que forma parte del circuito magnético. También se efectúa un cálculo de fuerza y torque para evaluar la performance del motor.

Por último, se compara la simulación realizada con los resultados experimentales, obtenidos en un moderno banco de prueba para motores eléctricos computarizado, con una buena correspondencia en los resultados.

ABSTRACT

The paper describes the behaviour of a single-phase induction motor with shading coil to be used in the industry of washing machines, in order to determine design parameters such as induced current in the rotor in shortcircuit and in the shading coil, employing the method of analysis of magnetic circuits by means of finite element in two dimension.

A time variation is first carried out and then a magnetostatic study for a complete modeling of the machine.

You analyze the distribution of the magnetic flux, the variation of the intensity of field H and the density of flux B , for the region between the polar expansions and in the estator that forms part of the magnetic circuit. You also calculate strength and torque in order to evaluate the performance of the motor. The simulation outputs are compared with experimental results obtained, using a modern computerized workbench for electric motors, with a good correspondence.

INTRODUCCIÓN

Los métodos numéricos que emplean elementos finitos, han emergido como una técnica conveniente para el diseño eléctrico, evaluación de performance y optimización de máquinas eléctricas rotativas, transformadores, motores con imanes permanentes y una serie de nuevos dispositivos electromagnéticos [1]-[2].

El sistema (polo saliente-rotor) será modelado por elementos finitos de tipo cuadrangular con 8 ecuaciones por elemento, en dos dimensiones y de acuerdo a los datos de ingreso se resuelven las ecuaciones de Maxwell en forma matricial (Anexo I).

Es interesante hacer notar que los dispositivos o máquinas electromagnéticas son analizadas inicialmente bajo la suposición de que los campos magnéticos son esencialmente estáticos y que no se inducirán corrientes en ningún lugar. Pero algunas máquinas tales como los motores requieren un análisis refinado y es necesario determinar el efecto de las corrientes inducidas que realmente se originan. Por esto se debe hacer un estudio de variación en el tiempo que generará una serie de soluciones tales como las corrientes inducidas en cada ranura del rotor y en las espiras de sombra, las pérdidas que éstas introducen y las fuerzas que se originan para producir la cupla del motor.

Con los valores de corrientes inducidas calculados se ingresa a una nueva fase de análisis de tipo magnetoestática donde se simula la condición real de funcionamiento para "ver", como en una fotografía instantánea, la distribución del campo magnético con las zonas de saturación y sus correspondientes valores.

ESQUEMA DEL PROCESO DE MODELACIÓN

En la figura 1 se muestra el proceso de cálculo empleado.

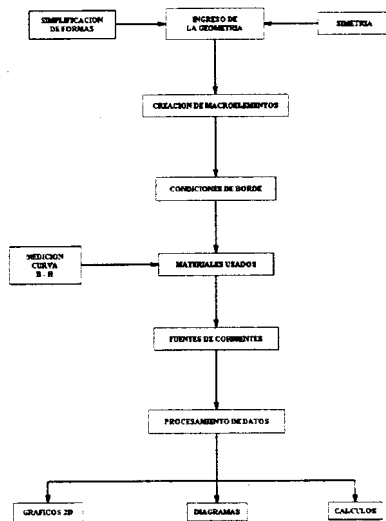


Figura 1: Diagrama de flujo del proceso de modelación

Ingreso de la geometría. Disponiendo de los planos del motor se realizó una primera aproximación de la geometría considerando a las ranuras del rotor según la figura 2 y a la sección de la espira de sombra cuadrada. El análisis se limitó a la mitad del motor, incluyendo uno de los polos salientes que contiene a las espiras en corto circuito, el polo delgado y 10 ranuras del rotor, figura 3.

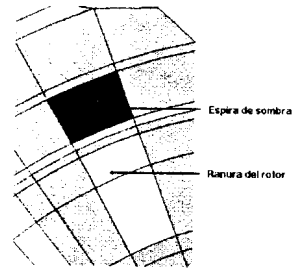


Figura 2: Forma de la espira de sombra y ranura del rotor

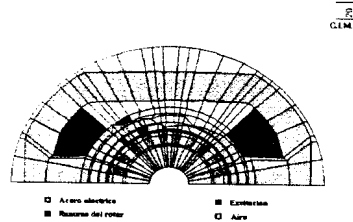


Figura 3: Geometría y materiales del motor monofásico con espira de sombra

Creación de los macroelementos. El programa realiza el mallado para la formación de los macroelementos.

