

Programa de Análisis Térmico de Máquinas Eléctricas Rotativas

Ramón Bargalló Perpiñà, Juan Morón Romera, Jaume Rahuet Jané
Departamento de Ingeniería Eléctrica
EUETIB, Universidad Politécnica de Catalunya
C/Urgell, 187, 08036 Barcelona (España)
Telef:+34 934137323, fax:+34 934137401,
e-mail: ramon.bargallo@upc.edu, juan.moron@upc.edu, j.rauet@es.gedia.com

Resumen. En el diseño de máquinas eléctricas tan importante es un buen diseño térmico como electromagnético y mecánico. A menudo, debido a su naturaleza tridimensional, este se considera de más difícil predicción que su comportamiento electromagnético. Por este motivo el análisis térmico suele ser minimizado en los cursos de diseño de máquinas.

Esta publicación presenta una aplicación informática que, usando circuitos térmicos equivalentes, permite analizar con cierto detalle la distribución de temperaturas en diversas clases de máquinas rotativas. El objetivo que se persigue es formar a nuestros estudiantes usando modelos sencillos, pero a la vez con un cierto grado de elaboración, que les permitirán avanzar en el conocimiento del comportamiento térmico.

Palabras llave

Análisis térmico de máquinas eléctricas, circuitos térmicos equivalentes, Motor de inducción, Motor síncrono de imanes permanentes, Motor de reluctancia conmutada.

1. Introducción

El diseño térmico en las máquinas eléctricas ha venido recibiendo un interés creciente en los últimos años debido a las posibilidades de optimización que permite un correcto ajuste de la temperatura en los diversos puntos de la máquina. A menudo el modelado térmico supone un problema de resolución compleja debido a la diversidad de formas en que se intercambia energía térmica.

Un cálculo apropiado del comportamiento térmico resulta muy conveniente tanto para diseñar el sistema de refrigeración como para el análisis de eficiencia y comportamiento de la máquina. Asimismo en los programas de diseño de máquinas de nuestras universidades, los aspectos térmicos suelen aparecer (cuando aparecen) en la parte final del curso y con poco detalle.

Para paliar este déficit los autores han desarrollado una aplicación informática que permite el análisis térmico de diversos tipos de motores eléctricos usando un modelado mediante circuitos térmicos equivalentes. Esta aplicación

no tiene como cometido el competir con las excelentes aplicaciones comerciales existentes (por ejemplo MOTOR-CAD) sino que persigue la determinación de una forma sencilla la distribución de temperaturas en puntos selectos de una máquina con el fin de formar a nuestros estudiantes en un aspecto del diseño normalmente mal resuelto.

Tras determinar de forma general las expresiones para las resistencias térmicas y los parámetros de convección necesarios para el cálculo se detallan los diversos circuitos térmicos equivalentes para cuatro clases de máquinas eléctricas:

- 1) Máquinas de inducción.
- 2) Motores síncronos de imanes permanentes exteriores
- 3) Motores síncronos de imanes permanentes interiores
- 4) Máquinas síncronas de reluctancia conmutada.

Finalmente se presenta la aplicación informática y un ejemplo de aplicación.

2. Esquemas Térmicos equivalentes y su resolución.

El proceso de transmisión de calor se produce generalmente mediante los procesos de conducción, convección y radiación (normalmente en máquinas eléctricas, y debido al rango de temperaturas en consideración, se suele despreciar este último) Para cada forma de transmisión se pueden determinar las resistencias térmicas correspondientes que, en el caso general, tomaran una expresión como la que sigue:

$$\begin{aligned} \text{conducción} \quad R_{th} &= \frac{L}{\lambda \cdot S} \\ \text{convección} \quad R_{th} &= \frac{1}{\lambda \cdot S} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde R_{th} es la resistencia térmica, L la longitud o espesor del medio considerado, S la sección del mismo y λ es la conductividad térmica o el coeficiente de convección según el modo de transmisión considerado.

A. Conducción

Las expresiones de conducción de un sistema cilíndrico, básico para cualquier máquina eléctrica [1] que supone las siguientes condiciones:

- El flujo de calor en dirección radial y axial se consideran independientes.
- La temperatura media es la misma en ambas direcciones.
- No existe flujo de calor en dirección tangencial.
- La generación de calor es uniforme.

