



MOTOR DE ALTO RENDIMENTO





MOTOR DE ALTO RENDIMENTO

Eletróbras/Procel
ACERVO DOCUMENTAL
00/00M
REG LIV 009
DATA 2-4-03

ELETROBRÁS/PROCEL e CEPEL
2002

INTRODUÇÃO

O motor elétrico de indução do tipo gaiola de esquilo é o mais importante uso final de energia elétrica no País. No Brasil, a quantidade de energia por ele processada é superior a 30% da energia elétrica total gerada. Diante disto, qualquer iniciativa que se desenvolva para aumentar o rendimento destes equipamentos trará grande economia ao País.

Há mais de uma década que os fabricantes de motores vêm desenvolvendo esforços para a redução das perdas destes equipamentos. Desta forma, além de fabricarem motores classificados como "standard" (motores da linha padrão ou convencional), apresentam também uma linha de produtos denominada Motor de Alto Rendimento.

A redução das perdas, com o conseqüente aumento da eficiência, foi obtida com o aumento dos custos de fabricação. Assim, motores de alto rendimento são mais caros do que os motores da linha padrão. No entanto, por serem mais eficientes, gastam menos energia que os motores da linha padrão para a mesma aplicação. Em conseqüência, este custo adicional de aquisição é compensado pelo menor custo operacional. Os tempos de retorno do capital investido geralmente são baixos e os seus benefícios econômicos se evidenciam nas economias estáveis, já que, em condições normais de operação, o motor pode durar mais de 12 anos.

Em resumo, o uso de motores de alto rendimento deve ser considerado, analisando-se também os custos de operação e não apenas o custo inicial.

RESUMO

Vantagens do Motor de Alto Rendimento

As principais vantagens, quando comparados com os motores da linha padrão, são:

- Reduzem o consumo de energia elétrica;
- A maioria deles apresenta um fator de potência mais alto;
- Menores temperaturas de operação;
- O rendimento decai menos para baixas cargas;
- Minimizam o superdimensionamento, nas situações em que não se possam corrigir a potência do motor.

Não Esquecer do Motor de Alto Rendimento

- Para as novas plantas industriais e comerciais;
- Para a maioria das expansões ou alterações das plantas industriais e comerciais existentes;
- Para a compra de novos equipamentos que contêm motores elétricos;
- Quando trocar o motor usado;
- Quando comprar motor para estoque;
- Para trocar motores superdimensionados que operam com baixo rendimento;
- Como parte do programa de gerência de energia;
- Para obter vantagens em descontos especiais, quando incentivados pelo Governo Federal.

Parte 1 – Por que utilizar motor de alto rendimento?	6
Participação dos Motores Elétricos no Uso da Energia Elétrica	6
O que É um Motor de Alto Rendimento?	7
Custo de Operação do Motor	8
Motores de Alto Rendimento x Motores Padrão	8
Normalização	9
Perdas do Motor	9
Benefícios Econômicos do Motor de Alto Rendimento	11
Economia de Energia	12
Tempo de Retorno de Investimento	12
Parte 2 – Considerações quando comprar motor de alto rendimento	15
Especificação	15
Dimensionamento do Motor	16
Rendimento	16
Fator de Potência	17
Fator de Serviço	18
Características de Aceleração	18
Características da Rede de Alimentação	20
Características Construtivas	20
Parte 3 – Como operar motor de alto rendimento	21
Dicas para Prolongar a Vida Útil do Motor	21
Os Cuidados na Limpeza do Motor	21
A Lubrificação do Rolamento e do Mancal	21
Vibração	22
Regime de Partidas do Motor	22
Sistema de Proteção	22
Locais para Instalação de Motores	23
Influência da Rede Elétrica na Operação do Motor	23
Variação da Amplitude da Tensão	23
Desequilíbrio da Rede Elétrica	24
Harmônicos	26
O que Fazer Quando o Motor Danificar?	28

PARTE 1 **Por que utilizar motor de alto rendimento?**

Participação dos Motores Elétricos no Uso da Energia Elétrica

O consumo de energia elétrica no Brasil, relativo aos setores mais significativos, pode ser observado pela distribuição apresentada na figura 1.

