

## Alumínio e ferro fundido na produção de carcaças de motores elétricos aletados: eficiência, custos, aspectos operacionais e ambientais

*Aluminium and cast iron in production of electric motors with fins: efficiency, cost, operating and environmental aspects*

Yuri Tavares Vianna<sup>1</sup>  
Denise Freire Duarte<sup>1</sup>  
Élcio Nogueira<sup>1,2</sup>

Artigo  
Original

Original  
Paper

### Palavras-chave

Alumínio  
Ferro Fundido  
Motores Elétricos  
Aletas  
Transferência de Calor  
Eficiência Térmica.

### Resumo

As superfícies estendidas, aletas, são utilizadas para aumentar o tempo de vida médio de um motor elétrico, através da troca de calor. Motores com diferentes potências utilizam carcaças distintas, devido às suas dimensões. Efetuou-se uma análise comparativa, determinando-se os custos por unidade de peso, relacionados às carcaças de motores elétricos com potências variadas, e a quantidade de material utilizado em cada situação em análise, utilizando dois diferentes tipos de materiais – o Alumínio e o Ferro Fundido. Alumínio e Ferro Fundido são materiais comumente utilizados na confecção de carcaças de motores elétricos, determinando o tempo de vida médio de cada tipo de motor elétrico, que é função das eficiências térmicas associadas às superfícies estendidas, aletas, utilizadas. Motores aletados com superfícies estendidas distintas têm custos operacionais distintos, vez que a eficiência térmica altera o tempo de vida médio do equipamento. Utilizaram-se 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. Efetuou-se uma análise comparativa de custo em relação aos materiais utilizados em motores com até 15 cv, com o objetivo de determinar o motor aletado com melhor desempenho, e o custo operacional mais adequado para uso prático. Justificou-se a escolha do material através de resultados gráficos e numéricos, que mostram a diferença de desempenho dos materiais analisados neste trabalho. Aspectos relacionados com preservação ambiental foram objetos de análise e, neste caso, o alumínio se mostrou mais adequado, uma vez que a reciclagem do mesmo evita a extração da bauxita, o mineral beneficiado para a fabricação da alumina, que é transformada em liga de alumínio.

<sup>1</sup> UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ

<sup>2</sup> Universidade do Estado do Rio de Janeiro - FAT/UERJ – Resende, RJ

**Abstract**

*The use of fins to maximize efficiency in the exchange of energy as heat has been a common procedure used for several decades. One of the more common industrial systems occurs in fins electric motors. We present analytical solutions for heat conduction in rectangular profiles with prescribed temperature condition at the base of the fin, using two different types of materials - Aluminum and Cast Iron, materials that are commonly used in the manufacture of electric motors carcasses. We use real data from an electric motor, which can be used in industry to drive pumps, fans, blowers, crushers, grinders, hoists, compressors and other applications. From the data obtained from the electric motor, its physical characteristics and operation were obtained numerical results and graphs for both materials. The results demonstrate the benefit achieved with the use of fins with different materials, in determining the rate of heat transfer. As expected, due to the higher thermal conductivity, aluminum has better thermal performance and although more expensive per unit weight, than cast iron, it is economically more attractive in terms of cost per weight of the motor. Another important factor that we see, and that cannot be overlooked, when choosing the material to be used in the fin, is related to the recycling of aluminum in the manufacture of electric motors. We know that to recycle one ton of aluminum is spent 5% of the energy needed to produce the same amount of aluminum by the primary process. This means that recycling of the material prevents the extraction of bauxite, mineral benefit for the manufacture of alumina, which is converted into aluminum alloy.*

**Key-words**

Aluminum  
Cast Iron  
Electric motors  
Fins  
Heat Transfer.