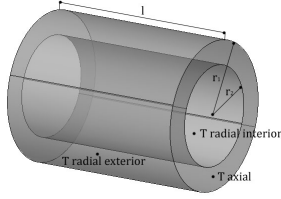


Fig.1.Elemento básico cilíndrico

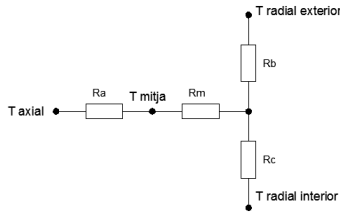


Fig.2.Circuito térmico para un cilindro

Con:

T radial exterior: temperatura en la superficie exterior del cilindro.

T radial interior: temperatura en la superficie interior del cilindro.

T axial: Temperatura en las superficies laterales del cilindro.

Tmitja: temperatura media del cilindro.

Las resistencias térmicas del circuito 2, pueden calcularse usando las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned}
 R_a &= \frac{l}{6 \cdot \pi \cdot \lambda_a \cdot (r_1^2 - r_2^2)} \\
 R_b &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_r \cdot l \cdot S} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot r_2^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)} \right] \\
 R_c &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_r \cdot l \cdot S} \cdot \left[\frac{2 \cdot r_1^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)} - 1 \right] \\
 R_m &= \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot (r_1^2 - r_2^2) \cdot \lambda_r \cdot l \cdot S} \cdot \left[r_1^2 + r_2^2 - \frac{4 \cdot r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)} \right]
 \end{aligned} \quad (2)$$

Dónde:

Ra, Rb, Rc, Rm: resistencias térmicas equivalentes según el esquema de la figura 2.

λ_a, λ_r : conductividades térmicas en dirección axial y radial respectivamente.

l: longitud del cilindro.

r_1, r_2 : radios exterior e interior del cilindro respectivamente.

S: superficie de paso del flujo de calor.

B. Convección

Los términos de convección resultan de más difícil determinación ya que el coeficiente de convección depende tanto de la geometría como de la velocidad del fluido y de su temperatura. Normalmente se suelen usar expresiones empíricas para la determinación de los mismos. En el modelo desarrollado aquí se consideran tres zonas donde se producen fenómenos de convección:

- 1) Carcasa – exterior
- 2) Rotor – estator a través del entrehierro
- 3) Aire interior y cabezas de bobina, rotor, estator y eje de la máquina.

Para el primer coeficiente se considera la siguiente expresión:

$$\lambda_{c1} = \frac{\lambda_{aire}}{D_{frame}} \cdot \left[1.36 \cdot \frac{0.518 \cdot Ra^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{1/6} \right)^{2/7}} \right] \quad (3)$$

Dónde:

λ_{aire} : conductividad térmica del fluido (aire)

D_{frame} : Diámetro exterior de la carcasa.

Ra: número de Raleigh.

Pr: número de Prandtl.

Para el segundo coeficiente, se considera que todo el calor evacuado del rotor se transmite al estator a través del entrehierro y que estos elementos son dos cilindros concéntricos que giran entre sí:

$$\lambda_{c2} = \frac{Nu \cdot \lambda_{aire}}{\delta} \quad (4)$$

Dónde:

λ_{aire} : conductividad térmica del fluido (aire)

Nu: número de Nusselt

δ : Entrehierro.

El tercer coeficiente de convección resulta sumamente complejo de determinar y normalmente se usan expresiones experimentales; en las referencias [1] a [5] podemos encontrar diversas aproximaciones de las cuales presentamos dos aquí:

$$\lambda_{c3} = 15.5 \cdot (0.29 \cdot r_g \cdot \Omega_r \cdot \eta_f + 1) \quad (5)$$

Dónde:

r_8 : radio del rotor

Ω_r : velocidad de rotación del rotor

η_r : eficiencia de los alabes del rotor.

Esta ecuación es válida en todas las superficies en contacto con el aire de la zona de cabezas de bobina. En la referencia [2] se realiza un ajuste diferenciado en función de la zona considerada:

$$\lambda_{e3} = \begin{cases} 15 + 6.75^{0.65} \cdot v_r^{0.65} & \text{aire entre cabezas y carcasa} \\ 16.5^{0.65} \cdot v_r^{0.65} & \text{aire entre cabezas y rotor} \\ 6.5 + 5.25^{0.6} \cdot v_r^{0.6} & \text{aire entre cabezas y cabezas} \end{cases} \quad (6)$$

Donde v_r es la velocidad del aire en la zona de las cabezas de bobina.

