

ANÁLISE DE RESULTADOS DA REGULAMENTAÇÃO DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTORES DE INDUÇÃO

- UM ESTUDO DE CASO -

Cássio T. C. Andrade¹, Francisco Rodrigo P. de Magalhães², 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: The efforts to reduce the energy consumption begin with its main load, the induction motor. There is a world agreement that this objective can be achieved by motors efficiency regulation. The Brazilian Government has already approved regulations establishing mandatory limits for Standards and High Efficiency Motors. This paper analyzes the results achieved so far through tests realized at LAMOTRIZ/DEE-UFC with both types of motors and points to the challenges to be overcome by the domestic industry to improve these machines efficiency. *Copyright © 2009 CBEE/ABEE*

Keywords: efficiency, induction motors, losses, regulation, premium.

Resumo: Os esforços para redução de consumo de energia elétrica começam pela sua principal carga, o motor de indução. Neste sentido existe um consenso mundial pela regulamentação dos índices mínimos de eficiência destes motores. O Brasil iniciou este processo e já possui regulamentação definindo limites obrigatórios para motores do tipo Padrão e de Alto Rendimento e até excluindo o primeiro tipo a partir de 2010. Este trabalho analisa os resultados obtidos até o momento através de testes em motores realizados no laboratório LAMOTRIZ/DEE-UFC. Apontando para os desafios a serem superados pela indústria nacional para a melhoria da eficiência destes motores.

Palavras Chaves: eficiência, motores de indução, regulamentação, premium, perdas.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, em várias partes do mundo existem esforços pela normatização de valores mínimos de eficiência de máquinas, equipamentos e processos. Já existem iniciativas, como a SEEEM ("Standards for Energy Efficiency of Electric Motor Systems) que tentam harmonizar todos estes esforços, que tiveram início na década de 70 e evoluíram para sistemas de etiquetagem e padronização de índices de eficiência, voluntários ou obrigatórios.

Os motores elétricos de indução trifásicos aparecem como prioridade nestas iniciativas por serem responsáveis pela maior parcela de consumo de energia no mundo (cerca de 1/3 do total). A sua padronização teve início com o Ato de Política Energética (EPAct) do Governo Americano, que adotou os índices do padrão NEMA para os motores fabricados e comercializados no país. Este padrão evoluiu até os atuais motores Premium, com índices médios de eficiência (η médio) de 93,3%. Esta iniciativa foi seguida em todas as regiões do mundo e no Brasil em particular através de legislação federal (Decreto 4508/2002 e Portaria Interm. 553/2005).

Neste trabalho, analisamos os avanços desta normatização nas principais regiões do mundo, destacando os avanços nacionais e comparando-os com os demais. Esta comparação enfatiza a diferença entre os índices que passarão a ser obrigatórios no Brasil a partir do início de 2010 (Motor de Alto Rendimento, η médio = 90,5%) em relação aos padrões já em vigor na Europa e América do Norte; e apresenta os desafios tecnológicos para a obtenção da redução de perdas no motor, levantando as necessidades de avanços na indústria nacional.

2 REGULAMENTAÇÃO DE MOTORES

Após a crise no abastecimento de energia elétrica no ano de 2001, o governo brasileiro passou a adotar medidas para melhorar a eficiência energética de máquinas e equipamentos consumidores de energia elétrica. Desta forma, passou a fazer parte de um seleto grupo de países que regulamentaram este assunto. As ações do governo brasileiro estão alinhadas com as iniciativas internacionais de regulamentação de índices mínimos de eficiência de motores de indução:

- 1992 - EUA – Promulgação do Ato de Política Energética (EPAct);
- 1997 - EUA – Adoção de Níveis Mínimos obrigatórios de Eficiência (Norma NEMA MG-1-1993)
- 2001 – EUA – Definição do Padrão de Motores Premium (Adesão Voluntária);

- 2001 - Europa – Definição do Padrão CEMEP de Motores, também de adesão voluntária (padrões Eff1, Eff2, Eff3)
- 2002 – Brasil – Adoção de dois índices de eficiência obrigatórios (Padrão e Alto Rendimento);
- 2005 – Brasil – Índice único de eficiência (Alto Rendimento), obrigatório a partir de julho 2010;
- 2008 – Europa – A IEC estabelece os padrões IEC1, IEC2, IEC3(similar ao Premium).