Condiciones de borde. Se establecen en base al análisis preliminar del recorrido probable de las líneas de fuerza para determinar si éstas interceptan o no a los límites de la porción modelada. En este caso se consideró que las bobinas del estator crearían un campo que se confina en el interior del circuito magnético estator-rotor.

Materiales. Se asigna a cada macroelemento el material que le corresponde. La laminación empleada es un acero 1008, cuyas propiedades magnéticas se midieron en un cuadro de Epstein, bajo los procedimientos prescritos por las norma IEC 4 04-2, figura 4. En la Tabla I se resumen las propiedades magnéticas.

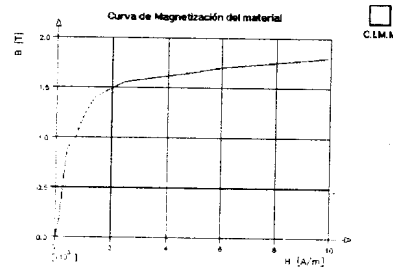


Figura 4: Curva de magnetización del material

Fuentes. Se introdujo la densidad de corriente de las bobinas de excitación con su módulo y sentido. Se tiene en cuenta el número de espiras y el espacio ocupado por el bobinado

Procesamiento de los datos. Se resuelve la situación bajo análisis mediante 5 subrutinas integrantes del programa en un tiempo total de 27 segundos (Tabla II).

Inducción [kG]	Pérdidas [w/kg]
10 kG	7,74
15 kG	16,31
17 kG	20,12

CampoH[A/cm]	Inducción [kG]
H 25 A/cm	15,6
H 50 A/cm	16,6

Tabla I: Propiedades magnéticas de la laminación

Nº de Programa	Nombre	Tiempo[seg]
1	MEIN01	15,33
2	MEIN02	0,989
3	MEIN03	0,934
4	MEIN04	0,440
5	MSOL03	9,560
	Total	27,253

Tabla II: Tiempos empleados por cada subrutina

Los resultados se obtienen en 3 formas alternativas:

*Gráfico 2D: es un gráfico del motor con una escala de valores en el margen derecho.

*Diagrama: gráfica una magnitud en función de la distancia.

*Cálculo: evalúa diferentes magnitudes tales como fuerzas, pérdidas, densidades de corrientes inducidas, etc.

Análisis: El proceso iterativo seguido se esquematiza en la figura 5.

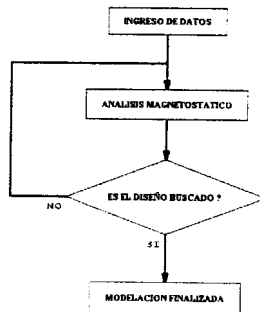


Figura 5: Esquema del proceso de cálculo

El cálculo de la distribución de la densidad de flujo en un motor puede hacerse en diferentes puntos de operación de la máquina. Se denomina análisis magnetoestático a la modelación en el estado sin carga

del motor y análisis por corrientes de Eddy a la evaluación del estado con rotor bloqueado para el cálculo de las corrientes inducidas [3].

ANÁLISIS DEL MOTOR

Se trabajó con un programa desarrollado por el Instituto de Teoría Básica de Campos Electromagnéticos, de la Universidad Técnica de Graz, Austria. llamado MicroFEM 2D, versión 1.1. Emplea elementos del tipo cuadrangular y para resolver este problema se usaron 406 elementos.

Se determinan las corrientes inducidas en cada ranura del rotor y en las espiras de sombra, respetando las dimensiones originales del motor, con una separación entre polos salientes de 3,2 mm. Si la excitación tiene una variación sinusoidal tal que:

$$I(t) = I \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

tomamos intervalos de $\omega t = 30^\circ$ y en la figura 6 se muestra la variación y distribución de las densidades de corriente. Todos los máximos se producen siempre en las 2 ranuras, cerca de la separación de los polos. La variación de las densidades de corriente en el rotor son también sinusoidales.