**1. Introdução**

O motor elétrico é o responsável pela transformação da energia elétrica em mecânica, principal forma de uso final da energia elétrica na indústria (4). Sua ampla aplicação no setor é devido à construção simples e versatilidade quanto à aplicação de cargas no mesmo. O setor industrial é responsável por 45% do consumo nacional de energia elétrica (5). Neste seguimento, o motor elétrico absorve aproximadamente 75% dessa energia, o que evidencia a necessidade de conhecimento e ampliação da eficiência desses equipamentos visando à economia de energia. Onde a eficiência energética torna-se tão presente e premente, uma vez que a energia elétrica é a solução viável para a substituição de energias 'suas', reduzir o consumo de energia dos motores elétricos é fator crucial para a economia e sustentabilidade da sociedade humana como um todo. A evolução desses equipamentos vem ocorrendo, seu peso foi reduzido, concomitantemente, o rendimento elevado (4). É comum em ambientes industriais, devido a elevadas temperaturas a qual são submetidos, a "queima" de motores elétricos e sua consequente incapacidade de operação. A queima de um motor implica em sua substituição, o

que pode comprometer horas, ou até dias de produção, além de gerar custos à organização.

A diferença entre a potência útil fornecida pelo motor na ponta do eixo e a potência que é absorvida na linha de alimentação representa a perda do sistema, e essa energia é transformada em calor. O calor produzido deve ser eficientemente dissipado para evitar o aquecimento excessivo do motor e sua consequente queima. Essa troca de calor está diretamente relacionada a uma ventilação eficiente, à diferença de temperatura entre a superfície da carcaça e do meio que a circunda e da área total de troca de calor. Nos motores elétricos é comum o uso de superfícies estendidas, denominadas aletas, que aumentam a área de troca como mecanismo de otimização da transferência de calor (2). O material da aleta deve possuir elevada condutividade térmica para auxiliar ao máximo o processo (6). Assim como o material, a geometria da mesma é de extrema relevância, pois influencia na área disponível para troca.

**2. Objetivos**

O objetivo principal do presente trabalho é analisar o desempenho de motores com carcaças de ferro fundido e alumínio, providos de aletas retangulares com condição de tempe-



de grafite em sua microestrutura proporciona diversas características que tornam o ferro fundido cinzento quase que insubstituível na fabricação de carcaças de motores e bases de equipamentos.

- **Alumínio**

O alumínio é um metal leve, macio e resistente. É muito maleável, muito dúctil, apto para a mecanização e fundição, além de ter uma excelente resistência à corrosão e durabilidade devido à camada protetora de óxido. É o segundo metal mais maleável, sendo o primeiro o ouro, e o sexto mais dúctil. Considerando

a quantidade e o valor do metal empregado, o uso do alumínio excede o de qualquer outro metal, exceto o aço. É um material importante em múltiplas atividades econômicas.

Analisando as propriedades dos materiais mencionados, Tabela 1 abaixo, percebe-se que o alumínio possui excelentes propriedades físico-químicas, entre as quais se destacam o peso específico, resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica e infinita reciclagem; apresenta, ainda, uma ampla variedade de utilização, que o torna o metal não ferroso mais consumido no mundo.

**Tabela 1: Dados do Alumínio e do ferro fundido (6)**

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 <sup>3</sup>	2,70g/cm <sup>3</sup>
Ponto de fusão °C	1200 °C	660,3 °C
Estado da matéria	Sólido	Sólido
Eletronegatividade (Pauling)	1,83	1,61
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	7,3	2,7

Destacando as vantagens do alumínio podemos observar que esse material é abundante na crosta terrestre na forma de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e as reservas minerais são quase ilimitadas. O minério industrial mais importante é a “bauxita”, com um teor de óxido de alumínio entre 35% a 45%; suas jazidas localizam-

se principalmente nas regiões tropicais e, no Brasil, concentram-se na área amazônica.

O custo da fabricação do alumínio primário é muito alto devido ao seu fluxo de produção; cerca de 1/3 do custo de produção do alumínio primário é devido à energia, como representado na Figura 2.



Figura 2- Processo de obtenção do alumínio

Quando o alumínio líquido é exposto à atmosfera, forma-se imediatamente uma fina e invisível camada de óxido, a qual protege

o metal de oxidações posteriores. Essa característica de autoproteção dá ao alumínio uma elevada resistência à corrosão. A menos que

seja exposto a uma determinada substância ou condição agressiva que destrua essa película de óxido de proteção, o metal fica totalmente protegido contra a corrosão.

