

ECONOMIA DE ENERGIA EM MOTORES ELÉTRICOS

João Roberto Cogo
Escola Federal de Engenharia de
Itajubá

Jocélio Souza de Sá
GSI – Engenharia e Comércio Ltda.

Adalberto Luiz de Oliveira
Aracruz Celulose S.A.

Artigo apresentado no Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XIII SNPTEE) - FL/STC/07 - Balneário de Camboriú/SC, 01- 05/10/95

RESUMO

Os resultados completos obtidos através de testes em 32 (trinta e dois) motores de indução trifásicos com potências nominais compreendidas entre 3 e 100 [CV], de 4 (quatro) fabricantes Brasileiros, entre outras razões, levaram à necessidade de revisar as normas Brasileiras de especificação de motores e permitiu desenvolver modelos para determinação das perdas, a partir da medição da corrente absorvida pelo motor, com bastante precisão. Assim, pretende-se apresentar, os resultados e a metodologia empregada para avaliar o potencial de economia de energia elétrica em uma indústria de grande porte envolvendo 553 motores com potências variando entre 0,75 a 135 [KW].

PALAVRAS CHAVE

Motores de indução, Economia de energia, Payback, Rendimento, Perdas.

1.0 INTRODUÇÃO

O projeto de norma NBR 7094 referente a “Máquinas Elétricas Girantes - Motores de Indução - Especificação”, cujo edital para votação encerrou-se em 03/04/95 estabelece que o rendimento deve fazer parte obrigatória dos dados de placa dos motores. Assim de posse da corrente, tensão e potência nominais as quais também deverão fazer parte dos dados de placa é possível obter o fator de potência nominal. Embora este fato seja um avanço, ainda não será desta vez que uma norma brasileira deva merecer destaque internacional, visto que, a definição do valor do rendimento a ser inserido como dado de placa deverá representar uma média de um “número muito grande de motores”.

O motivo da preocupação com os motores de indução trifásicos (MIT) esta baseado no fato que eles representam, praticamente, 55% do consumo de energia elétrica nas indústrias e estas representam 50% do consumo do sistema interligado. Assim sendo, os motores de indução, são responsáveis por no mínimo 25% do consumo total de energia elétrica no país, e portanto as perdas a eles associadas podem atingir alguma coisa em torno de 1,2 [GW]. Estas perdas, embora relevantes ao sistema elétrico interligado representam um custo bastante significativo para a indústria e, procurando-se reduzi-las fez-se para uma indústria do setor de papel e celulose um

levantamento específico visando identificar o valor real das perdas e, se seria viável, utilizar novos motores para substituir os já existentes. Os primeiros números, animadores, permitiram desenvolver uma metodologia criteriosa para se verificar os custos, as vantagens e as desvantagens de tal aplicação.

2.0 METODOLOGIA EMPREGADA

A identificação, a estimativa e o custo das perdas associados a um motor de indução trifásico (MIT) não é simples de ser feita com precisão. Dentro deste contexto, para se dar uma maior credibilidade aos custos envolvidos com as perdas desenvolveu-se uma modelagem específica envolvendo as seguintes etapas:

- levantamento dos dados técnicos dos motores nos acionamentos a serem analisados;
- medições em campo e registros de grandezas elétricas para composição dos dados de arquivo;
- avaliação do acionamento com base nos dados técnicos dos motores e nos dados de medições.

Embora os dados de catálogos representem uma média de muitos motores utilizou-se este recurso pelo fato deles estarem sempre disponíveis. Por outro lado embora os dados de placa do motor fiquem mais próximos da realidade eles são, atualmente, insuficientes para os objetivos deste trabalho.

Já a medição em campo pode dar um melhor panorama acerca da situação operacional do motor sem condutor permitir, de um modo simples, a definição das perdas do mesmo. Assim, tomou-se como base para a determinação das perdas dos motores o seguinte:

- 1 - Corrente, potência e tensão nominais e o número de pólos do motor inscritos na placa dos mesmos. A ausência destes dados retira o motor da análise para a determinação do custo das perdas;
- 2 - Corrente de partida, escorregamento nominal, conjugado máximo (de inflexão) e conjugado de partida, disponíveis em catálogo;
- 3 - Medição e levantamento de dados em campo. Para a medição utilizou-se equipamento apropriado visando-se determinar a corrente e a tensão de operação do motor. Se a tensão não estivesse dentro de uma faixa compreendida entre +5% a -7,5% da tensão nominal do motor

desprezava-se este barramento para a determinação do custo das perdas.

