

Denise Freire Duarte¹
Ariane Novaes²
Élcio Nogueira³

Artigo
Original

Original
Paper

Palavras-chave:

Aletas
Transmissão de Calor
Eficiência Térmica
Motor Elétrico

Resumo

A utilização de aletas para potencializar a eficiência na troca de energia na forma de calor tem sido um procedimento comum utilizado há várias décadas. Provemos, neste trabalho, soluções analíticas para condução de calor em aletas de perfis retangulares, utilizando dois diferentes tipos de materiais, o Alumínio e o Ferro Fundido, que são materiais comumente utilizados na confecção de carcaças de motores elétricos. Uma das aplicações industriais mais comuns de sistemas de aletas ocorre em motores elétricos, que se tornaram um dos mais notórios inventos do homem ao longo de seu desenvolvimento tecnológico. Utilizamos dados reais de um motor elétrico (Weg modelo W21), que pode ser utilizado na indústria para o acionamento de bombas, ventiladores, exaustores, britadores, moinhos, talhas, compressores e outras aplicações. A partir dos dados obtidos do motor elétrico, sobre suas características físicas e de operação de trabalho, foram obtidos resultados numéricos e gráficos, para ambos os materiais. Os resultados demonstram o benefício que se consegue com a utilização de aletas na determinação da taxa de transferência de calor, neste tipo de equipamento.

Recebido em
07/2012

Aprovado em
12/2012

Abstract

The use of fins to maximize efficiency in the exchange of energy as heat has been common procedure, used for several decades. Analytical solutions for heat conduction in fins of rectangular profiles, using two different types of materials - Aluminum and Cast Iron were provided in this paper. These kinds of materials are commonly used in the manufacture of electric motors carcasses. One of the most common industrial applications of systems of fins occurs in electric motors, which have become one of the most notorious inventions of man along its technological development. Real data from an electric motor (WEG W21 model), which can be used in industry to drive pumps, fans, blowers, crushers, grinders, hoists, compressors and other applications were used. The data obtained from the electric motor on its physical characteristics and operation work, provided numerical results and graphs for both materials. The results demonstrate the benefit achieved with the use of fins on determining the rate of heat transfer.

Key words:

Fins
Heat Transfer
Thermal
Efficiency
Electric Motor

1 Aluna do Curso de Engenharia de Produção do UNIFOA

2 Aluna do Curso de Engenharia Mecânica

3 Professor Dr. Assistente do UNIFOA; Professor Adjunto da Faculdade de Tecnologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

1. Introdução

Motores elétricos são partes importantíssimas do processo produtivo industrial, não só no Brasil como no mundo (Garcia, 2003). Baseando-se no número de equipamentos e facilidades existentes, como geradores de força motriz, o parque de motores elétricos é responsável pelo consumo de um terço de toda a energia ofertada no país (Garcia, 2003). Em um cenário em que a eficiência energética torna-se tão presente, uma vez que a energia elétrica é a solução viável para a substituição de energias 'sujas', como as por queima de combustível fóssil, reduzir o consumo de energia dos motores elétricos é fator crucial para a economia e sustentabilidade da sociedade humana como um todo.

O motor elétrico é um dispositivo cuja finalidade é transformar a energia elétrica a ele aplicada em energia mecânica através de interações eletromagnéticas entre as partes que o constituem. É o mais usado de todos os tipos de motores, pois combina às vantagens da energia elétrica, baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando, com as de construção simples, custo reduzido, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos (Catálogo WEG, 2011, referência 3).

É possível obter um maior ganho na taxa de transferência de calor apenas mudando o material que compõe a carcaça ou, por sua vez, as aletas, mudando, desta forma, o valor da condutividade térmica do material, que no caso do alumínio é superior ao do ferro fundido (Incropera, 2012; Sissom & Pitts, 2000).

Resultados analíticos para aletas retangulares são obtidos na literatura especializada com facilidade (Silva & Nogueira, 1997; Incropera, 2012; Sissom e Pitts, 2000). Os autores desconhecem, entretanto, na literatura aberta, trabalhos que utilizam a técnica analítica para aletas em motores elétricos, com o fim específico de comparação entre alumínio e ferro fundido.