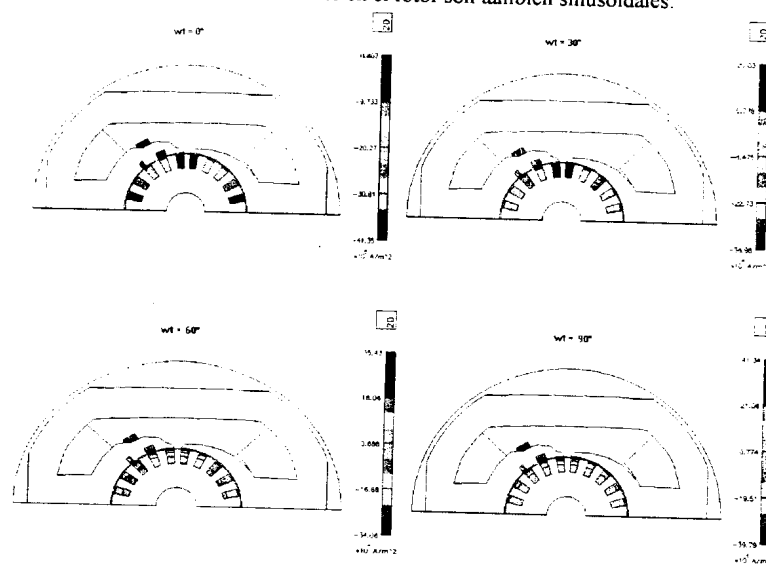


Figura 6: Análisis de variación en el tiempo-Distribución de las densidades de corriente

Cuando las bobinas excitadores establecen un flujo senoidal en los polos, inicialmente las líneas de fuerza se concentran en las espiras en corto circuito. Si el flujo está cerca del valor pico las líneas se reparten a ambos lados de los polos salientes, figura 7, [4].

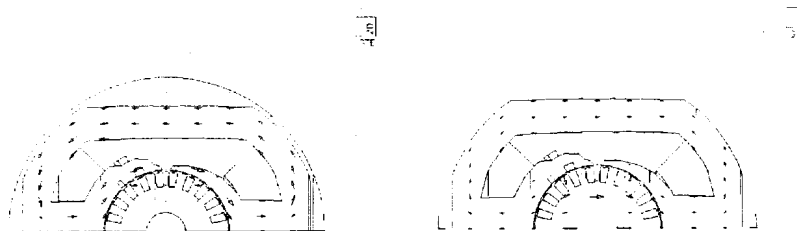


Figura 7: Recorrido de las líneas de flujo

Tanto los conductores del rotor como las espiras en corto están constituidas por materiales de determinada conductividad eléctrica, como son aluminio y cobre respectivamente, y en consecuencia deben considerarse las pérdidas originadas por las corrientes inducidas. Los valores de conductividad empleados son:

$$\sigma_{Cu} = 0.57 \times 10^8 \frac{S}{m} \quad ; \quad \sigma_{Al} = 0.354 \times 10^8 \frac{S}{m}$$

La variación de pérdidas y su gráfico indicativo se observa en la figura 8.

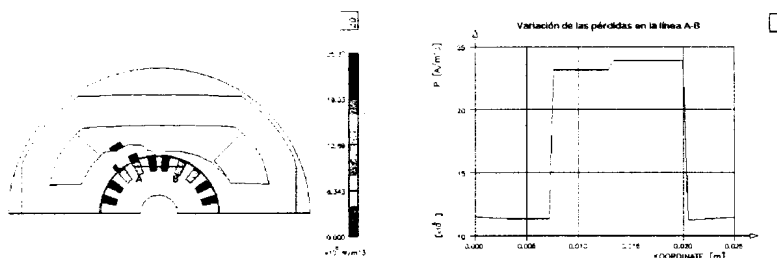


Figura 8: Variación de las pérdidas

En la figura 9 se muestra la densidad de corriente y en la figura 10 se presenta una distribución de las corrientes inducidas en cada ranura del rotor.