La determinación de los números de Raleigh, Prandtl y Nusselt se realiza de la forma habitual, tal como la expuesta por ejemplo en la referencia [6] o tal como se resume en la referencia [7].

C. Contacto

La transferencia de calor por contacto es una mezcla de conducción, convección y radiación y se produce por las bolsas de aire que van quedando en las zonas de contacto de diversas partes (cojinetes-eje, estator-carcasa, rotor-eje, etc.) La resistencia térmica equivalente se determina mediante:

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda_{cont} \cdot S} \quad (7)$$

Donde λ_{cont} es el coeficiente de contacto que toma valores medios según la tabla 1.

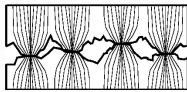


Fig.3. Representación de la transferencia de calor entre dos superficies en contacto a nivel macroscópico.

TABLA I. – Coeficientes de contacto

	Coefficiente de contacto (W/m ² K)
Carcasa de aluminio – estator	650 – 870
Carcasa de acero – estator	300-550
Eje – Rotor	430-2600

D. Resolución del sistema de ecuaciones resultante

Una vez determinadas las expresiones de todas las resistencias térmicas y el valor de las pérdidas en las diferentes partes de la máquina puede plantearse y

resolverse el sistema de ecuaciones resultante. Normalmente se considera como referencia el nodo correspondiente a la temperatura ambiente con lo que los resultados obtenidos indican directamente el calentamiento sobre esta:

$$\theta = G^{-1} \cdot P \quad (8)$$

Dónde:

θ : Calentamiento en cada punto considerado.

G : matriz de conductancias térmicas

P : vector de pérdidas en la máquina.

Las pérdidas se introducen mediante fuentes de corriente equivalentes aplicadas al nodo correspondiente. Dado que algunas de las expresiones de la resistencia térmica son función de la temperatura, el sistema de ecuaciones deberá resolverse de forma iterativa.

3. Esquemas Térmicos equivalentes para cada tipo de máquina.

En función de la geometría de cada máquina considerada se han elaborado los diversos circuitos equivalentes. En la referencia [7] se encuentran todos los detalles para el cálculo de las resistencias térmicas correspondientes a cada esquema.

A. Motor de inducción.

Siguiendo el modelo expuesto en [1] y [2] se ha desarrollado un circuito con los siguientes nodos principales: carcasa (N1), Corona del estator (N2), Dientes del estator (N3), Bobinado estatórico (N4), Entrehierro (N5), Cabezas de bobina (N6), Aire de la zona de cabezas (N7), Bobinado del rotor (N8), Hierro del rotor (N9), Eje (N10) El esquema completo se muestra en la figura 6.

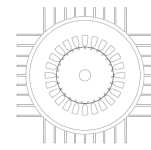


Fig.4. Motor asíncrono trifásico.

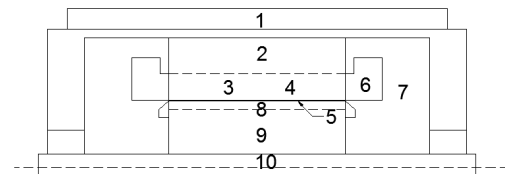


Fig.5. Nodos del esquema equivalente.

Las pérdidas que se consideran son: pérdidas en la corona del estator ($P_{F_{eys}}$), pérdidas en los dientes del estator ($P_{F_{eds}}$), pérdidas por efecto Joule en los bobinados del estator (P_{cus}), pérdidas en el bobinado del rotor (P_{cur}), pérdidas adicionales (P_{ad}) y que se asignan a los nudos 2, 3, 4, 6, 8 y 9, según las expresiones siguientes [2]:

$$P_{N2} = \frac{P_{F_{cys}}}{2}$$

$$P_{N3} = \frac{P_{F_{eds}} + 0.3 \cdot P_{ad}}{2}$$

$$P_{N4} = \frac{0.48 \cdot P_{cus} + 0.4 \cdot P_{ad}}{2}$$

$$P_{N6} = \frac{0.52 \cdot P_{cus}}{2}$$

$$P_{N8} = \frac{P_{cur}}{2}$$

$$P_{N9} = \frac{0.3 \cdot P_{ad}}{2}$$

(9)

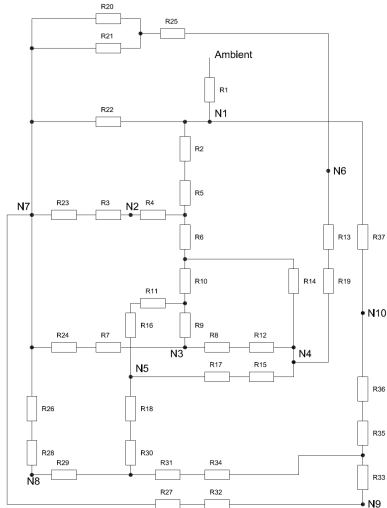


Fig.6. Esquema térmico equivalente para el motor asíncrono trifásico.

