

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM MOTORES ELÉTRICOS

João Roberto Cogo*
Jocélio Souza de Sá*
Héctor Arango*

* Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá/MG
* FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, Itajubá / MG
* GSI – Engenharia e Comércio Ltda.
Rua José Joaquim, 481. Fone: (35) 622-2337. Itajubá / MG

Artigo apresentado no 5º Congresso Brasileiro de Energia - Rio de Janeiro/RJ - 22-26/10/1990

RESUMO

A correta escolha do parque motor de uma indústria é um fator relevante nos custos de produção. Neste trabalho, são focalizadas as metodologias que permitem quantificar a inter-relação entre a potência, o rendimento e os preços dos motores elétricos de indução e da energia elétrica de modo a se obter a máxima economia e desempenho.

ABSTRACT

The correct choice of the driving facility of an industry is a relevant feature in the production costs. In this work, the methodologies which allow to evaluate the interplay among power, efficiency and the induction electrical motors and the electric power prices are focused so as to obtain maximum saving and performance.

INTRODUÇÃO

O preço da energia elétrica no Brasil vai inevitavelmente crescer nos próximos anos. Assim, os aspectos econômicos da utilização de eletricidade serão cada vez mais ponderáveis na eficiência dos processos industriais. Nesta utilização, o motor elétrico é uma peça fundamental. Assim, a aquisição de unidades com potência e características bem adequadas à sua função contribui de modo substancial para garantir a competitividade da indústria.

Observa-se, por vezes, um certo amadorismo na forma de comprar os motores elétricos nas empresas, o que pode acarretar à elevações insuspeitadas dos custos de produção.

Isto pode ser resolvido através de uma análise técnico-econômica, que otimiza o desempenho, em função do binômio: encargos financeiros do investimento e o valor atual das perdas futuras.

Apresentam-se, neste trabalho, algumas reflexões sobre esta matéria mostrando, através de exemplos práticos, como quantias apreciáveis podem ser poupadas ao se adotar os métodos propostos.

ECONOMIA DE ENERGIA EM MOTOR ELÉTRICO

O custo da energia que o motor consome durante sua vida útil pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$VCE = (FF) * (CE) * (ECA) = (FF) * (CE) * (8760 * FC * PE) \quad (1)$$

na qual tem-se:

VCE - valor (ou custo) do consumo de energia elétrica pelo motor;

FF - fator financeiro (depende da taxa do custo do dinheiro (I) por ano e do tempo (T) que o recurso financeiro será utilizado).

$$FF = \frac{1 + I - \frac{1}{(1+I)^{(T-1)}}}{I}$$

CE - custo da energia em dólar americano por KWh (U\$A / KWh);

ECA - energia consumida por ano.

Note que:

$$ECA = FC * PE \quad (2)$$

sendo:

FC = fator de carga do motor;

PE = potência média que o motor absorve da rede em [KW].

$$PE = \frac{P_N}{\eta}$$

onde:

P_N = potência média (no eixo) do motor em [KW];

η = rendimento do motor.

Estudos efetuados pelo Edison Electric Institute mostram que o custo do [KWh] elétrico em dólar americano terá a seguinte evolução futura:

ANO	CUSTO DO [KWh] (U\$A / KWh)
1990	0,05
1995	0,075
2000	0,10
2005	0,12
2010	0,13

Nessas condições, um motor de 100 [KW], cujo custo é de aproximadamente 4.000 [U\$A] vai consumir, em 10 anos de vida útil, a um fator de carga de 0,5, com uma taxa de custo do dinheiro de 0,1, rendimento 0,9 e custo 0,07 [U\$A / KWh], o seguinte valor:

$$VCE = (6,75902) * (0,07) * (8760 * 0,5 * 100) / (0,9) = 230.257 \text{ [U$A]}$$

ou seja, aproximadamente 60 vezes o valor de compra do motor. Para um motor deste rendimento, mais de dez por cento da potência que o mesmo absorve da rede (consumo) corresponde as perdas. Conclui-se, então, que no caso apresentado, as perdas do motor representam alguma coisa em torno de 6 vezes seu próprio preço.