De posse destes valores utilizou-se um modelo onde se verificou a sua validade em laboratório ([1], [2]) e assim a modelagem adotada, basicamente, seguir o fluxograma mostrado na Figura 1 para o motor representado pelo circuito equivalente indicado na Figura 2.

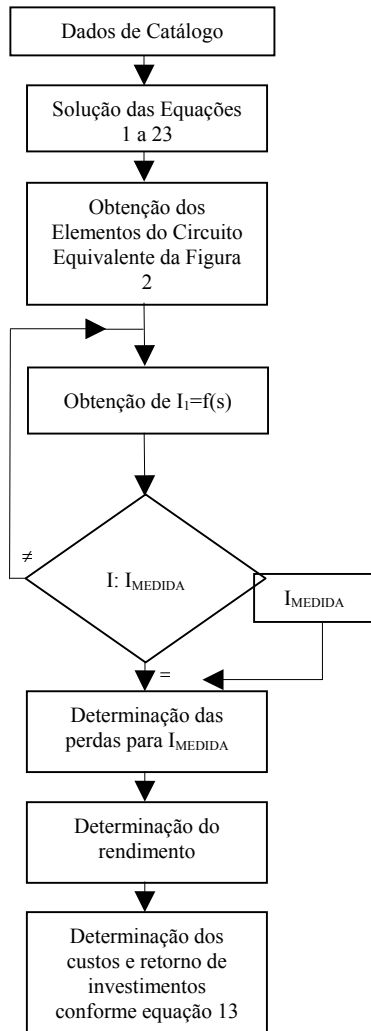


Figura 1 - Fluxograma para determinação das perdas e custos a elas associados de um MIT

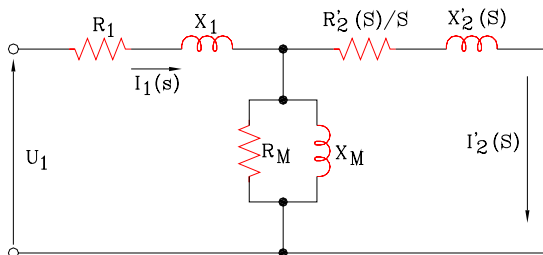


Figura 2 - Modelo do motor em análise.

Na Figura 2 tem-se:

U_1 - tensão de fase aplicada ao enrolamento do estator [V]

I_1 - corrente no enrolamento do estator [A]

R_1 - resistência por fase do enrolamento do estator [Ω]

X_1 - reatância de dispersão por fase do enrolamento do estator [Ω]

I_M - corrente de magnetização [A]

X_M - reatância de magnetização [Ω]

R_M - resistência para representação das perdas no ferro [Ω]

I'_2 - corrente no enrolamento do rotor, referida ao estator [A]

X'_2 - reatância de dispersão por fase do enrolamento do rotor referida ao estator [Ω]

R'_2 - resistência do enrolamento do rotor por fase referida ao estator [Ω]

s - escorregamento do motor

3.0 EQUACIONAMENTO

As equações utilizadas para a determinação dos parâmetros dos circuito equivalente do motor (vide Figura 2), conforme [2] são apresentadas a seguir.

$$s_k = s_n \left[\bar{M}_k + \sqrt{\bar{M}_k^2 - 1} \right] \quad (1)$$

$$\bar{M}_k = M_k / M_N \quad (2)$$

$$R_{2N} = \frac{s_N P_N}{3(1 - s_N) \left\{ I_N^2 \cos^2 \psi_N \left[1 + \left(\frac{s_N}{s_k} \right)^2 \right] \right\}} \quad (3)$$

$$R = R_{2N} / s_N \quad (4)$$

$$a = R \left(R_1 - \frac{U_N}{I_N} \cos \psi_N \right) - \quad (5)$$

$$- X_1 X_{2Np} + X_{2Np} \frac{U_N}{I_{1N}} \sin \psi_N$$

$$b = X_1 + X_{2Np} - \frac{U_N}{I_N} \sin \psi_N \quad (6)$$

$$X_M = a/b \quad (7)$$

$$c = 3[U_N^2 + I_N^2(R_1^2 + X_1^2)] - 2U_N I_N (R_1 \cos \psi_N + X_1 \sin \psi_N) \quad (8)$$