Consumo de energia elétrica anual no País: 305,60 TWh (ano 2000)

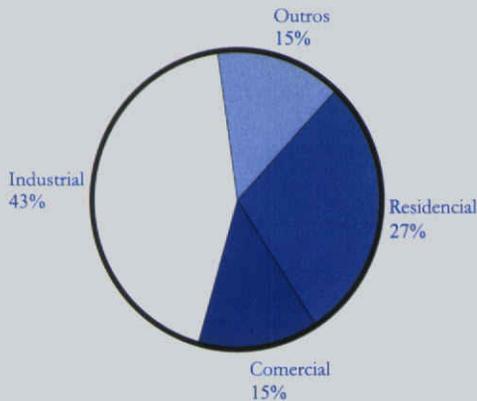


Figura 1 – Consumo de energia elétrica no País entre os principais setores.

Fonte: PROCEL.

Como se pode observar, o setor industrial é o mais significativo, representando praticamente metade do consumo de energia elétrica do País.

A distribuição de consumo por equipamentos dos setores industrial e comercial pode ser observada nas figuras 2 e 3, respectivamente.

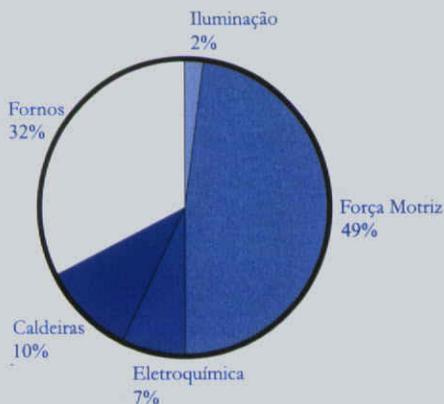


Figura 2 – Consumo de energia elétrica para o setor industrial.

Fonte: PROCEL.

Dentro do setor das indústrias, onde há a maior demanda de energia elétrica, os motores são responsáveis por, aproximadamente, 49% deste consumo. Isto significa que a participação deles, no consumo global do País, pode ser estimada em 22%.

Neste setor, os motores são usados, principalmente, para acionar:

- Equipamentos de processos, tais como: bobinadoras, trefiladoras, etc.;
- Bombas;

- Compressores;
- Ventiladores;
- Esteiras transportadoras.

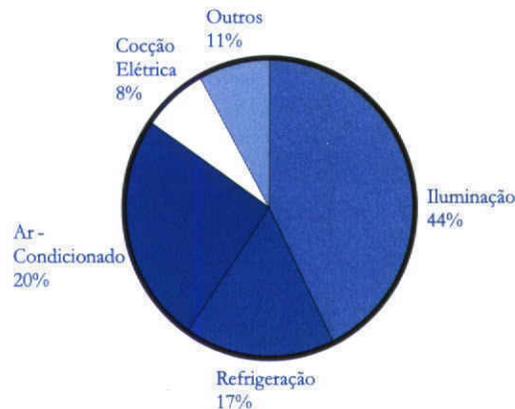


Figura 3 – Consumo de energia elétrica para o setor comercial.

Fonte: PROCEL.

No setor comercial, os equipamentos mais significativos correspondem aos refrigeradores, aparelhos de ar condicionado e elevadores, que são acionados pelos motores elétricos e representam cerca de 37% do consumo do setor. A participação destes motores no consumo global é da ordem de 5%.

Ao mesmo tempo que se constata a grande importância dos motores elétricos trifásicos, por serem responsáveis pelo processamento de mais de 30% da nossa energia elétrica, torna-se claro que medidas a serem adotadas para um aumento da eficiência do seu processo de operação produzirão uma razoável economia de energia.

Uma utilização adequada destes motores trará benefícios imediatos aos usuários e a toda a sociedade brasileira, na medida em que, para os primeiros, reduzir-se-ão os custos da produção, ressaltando-se que a economia de energia elétrica será convertida diretamente em lucro. Para o País, haverá uma considerável economia de energia, minimizando os investimentos em nova geração de energia elétrica.

O que É um Motor de Alto Rendimento?

O motor de alto rendimento possui rendimento superior ao motor-padrão e, conseqüentemente, perdas reduzidas. Isto é possível devido a mudanças no projeto, materiais e processos de fabricação melhores.