Em outras palavras, quando se compra este motor, por cada dólar pago há outros 6 implicitamente gastos, que representam o custo embutido (e atualizado) das perdas que nele acontecerão durante sua vida futura.

Por outro lado, um motor de 100 [KW], e rendimento 90% terá 11,1 [KW] de perdas, irá obrigar as concessionárias fornecedoras de energia elétrica a investirem em obras de reforço do sistema de atendimento, desde a geração até o nível de tensão de fornecimento. O custo destas obras vai depender tanto da energia firme, como do grau de utilização do motor durante as pontas de geração, transmissão e subtransmissão, mas pode ser estimado, em média, como algo equivalente a 18.000 [U\$A].

Finalmente, as perdas adicionais que estes 11,1 [KW] vão causar no sistema de alimentação, incluindo o trecho dentro da própria indústria, até as centrais geradoras, utilizando-se os índices de perdas estimadas nesta cadeia de suprimento é de se esperar, que cada KW de perda no motor, induza a 0,2 [KW] de perdas adicionais no sistema. Este valor não é tão elevado como os anteriores, porém contribui para que, no total, o efeito econômico das perdas destes motores signifiquem algo em torno de 10 vezes o seu preço de compra, ao longo dos seus 10 anos de vida útil.

Deve-se ressaltar que este cálculo é feito na suposição de que o motor está operando corretamente. Caso o ponto de funcionamento se desvie daquelas condições especificadas pelo fabricante, o efeito econômico é, em geral, negativo, como será ilustrado na próxima seção.

OS PERIGOS DO SOBREDIMENSIONAMENTO

Seja o caso, em geral muito comum, do motor sobredimensionado. Imagina-se que, em vez de comprar o motor de 100 [KW] (M100), o qual corresponderia à potência correta para a carga mecânica, faz-se, erradamente, uma opção por um motor de 200 [KW] (M200).

Será que esta decisão aumenta a vida média do motor?

A teoria mostra que o efeito é insignificante.

Será que a maior seção do cobre diminui as perdas?

Esta segunda questão merece uma análise elucidativa.

O fator de potência de um motor de indução depende da sua velocidade (no caso de motores de indução é usual utilizar o seu escorregamento s que se caracteriza pela percentagem que a velocidade do rotor se atrasa da sua velocidade síncrona). A expressão do fator de potência em função da velocidade pode ser calculada pela fórmula aproximada, a seguir *:

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,088 \left(\frac{s}{2} + \frac{2}{s} \right)^2}} \quad (3)$$

Um motor de 100 [KW] operando na sua potência nominal com $s = 2\%$ (escorregamento nominal ou previsto pelo fabricante), seu fator de potência será também o nominal 0,86, desde que a tensão seja a nominal.

Já o motor de 200 [KW] que vai operar com 100 [KW] de potência no eixo possui, aproximadamente, um escorregamento de 1%, o que resulta em um fator de potência de 0,80.

Logo, nestas condições, a corrente no motor M200 será 7,5% maior que aquela do motor M100. Admitindo que as seções de cobre do motor M200 sejam o dobro daquelas usadas no motor de M100 resultam perdas no cobre de valor:

(Perdas no cobre de M200) = 58% (das perdas no cobre do M100)

Por outro lado, as perdas no ferro no motor M200 serão da ordem de 200% daquelas apresentadas pelo motor M100 (admitindo que a dimensão linear de M200 seja 25% superior). Ora, como na prática 33% das perdas totais corresponde ao ferro, a contabilização final mostra o seguinte:

Perdas totais M200 = 67% de 58% + 33% de 200% = 104,86% (perdas totais M100)

* Esta fórmula considera que o FP máximo ocorre quando a carga no eixo do motor é a nominal. Em motores normais, isto acontece para a carga no eixo ligeiramente acima da nominal e, desta forma, o efeito de sobredimensionamento é mais pronunciado.