2. Objetivos

Este trabalho visa estudar o ganho obtido na troca de energia na forma de calor com a

utilização de aletas de perfil retangular comparando dois diferentes tipos de material: motores com carcaça de alumínio e motores com carcaça de ferro fundido. As grandezas de interesse estudadas são: perfil de temperatura ao longo da aleta, material utilizado, taxa de transferência de calor, altura ideal, largura ideal e eficiência global do sistema.

Pretende-se determinar se o equipamento utilizado na simulação possui aletas de tamanho ideal, qual o tipo de material é mais eficiente, alumínio ou ferro fundido, e qual o efeito dos parâmetros altura, largura e condutividade na eficiência térmica.

3. Metodologia

A metodologia utilizada foi a solução de equações diferenciais ordinárias (EDO) para o perfil de temperatura, utilizando o método analítico para determinação da taxa de transferência de energia na forma de calor e outras grandezas de interesse. Utilizou-se o sistema de linguagem ForTran (Power Station) e o sistema gráfico Grapher para representação gráfica. A utilização da linguagem de programação ForTran (Formula Translation), através do software Power Station, permite, através de um programa fonte, que as equações deduzidas no trabalho sejam compiladas e executadas, obtendo-se, assim, os resultados numéricos utilizados na confecção dos gráficos. A programação em ForTran é utilizada desde o início da década de 60 como linguagem de alto nível, e sua utilização nos dias de hoje - apesar de todo avanço computacional ao longo destes últimos 50 anos, como linguagem de cunho científico - é justificada em função de que a maior biblioteca de programas na área de matemática e estatística (IMSL - International of Mathematic and Statistical Library) encontra-se em ForTran. A NASA utiliza sistematicamente o IMSL. Novas rotinas computacionais utilizadas pela agência espacial citada, e outras entidades de igual prestígio no mundo, são criadas, preferencialmente, na linguagem ForTran.

O perfil de temperatura foi obtido para diferentes valores de temperatura externa, com a variação do coeficiente de transferência de calor por convecção. Através da integração do perfil de temperatura é possível obter a taxa de trans-

ferência de calor. A análise da taxa de transferência de calor foi efetuada a partir da variação da temperatura do motor em relação ao meio ambiente. A eficiência, diferente do definido nos textos clássicos (Incropera, 2012), foi calculada utilizando a razão da taxa de transferência do motor com aleta de alumínio em relação à taxa do motor com aleta de ferro fundido.

4. Desenvolvimento

A equação unidimensional da distribuição de temperatura em regime permanente de uma aleta de seção transversal constante (Figura 1) pode ser descrita como [Silva & Nogueira (1997).; Incropera (2012)].

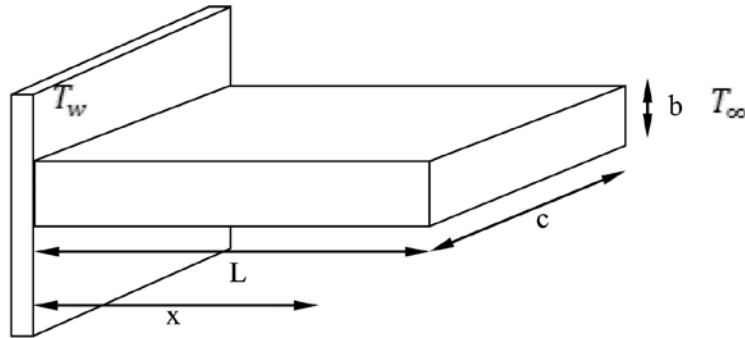


Figura 1: Representação esquemática de uma aleta retangular.

$$\frac{d^2T}{dx^2} - m^2(T - T_\infty) = 0 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

$$m = \sqrt{\frac{hp}{kA}}$$

$$p = 2b + 2c \text{ (perímetro da aleta)}$$

$$A = b * c \text{ (área da base da aleta)}$$

Por conveniência estabelecemos a seguinte troca de variável:

$$\theta = T - T_\infty$$

Logo, a equação 1 se reescreve:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \quad \text{Eq. 2}$$

A solução geral da equação diferencial ordinária de segunda ordem (Eq. 2) é:

$$\theta_x = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad \text{Eq. 3}$$