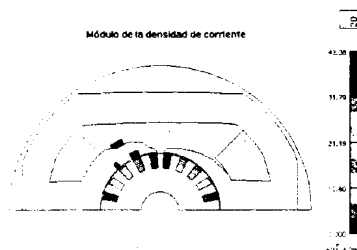


Figura 9: Módulo de las densidades de corrientes en la ranuras del rotor

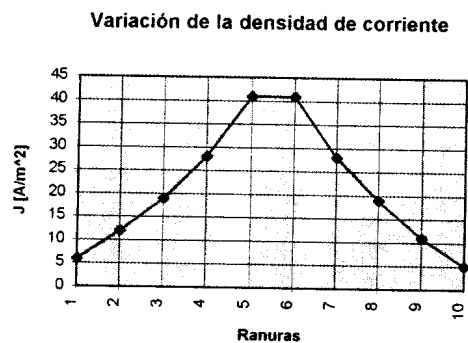


Figura 10: Distribución de las corrientes inducidas en cada ranura del rotor

Los valores suministrados por el análisis por Eddy se vuelcan en el análisis magnetoestático y se obtiene así la distribución real del campo magnético en el motor. La línea A-B toma la variación del campo en la zona de sección constante del estator, entre dos ranuras del rotor y a través del mismo, figura 11, [5].

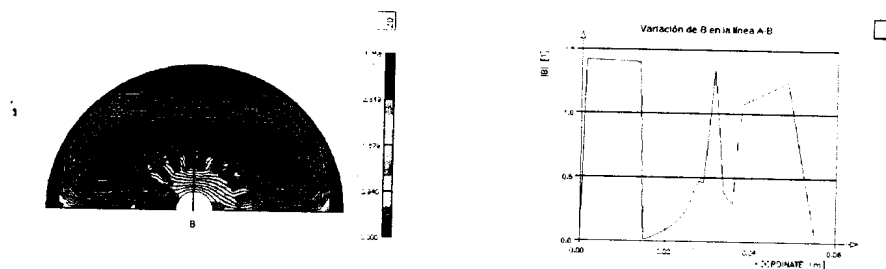


Figura 11: Análisis magnetoestático-Distribución de la densidad de flujo B

Para analizar una zona de interés en este trabajo, realizaremos un zoom, figura 12, donde se traza la línea C-D que muestra la variación del campo B y la intensidad de campo H, figura 13.



Figura 12: Distribución de B entre los polos salientes

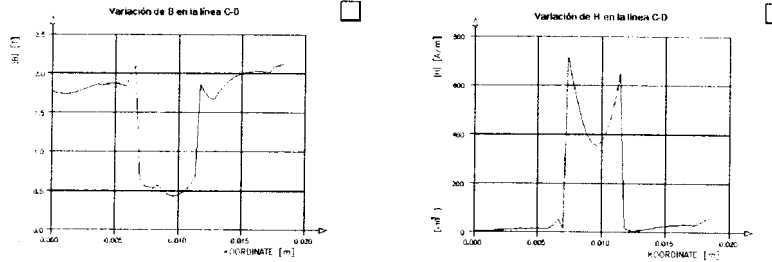


Figura 13: Variación de B y H entre los polos salientes

EXPERIENCIAS

Se empleo un moderno banco de prueba para motores eléctricos computarizado marca ATC 32000 PC/System (E.D.C. - Italy) cuyas características eléctricas y dinámicas más comunes son:

rpm	Torque (kgcm)	Potencia Mecánica (w)
Potencia Eléctrica (w)	Eficiencia (%)	Tensión (V)
Consumo (A)	Cos ϕ	Temperatura (°C)

Cualquiera de ellas se puede graficar en función de otra variable. La clase de motor a ensayar son los monofásicos de cualquier tipo y universal. Dispone de un sistema de frenado por corrientes parásitas hasta 30 kgcm.

A continuación se graficará el torque en función de la velocidad y la eficiencia en función también de la velocidad, para el motor, en las figuras 14 y 15.