O alumínio é altamente resistente ao tempo, mesmo em atmosferas industriais, que frequentemente corroem outros metais. É também resistente a vários ácidos. Já o Ferro fundido não tem a mesma resistência ao ser exposto ao tempo, pois o material se deteriora com facilidade em contato com o oxigênio.

**Tabela 2: Dados obtidos do motor elétrico WEG 21**

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

Com os dados coletados do motor elétrico efetuou-se uma simulação numérica através da linguagem de programação ForTran, demonstrando o funcionamento do motor com relação ao seu desempenho térmico. Com os resultados, numéricos e gráficos, obtidos através da simulação computacional pode-se observar a eficiência do motor, trocando-se apenas o material que compõe sua carcaça e material da aleta. O motor W21 opera com potência máxima de 750 W e, para efeito de estudo, 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. A Figura 3, apresenta os resultados gráficos para a taxa de transferência de calor, com condição de temperatura prescrita na base da aleta ( $h_1=10^7$ ), e perfis de temperaturas (Figura 4), para os materiais analisados. Estes resultados demonstram a superioridade do alumínio, com relação à eficiência térmica, para o material da aleta.

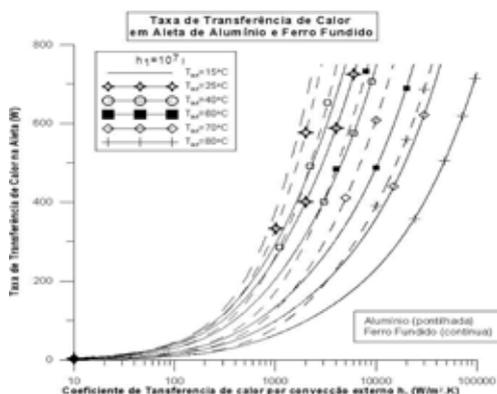


Figura 3: Taxa de transferência de calor com variação da temperatura externa. Comparação entre o Alumínio e o Ferro Fundido, utilizando o método computacional (2).

Na construção de máquinas e equipamentos, a leveza e a elevada condutibilidade térmica do alumínio favorecem o uso em peças e equipamentos trocadores de calor como as aletas de um motor elétrico analisado nesse trabalho.

O motor elétrico utilizado para estudo possui armadura e aletas retangulares feitas de ferro fundido. Com as mesmas características físicas, utilizaram-se os dados do material alumínio para efetuar comparações. Realizaram-se medidas na armadura do motor e nas aletas onde foram retirados, conforme evidenciado na Tabela 2.

O tempo de vida médio do motor com aleta de alumínio será superior ao do motor com aleta de ferro fundido, pois o motor irá trabalhar com temperaturas menores devido a sua maior capacidade na troca de calor. A temperatura do meio influencia na troca de calor e quanto menor a temperatura de operação maior o tempo de vida do equipamento.

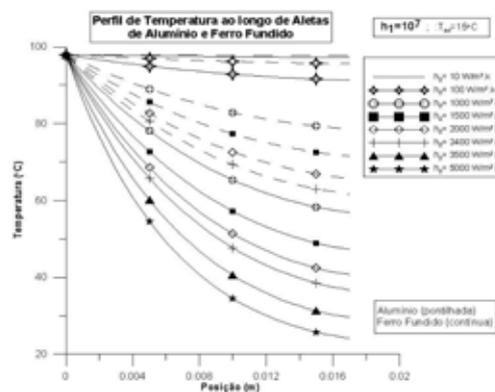


Figura 4: Perfil de temperatura ao longo de aletas de alumínio e ferro fundido com  $T_{inf}=15^{\circ}\text{C}$  (2).

De acordo com os resultados gráficos apresentados nas Figuras 3 e 4, pode-se observar que na comparação entre o ferro fundido e o alumínio, este obteve uma taxa de troca de calor mais elevada. Assim, conclui-se que o motor tem uma vida útil maior com aletas de alumínio, pois a troca de calor com o meio ambiente será mais fácil do que com o ferro fundido. Essa facilidade na troca de calor se deve a condutibilidade térmica, que no alumínio é mais elevada que no ferro fundido. O motor com alumínio trabalhará com a tempe-

ratura do núcleo inferior ao do ferro fundido, para uma mesma condição de operação.