Tabela 1 – Diferenças de perdas em motores Premium X Alto Rendimento

| Potência Nominal (CV) | Redução de Perdas (Premium X Alto Rendimento) |
|-----------------------|---|
| 1 – 10 | -22,31% |
| 12,5 – 50 | -17,75% |
| 60 – 100 | -20,09% |
| 125 – 250 | -20,09% |

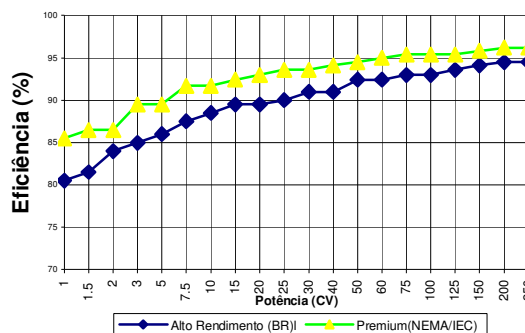


Figura 1 - Comparação entre os padrões de Alto Rendimento e Premium

3 DESAFIOS TECNOLÓGICOS

O motor de indução existe desde final do século 19 e suas características construtivas evoluíram junto com as melhorias em materiais e técnicas de fabricação. O primeiro modelo possuía a relação de 88Kg/KW, enquanto os modelos atuais chegam uma relação peso potência 15 vezes menor (cerca de 5,7 kg/kW). No entanto, esta tendência tende a se inverter um pouco em função da busca por melhores rendimentos.

A figura 2 representa a evolução atual dos motores, passando de um motor considerado padrão, para um alto rendimento e depois para um motor do tipo Premium. Note-se que a carcaça foi mantida, mas o aumento de material necessário para se obter uma melhor eficiência praticamente esgotou a capacidade da mesma. Para atingir os índices de eficiência Premium.

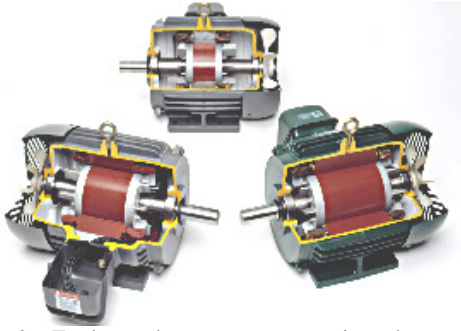


Figura 2 – Evolução de aspectos construtivos do motor de indução

3.1 Descrição das perdas

3.1.1 Perdas Resistivas

São a principal fonte de perdas e geração de calor de uma máquina de indução. São intrínsecas dos condutores da máquina (cobre ou alumínio) e provocam uma dissipação de potência em forma de calor de acordo com a seguinte expressão:

$$P_j = RI^2 \quad (1)$$

O valor da resistência também é afetada pela temperatura do condutor de acordo com o coeficiente de variação da resistência com a temperatura (α) da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_1 \Delta T} \quad (2)$$

Onde $\alpha_{\text{cu,al}} = 3,9 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e ΔR a variação de resistência a que é submetida a resistência R_1 a partir da variação de temperatura ΔT . Para cada variação de 10°C a que o condutor de cobre ou alumínio é submetido, ocorre uma variação de 3,9% no valor de sua resistência.

Outros fatores afetam o valor da resistência dos enrolamentos de uma máquina de indução, o efeito pelicular (skin effect) e efeito proximidade. Ambos estão associados à distribuição não uniforme da corrente pela área da seção transversal do condutor, o primeiro ocorre porque o centro do condutor é enlaçado por mais linhas de fluxo magnético que as extremidades, aumentando a indutância e reduzindo a corrente nesta região; o segundo se deve a distorção nos campos magnéticos provocados pela proximidade entre condutores, também causando distorções nas densidades de corrente.