O rendimento é a relação entre a potência mecânica desenvolvida no eixo do motor e a potência elétrica ativa que ele consome da rede de alimentação. Sua expressão pode ser escrita, em valores percentuais, como:

$$\eta(\%) = \frac{\text{Potência mecânica (kW)}}{\text{Potência consumida (kW)}} \times 100$$

ou por

$$\eta(\%) = \frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência de entrada}} \times 100$$

Ao considerarmos que **Potência de entrada = Potência de saída + Perdas**,
o rendimento pode ser expresso como:

$$\eta(\%) = \frac{\text{Potência de entrada} - \text{Perdas}}{\text{Potência de entrada}} \times 100$$

ou

$$\eta(\%) = \frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência de saída} + \text{Perdas}} \times 100$$

Custo de Operação do Motor

As perdas menores do motor de alto rendimento significam que este motor produz a mesma potência mecânica de saída com menos potência de entrada que um motor-padrão. Desta maneira, o motor de alto rendimento tem custo de operação menor.

Motores de Alto Rendimento x Motores Padrão

A figura 4 mostra uma comparação entre o rendimento de motores de alto rendimento e motores padrão.

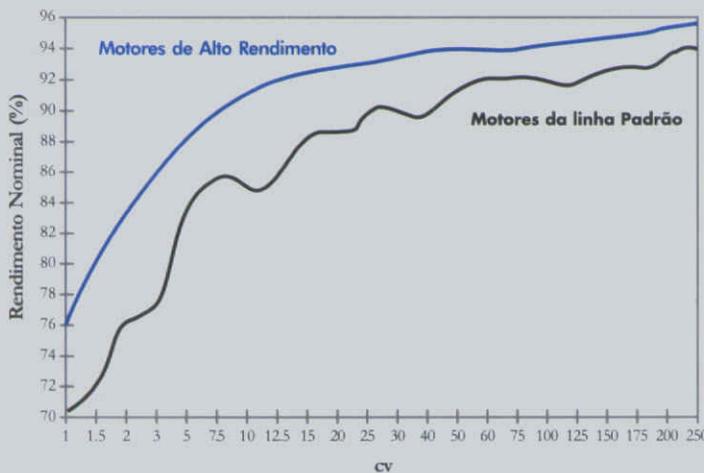


Figura 4 – Rendimento nominal para motores de alto rendimento e padrão, 4 pólos, Categoria N (fabricante nacional).

Normalização

Os motores de alto rendimento possuem rendimentos nominais mínimos normalizados para cada combinação potência x velocidade síncrona.

Os fabricantes de motores elétricos devem garantir que o rendimento nominal real do motor não deve ser inferior ao rendimento nominal declarado na placa menos a tolerância permitida pela norma NBR 7094.

A tabela 1 mostra estes valores nominais mínimos normalizados.

POTÊNCIA NOMINAL		VELOCIDADE SÍNCRONA (rpm)			
cv	kW	3.600	1.800	1.200	900
		RENDIMENTO NOMINAL			
1	0,75	80,0	80,5	80,0	70,0
1,5	1,1	82,5	81,5	77,0	77,0
2	1,5	83,5	84,0	83,0	82,5
3	2,2	85,0	85,0	83,0	84,0
4	3,0	85,0	86,0	85,0	84,5
5	3,7	87,5	87,5	87,5	85,5
6	4,5	88,0	88,5	87,5	85,5
7,5	5,5	88,5	89,5	88,0	85,5
10	7,5	89,5	89,5	88,5	88,5
12,5	9,2	89,5	90,0	88,5	88,5
15	11	90,2	91,0	90,2	88,5
20	15	90,2	91,0	90,2	89,5
25	18,5	91,0	92,4	91,7	89,5
30	22	91,0	92,4	91,7	91,0
40	30	91,7	93,0	93,0	91,0
50	37	92,4	93,0	93,0	91,7
60	45	93,0	93,6	93,6	91,7
75	55	93,0	94,1	93,6	93,0
100	75	93,6	94,5	94,1	93,0
125	90	94,5	94,5	94,1	93,6
150	110	94,5	95,0	95,0	93,6
175	132	94,7	95,0	95,0	-
200	150	95,0	95,0	95,0	-
250	185	95,4	95,0	-	-

Tabela 1 – Menores valores de rendimento nominal a plena carga para motores de alto rendimento.