B. Motor síncrono de imanes permanentes situados en la periferia del rotor

Siguiendo el modelo expuesto en [1] y [4] se ha desarrollado un circuito con los siguientes nodos principales: carcasa (N1), Corona del estator (N2), Dientes del estator (N3), Bobinado estatórico (N4), Cabezas de bobina (N5), Imanes permanentes (N6), Cojinetes (N7), Entrehierro (N8), Aire de la zona de cabezas de bobina (N9), Hierro del rotor (N10), Eje (N11) El esquema completo se muestra en la figura 9.

De forma similar al caso anterior se consideran las pérdidas siguientes: Corona del estator, Dientes, Bobinado estatórico, Cabezas de Bobina, Imanes permanentes y cojinetes.

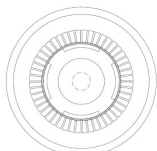


Fig.7. Motor síncrono de imanes permanentes exteriores

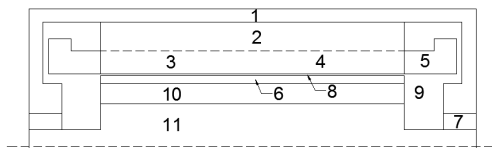


Fig.8. Nodos del esquema equivalente.

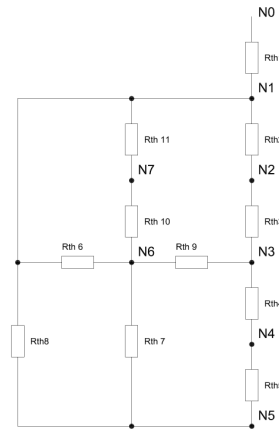


Fig.9. Esquema térmico equivalente para el motor síncrono de imanes permanentes exteriores.

C. Motor síncrono de imanes permanentes situados en el interior.

Para este caso se ha desarrollado el modelo para un motor con imanes interiores según lo expuesto en [3]. Se trata de un motor con imanes en forma de V y dos capas (figura 10) Siguiendo el modelo expuesto en [1] y [3] se ha desarrollado un circuito con los siguientes nodos principales: carcasa (N1), Corona del estator (N2), Dientes del estator (N3), Bobinado estatórico (N4), Cabezas de bobina (N5), Imanes permanentes (N6 y N7), Cojinetes (N8), Entrehierro (N9), Aire de la zona de cabezas de bobina (N10), Hierro del rotor (N11), Eje (N12) El esquema completo se muestra en la figura 13.

De forma similar al caso anterior se consideran las pérdidas siguientes: Corona del estator, Dientes, Bobinado estatórico, Cabezas de Bobina, Imanes permanentes y cojinetes.

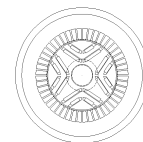


Fig.10. Motor síncrono de imanes permanentes interiores

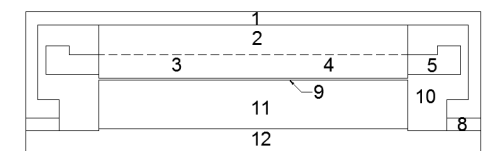


Fig.11. Nodos del esquema equivalente

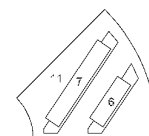


Fig.12. Nodos del esquema equivalente

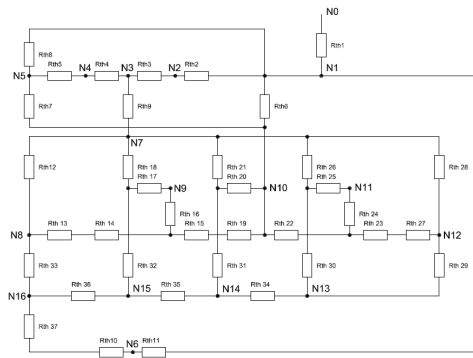


Fig. 13. Esquema térmico equivalente para el motor síncrono de imanes permanentes interiores