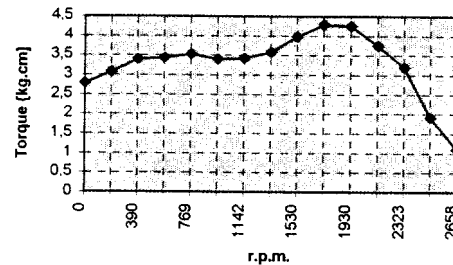


Figura 14: Variación del torque vs. r.p.m

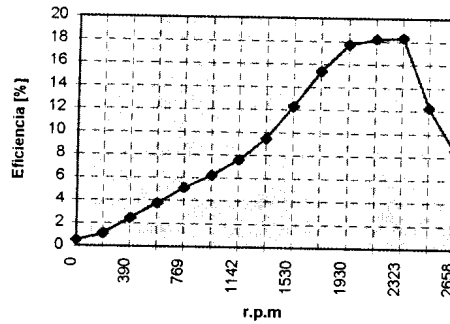


Figura 15: Variación de la eficiencia vs. r.p.m.

DISCUSIÓN

- La inducción B en el circuito magnético del estator presenta valores razonables, operando en la zona próxima a la saturación
- Las discontinuidades por perforaciones de la laminación coinciden plenamente con zonas de baja densidad de flujo
- Se determinó en el post-procesamiento, el valor de la fuerza por unidad de longitud de la componente tangencial de cada una de las ranuras del rotor y luego, multiplicando por el radio del mismo, se calculó el torque, en la condición de régimen, Tabla III.

Torque por banco de prueba	1,1 kgcm
Torque por elementos finitos	1.122 kgcm
Error estimado	2 %

Tabla III: Cálculo de torque

CONCLUSIONES

Se verifican los resultados obtenidos por el método de elementos finitos con los experimentales y se justifica el empleo de esta moderna técnica de diseño para el análisis de máquinas eléctricas.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Jose M. Alladio e Hijos S.A. por el apoyo brindado al uso de esta herramienta de diseño y al Ing. Fernando Actis del CIMM, por la revisión y sugerencias al trabajo presentado.

REFERENCIAS

- [1] Chari, M. V. K.; Bedrosian, G.; D' Angelo, J.; Konrad, A.: "Finite Element Applications in Electrical Engineering". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, N° 2, March 1993, pp. 1306-1312.

- [2] Belmans, R.; Verdyck, D.; Geysen, W.; Findlay, R.; Lie, S.; "Magnetic Field Analysis in squirrel cage induction motors". IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, N° 2, March 1992, pp. 1367-1370.
- [3] Manual für den 2D Pre-Prozessor PREP2D. IGTE Graz (1993), Austria.
- [4] C. B. Gray, C.B.: "Electrical Machines and Drive Systems": 1989: pp. 424.
- [5] Agüero, A.C.; Roberi, J.; Ranciglio, R.; Knudsen, F. "Análisis de la Influencia del corte de una porción en los polos salientes de un motor monofásico con espira de sombra". I Taller Argentino de Materiales Magnéticos y sus Aplicaciones, Córdoba, 17 al 20 de Mayo de 1995 (Anales a ser publicados).

ANEXO I.

Las cuatro ecuaciones de Maxwell son:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \dot{\bar{D}}$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\dot{\bar{B}}$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho$$

Y las ecuaciones del material:

$$\bar{J} = \sigma \bar{E}$$

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E}$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H}$$

donde: σ , ϵ , μ pueden ser complejas y anisotrópicas y en el caso de μ es no lineal.

Si introducimos el vector potencial magnético A en las ecuaciones anteriores nos queda:

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A}$$

$$\bar{E} = -\nabla \phi - \dot{\bar{A}}$$

Para simplificar la formulación de elementos finitos, el potencial escalar eléctrico ϕ es reemplazado por el potencial escalar integrado γ .

$$\bar{E} = -\nabla \gamma - \dot{\bar{A}}$$

Las cantidades desconocidas son ahora los tres componentes del vector potencial magnético y del potencial escalar.