

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA CÁLCULO DE EFICIÊNCIA DE MOTORES DE INDUÇÃO EM OPERAÇÃO

Cássio T. C. Andrade¹, Adson B. Moreira², Ricardo S. T. Pontes²

¹ *Agência Reguladora dos Serviços Públicos Delegados do Estado do Ceará (ARCE)*
Av. Santos Dumont, 1789 – Térreo – Fortaleza – CE CEP 60000
Tel. 55 85 3101-1003, fax 55 85 3101 1000, e-mail: cassiotca@arce.ce.gov.br

² *Departamento de Engenharia Elétrica/Universidade Federal do Ceará (UFC)*
Caixa Postal 6001 – Campus do Pici – Fortaleza – CE CEP 60455-760
Tel. 55 85 33669580, fax 55 85 3366-9574 e-mail: ricthe@dee.ufc.br

Abstract: Induction motors are responsible for 1/3 of the world's electrical energy consumption, and when operated under appropriate conditions work with maximum efficiency. To reach this ideal operation point it is necessary to know the characteristics of the machine during load operation. This paper presents an analysis of the existing efficiency determination methods of induction motors in operation, considering aspects of precision, economy, and security, also presents the results of the implementation of selected methods in the laboratory, and examines the influence of the chosen method on the economic analysis when defining machine's destination.

. Copyright © 2009 CBEE/ABEE

Keywords: efficiency, induction motors, losses, operation, methods.

Resumo: Os motores de indução consomem cerca de 1/3 da energia elétrica do País e, quando operados em condições adequadas trabalham com máxima eficiência. Para que este ponto ótimo de operação seja alcançado, faz-se necessário conhecer as características do motor em operação. Este trabalho apresenta uma análise dos diferentes métodos para cálculo desta eficiência e também os resultados da implementação de três destes métodos a partir de ensaios realizados no LAMOTRIZ do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará. Por fim apresenta a influência do método escolhido sobre a análise econômica da solução de efficientização para o motor.

Palavras Chaves: eficiência, motores de indução, métodos, operação, perdas.

1 INTRODUÇÃO

O predomínio da utilização do motor de indução trifásico (MIT) na indústria se deve as suas características de robustez, baixo custo de aquisição e alta eficiência. As duas primeiras são fáceis de medir e avaliar, decorrem da relativa simplicidade de sua construção e manutenção, e de sua capacidade de operar com uma grande diversidade de cargas e em condições adversas. A terceira característica, a alta eficiência, é a que apresenta um maior grau de dificuldade em sua determinação, já que depende de características de fabricação e de operação da máquina e ainda da carga a que ela está ligada. Somado a isto, existem as limitações de coleta de dados, já que estamos tratando com a máquina em operação e, portanto, a mesma não está disponível para qualquer tipo de medição de parâmetros.

O interesse por este tema vem crescendo em importância devido aos recentes aumentos no custo da energia elétrica, que incidem nos custos de operação da máquina, e nas preocupações ambientais, que pressionam para um melhor aproveitamento energético de equipamentos em geral.

Este trabalho apresenta o estado da arte do cálculo da eficiência de motores de indução trifásicos, iniciando pela descrição de suas perdas, e realizando a análise de cerca de 30 métodos existentes para o cálculo de eficiência de MIT em operação, desde os métodos padronizados pelas instituições de normatização, passando pelos métodos comerciais e chegando às tendências atuais de pesquisa, destacando principalmente os aspectos de precisão e invasão no processo. Por fim, apresentamos os resultados da implementação no LAMOTRIZ - UFC de três destes métodos e a influência da precisão dos mesmos sobre a análise econômica da solução de eficiência energética adotada para o motor.

2 PERDAS DE POTÊNCIA

A Figura 1 mostra a evolução do fluxo de potência de um motor de indução, desde os terminais de entrada ($P_{entrada}$) até a saída mecânica entregue a carga ($P_{saída}$), destacando as perdas existentes neste processo.