Perdas do Motor

Os vários tipos de perdas podem ser classificados de diversas formas, sendo as mais usuais:

Perdas Fixas – que praticamente independem da carga;

Perdas Variáveis – que variam com o carregamento do motor.

As perdas fixas são perdas nos núcleos e mecânicas. As perdas variáveis com a carga são as perdas nos enrolamentos do estator e do rotor e as perdas suplementares.

Perdas nos Núcleos (15 a 30% das perdas totais)

São as perdas que ocorrem nas chapas magnéticas do estator e do rotor. Estas perdas se devem aos fenômenos de histerese e correntes induzidas nos pacotes magnéticos (correntes parasitas) e dependem da frequência e da densidade máxima de fluxo.

No caso particular da perda por correntes parasitas, ela depende também da espessura das lâminas do pacote magnético.

As perdas por histerese e correntes parasitas podem ser reduzidas pela diminuição da densidade de fluxo. Isto pode ser conseguido aumentando-se o comprimento do pacote magnético ou através de um melhor projeto do circuito magnético.

Outro procedimento adotado para redução destas perdas é a utilização de material magnético de melhor qualidade.

Perdas Mecânicas (2 a 15% das perdas totais)

São as perdas devidas ao atrito nos mancais ou nos rolamentos e a ventilação. Em geral, quando o motor está operando em carga nominal, elas são as menores parcelas das perdas totais.

As perdas por atrito são diminuídas utilizando-se rolamentos de baixas perdas e com uma melhor lubrificação (como, por exemplo, lubrificantes sintéticos).

As perdas por ventilação podem ser reduzidas pela otimização do projeto do ventilador. Como o motor de alto rendimento produz menores perdas nos enrolamentos e no núcleo, torna-se menor a própria necessidade de ventilação. Uma boa consequência indireta disto é a redução do nível de ruído produzido pelo motor.

Perdas por Efeito Joule no Estator (25 a 50% das perdas totais)

São as perdas por efeito Joule devidas à circulação de corrente nos condutores do enrolamento do estator. Frequentemente, são denominadas perdas $I^2 R$, onde R é a resistência do enrolamento e I , a corrente.

Nos motores de alto rendimento, a resistência destes enrolamentos é diminuída utilizando-se condutores de cobre de maior bitola (condutores mais grossos). Os fabricantes nacionais têm alcançado estes resultados mantendo a mesma carcaça do motor padrão.

Perdas por Efeito Joule no Rotor (15 a 25 % das perdas totais)

São perdas por efeito Joule que ocorrem na gaiola do rotor e dependem da carga, do material do condutor da gaiola, da área da ranhura e do comprimento das barras. Estas perdas são proporcionais ao escorregamento de operação.

Assim como no estator, a diminuição destas perdas é feita pelo aumento da quantidade de material condutor da gaiola. Naturalmente, isto pode contribuir também para o aumento das dimensões da carcaça.

No entanto, a resistência do rotor apresenta forte influência no desempenho do motor. Sendo assim, a redução destas perdas fica limitada às imposições aos valores mínimos de conjugado de partida e da máxima corrente de partida.

Perdas Suplementares (5 a 20% das perdas totais)

São todas as perdas que não estão incluídas nos outros tipos de perdas. São definidas como a diferença entre a perda total do motor e os outros quatro tipos de perdas.

Elas levam em conta vários fenômenos, tais como a distribuição não uniforme da corrente nos enrolamentos, o efeito de saturação e as imperfeições na densidade de campo magnético (devido às ranhuras do estator e do rotor). Estas imperfeições provocam perdas nos dentes das lâminas do estator e do rotor e ocasionam perdas ôhmicas nas barras das gaiolas, associadas aos harmônicos de corrente.

As perdas que ocorrem nas partes metálicas próximas ao campo magnético de dispersão produzidas pelas cabeças das bobinas são também computadas nas perdas suplementares.