Utilizando a equação 3 em $x=0$:

$$\theta_0 = C_1 e^{m \cdot 0} + C_2 e^{-m \cdot 0}$$

$$\theta_0 = C_1 + C_2$$

$$C_1 = \theta_0 - C_2$$

Para $x=L$:

$$\begin{aligned}\theta_L &= C_1 e^{mL} + C_2 e^{-mL} \\ \theta_L &= (\theta_0 - C_2) e^{mL} + C_2 e^{-mL} \\ \theta_L &= \theta_0 e^{mL} - C_2 e^{mL} + C_2 e^{-mL} \\ \theta_L &= \theta_0 e^{mL} + C_2 (e^{-mL} - e^{mL})\end{aligned}$$

Onde obtemos:

$$\begin{aligned}C_1 &= \frac{\theta_0 - \theta_0 e^{mL} + \theta_L}{(e^{-mL} - e^{mL})} \\ C_2 &= \frac{\theta_L - \theta_0 e^{mL}}{(e^{-mL} - e^{mL})}\end{aligned}$$

Definimos:

$$\begin{aligned}\theta_0 &= T_w - T_\infty \\ \theta_L &= T_\infty - T_\infty = 0\end{aligned}$$

Substituindo C_1 C_1 C_2 C_2 na equação 3 temos a seguinte equação para o perfil de temperatura ao longo da aleta:

$$T(x) = \frac{(T_w - T_\infty)(\cosh mL - x) + (h/mK)\sinh mL}{\cosh mL + (h/mK)\sinh mL} + T_\infty \quad \text{Eq. 4}$$

E a taxa de transferência de energia na forma de calor:

$$Q = \sqrt{hpKA} \frac{(T_w - T_\infty)(\sinh mL) + (h/mK)\cosh mL}{\cosh mL + (h/mK)\sinh mL} \quad \text{Eq. 5}$$

Neste trabalho foi utilizado um motor elétrico da Weg modelo W21 [http://www.weg.net/files/products/WEG-motores-eletricos-baixa-tensao-mercado-brasil-050-catalogo-portugues-br.pdf; referência 3]. Este modelo atende uma série de normas que vão desde a sua forma de construção até o tipo de isolamento empregado para fins de normalização.

O modelo W21 é um motor elétrico trifásico IP 55 (motores blindados), que possui

as suas dimensões construtivas atendendo a norma NBR – 5432. Sua carcaça é feita de ferro fundido (NBR – 8441), com potência que vai de 0.16 a 500 Cv. É de categoria N (NBR – 7094), está entre a maioria dos motores encontrados no mercado atendendo ao acionamento de cargas normais. E possui classe de isolamento F (NBR – 7034).

Tabela 1: Composição da temperatura do catálogo da Weg

Classe de Isolamento F	
Temperatura ambiente	40°C
ΔT = elevação de temperatura (método da resistência)	105°C
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média	10°C
Temperatura do ponto mais quente	155°C

O motor elétrico utilizado para estudo possui armadura e aletas retangulares feitas de ferro fundido. Com as mesmas características físicas, utilizamos os dados do material alumínio para fazer as comparações:

Tabela 2: Dados do Alumínio e do ferro fundido

Substância	FERRO FUNDIDO	ALUMÍNIO
Condutividade térmica (k)	80 W/ m°K	237 W/ m°K
Calor específico	450 j/Kg°K	900 j/Kg°K
Massa específica	7,20g/cm ³	2,70g/cm ³
Ponto de fusão °C	1200	660,3
Estado da matéria	Sólido	Sólido
Eletronegatividade (Pauling)	1,83	1,61
Densidade (g/cm ³)	7,3	2,7