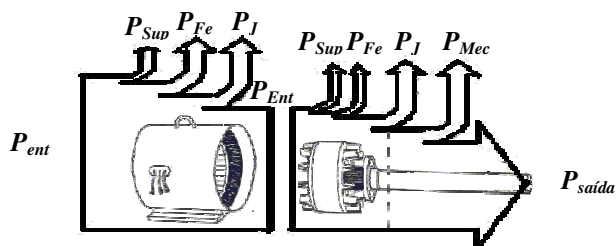


Figura 1 – Diagrama de sankey de um motor de indução

2.1 Descrição das perdas

Um motor é constituído basicamente de duas partes: ativa e não-ativa. A parte ativa é constituída dos componentes que fazem a conversão eletromecânica de energia, a saber: condutores e núcleos magnético do rotor e do estator; os núcleos são de aço laminado, os condutores do estator são de fios isolados de cobre e a parte condutora do rotor pode ser de alumínio ou cobre. Os componentes inativos são a carcaça, os rolamentos, o ventilador, a cobertura do ventilador e o eixo.

As perdas do motor estão associadas às partes ativas e inativas de sua construção e podem ser minimizadas pela otimização das mesmas. Podemos resumir todas as perdas de um motor em quatro, obedecendo ao estabelecido nos padrões IEEE e NEMA.

- **Perdas Resistivas (P_J):** Associadas às correntes que circulam nas partes condutoras da máquina, variam com o quadrado das correntes e são diretamente proporcionais à resistência (seção transversal do fio de cobre do estator e da barra do rotor). São influenciadas pela temperatura, área da seção e material do condutor ;
- **Perdas Magnéticas (P_{Fe}):** Dependem da magnitude do campo magnético, que basicamente depende da tensão e do número de voltas do enrolamento de cada fase no estator, portanto, se mantém praticamente constante com a variação de carga e são influenciadas basicamente pelas laminações do núcleo.;
- **Perdas Mecânicas (P_{Mec}):** Associadas às partes inativas da máquina, como o ventilador montado no eixo e os rolamentos que provocam atritos na junção da parte móvel com a fixa da máquina.
- **Perdas Suplementares (P_{Sup}):** As mais complexas, por estarem associadas às imperfeições construtivas da máquina e por serem muito difíceis de determinar. São causadas pelas descontinuidades nos componentes dos campos magnéticos nas ranhuras do rotor, na inclinação transversal dos barramentos do rotor (skew), e pelas pulsações nas formas de onda dos campos nas conexões dos enrolamentos. São proporcionais ao quadrado da corrente.

3. ANÁLISE DE MÉTODOS PARA CÁLCULO DE EFICIÊNCIA

Os métodos para o cálculo de eficiência de motores de indução em operação podem ser divididos em quatro categorias: Métodos das Perdas Segregadas, Métodos do Circuito Equivalente, Métodos do escorregamento e Métodos da Corrente/Outros. Nos itens anteriores foi descrito um método apresentado pelo IEEE para o cálculo de cada uma das perdas e ele será utilizado como base para a comparação com os demais.

3.1. Métodos das Perdas Segregadas

Aqui as perdas são calculadas individualmente e somadas para o cálculo das Perdas Totais e da eficiência (η) da máquina de acordo com a seguinte expressão:

$$\eta = 1 - \frac{\text{PerdasTotais}}{\text{Pentrada}} \quad (7)$$

Em geral apresentam uma alta precisão ($\pm 3\%$), no entanto, tendem a ser invasivos e de difícil implementação. O mais preciso é o padrão IEEE Método E, porém o mais utilizado é o Método E1, que calcula as perdas suplementares a partir de uma tabela com valores estimados.

3.1.1. Padrão IEEE 112-1998 (Método E1)

Este método calcula as perdas resistivas do estator a partir de leituras direta da resistência CC nos bornes do motor; calcula as perdas mecânicas e magnéticas a partir de um teste a vazio e as separa reduzindo a tensão aplicado no motor até próximo do zero (quando restam apenas as perdas mecânicas); e calcula as perdas suplementares a partir de uma tabela com valores padronizados proporcionais a potência nominal de saída do motor. Implementa ainda um teste com uma carga variável (25-100% da nominal), o que permite o levantamento da característica de eficiência da máquina para toda a sua faixa de operação, porém, torna o método ainda mais invasivo.

3.1.2. Método de Hirzel (E1 modificado)

Simplificação do método anterior, dispensa a necessidade de fonte de tensão variável no teste a vazio e de uma carga variável no teste com carga. Estas alterações tornam o método mais econômico e fácil de implementar, entretanto não consegue separar as perdas mecânicas das magnéticas e mostra a eficiência do motor apenas para o ponto de operação. Não perde em precisão ao anterior mais ainda exige um teste a vazio, o que exige o desacoplamento da carga.