Os elementos que mais afetam estas perdas são o projeto do enrolamento do estator, a razão entre a largura do entreferro e a abertura das ranhuras, a razão entre o número de ranhuras do estator e do rotor e as superfícies dos pacotes magnéticos do estator e do rotor.

As perdas suplementares variam, aproximadamente, com o quadrado da corrente de carga. As perdas suplementares são as mais difíceis de serem reduzidas. No entanto, podem apresentar uma grande contribuição para o aumento da eficiência do motor. Elas podem ser reduzidas pela adoção de um projeto otimizado e com cuidados de qualidade na fabricação. Estas perdas são um importante componente das perdas totais do motor.

Os vários tipos de perdas dos motores não são independentes. Por exemplo, aumentar o comprimento do pacote de lâminas para redução das perdas magnéticas provoca aumento no comprimento dos condutores, o que, por sua vez, aumenta suas perdas por efeito Joule. O projeto final destes motores deve ser fruto de um balanço dos vários tipos de perdas, de modo a se alcançar um alto rendimento, mas mantendo-se os níveis de conjugado de partida, capacidade de sobrecarga, corrente de partida e fator de potência.

Benefícios Econômicos do Motor de Alto Rendimento

O custo de um motor envolve não só o seu preço inicial, mas também o seu custo operacional.

O preço inicial do motor de alto rendimento é superior ao motor da linha padrão. O motor de alto rendimento consome menos energia para executar o mesmo trabalho realizado por outro da linha padrão porque possui maior rendimento. Após algum tempo de operação, a economia obtida deverá compensar e até ultrapassar a diferença entre o seu preço e o do motor equivalente da linha padrão.

A economia no consumo de energia e o tempo de retorno do investimento, ao se optar por um motor de alto rendimento ao invés de outro da linha padrão, são funções dos seus rendimentos, do tempo de operação, da potência solicitada pela carga, da tarifa de energia elétrica e dos seus preços iniciais.

Economia de Energia

Se um motor opera H horas por ano, solicitando da rede elétrica uma potência elétrica P_e (em kW), a energia elétrica consumida por ano é:

$$E = H \times P_e$$

A potência elétrica P_e se relaciona com a potência mecânica P (em cv) desenvolvida no eixo através do rendimento η e de um fator de conversão entre unidades. Desta maneira, o consumo de energia pode ser calculado por:

$$E = 0,736 \times H \times P \times \frac{1}{\eta}$$

Considerando, respectivamente, os rendimentos η_p e η_{AR} para os motores da linha padrão e de alto rendimento e ambos desenvolvendo a mesma potência mecânica, a economia anual EA (kWh) no consumo de energia elétrica será:

$$EA = 0,736 \times H \times P \times \left(\frac{1}{\eta_p} - \frac{1}{\eta_{AR}} \right)$$

A equação acima se aplica ao regime contínuo (carga constante), com os motores operando nas mesmas tensão e velocidade. Para vários níveis de carga, deve-se calcular os valores da economia obtida em cada intervalo de carga e somá-los para a obtenção da economia anual.

Tempo de Retorno de Investimento

O cálculo do tempo de retorno do investimento simplificado (payback simples) leva em conta a tarifa da energia elétrica T (em R\$/kWh), a economia anual EA obtida e a diferença de preços entre os motores ($PR_{AR} - PR_p$ em R\$). Assim, o tempo de retorno do investimento TRI (em anos) pode ser estimado por:

$$TRI = \frac{PR_{AR} - PR_p}{EA \times T} \quad (1)$$

Observa-se que o tempo de retorno do investimento será tanto menor quanto maior for:

- A tarifa de energia;
- O número de horas de operação;
- A diferença entre os rendimentos;
- A potência da carga.