O padrão IEEE (Std 112-1996) especifica o cálculo das perdas resistivas do estator ($P_{j,E}$) através da medição de sua resistência CC (R_{cc}) entre duas fases (devidamente corrigido para a temperatura de operação do motor) e da corrente do estator (I), utilizando a expressão:

$$P_{j,E} = \frac{3}{2} I^2 R_{cc} \quad (3)$$

As perdas joulícas do rotor ($P_{j,R}$) são obtidas a partir da medição do escorregamento do motor (s) e do valor de potência de entrada (P_{entrada}) e das perdas magnéticas (P_{Fe}):

$$P_{j,R} = (P_{\text{entrada}} - P_{j,E} - P_{Fe}) * s \quad (4)$$

3.1.2 Perdas Magnéticas

O circuito magnético de um motor é constituído do material ferromagnético presente no estator e no rotor e do entreferro que os separa. Neste circuito é induzido um campo magnético com intensidade proporcional à corrente do estator e com mesma frequência (no rotor, a frequência é a do escorregamento).

As perdas magnéticas se caracterizam por dois tipos: histerese, que é medida pela área no interior do ciclo de magnetização do circuito magnético do motor e pelas correntes parasitas de Foucault, que circulam no núcleo ferromagnético devido a uma pequena característica condutora do mesmo. Estas correntes parasitas tendem a se opor à variação da densidade de fluxo, “alargando” a curva de histerese e, consequentemente, aumentando as perdas.

O padrão IEEE implementa um teste a vazio com o motor para determinar as perdas magnéticas (P_{Fe}) e mecânicas (P_{Mec}) em conjunto, a partir da seguinte expressão:

$$P_{Fe} + P_{Mec} = P_{\text{entrada, vazio}} - P_{j,E, \text{vazio}} \quad (5)$$

A separação das perdas magnéticas das perdas mecânicas é feito em outro teste a vazio reduzindo-se a tensão de alimentação do motor desde 125 % da tensão nominal até um valor em que ocorre um acréscimo de corrente.

3.1.3 Perdas Mecânicas

Não dependem das condições operacionais da máquina e ocorrem devido ao atrito dos enrolamentos que fixam o rotor à máquina e à ventilação necessária para retirar o calor gerado na mesma. O método padronizado para o seu cálculo foi descrito no item anterior e pode ser visualizado na Figura 2:

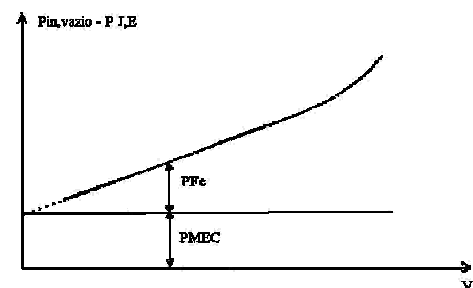


Figura 2 – Separação das Perdas Mecânicas e Magnéticas a partir do teste a vazio

3.1.4 Perdas Suplementares

Definida como as perdas que não podem ser classificadas naquelas já descritas, são as mais difíceis de ser determinadas, tanto que ainda são consideradas um desafio para a engenharia. São causadas pelas imperfeições construtivas da máquina, como as ranhuras para passagem dos enrolamentos, a inclinação transversal dos barramentos do rotor (skew), as conexões dos enrolamentos e o entreferro, que provocam descontinuidades nos componentes dos campos magnéticos, que por sua vez induzem perdas extras na máquina com o aparecimento de novas correntes parasitas no núcleo magnético e também aumentando as perdas resistivas dos condutores. Consomem cerca de 2 % da potência da máquina, distribuídas conforme a Figura 3 para um motor de 30 CV.

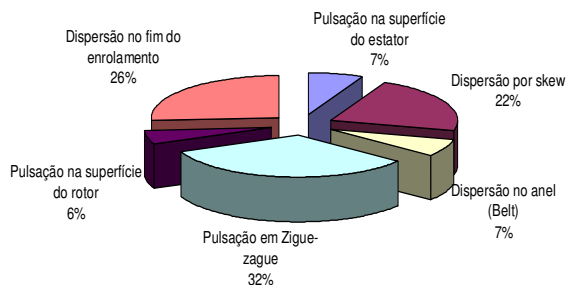


Figura 3 – Distribuição percentual dos componentes das Perdas Suplementares (Motor 30 CV)

O IEEE apresenta um método para o cálculo das perdas suplementares extremamente invasivo. Para o cálculo das perdas no estator, o rotor deve ser extraído da máquina e deve ser aplicada uma tensão balanceada aos terminais do estator. A Potência de entrada subtraída das perdas júllicas do estator é igual à perda suplementar no estator ($P_{Sup,E}$).