Com os resultados apresentados nos gráficos anteriores pode-se constatar que o alumínio obteve vantagem em relação ao seu desempenho térmico. Entretanto, permanece a seguinte questão: o alumínio apresenta vantagens com relação ao seu custo de fabricação?

Em pesquisa de preço realizada no mercado observou-se que o alumínio é um mate-

rial mais caro, por unidade de massa, que o ferro fundido. O alumínio reciclável custa em média R\$ 5,00/kg, enquanto que o ferro fundido custa R\$ 3,15/kg.

A princípio, o alumínio reciclável é mais caro que o ferro fundido. No entanto, comparando-se a massa das duas carcaças pode-se notar uma diferença significativa. A Tabela 3 mostra a comparação entre duas carcaças do motor WEG W21.

**Tabela 3: Diferença entre as massas do alumínio e ferro fundido para o motor elétrico**

MOTOR WEG W21			
MATERIAIS	FERRO FUNDIDO (Fe)	ALUMÍNIO (Al)	DIFERENÇA DE PESO (Fe/Al)
Carcaça 63	2,08kg	0,55kg	1,53kg
Carcaça 71	2,88kg	0,75kg	2,13kg

Utilizando-se os dados mencionados para o preço de cada material, chegou-se aos seguintes valores numéricos para cada tipo de carcaça, os quais podem ser evidenciados na Tabela 4.

**Tabela 4: Custo total do material do motor elétrico para alumínio e ferro fundido**

TABELA DE PREÇO		
MOTOR WEG W21	FERRO FUNDIDO	ALUMÍNIO
Carcaça 63	2,08kg	0,55kg
Carcaça 71	2,88kg	0,75kg
Preço R\$/Kg	R\$ 3,15	R\$ 5,00
Custo Total Carcaça 63	R\$ 6,55	R\$ 2,75
Custo Total Carcaça 71	R\$ 9,07	R\$ 3,75

Em função da diferença de preço e massa dos materiais apresentados, efetuaram-se cálculos, demonstrando a porcentagem de lucro que o alumínio possibilita, em função do ferro fundido, representado na Tabela 5.

**Tabela 5: Porcentagem de lucro do alumínio em relação ao ferro fundido**

ALUMÍNIO x FERRO FUNDIDO: LUCRO PERCENTUAL			
MOTOR WEG W21	FERRO FUNDIDO	ALUMÍNIO	%
Custo Total Carcaça 63	R\$ 6,55	R\$ 2,75	58,03
Custo Total Carcaça 71	R\$ 9,07	R\$ 3,75	58,66

Observando-se a diferença de preço e peso do alumínio com relação ao do ferro fundido, pode-se constatar que o ferro fundido, mais barato em relação ao peso, tem custo final mais elevado. Isso ocorre devido ao peso do ferro fundido, que é superior em 1,53 kg na carcaça 63 e superior em 2,13 kg na carcaça 71. Essa diferença é significativa, pois a densidade do ferro é bem superior que a do alumínio.

No Brasil, os motores de indução trifásicos são responsáveis por aproximadamente 60% do consumo industrial e aproximada-

mente 30% do consumo total de eletricidade, constituindo-se em um grande potencial de economia de energia.

Analisando motores de 1 a 250 cv no mercado, observou-se que existe um número muito grande de motores de baixa potência em operação, devido a sua diversidade de aplicação, como o WEG 21. Motores com potências superiores são utilizados por empresas de grande porte. Na Figura 5 pode-se observar o nível de utilização dos motores de 1 a 250 cv no país (Garcia, 2003).