Destaca-se que, após o tempo de retorno do investimento, a economia de energia em cada ano é convertida diretamente em lucro (R\$) multiplicando-se EA pela tarifa T . Por exemplo, consideremos dois motores de 15 cv, 4 pólos, 220 V, um da linha padrão e outro de alto rendimento. Seus rendimentos nominais valem $\eta_p = 88,3\%$ e $\eta_{AR} = 91,7\%$. Se eles desenvolverem potência nominal, operando com tensão nominal e mesma velocidade durante 6.000 horas por ano, então a economia

anual de energia ao se optar pelo uso do motor de alto rendimento será:

$$EA = 0,736 \times 6000 \times 15 \times \left(\frac{1}{0,883} - \frac{1}{0,917} \right) \text{ ou } EA = 2.781,4 \text{ kWh/ano.}$$

Admitiremos que seus preços são $PR_p = R\$ 460,00$ e $PR_{AR} = R\$ 720,00$ e que a tarifa de energia elétrica é igual a $T = R\$ 0,07/\text{kWh}$. Para as condições citadas, o tempo de retorno do investimento pela opção de compra do motor de alto rendimento será:

$$TRI = \frac{720 - 460}{2.781,4 \times 0,07} = 1,34 \text{ anos ou 16 meses.}$$

O lucro anual após o TRI é $R\$ 194,7$ ($2.781,4 \times 0,07$).

O cálculo do TRI apresentado anteriormente (payback simples) considera a tarifa de energia elétrica média, e ainda constante, ao longo desse tempo. Uma boa estimativa da tarifa pode ser obtida dividindo-se o valor da conta pela energia consumida. Isto, de certa maneira, inclui a demanda.

O cálculo do TRI (payback simples) não leva em conta um aspecto importante, que é o valor da moeda no tempo. Sabe-se que o valor atual de uma receita futura precisa ser corrigido através de um fluxo de caixa que tenha os n períodos desta receita a uma taxa de juros (i) igual à taxa de atratividade das aplicações do mercado financeiro. Então, a receita deve ser corrigida através do seguinte fator de valor atual (FVA):

$$FVA = \frac{1}{(1+i)^n}$$

Com esta consideração, o tempo de retorno do investimento se relaciona com a diferença de preços, a tarifa de energia elétrica, a economia de energia anual e os juros anuais, pela relação:

$$PR_{AR} - PR_p = \left(1 - \frac{1}{(1+i)^{TRI}} \right) \times \frac{EA \times T}{i} \text{ ou}$$

$$TRI = \frac{\log \left(\frac{EA \times T}{EA \times T - i \times (PR_{AR} - PR_p)} \right)}{\log(1+i)} \quad (2)$$

Os procedimentos de cálculo do TRI apresentados anteriormente não levam em consideração tarifas diferenciadas, ponta e fora de ponta, e a demanda para alguns grupos tarifários.

Para considerar a demanda no cálculo do TRI, a parcela calculada a partir da diferença entre as potências dos motores padrão e de alto rendimento, tarifa da demanda T_d e número de meses no ano, deve ser somada à parcela $EA \times T$ das equações 1 e 2. A seguir, são mostradas, respectivamente, as equações dos procedimentos de cálculo do TRI, payback simples e valor da economia atualizado, levando em consideração a parcela da demanda.

$$TRI = \frac{PR_{AR} - PR_P}{EA \times T + 0,736 \times P \times \left(\frac{1}{\eta_P} - \frac{1}{\eta_{AR}} \right) \times T_d \times 12}$$

$$TRI = \frac{\log \left(\frac{EA \times T + 0,736 \times P \times \left(\frac{1}{\eta_P} - \frac{1}{\eta_{AR}} \right) \times T_d \times 12}{EA \times T + 0,736 \times P \times \left(\frac{1}{\eta_P} - \frac{1}{\eta_{AR}} \right) \times T_d \times 12 - i \times (PR_{AR} - PR_P)} \right)}{\log(1+i)}$$

Finalmente, ressalta-se que os métodos possuem algumas simplificações, mas são considerados como boas ferramentas na análise do investimento.

A tabela 2 é uma fonte de consulta rápida do TRI (payback simples) para a compra de um motor de alto rendimento ao invés de outro da linha padrão. Ela é uma aproximação baseada nas hipóteses do período de funcionamento de 4.000 e 8.000 horas por ano. A tarifa de energia elétrica considerada é de R\$ 0,07/kWh e a carga do motor é constante e nominal.