No balanço econômico então, existem praticamente 5% a mais de perdas. Por outro lado, deve-se ressaltar que estes 5% a mais de perdas no motor M200 em relação ao M100 (na mesma condição de carga) irá representar algo como 50% do custo inicial do motor M200. Além deste sobrecusto em termos de perdas deve se somar é claro, o acréscimo de custo no preço de compra do motor de 200 [KW], em relação ao de 100 [KW].

Outra consequência desagradável da opção é que os 7,5% a mais da corrente induzirão perdas e investimento no sistema de suprimento de energia, em função dos 15% a mais devido às perdas por efeito Joule provocado pela corrente, indicando que a escolha do motor, sobredimensionado é também muito ruim para o sistema fornecedor de energia elétrica (concessionária).

AS VANTAGENS DO MOTOR DE ALTO RENDIMENTO

As despesas vultuosas induzidas pelas perdas levam, naturalmente, a considerar o mérito da utilização de motores mais caros, porém de mais alto rendimento.

Considera-se um motor de 100 [KW] e rendimento de 0,86, operando com sua carga nominal ao longo de um período de análise de 5 (cinco) anos. O objetivo é determinar a conveniência ou não de substituir este motor por outro, da mesma potência, mas com um rendimento de 0,90, em vez de 0,86.

A teoria a ser desenvolvida irá calcular o preço máximo ao qual este novo motor poderá custar para que a troca resulte economicamente justificada.

Seja W_N e W'_N as perdas do motor original e do substituto, respectivamente. Pelos valores de rendimentos adotados $\eta = 0,86$ e $\eta' = 0,90$, tem-se os seguintes valores de perdas nominais:

$$W_N = 16,3 \text{ [KW]}$$

$$W'_N = 11,1 \text{ [KW]}$$

Em consequência, o valor atual do benefício B a favor do motor de alto rendimento, em termos de perdas, será:

$$B = C * P_N * \left[\left(\frac{1-\eta}{\eta} \right) - \left(\frac{1-\eta'}{\eta'} \right) \right] * FF \quad (4)$$

ou ainda:

$$B = C * (W_N - W'_N) * FF \quad (5)$$

onde nas expressões (3) e (4), C é o custo anual das perdas, estimado em 300 [U\$A/KWh].

Considerando a taxa de custo do dinheiro I como sendo a mesma já adotada (0,1) e um período (T) de 5 anos vem:

$$B = 6505 \text{ [U\$A]}$$

Conclui-se que qualquer preço menor que 6505 [U\$A] é economicamente justificável. (Em rigor da verdade, o valor justificável é menor que 6505 acrescido do valor residual do motor substituído).

Caso se tenha interesse em substituir um moto normal por um motor de alto rendimento deve-se verificar, primeiramente, os custos aí envolvidos.

A expressão aproximada a seguir indica qual deverá ser o rendimento mínimo (η') que o motor de alto rendimento, com custo M, deverá ter para ser vantajoso colocá-lo no lugar de um motor normal com rendimento η .

$$\eta' = \frac{\eta}{1 - \frac{M}{C * P_N * FF} * \eta} \quad (6)$$

Como exemplo, um motor normal de 100 [KW] com rendimento $\eta = 0,86$ deverá ser substituído por um motor de custo $M = 6505$ [U\$A] apenas se o rendimento η' tiver o seguinte valor:

$$\eta' = \frac{0,86}{1 - \frac{6505}{300 * 100 * 4,17} * 0,86} = 0,90 \quad (7)$$

Porém, se o motor fosse mais caro, por exemplo, 15000 [U\$A], o rendimento mínimo exigível vai para aproximadamente 0,96.

Note-se ainda que há um preço ($M_{\text{máx}}$) para o qual η' é igual a 1 que corresponde a um motor ideal, e não pode ser ultrapassado. Esse preço é de:

$$M_{\text{MAX}} = C * P_N * \frac{1 - \eta}{\eta} * FF \quad (8)$$

Para o motor de 100 [KW], esse preço máximo seria em torno de aproximadamente, 20300 [U\$A].