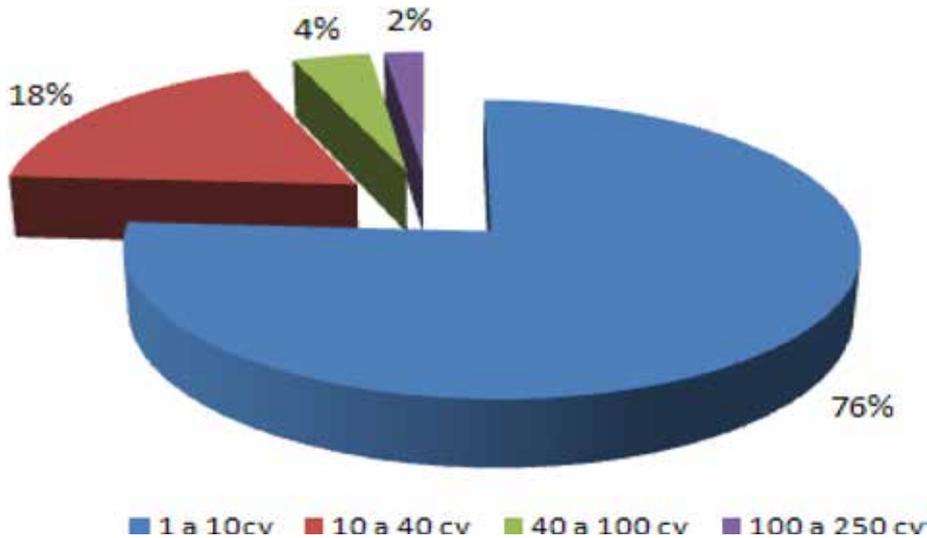


Figura 5: Distribuição dos motores por faixa de potência

A Figura 5 demonstra que os motores de 1 a 40 cv, representam 94% dos motores instalados no mercado brasileiro.

A vida útil do motor, Tabela 6, é uma função da potência do motor. Quanto maior for a potência, maior o tempo de operação.

**Tabela 6: Vida útil dos motores elétricos, em anos.**

P (cv)	Mínima	Máxima	Média
1-10	10	19	13
>10-40	16	24	20
>40-100	22	34	25
>100-250	25	38	29

Todo equipamento rotativo apresenta um determinado nível de vibração quando está em operação. A potência máxima estipulada para motor com carcaça de alumínio é de 15cv. Não se pode colocar, por exemplo, um motor

com carcaça de alumínio como acionamento de um motor de um guindaste. Durante a operação o nível de vibração do guindaste será maior quando comparado ao nível suportado pelo material, como evidenciado na Figura 6.



Figura 6: Limites de vibração para motores elétricos

Como a potência máxima para carcaça de alumínio foi estipulada em até 15 cv, efetuou-se cálculos para o custo das carcaças de motores neste limite de potência. A Tabela 7 mostra os custos das carcaças em motores até 15cv.

**Tabela 7: Custo total por unidade de peso para diferentes tipos de carcaças de motores elétricos**

TABELA DE PREÇO				
MOTOR WEG W21	PESO (Fe)	PREÇO (Fe) 3,15 / Kg	PESO (Al)	PREÇO (Al) 5 / Kg
Carcaça 80	3,8 kg	R\$11,97	1 kg	R\$5,00
Carcaça 90	5,2 kg	R\$16,38	1,5 kg	R\$7,50
Carcaça 100	7 kg	R\$22,05	2 kg	R\$10,00
Carcaça 112	9,5 kg	R\$29,93	2,6 kg	R\$13,00
Carcaça 132M	14 kg	R\$44,10	4,4 kg	R\$22,00

Os resultados anteriores, Tabela 7, são apresentados, em termos relativos, através da Tabela 8.

**Tabela 8: Custo relativo para uso do alumínio em relação ao ferro fundido, para diferentes motores elétricos.**

PORCENTAGEM DE GANHO NA UTILIZAÇÃO DO ALUMÍNIO			
MOTOR WEG W21	FERRO FUNDIDO	ALUMÍNIO	%
Custo Total Carcaça 80	R\$ 11,97	R\$ 5,00	58,23
Custo Total Carcaça 90	R\$ 16,38	R\$ 7,50	54,21
Custo Total Carcaça 100	R\$22,05	R\$10,00	54,65
Custo Total Carcaça 112	R\$29,93	R\$13,00	56,56
Custo Total Carcaça 132M	R\$44,10	R\$22,00	50,11

Com os resultados das porcentagens apresentados na Tabela 8, chega-se a uma média de 55,78%, demonstrando que a utilização do alumínio é mais vantajosa, em termos econômicos, que o ferro fundido, na implantação em carcaças para motores elétricos com potências de até 15cv.