3.1.3. Método da Ontario Hidro de Perdas Segregadas

Desenvolvido pela companhia canadense Ontario Hidro, é similar ao anterior, no entanto simplifica ainda mais o processo eliminando o teste a vazio estimando, com base em um estudo, as perdas magnéticas e mecânicas em 3.5% da potência de entrada. As perdas suplementares são padronizadas a partir de testes realizados no próprio laboratório e padronizados em 1.2% da potência de entrada. Mais simplificado e menos invasivo que os anteriores, há que se alertar que os testes realizados para estimar as perdas foram realizados com motores novos.

3.1.4. Analizador de Performance da Nielsen Engineering

Usa um dispositivo proprietário que realiza as medições e o cálculo da eficiência do motor a partir de um método similar ao de Hirzel. Estima as perdas suplementares com base em tabela própria. O dispositivo realiza medições de resistência do estator com o motor em operação. Possui alta precisão, mas o dispositivo tem que ser acoplado ao motor, o que o torna invasivo e com algum risco para o instalador.

3.1.5. Método E1 modificado de Becnel, Kilgore e Merril

Também muito parecido com o método de Hirzel com alteração na estimação da potência do entreferro quando do cálculo das perdas resistivas do rotor (reduz as perdas suplementares do estator da potência de entrada). Isto leva a um subdimensionamento das perdas rotóricas e a um aumento na estimativa da eficiência da máquina. Também reduz a estimativa das perdas suplementares para 90% do usado pelo IEEE.

3.1.6. Analisador de Performance Vogelsang & Benning

Dispositivo desenvolvido na Alemanha que faz a leitura de dados com o motor em operação e calcula a eficiência da máquina utilizando informações de dados de placa de fabricante armazenados no próprio dispositivo. O resultado é impresso imediatamente. Apresenta opções de cálculo com ou sem testes a vazio, sendo que a segunda opção diminui a precisão por utilizar apenas dados de placa do motor. Neste ponto convém ressaltar que os dados de placa, por norma, podem apresentar erros de até 20% para a velocidade.

3.1.6. Método ECNZ

Método Neozelandês que utiliza os padrões da IEC (International Electrotechnical Commission), cuja principal diferença para o padrão IEEE está na estimativa das perdas suplementares (0.5% da potência nominal). Este método realiza a medição de resistência do estator com o motor em operação através da injeção de tensões CC nos terminais de entrada e a leitura das correntes geradas.

3.1.7. Método da Angus Electronics

Possui um programa (MET – Motor Efficiency Test) para cálculo da eficiência a partir de dados coletados em testes com carga e a vazio. Segue o padrão IEEE (Métodos E e F) e também possui um dispositivo próprio para realizar as medições, mas que pode ser substituído por outros aparelhos disponíveis. É invasivo e pouco amigável, já que requer o domínio do software e apresenta precisão inferior ao padrão IEEE.

3.2 Métodos do Circuito Equivalente

Utiliza um circuito equivalente para representar o motor e calcular a eficiência do mesmo. A chave está em

determinar o valor das resistências e indutâncias do motor a partir de leituras de tensão e corrente de entrada ou de dados de placa. Trata-se do método que está sendo mais pesquisado atualmente devido às recentes melhorias nos métodos de estimação de sistemas não-lineares. Possuem a desvantagem de não representarem desequilíbrios de tensão e da não representação das perdas suplementares por um elemento de circuito, apesar de alguns métodos mais complexos apresentarem soluções para estes problemas. A Figura 4 mostra um circuito equivalente de um motor de indução.

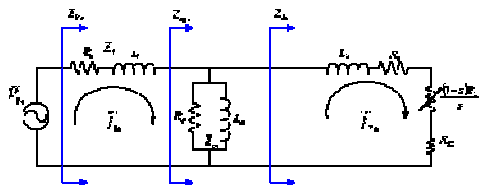


Figura 4 – Circuito equivalente de um motor de indução com resistência representando as perdas suplementares

3.2.1 Padrão IEEE – Método F1

Praticamente impossível de ser implementado em campo, este método apresenta quatro testes para o cálculo dos dados de impedância do motor, sendo que o mais preciso é o teste 3 que requer leituras com tensão e carga reduzidas e a vazio. Para complementar a determinação do circuito equivalente, requer uma estimativa da relação entre os valores das indutâncias do estator e do rotor ($X1/X2$). As perdas suplementares são calculadas a partir de tabela padrão.