QUAL É O MELHOR RENDIMENTO?

Esta questão não tem uma resposta fácil, nem geral. O melhor rendimento depende tanto dos custos de fabricação do motor como das peculiaridades do cliente, em termos de fator de carga, horizonte de análise, etc.

Entretanto, é possível um enfoque aproximado aceitando que o preço de custo, M , de um motor deva, em princípio, em função de sua perda nominal W_N obedecer a lei:

$$M = \frac{H * P_N^2}{W_N} \quad (9)$$

O valor de H (em [U\$A/KW]) pode ser ajustado, para um universo de preços pesquisado, para motores com potência nominal (P_N) em torno de 100 [KW] como sendo de:

$$M = 4,40 \text{ [U$A/KW]} \quad (10)$$

Supondo-se ainda que o custo das perdas (CP) no sistema elétrico fique em torno de 300 [U\$A/KW], a uma taxa de custo do dinheiro (I) de 0,1 e um período (T) de 5 anos tem-se em função das perdas nominais que o custo das perdas em função da potência nominal do motor, é dado pela seguinte expressão:

$$CP = 1250 W_N \quad (11)$$

Assim, o custo total (CT) das perdas em 5 (cinco) anos pode ser expresso como sendo a soma das duas expressões anteriores, ou seja:

$$CT = \frac{4,40 * (P_N^2)}{W_N} + 1250 * W_N \quad (12)$$

Obtendo-se o “melhor” valor de W_N como sendo

$$W_N^* = 0,059 * P_N \quad (13)$$

ou também

$$\eta_N^* = \frac{P_N}{P_N + W_N^*} \quad (14)$$

No caso do motor de 100 [KW], resulta um rendimento ótimo de 94,43% correspondente a:

$$W_N^* = 5,90 \text{ [KW]} - \text{obtido da expressão (14)}$$

$$M^* = 7458 \text{ dólares} - \text{obtido da expressão (9)}$$

$$CT^* = 14833 \text{ dólares} - \text{obtido da expressão (12)}$$

ou seja, ao comprar o motor de rendimento ótimo, custando 7458 [U\$A], fica “embutido” um custo das perdas nos futuros 5 anos igual a outros 7375 [U\$A] (total de 14833 [U\$A]).

Nota-se que para um motor mais barato (M100), por exemplo, com perdas nominais em torno de 10 [KW] e com um custo de $M = 3300$ [U\$A], tem um custo das perdas embutido de 12500 [U\$A], perfazendo um custo efetivo de 15800 [U\$A]. Já um motor mais caro, por exemplo, com perdas nominais de apenas 4 [KW] e preço $M = 11000$ [U\$A], terá como custo das perdas um valor de 5000 [U\$A], porém o custo total ficam em 16000. Isto comprova em números a otimização do rendimento em 94,43% e das perdas em torno de 5,90 [KW].

CONCLUSÕES

A maior importância prática é a comparação com preço do motor “normal” de 2200 [U\$A], cujas perdas nominais são de W_N de 16,3 [KW]. No caso, o custo das perdas vai para 20380 [U\$A]. Portanto, o custo total do motor “normal” é na verdade de 22580 [U\$A], ou seja, 7747 [U\$A] (52%) acima do motor ótimo.

Em outras palavras, isto significa um ônus inutilmente pago de 77,47 [U\$A] por [KW] instalado na indústria, ao longo de 5 anos, além das despesas necessárias para as obras adicionais no sistema elétrico de suprimento. Entende-se assim, a preocupação generalizada por atingir, no parque industrial, níveis os mais próximos possíveis aos indicados pelas análises de otimização aqui apresentadas.

REFERÊNCIAS

1. Relatório técnico referente a “Avaliação dos Desempenhos dos Motores Elétricos Trifásicos” – Convênio CEMIG / EFEI / FUPAI 1987 a 1990.