D. Motor de reluctancia conmutada

Siguiendo el modelo expuesto en [1] y [5] se ha desarrollado un circuito con los siguientes nodos principales: carcasa (N1), Corona del estator (N2), Dientes del estator (N3), Bobinado estatórico (N4), Entrehierro menor (N5), Entrehierro mayor (N6), Cabezas de bobina (N7), Aire de la zona de cabezas de bobina (N8), Dientes del rotor (N9), Hierro del rotor (N10), Eje (N11). El esquema completo se muestra en la figura 16.

Las pérdidas que se consideran son: pérdidas en la corona del estator (P_{Feys}), pérdidas en los dientes del estator (P_{Feds}), pérdidas por efecto Joule en los bobinados del estator (P_{cus}), Pérdidas en los dientes del rotor (P_{cur}) pérdidas adicionales (P_{ad}) y que se asignan a los nudos 2, 3, 4, 6, 8 y 9, según las expresiones siguientes [5]:

$$P_{N2} = \frac{P_{Feys}}{2}$$

$$P_{N3} = \frac{P_{Feds}}{2}$$

$$P_{N4} = \frac{0.48 \cdot P_{cus}}{2}$$

$$P_{N6} = \frac{0.52 \cdot P_{cus}}{2}$$

$$P_{N8} = \frac{P_{cur}}{2}$$

$$P_{N9} = \frac{P_{ad}}{2}$$

(10)

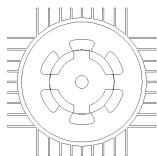


Fig. 14. Motor de reluctancia conmutado.

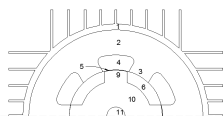


Fig. 15. Nodos del esquema equivalente

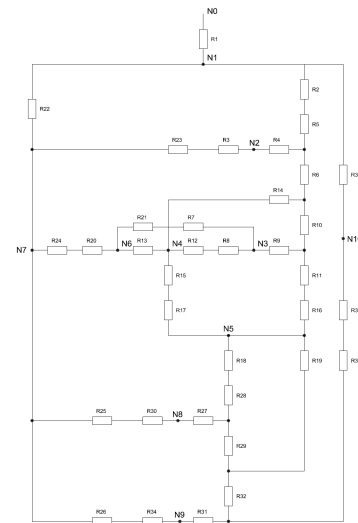


Fig. 16. Esquema térmico equivalente para el motor de reluctancia conmutado

4. Programa de análisis térmico.

El programa ha sido desarrollado en lenguaje Pascal y presenta las siguientes características:

- No es necesario instalarlo: solo es necesario copiar los ficheros de instalación en el directorio elegido.
- está formado por una serie de menús que permiten elegir inicialmente el tipo de máquina a analizar y una vez escogido está podemos introducir los datos necesarios para realizar el análisis.
- existen tres paquetes de datos a introducir:
 - o Geometría del motor,
 - o Constantes del sistema (coeficientes de convección, materiales de cada zona, etc.) y
 - o pérdidas de la máquina.

Una última pantalla permite visualizar la temperatura en los diversos nodos modelados. Existe la posibilidad de asignar unos valores por defecto para cada parámetro considerado si así se considera necesario. Las figuras 17 a 21 muestran estas pantallas para el caso de máquina asíncrona trifásica.

5. Ejemplo de aplicación.

La Tabla II nos muestra los resultados obtenidos en el caso de un motor asíncrono trifásico de 5.5 kW; 230/400V; 50 Hz; 2960 rpm, así como los resultados utilizando el programa MOTOR-CAD.

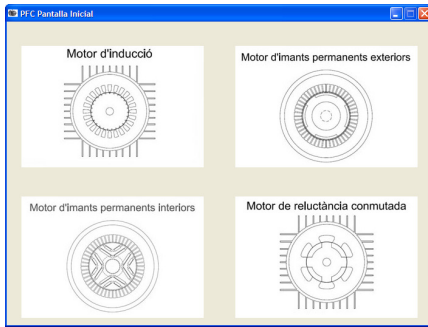


Fig.17. Pantalla inicial del programa.