3.2.2. Método Ontário Hidro simplificado

Similar ao anterior, porém elimina os testes com tensão reduzida, utiliza um circuito equivalente com as impedâncias do circuito magnético em série e ignora as perdas suplementares e mecânicas. Perde em precisão mas ganha um pouco em invasão, apesar de ainda requerer os testes com carga reduzida.

3.2.3. Método do Rotor Bloqueado

O mais invasivo de todos, pois requer testes com rotor bloqueado e com tensão reduzida. Adiciona um laço na representação do rotor, o que simplifica o cálculo matemático. Alta precisão, porém com baixa segurança da implementação.

3.2.4. Método ORMEL96

Menos invasivo de todos, utiliza um circuito equivalente com dois laços no rotor e utiliza apenas a medição de velocidade do motor, obtendo os demais dados a partir dos dados de placa ou padronizados. Utiliza uma resistência equivalente em série no circuito do rotor para representar as perdas suplementares. Perde em precisão em relação aos demais mas ganha em segurança, economia e facilidade de implementação.

3.2.5. Método de Bin Lu, Habetler e Harley

Usa um circuito equivalente como mostrado na Figura 5 para representar o motor e parte de dados de leitura de tensão e corrente em dois pontos de operação da medição e da resistência do estator. Apresenta um método não intrusivo para a medição desta resistência. Utiliza métodos numéricos não-lineares para estimar os demais parâmetros, mais especificamente os métodos de Newton, PSO e annealing, concluindo que o primeiro converge mais rapidamente, mas necessita de uma estimativa inicial do valor dos parâmetros.

3.2.6. Método de El-Ibiary

Similar ao anterior, porém necessita de uma medição da resistência do estator de uma maneira bastante intrusiva (sensores inseridos na carcaça) e não revela o método utilizado para resolver as não-lineares e equações multidimensionais. Apresenta alto grau de precisão de acordo com os resultados apresentados.

3.3 Métodos do Escorregamento

Partem do princípio de que, para o motor em operação, o torque é diretamente proporcional ao escorregamento, o que pode ser visualizado na Figura 5.

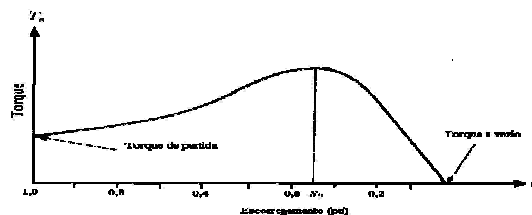


Figura 5 – Característica de Torque x Escorregamento de um motor de indução

3.3.1. Método Padrão de Escorregamento

Realiza medições de escorregamento (s) e de potência de entrada ($P_{entrada}$) e utiliza os dados de placa do motor de Potência nominal (P_{nom}) e escorregamento nominal (s_{nom}) para o cálculo da eficiência de acordo com a expressão abaixo.

$$\eta = \frac{746 \times P_{nom} \times s}{P_{entrada} \times s_{nom}} \quad (8)$$

O seu maior atrativo é a simplicidade, no entanto, os dados de placa de velocidade nominal podem apresentar erros permitidos por norma de até 20%.

3.3.2. Ontário Hidro do escorregamento compensado

Aperfeiçoa o método anterior incluindo os efeitos da tensão (V) sobre a eficiência do motor.

$$\eta = \frac{746 \times P_{nom} \times s \times V^2}{P_{in} \times s_{nom} \times V_{nom}^2} \quad (9)$$

Ainda assim apresenta uma baixa precisão.

3.3.3. Método do limite superior de escorregamento

Este método estabelece um valor máximo para o rendimento de um motor a partir do valor de seu escorregamento nominal. A expressão é simples ($\eta \leq 1 - s_{nom}$), porém sua aplicação é limitada e basicamente serve para comparar o rendimento de dois motores de mesma potência. Aquele com menor escorregamento (maior velocidade nominal) pode apresentar melhor eficiência em condições similares de operação.

3.3.4. Motor Master+

Analizador de eficiência que permite o cálculo por três métodos (escorregamento, corrente e potência de entrada). No caso da potência de entrada, calcula a estimativa de carga utilizando a eficiência a 100% da carga (η_{nom}) fornecida pelo fabricante, como segue:

$$Carga = \frac{P_{in}}{P_{nom} / \eta_{nom}} \quad (10)$$

A partir deste valor, utiliza dados de fabricante e de um banco de dados de motores testados para estimar a eficiência do motor no ponto de operação medido. Possui uma opção para motores rebobinados, reduzindo a eficiência em dois pontos. Apresenta baixa precisão, mas é pouco invasivo, econômico e seguro.