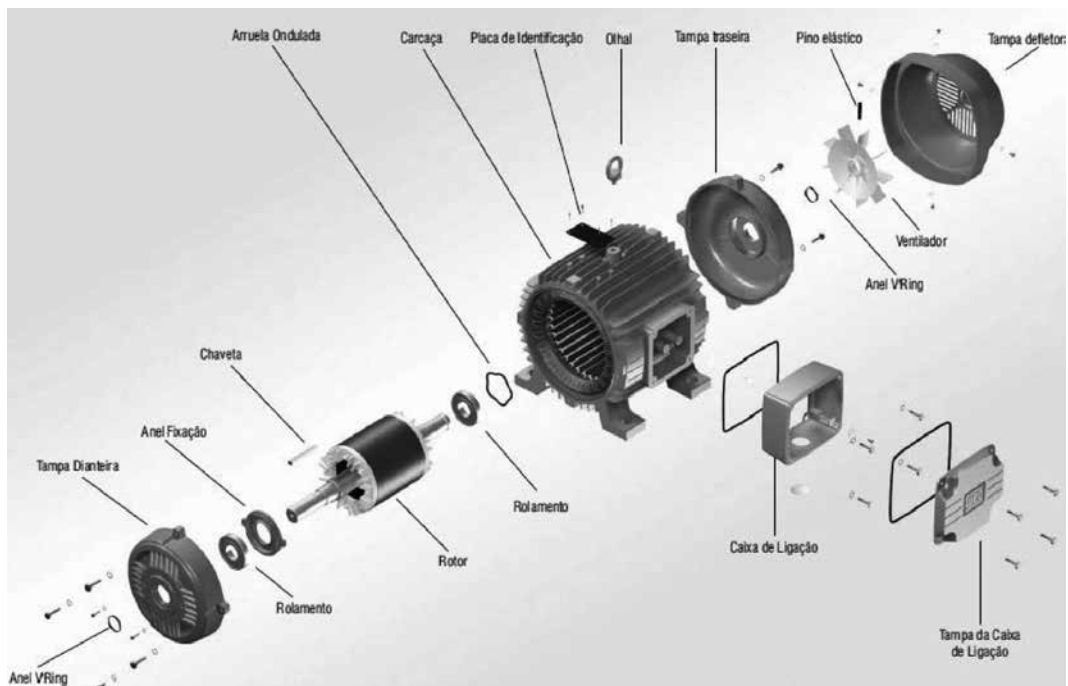


Figura 2: Representação dos componentes do motor elétrico Weg [03]

Efetuarão-se medições na armadura do motor e nas aletas onde foram retirados os seguintes dados:

Tabela 3: Dados obtidos do motor

Diâmetro externo do motor	Largura do motor	Largura da base da aleta	Altura da aleta	Número de aletas
139.60 mm	130.13 mm	5.84 mm	17.00 mm	32

O motor opera com potência máxima de 750 W, e para efeito de análise foi estipulado que a temperatura máxima de trabalho na parede do motor é de 98 °C, e a temperatura externa no ambiente de trabalho variando em 15 °C, 25 °C, 40°C, 55°C e 70 °C. Escolhemos neste trabalho a temperatura ambiente de 25

°C como padrão, por ser um valor intermediário, uma vez que o fabricante especifica como a temperatura máxima ambiente em 40 °C. Temperaturas acima desse valor são consideradas um caso especial de operação, mas para efeito de análise do comportamento do sistema, estas temperaturas foram utilizadas.