$$d = (1 - K) \left[\frac{1}{\eta_N} - 1 \right] P_N \quad (9)$$

$$R_M = c/d \quad (10)$$

A relação entre as perdas no cobre do estator (P_{j1}) e do rotor (P_{j2}) e as perdas nominais é dada por:

$$K = \frac{P_{j1} + P_{j2}}{P_N \left[\frac{1}{\eta_N} - 1 \right]} = \frac{3R_1 I_N^2 + 3R_2' I_N^2}{P_N \left[\frac{1}{\eta_N} - 1 \right]} \quad (11)$$

Admite-se ainda, conforme [3], que a relação entre X_1 e X_{2p} é dada por:

$X_1/X_{2p} = 1,00$ - para motores de categoria D e motores de anéis

$X_1/X_{2p} = 1,67$ - para motores de categoria N

$X_1/X_{2p} = 0,43$ - para motores de categoria H

$$X_{2NP} = R_{2N}/s_K - X_1 \quad (12)$$

Corrigindo-se R_{2N} e X_{2NP} e referindo-os ao estator tem-se:

$$e = s_N \left\{ R - [R^2 + (X_{2NP})^2]/R_M \right\} \quad (13)$$

$$f = 1 - (2R/R_M) + [(R^2 + (X_{2NP})^2)/(R_M)^2] \quad (14)$$

$$R'_{2N} = e/f \quad (15)$$

$$X'_{2NP} = X_{2NP}/f \quad (16)$$

Para a condição de partida ($s=1$) tem-se:

$$R_{2p} = \frac{2\pi M_p n_1}{180 I_{1p}^2} \quad (17)$$

logo:

$$X'_2(s) = X'_{2NP} e^x \quad (18)$$

$$x = \frac{[\ln(X_{2p}) - \ln(X'_{2NP})]}{(\sqrt{1-s_k})} \cdot \sqrt{s-s_k} \quad (19)$$

$$R'_2(s) = R'_{2N} e^r \quad (20)$$

$$r = \frac{\ln(R'_{2p}) - \ln(R'_{2N})}{\sqrt{1-s_k}} \cdot \sqrt{s-s_k} \quad (21)$$

Nas equações (1) a (21) tem-se:
 n_1 , I_N e P_N - dados de placa do motor.
 $\cos\psi_N$, s_N , M_K , M_N , M_p e I_{1p} - dados de catálogo.

Para a determinação do custo das perdas dos motores, conforme [4], utilizou-se as expressões mostradas a seguir:

$$CCE = (8760) (FF) (CE) (FC) (PE) \quad (22)$$

onde:

CCE - Custo da energia elétrica

FF - Fator financeiro

$$FF = [(I + 1)^T - 1] / [I(I + 1)^T] \quad (23)$$

I - Taxa de juros

T - Tempo que o recurso financeiro será utilizado.

CE - Custo da energia em US\$ por KWh

FC - Fator de carga

PE - Potência elétrica média

A determinação da potência elétrica média relativa as perdas (PE) de um motor foi determinada com base no circuito da Figura 2, corrente medida e fluxograma da Figura 1. Adotou-se ainda:

$$CE = 0,045 \text{ [US\$/KWh]}$$

$$I = 0,12$$

4.0 RESULTADOS OBTIDOS

A análise econômica relativa ao consumo de energia elétrica em 553 motores de indução trifásicos. e referentes à substituição ou não dos mesmos e os respectivos “paybacks”.

Resumidamente, os “paybacks” tem por objetivo, para todos os motores analisados (vide Tabela 1), obter qual é o intervalo de tempo mínimo que se espera, a partir do qual, o valor investido para a compra de um novo motor e serviços a ele associados, fique igual ao custo da energia elétrica relativa a diferença entre as perdas do motor atual e o novo.