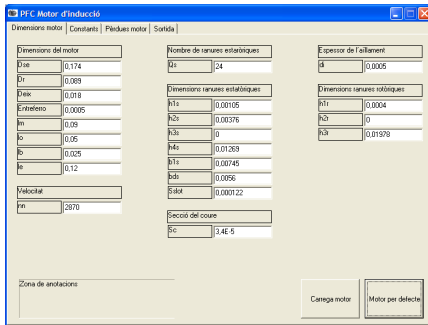


Fig.18. Pantalla de entrada de datos geométricos.

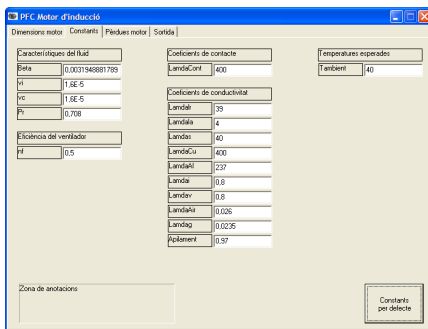


Fig.19. Pantalla de entrada de constantes.

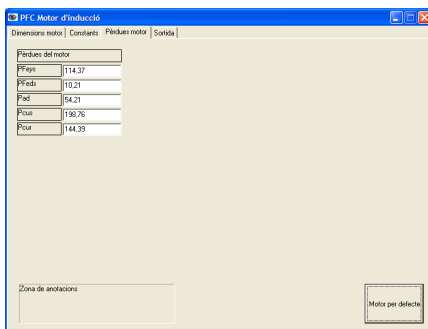


Fig.20. Pantalla de entrada de pérdidas.

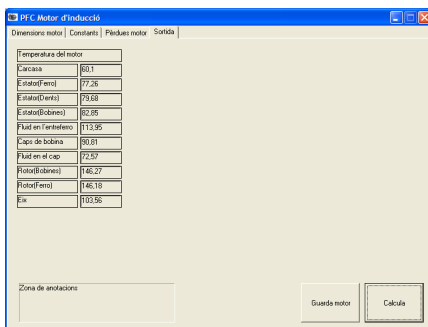


Fig.21. Pantalla de salida de datos: temperaturas.

TABLA II. – Resultados para un motor de 5.5 kW.

Componente	Temperatura (programa)	Temperatura (MOTOR-CAD)	Temperatura (experimental)
Carcasa	60.1	66.4	
Corona estator	77.3	74.7	
Dientes	79.7	80.4	
Bob. estator	82.8	85.1	88
Cabezas	90.8	99.4	
Bob. rotor	146.3	147.1	
Hierro rotor	146.2	145.5	
Eje	103.5	109	

A la vista de los resultados queda valida la metodología empleada para el desarrollo del programa.

En la referencia [7] pueden encontrarse otros ejemplos resueltos aplicados al resto de máquinas consideradas.

6. Conclusiones

- El programa desarrollado permite analizar usando un esquema equivalente relativamente sencillo la distribución de temperaturas en la máquina.
- El programa resulta una herramienta de aprendizaje sumamente útil ya que permite en un tiempo corto entrenar al estudiante para realizar análisis térmico de máquinas a coste nulo.
- Sirve como introducción a la utilización de programas comerciales (por ejemplo MOTOR-CAD) sin la complejidad que presentan estos (reconociendo su enorme utilidad en el caso de desarrollos industriales)

Referencias

- [1]Mellor, P.H., Roberts, D., Turner, D.R. “Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design” IEE Proc. Vol 138, No 5, 1991.
- [2]Kylander G. “Thermal modeling of small cage induction motors” Chalmers University of Thecnology, Göteborg, 1995.
- [3]Yang, B. “Development of Thermal Models for Permanent-Magnet Traction Motors” Master Thesis, School of Electrical Engineering Royal Institute of Technology, Stockholm, 2009.
- [4]Lindstööm, J. “Thermal Model of a Permanent-Magnet Motor for a Hybrid Electric Vehicle” Chalmers University of Technology, Göteborg, 1999.
- [5] Faiz, J., Lucas, C., Rouhani, H. “Lumped thermal model for switched reluctance motor applied to mechanical design optimization” University of Tehran, Tehran, 2006.
- [6] Incropera, F.P. “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”. Sixth Edition. Wiley. 2007.
- [7] Rahuet, J. “Elaboració d’un programari d’anàlisi Tèrmic per a Màquines Elèctriques”. TFG. EUETIB. 2011.