5. Resultados e Discussão

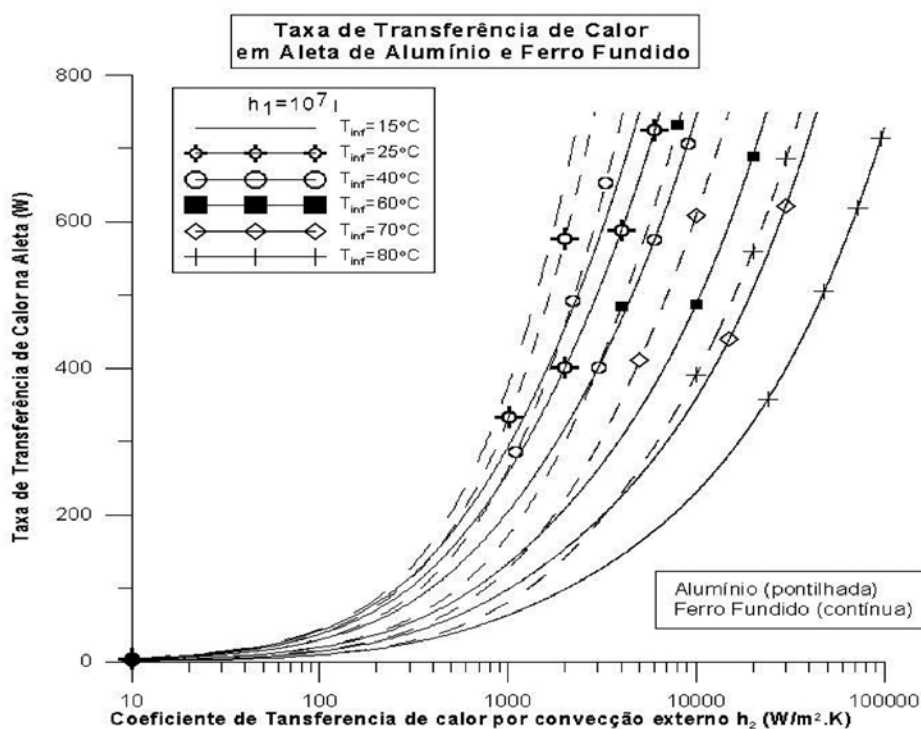


Figura 3: Taxa de transferência de calor com variação da temperatura externa.

A Figura 3 mostra os valores da taxa de transferência de calor entre o alumínio e o ferro fundido, para temperatura prescrita na base da aleta, condição imposta neste trabalho. É visível o aumento desta taxa para o alumínio em relação ao ferro fundido em todos os valores assumidos para a temperatura ambiente, para um mesmo valor de transferência de calor externo. Na Figura 3, acima, podemos perceber

que para todas as temperaturas avaliadas, a aleta de alumínio necessita de um coeficiente de transferência de calor externo (h_2) menor que a aleta de ferro fundido para trocar a mesma quantidade de energia na forma de calor. Isso ocorre, como esperado fisicamente, pelo fato do valor da condutividade térmica do alumínio ser maior do que o do ferro fundido.

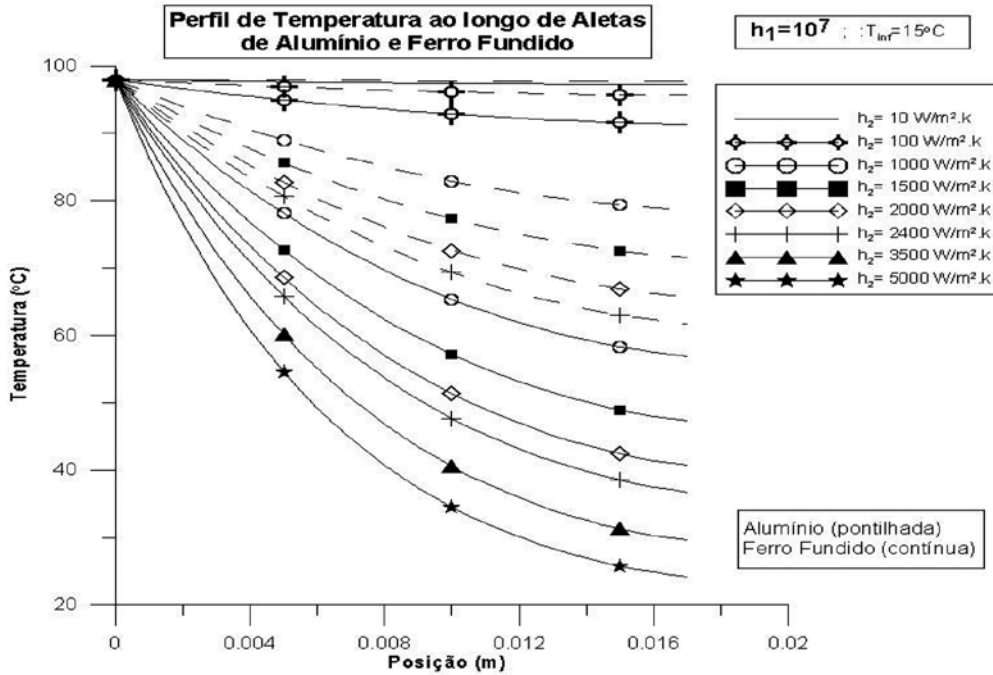


Figura 4: Perfil de temperatura ao longo das aletas de alumínio e ferro fundido com $T_{inf}=15^{\circ}C$.