Por outro lado as Tabelas 2 a 7 apresentadas a seguir referem-se à potência que é possível de se economizar com a substituição dos motores existentes por outros mais adequados, porém considerando-se apenas os 297 motores que se encontravam mais sobredimensionados para as diversas faixas de potência. Além disso dividiu-se o setor da indústria em análise em 5 áreas (A1, A2, A3, A4 e A5), conforme mostram as Tabelas 2 a 7.

Payback Meses	Motores		Total
	Normais	Alto Rend.	
0 - 24	11	40	51
24 - 36	18	65	83
> 36	103	316	419
Total Geral			553

4.1 Payback Até 24 Meses

O número maior de sugestões para substituições refere-se a motores de alto rendimento em duas áreas da unidade fabril. Verifica-se que para a área A1 foram feitas 17 recomendações de substituições e para área A2 resultou 9 recomendações.

A substituição por motores normais, na área A1 envolve o número maior de recomendações, ou seja 9. A potência dos motores que é possível ser economizada após a substituição está apresentada nas Tabelas 2 e 3.

4.2 Payback de 24 a 36 Meses

O número maior de sugestões para substituições refere-se à motores de alto rendimento. Na área A1 são sugeridas 11

substituições e na área A2 recomenda-se 10 substituições.

Com relação aos motores normais, a área que apresentou o maior número de motores a serem substituídos foi a A2 com 8 recomendações. A potência dos motores que é possível ser economizada após a substituição está apresentada nas Tabelas 4 e 5.

4.3 Payback Acima de 36 meses

O número maior de sugestões para as substituições também refere-se à motores de alto rendimento. As áreas que apresentaram o maior número de recomendações para as substituições foram a área A3 com 97 recomendações, a área A4 com 50 recomendações e finalmente a área A5 com 44 recomendações.

Para os motores normais, nas áreas A1 e A4 ocorrem o número maior de recomendações, com 21 recomendações em cada uma (vide Tabelas 6 e 7).

5.0 CONCLUSÕES

O procedimento efetuado de acordo com o fluxograma da Figura 2 para cada acionamento, permitiu obter os seguintes resultados:

- potência da carga do acionamento (P_c)
- perdas do motor atual do acionamento (P_{TA})
- recomendações de um novo motor compatível com a potência da carga.
- perdas do novo motor (P_{TN})
- perdas possível de ser economizada com a substituição ($P_T = P_{TA} - P_{TN}$)

A partir destas informações, estabelecido os custos da energia elétrica e do novo motor, determinou-se qual deve ser o tempo necessário para que os custos, da diferença entre as perdas dos motores atuais e dos novos, fique igual ao investimento a ser feito, considerando-se as taxas financeiras usuais.

O gráfico (vide Figura 3), apresenta os resultados comparativos de custo do motor versus custo das perdas para um horizonte de 5 anos. Note que o custo das perdas torna-se muito maior que o próprio custo do motor, e desta forma é fundamental que a adequação motor - carga - rendimento deva ser feito com critério de modo que os custos das perdas não prejudiquem o investimento.

Os resultados, apresentados nas tabelas permitem que a indústria em análise possa determinar o custo do investimento a ser feito e o retorno do investimento, após a “payback”

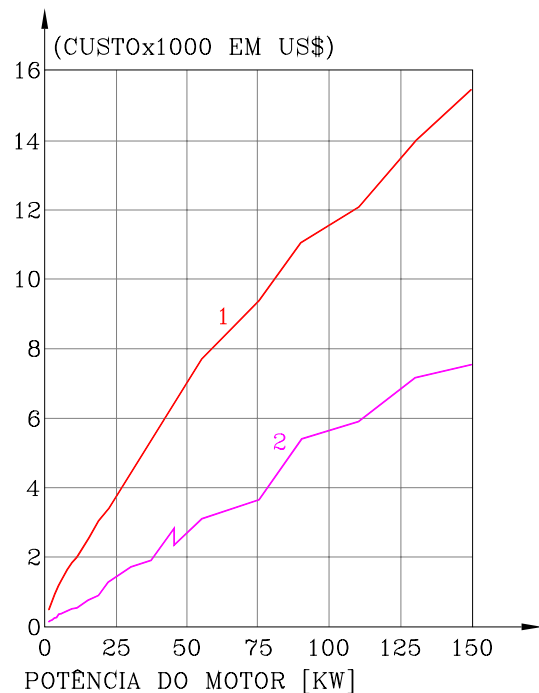


Figura 3 - Comparação entre os custos do motor e das perdas para um horizonte de 5 anos.