Para o cálculo das perdas suplementares no rotor é necessário um teste com rotação reversa síncrona com

leituras das potências mecânicas necessárias para girar reversamente o rotor com (P_r) e sem (P_f) uma tensão aplicada nos terminais do estator. As Perdas suplementares em alta frequência ($P_{Sup,R}$) são obtidas pela expressão:

$$P_{Sup,R} = P_r - P_f - P_{entrada} - P_{Sup,E} - P_{J,E} \quad (6)$$

Uma outra opção que o IEEE apresenta para a determinação das perdas suplementares é a utilização de uma tabela com valores percentuais da potência nominal da máquina. O novo padrão IEC (IEC 60034-2 Ed. 4) utiliza o método alemão Eh-Star para o cálculo destas perdas. Trata-se de um método menos invasivo, com medições de tensão e corrente em todas as fases do estator ligado em estrela, e que resulta em um valor destas perdas com alta precisão.

3.2 Meios para Redução das Perdas

Existem três formas de se aumentar a eficiência de uma máquina de indução: aumentando ou aperfeiçoando o material ativo da máquina; otimizando o design da máquina; e aperfeiçoando os processos de fabricação. A primeira atua nas perdas resistivas e magnéticas através do aumento da seção transversal dos condutores, da utilização de materiais novos (barramentos de cobre no rotor) e de alto desempenho (núcleos com laminações de alta performance). A segunda tem efeitos nas perdas mecânicas e suplementares através do aumento da taxa de transferência de calor entre as partes ativas e o ambiente, da otimização da distância de entreferro e das geometrias do rotor e do estator, da redução dos diâmetros dos ventiladores, e do uso de rolamentos de alta eficiência. A última forma reduz basicamente as perdas suplementares otimizando os processos de inserção dos barramentos condutores no núcleo do rotor. Existe uma inter-relação entre todos estes procedimentos que devem ser cuidadosamente analisados pelo fabricante para que a redução de um tipo de perda não provoque o aumento de outra.

A Tabela 2 sumariza os diferentes padrões de eficiência de motores e as formas de se aprimorar estes índices.

Tabela 2 – Comparação entre padrões de motores

| Motor | Denominação | Índice de Eficiência Médio(%) | Meios para reduzir as perdas |
|-----------------|--|-------------------------------|--|
| Padrão | Pre-EPA (USA), Padrão (Brasil), IE1 (IEC/Europe) | 88,7 | <ul style="list-style-type: none"> Aumenta o volume de material ativo Enrolamentos de dupla camada materiais de alta performance Tratamento térmico na superfície do rotor Otimização do diâmetro do entreferro Melhorar o design do ventilador Aumentar a taxa de transferência de calor Rolamentos de alta eficiência otimização de processos de fabricação Rotor com barramentos de cobre |
| Alto Rendimento | EPA (NEMA/USA), High-Efficiency (Brasil), IE2 (IEC/Europe) | 90,5 | |
| Premium | Premium (NEMA/USA), IE3 (IEC/Europe) | 93,3 | |
| Super Premium | IE4 (IEC/Europe) | Em análise | |

4 RESULTADOS E DESAFIOS

Para verificar a evolução da eficiência em motores nacionais, utilizamos as instalações do Laboratório de Eficiência Energética em força motriz - LAMOTRIZ/DEE-UFC, que possui dois motores de indução trifásico de 10 CV (um do tipo padrão e o outro do tipo alto rendimento) ligados a uma mesma carga variável (um freio eletromagnético), e procedemos à determinação de cada um dos tipos de perdas utilizando os critérios definidos no padrão IEEE-112. A Figura 4 mostra os resultados dos testes comprovando 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 apresentamos, na Figura 5, a comparação entre um motor de Alto Rendimento e um Premium de maior Potência (150 hp), de onde concluímos que as inovações para a melhoria de eficiência diferem com a faixa de potência. Em motores de menor potência, a maior preocupação é com as perdas resistivas e magnéticas, enquanto nas maiores potências, as perdas mecânicas aumentam sua participação percentual e exigem cuidados específicos. As Perdas Suplementares a muito tem sido objeto de inovações de design e de processos de fabricação e a sua redução em alguns casos produz aumentos nas demais perdas.