3.4. Métodos da Corrente/Outros

3.4.1. Método da Corrente

Fácil de implementar mas com pouca precisão, já que superestima a carga entre 10-20% ao não excluir a corrente de magnetização. Possui uma vantagem sobre o método do escorregamento, pois os dados de placa de corrente de placa (I_{nom}) são mais precisos e a corrente não é influenciada pela temperatura. O cálculo de eficiência é dado pela seguinte expressão.

$$\eta = \frac{I \times 746 \times P_{nom}}{I_{nom} \times P_{nom}} \quad (11)$$

3.4.2. BD Motor

Desenvolvido pela Eletrobrás é uma combinação dos métodos de corrente e Motor Master+. Utiliza os dados de corrente de entrada para calcular a carga do motor e faz uma interpolação dos dados de eficiência do fabricante para o ponto de operação calculado. Apresenta baixa precisão, mas está disponível gratuitamente e é de fácil implementação.

3.4.3. Método de Hsu, Scoggins e Sorensen do torque no entreferro

Parte de leituras instantâneas de corrente e tensão, de um teste em vazio e de um conjunto de equações integrais para calcular o torque no entreferro (T_{entref}). A

eficiência do motor é determinada pela seguinte expressão.

$$\eta = \frac{T_{entref} \times 2\pi \times (rpm / 60) - P_{MEC} - P_{SUP,R}}{P_{in}} \quad (12)$$

Apresenta alta precisão, mas é de difícil implementação e ainda requer um teste a vazio do motor. Trata-se uma área que vem sendo muito estudada.

3.4.4. Método SILEX de Torque no Entreferro

Equipamento desenvolvido na Hungria que usa as formas de onda de corrente e tensão para calcular o torque no entreferro. Não necessita de ensaio a vazio e apresenta menor precisão que o anterior. Requer um treinamento para o uso do equipamento.

3.4.5. Método SENTECH de medição de torque de saída

Método de alta precisão ($\pm 1\%$), mas de alto custo de implantação, já que requer a medição do torque no eixo do motor. Utiliza um sensor desenvolvido pela SENTECH para determinar o torque e velocidade baseado a partir de uma tecnologia a laser de medição de distorção torsional do eixo. Necessita que o motor seja desacoplado da carga para calibração do sensor.

3.4.6. Método de Ho e Chen

Variação do método do circuito equivalente, este método obtém um modelo matemático para simular o motor a partir de medições a vazio e com carga. Utiliza o método dos mínimos quadrados recursivo para calcular os parâmetros do modelo. Apresenta precisão média e é muito invasivo.

4. RESULTADOS

Para calcular a eficiência de motores, utilizamos a bancada de ensaio de motores do Laboratório de Eficiência Energética em Força Motriz LAMOTRIZ/DEE-UFC (montado com recursos da Eletrobrás). Esta bancada é composta por dois motores de indução trifásico de 10 CV cada, sendo um padrão e o outro de alto rendimento, ligados a uma mesma carga variável (um freio eletromagnético). Procedeu-se à determinação de cada um dos tipos de perdas utilizando os critérios definidos no padrão IEEE-112. Os resultados estão mostrados na Tabela 1 e comprovam a evolução do motor de alto rendimento, mais especificamente na redução de perdas resistivas e magnéticas, obtidas a partir de aumento de volume de material condutor e a utilização material ferromagnético de melhor qualidade. Também a partir dos dados levantados, foi levantada a curva de rendimento do motor de alto rendimento utilizando três métodos distintos, o método das perdas segregadas (IEEE-método E1), o Método da Potência (BDMotor) e o método da Corrente. O Resultado está mostrado na Figura 6.