Na Figura 3 tem-se:

- Curva 1 - Custo das perdas em cinco anos;
- Curva 2 - Custo do motor em cinco anos.

6.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] Cogo, J. R. e outros: - Relatório técnico final referente a Avaliação do Desempenho dos Motores Elétricos Trifásicos - Convênio EFEI / FUPAI / ELETROBRÁS / CEMIG / PROCEL. - 1990.
- [2] Sá, J. S.: - Contribuição a Análise do Comportamento Térmico de Motores de Indução Trifásicos com Rotor do Tipo Gaiola. - FEE - Unicamp - Tese de Doutorado - 1989.
- [3] NBR 5383 - Máquinas Elétricas Girantes - Máquinas de Indução - Determinação das Características - 1982.
- [4] “IEEE Recommended Practice for Energy Conservation and Cost - Effective Planning in Industrial facilities - IEEE Std 739-1984”.

Tabela 2 - Motores Normais

Área com maior nº de recomendações de substituição	Faixa de Potência [KW]	% em relação ao nº total de motores da área	Total de Potência economizada [KW]
A1 (9 recomendações)	0,75-7,5	77,78	2,68
	8,3 - 15,0	22,22	1,99

Tabela 3 - Motores de Alto Rendimento			
Área com maiores nºs de recomendações de substituições	Faixa de Potência [KW]	% em relação ao nº total de motores da área	Total de Potência economizada [KW]
A1 (17 recomendações)	0,75-7,5	88,24	8,34
	8,3 - 15,0	11,76	2,37
A2 (9 recomendações)	0,75-7,5	88,89	4,28
	8,3-15,0	11,11	0,98

Tabela 4 - Motores Normais			
Área com maior nº de recomendações de substituição	Faixa de Potência [KW]	% em relação ao nº total de motores da área	Total de Potência economizada [KW]
A2 (8 recomendações)	0,75-7,5	50,00	2,47
	8,3 - 15,0	50,00	0,98

Tabela 5 - Motores de Alto Rendimento			
Área com maiores nºs de recomendações de substituições	Faixa de Potência [KW]	% em relação ao nº total de motores da área	Total de Potência economizada [KW]
A1 (11 recomendações)	0,75 - 7,5	9,09	0,20
	8,3 - 15,0	90,91	12,97
A2 (10 recomendações)	0,75 - 7,5	50,00	1,04
	8,3 - 15,0	50,00	7,40

Tabela 6 - Motores Normais			
Área com maior nº de recomendações de substituições	Faixa de Potência [KW]	% em relação ao nº total de motores da área	Total de Potência economizada [KW]
A4 (21 recomendações)	0,75 - 7,5	42,86	1,02
	8,3 - 15,0	14,29	1,21
	23,3 - 30,0	23,81	5,10
	30,8 - 37,5	19,04	4,38
A1 (21 recomendações)	0,75 - 7,5	52,38	1,11
	8,3 - 15,0	38,10	4,21
	105,8 - 112,5	4,76	3,63
	128,3 - 135,0	4,76	4,25

Tabela 7 - Motores de Alto Rendimento			
Área com maior nº de recomendações de substituições	Faixa de Potência [KW]	% em relação ao nº total de motores da área	Total de Potência economizada [KW]
A3 (97 recomendações)	0,75 - 7,5	78,35	10,75
	8,3 - 15,0	14,43	5,68
	15,8 - 22,5	3,10	2,41
	23,3 - 30,0	2,06	1,64
	30,8 - 37,5	2,06	3,22
A4 (50 recomendações)	0,75 - 7,5	60,00	5,60
	8,3 - 15,0	18,00	4,84
	15,8 - 22,5	4,00	1,15
	23,3 - 30,0	2,00	0,77
	30,8 - 37,5	10,00	7,22
	128,3 - 135,0	6,00	13,54
A5 (44 recomendações)	0,75 - 7,5	45,45	3,49
	8,3 - 15,0	34,09	4,61
	15,8 - 22,5	4,55	1,29
	23,3 - 30,0	2,27	0,75
	53,3 - 60,0	9,09	6,01
	128,3 - 135,0	4,55	5,99