É possível visualizar, através da Figura 4, que aletas de ferro fundido possuem maior variação no perfil de temperatura quando comparadas a aletas de alumínio. Isso é justificado pela condutividade térmica do alumínio (k) ser da ordem de 237 (W/m.K) enquanto que a do ferro fundido é de 80 (W/m.K), assim o alumínio tanto transfere mais energia na forma de calor para o ambiente que a aleta de ferro fundido, como também absorve mais energia na forma de calor do motor que o ferro fundido é capaz de absorver. Dessa forma, para o alumínio, tem-se uma menor va-

riação no perfil de temperatura ao longo da aleta que para o ferro fundido.

Como definido anteriormente, a taxa de transferência de calor máxima foi fixada em 750 watts, o que forneceu valores máximos de coeficientes de transferência de calor externo (h_2) de 2400 (W/m².K) para aleta de alumínio e 5000 (W/m².K) para de ferro fundido, já que o alumínio necessita de um coeficiente de transferência de calor externo (h_2) menor que o ferro fundido para trocar a mesma quantidade de energia na forma de calor.

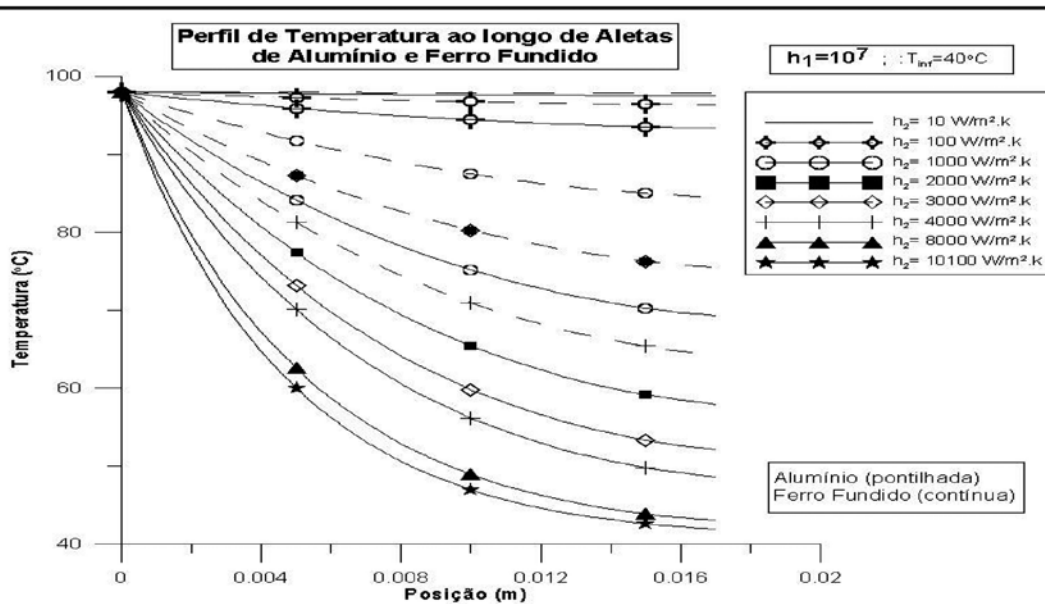


Figura 1: Perfil de temperatura ao longo das aletas de alumínio e ferro fundido com $T_{inf}=40^{\circ}C$.

Assim como observado através da Figura 4, o Gráfico 5, acima, também apresenta variação no perfil de temperatura maior para aletas constituídas de ferro fundido. A Tabela 3,

abaixo, apresenta os valores máximos de coeficiente de transferência de calor externo, em função da temperatura externa.

Tabela 3: Máximos Coeficientes de Transferência de Calor externo (h_2).