A reciclagem é um parâmetro muito importante na indústria dos materiais, tanto do ponto de vista energético como do ambiental. Na reciclagem do alumínio, a economia de energia é de 95% em relação ao processo primário. Isto equivale ao consumo de energia de um aparelho

de TV durante 3 horas. Cada tonelada de alumínio reciclado economiza a extração de 5 toneladas de bauxita (matéria prima para se fabricar o alumínio), sem contar toda a lama vermelha (resíduo da mineração) que é evitada.

No aspecto ambiental, a reciclagem do alumínio diminui o volume de lixo gerado, poupando espaço nos aterros sanitários. Também estimula a consciência ecológica, incentivando a reciclagem de outros materiais, através de programas de educação ambiental, como representa a Figura 7.

Econômicos e Sociais	Ambientais
Gera emprego e renda para milhares de trabalhadores envolvidos na cadeia da reciclagem do alumínio.	Reduz o consumo de matérias primas, como a bauxita e elementos de liga.
É uma atividade que movimenta milhões na economia nacional, em todas as etapas do processo.	Favorece o desenvolvimento da consciência ambiental na sociedade.
Estimula outros negócios, por demandar novas atividades relacionadas à cadeia de reciclagem.	Incentiva a reciclagem de outros materiais.

Figura 7: Representação das vantagens da reciclagem do alumínio dentro do programa de educação ambiental

## 5. Considerações finais e conclusões

Comparando-se a diferença de preço, por unidade de massa, pode-se notar que o ferro fundido, mais barato que o alumínio, acaba tornando-se mais dispendioso, em relação ao custo final. A densidade do ferro fundido é bem superior à densidade do alumínio.

Os resultados do trabalho demonstram que o alumínio é, em média, 55,78% mais barato que o ferro fundido, além de ser significativamente mais eficiente em termos térmicos. Para reciclar uma tonelada de alumínio, se gasta 5% da energia necessária para produzir a mesma quantidade de alumínio pelo processo primário. A reciclagem do alumínio evita a extração da bauxita, o mineral beneficiado para a fabricação da alumina, que é transformada em liga de alumínio. Cada tonelada do metal exige cinco de minério,

e utilizando a reciclagem evitamos essa retirada de minério da natureza. A utilização do alumínio reciclado contribui para a preservação do meio ambiente, evitando a retirada de minério.

Para motores elétricos até 15 cv é vantajoso utilizar carcaça e aletas de alumínio, em função das diferenças relativas observadas em comparação com o ferro fundido, em termos de eficiência térmica, custos e preservação ambiental.

A vida média dos motores de menor potência pode ser estendida se a eficiência térmica for ampliada e as condições de operação forem adequadas, conforme demonstrado.

## 6. Agradecimentos

Os alunos Yuri Tavares Viana e Denise Freire Duarte agradecem ao UNIFOA por possibilitar o desenvolvimento de Projeto de Iniciação Científica – PIC.

---

## 7. Bibliografia

01 - Y. T. Viana, D. F. Duarte, E. Nogueira. “*Comparação de desempenho térmico e análise de custos para utilização do alumínio e do ferro fundido em aletas de motores elétricos*” 20º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 04 a 08 de Novembro de 2012, Joinville, SC, Brasil.

02 - Denise Freire Duarte, Ariane Novais e Élcio Nogueira. “*Solução analítica em aleta de perfil retangular: comparação de desempenho térmico entre alumínio e ferro fundido em motores elétricos*”. Cadernos UniFOA, Revista Nº 20, Dezembro, 2012.

03 - DUARTE D. F.; NOGUEIRA, E. “*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.

04 - 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.

05 - Hamilton Moss de Souza et all. “*Reflexões sobre os principais programas em eficiência energética existentes no Brasil*” Revista Brasileira de Energia, Vol. 15, No. 1, 1o Sem. 2009, pp. 7-26.

06 - PADILHA, A.F. “*Materiais de engenharia: Microestrutura e propriedades*”. 5. ed. Curitiba - PR: Hemus, 2000.