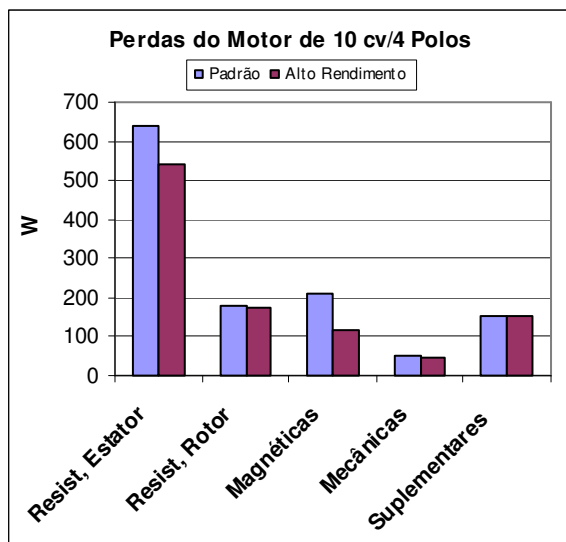


Figura 4 – Comparação das perdas entre motores Padrão e Alto Rendimento de 10 cv, 4 pólos.

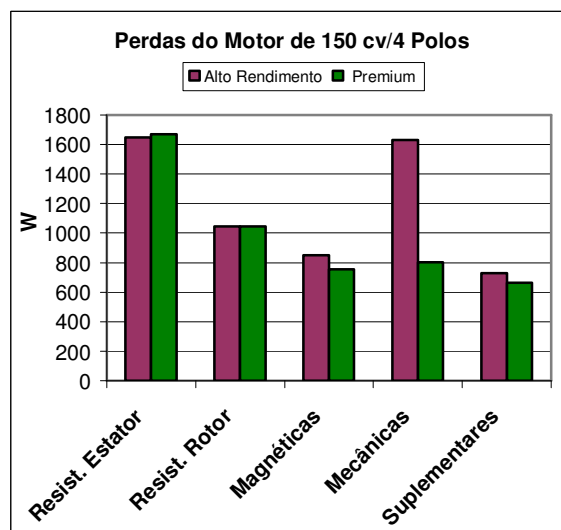


Figure 5 – Comparação das perdas entre motores Padrão e Alto Rendimento de 150 cv, 4 pólos,

5 CONCLUSÕES

Atualmente, cerca de 15% dos motores de indução fabricados no Brasil são do tipo Alto Rendimento, enquanto nos Estados Unidos, os motores Premium já representam 16% do total. Como verificado, as alterações impostas nos índices de eficiência do Brasil, apesar de ainda inferiores aos padrões internacionais, já produziram alguns efeitos em pequena escala, porém, quando se tornarem obrigatórios a partir de 2010 poderão trazer dificuldades para os fabricantes. A comparação entre os motores Padrão e de Alto rendimento comprova os avanços obtidos na indústria nacional, porém a diferença entre os índices nacionais (Alto Rendimento) e os internacionais (Premium) alerta para uma necessidade de avanço nas pesquisas de materiais, design e processos de fabricação de motores de indução.

6 REFERÊNCIAS

- Bonnett, A. H., C. Yung, "Increased Efficiency Versus Increased Reliability", IEEE Industry Applications Magazine, Jan/Feb 2008.
- Fuchsloch, J. F., W. R. Finley, R. W. Walter, "The Next Generation Motor", IEEE Industry Applications Magazine, Jan/Feb 2008.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, 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;

Conrad U. Brunner, Anne A. Niederberger, Aníbal. T. Almeida, H. Keulenaer, “Normas de Eficiência Energética: Construindo uma Comunidade Internacional”, Revista Eletricidade Moderna, pp. 280-300, Brasil, Julho de 2008;

MME – Ministério das Minas e Energia, Lei de Eficiência Energética (Lei 10.295/2001, Decretos 4059/2001 e 4508/2002, Portarias Interministeriais MME-MCT-MDIC 553/2005, 362/2007, 363/2007, 364/2007 e 298/2008, Disponível em www.mme.gov.br, Acesso em 10/09/2008;