T_{inf} (°C)	Máximos valores de H^2 (W/m ² .k)	
	Alumínio	Ferro Fundido
25	2.800	6.400
40	4.000	10.100
60	8.300	23.600
70	14.800	43.700
80	35.800	100.000

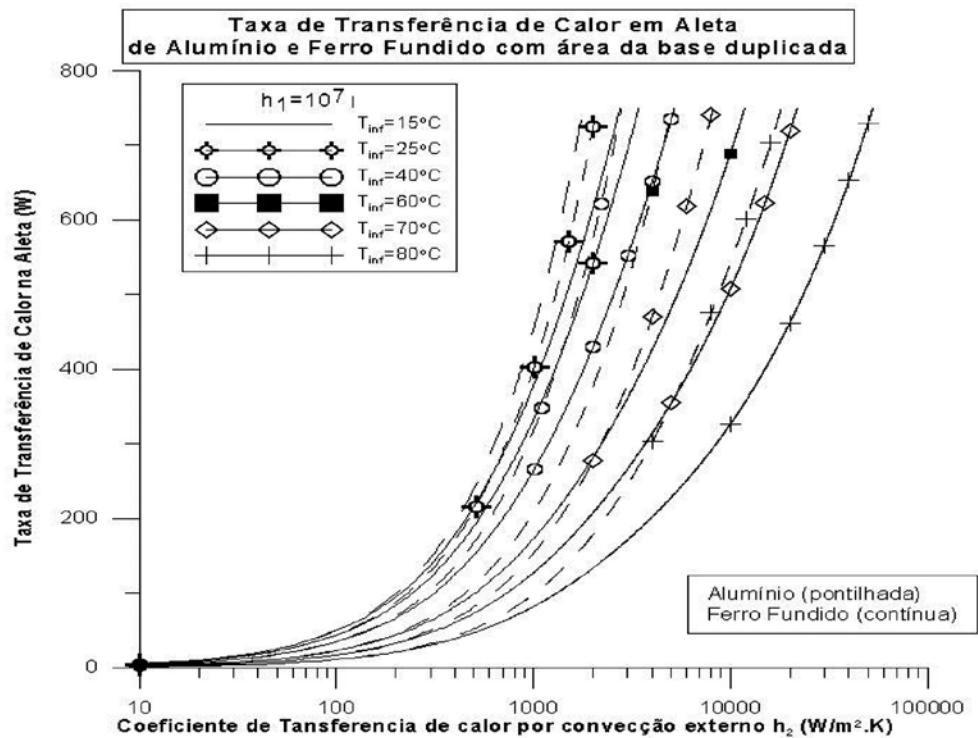


Figura 6: Taxa de transferência de calor entre alumínio e ferro fundido com variação da largura da base.

A Figura 6 representa a taxa de transferência de calor em aletas de alumínio e ferro fundido, com área da base duplicada, quando submetidas a diferentes temperaturas e coeficientes de transferência de calor por convecção (h_2) no meio externo ao motor. Quando comparamos a Figura 6 com os resultados apresentados através da Figura 3, percebemos que para todas as temperaturas avaliadas, a aleta de alumínio continua necessitando de um coeficiente de transferência de calor externo (h_2) menor que a aleta de ferro fundido para trocar a mesma quantidade de energia na forma de calor. Porém agora,

para ambos os materiais o coeficiente de transferência de calor externo (h_2) máximo é menor, posto que a área disponível para troca é maior, permitindo um menor coeficiente de transferência de calor. Ao analisarmos a Figura 7, abaixo, temos também a comprovação da necessidade de um menor coeficiente de transferência de calor externo (h_2) para transferir a mesma quantidade de energia na forma de calor para aletas com base duplicada quando comparadas a aletas sem duplicação da base, isso ocorre devido a maior área disponível para a troca de energia, como já foi citado anteriormente.