Tabela 2 – Resultado de ensaios utilizando o padrão IEEE 112 Método B em Motores de 10 CV

Tipos de Perdas	Motor Padrão(W/%)	Motor Alto Rend.(W/%)
Resistivas do Estator	640/51,7	541/52,3
Resistivas do Rotor	181/14,6	175/16,9
Magnéticas	210/17,0	120/11,6
Mecânicas	52/4,2	44/4,3
Suplementares	154/12,4	155/15
Perdas Totais	1237/100	1035/100
Eficiência Nominal	0,85	0,88

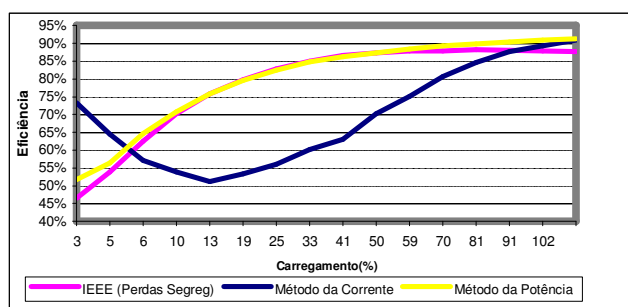


Figura 6 – Eficiência do motor de alto rendimento para diferentes métodos de cálculo

4.1. Decisão Econômica

A informação sobre a eficiência da máquina em operação é utilizada nos cálculos econômicos para a decisão do destino da mesma, se será substituída, remanejada, vendida ou reciclada. Daí a importância da precisão quando da escolha do método para o cálculo da eficiência. Para enfatizar esta importância, a Tabela 2 mostra os valores de eficiência calculados por diferentes métodos para um motor de 10 CV operando com 70% de seu carregamento, e a economia anual obtida com a substituição do mesmo por um motor de alto rendimento com $\eta = 0,94$.

Método Utilizado	Eficiência Calculada	Economia Anual
Perdas Segregadas	0,88	R\$ 297,00
Potência	0,89	R\$ 230,00
Corrente	0,81	R\$ 712,00

Tabela 1 – Economia Anual com a substituição de um Motor de 10 CV

Considerando o Método das Perdas Segregadas como o mais preciso, verifica-se que como a definição do método pode influenciar na decisão da substituição do motor, exagerando na economia (Método da Corrente) ou inviabilizando a troca (Método da Potência)

5. CONCLUSÕES

A primeira conclusão da pesquisa dos métodos para cálculo de eficiência é sobre quantidade. Dela podemos observar a importância que este tema possui na comunidade acadêmica e não acadêmica em todas as partes do planeta. Isto já era esperado considerando a a grande parcela de consumo de energia associada aos motores de indução. Uma análise mais apurada mostra que o horizonte de pesquisa e desenvolvimento sobre o tema, apesar de já ter sido exaustivamente analisado,

ainda apresenta áreas a serem exploradas. A modelagem matemática e a estimação de parâmetros estão entre os itens que apresentam mais inovações sobre o tema, mas o desenvolvimento de equipamentos para medições de características dos motores com pouca invasão sobre o processo também se mostram importantes.

A característica de precisão do método, por influenciar diretamente na análise econômica e na decisão sobre o destino do motor, mostrou-se mais importante que a sua invasão sobre a operação. Dentre os métodos analisados verificamos que o neozelandês ECNZ, do tipo perdas segregadas, apesar de um pouco invasivo, é o mais indicado por apresentar muita precisão ($\pm 1\%$). Destacamos também o método desenvolvido pela Eletrobrás (BDMotor), em sua opção de cálculo por Potência, que apresentou boa precisão ($\pm 4\%$) e a vantagem de não interferir na operação da máquina. O próximo passo para este trabalho é o desenvolvimento de um método voltado para a nossa realidade industrial.

6. REFERÊNCIAS

- Lu, B., Habetler, T. G., Harley, R. G. “ A Nonintrusive efficiency estimation method for in-service motor testing using a modified induction motor equivalent circuit”, Proceedings of the 37^a IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC’06), June 2006;
- El-Ibiary, Y. “ An accurate low-cost method for determining electric motors’ efficiency for the purpose of plant energy management”, IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 39, Nº 4, july/August 2003, pp. 1205-1210.
- Souto, Olívio Carlos do Nascimento. Modelagem e análise do desempenho térmico de motores de indução sob condições não ideais de alimentação. Tese de Doutorado. Uberlândia – MG. Universidade Federal de Uberlândia, 2001
- Standarts Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, ANSI/IEEE Standarts 112-1996;
- Glew, C. N. Stray Load Loss in induction motors: a challenge to academia. Power engineering Journal, February, 1998
- Nailen, R. L., “Stray load loss: What’s it all about?”, Electrical Apparatus Magazine, August, 1997;
- Kueck, J. D., gray, J. R., e outros “ Assessment of available methods for evaluating in-service motor efficiency”, REPORT OF Oak ridge national laboratory ORNL-TM_13237 managed by Lockheed Martin energy research Corporation, 1996.