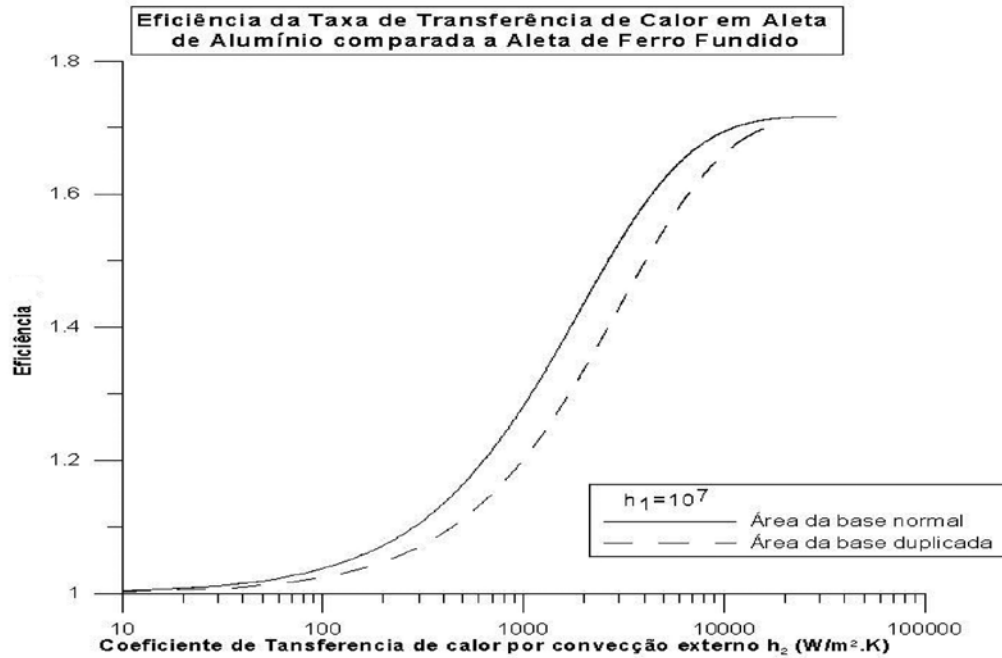


Figura 7: Relação entre as taxas de transferência de calor entre alumínio e ferro fundido

Ainda, da Figura 7, acima, podemos ver a eficiência do uso do alumínio, quando comparado ao ferro fundido, na troca de calor realizada por aletas em motores elétricos. Nos casos analisados, a aleta de alumínio assumiu valores de taxa de transferência de calor de aproximadamente 70% maiores que em aletas de ferro fundido, para valores extremos de h_2 .

6. Conclusão

Os resultados obtidos neste trabalho estão consistentes fisicamente e demonstram que é mais vantajosa, em termos de desempenho, a utilização do alumínio no lugar de ferro fundido para aletas de motores elétricos. A utilização

de métodos numéricos permite análise de novas geometrias, diferentes da aleta retangular. Em função da carcaça do motor ser cilíndrica, a aleta acompanha a geometria do mesmo e sua base é também cilíndrica, e este fato se torna mais significativo para aletas com bases maiores. Este último caso pode ser resolvido numericamente, utilizando o Método de Frobenius, ou analiticamente, utilizando a Técnica da Transformada Integral (GITT). O Método de Frobenius é uma extensão do Método de Potência, muito utilizado e referenciado em literatura de soluções numéricas de Equações Diferenciais Ordinárias (EDO). A Técnica da Transformada Integral (GITT) é uma extensão das técnicas clássicas de transformação de equações diferenciais (Transformada de Laplace e Transformada de Fourier).

7. Referências

1. Denise, F. D.; Élcio N. “**Aplicação de equações diferenciais em eficiência da troca de calor em motores aletados**”. 10º Congresso Nacional de Iniciação Científica CONIC-SEMESP, realizado nos dias 19 e 20 de novembro de 2010, na Universidade Presbiteriana Mackenzie, em São Paulo - SP.
2. Silva, E. L. P; E. Nogueira. “**Estudo de Técnicas Matemáticas para Solução de Equações Diferenciais – Uma Aplicação em Condução de Calor em Aletas**”. Universidade do Vale do Paraíba, 1997, São José dos Campos - SP
3. Incropera, F. P., Witt D. P. “**Fundamental of Heat and Mass Transfer**”, 4rd Ed., 2012.
4. <http://www.weg.net/files/products/WEG-motores-eletricos-baixa-tensao-mercado-brasil-050-catalogo-portugues-br.pdf>
5. Sissom, L. E., Pitts D. R. “**Fenômenos de Transporte**”. 96 – 140, 2000.
6. GARCIA, Agenor Gomes Pinto. “Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2003.

Endereço para Correspondência:

Élcio Nogueira - Professor Dr. UniFOA
elcionogueira@hotmail.com

Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA
Campus Universitário Olesio Galotti
Av. Paulo Erley Abrantes, 1325
Três Poços - Volta Redonda - RJ
CEP: 27.240-560