P (cv)	TRI (anos) para 4.000 h/ano	TRI (anos) para 8.000 h/ano
1,0	1,9	0,9
1,5	1,2	0,6
2,0	1,7	0,9
3,0	1,5	0,7
4,0	1,6	0,8
5,0	2,1	1,0
6,0	1,5	0,8
7,5	2,0	1,0
10,0	1,2	0,6
12,5	2,1	1,0
15,0	2,0	1,0
20,0	1,7	0,8
25,0	2,7	1,4
30,0	2,6	1,0
40,0	1,8	0,9
50,0	3,0	1,5
60,0	3,3	1,7
75,0	3,4	1,7
100,0	3,3	1,6
125,0	2,4	1,2
150,0	2,4	1,2
175,0	3,2	1,6
200,0	3,1	1,6
250,0	3,2	1,6

Tabela 2 – Tempo de Retorno do Investimento (payback simples) na compra do motor de alto rendimento ao invés do motor da linha padrão para carga nominal (tarifa considerada de R\$ 0,07/kWh).

PARTE 2 *Considerações quando comprar* *motor de alto rendimento*

Especificação

O desempenho de motores elétricos, de uma forma global, está associado aos seguintes parâmetros:

- Rendimento;
- Fator de potência;
- Conjugado de partida;
- Conjugado máximo;
- Velocidade de operação;
- Capacidade de aceleração;
- Classe de isolamento;
- Corrente de partida;
- Fator de serviço;
- Ruído;
- Temperatura de operação;
- Tipo de carcaça.

A especificação técnica deve definir os requerimentos de desempenho e descrever as condições nas quais o motor irá operar. Um balanço entre os vários parâmetros de desempenho pode resultar num decréscimo do rendimento do motor se a especificação técnica não estiver cuidadosamente elaborada.

O comprador de motores deve evitar uma especificação que irá modificar elementos básicos do projeto do motor, tais como:

- Projeto da carcaça;
- Projeto dos rolamentos;
- Projeto do rotor;
- Classe de isolamento.

Uma boa especificação deve conter:

1. O desempenho esperado do motor

- Potência nominal (cv) e fator de serviço;
- Rendimento mínimo;
- Fator de potência mínimo;
- Conjugado de partida mínimo;
- Elevação de temperatura e classe de isolamento;
- Tensão de alimentação;
- Máxima corrente de partida;
- Inércia da carga e número de partidas.

2. As condições ambientais de operação do motor

- Temperatura ambiente;
- Altitude;
- Nível de umidade;
- Ambiente agressivo ou não;
- Áreas de risco ou não.

3. Os sistemas de proteção do motor

- Proteção contra sobrecorrente;
- Proteção térmica;
- Proteção contra subtensão;
- Proteção contra tempos de partida muito longos e partidas sucessivas.

Dimensionamento do Motor

No Brasil, o superdimensionamento de motores é uma das causas mais comuns de operação ineficiente, e as razões mais freqüentes para esta ocorrência são:

- Desconhecimento das características da própria carga;
- Desconhecimento de métodos para um dimensionamento adequado;
- Aplicação de sucessivos fatores de segurança nas várias etapas de um projeto industrial;
- Expectativa de aumento futuro de carga;
- A não especificação de fator de serviço maior que 1,0 para motores que esporadicamente apresentam picos de carga.

O uso de motores superdimensionados aumenta os custos com:

- A compra do motor de potência maior;
- A compra de equipamentos da fonte de alimentação, por solicitar maiores potências aparente (kVA) e reativa (kVAr);
- A energia elétrica consumida, por apresentar rendimento menor;
- A penalidade, devido ao baixo fator de potência.

Em condição normal de funcionamento, o motor deve ser adequado à carga, ou seja, deve operar entre 75% e 100% da potência nominal. Por exemplo, se o dimensionamento mostra que a carga é de 35 cv, um motor de 40 cv deverá ser usado operando com 88% da potência nominal. Quando um motor é usado para atender a uma carga constante, como um ventilador, o motor deve ser dimensionado o mais próximo possível de 100% da potência nominal.

O motor de alto rendimento bem dimensionado proporcionará uma máxima economia de energia, permitindo obter elevados rendimento e fator de potência.

Rendimento

Um motor de alto rendimento é especificado da mesma forma que outro da linha padrão. Ambos, geralmente, possuem a mesma carcaça padronizada, assim, nenhuma modificação especial é necessária para trocar um motor padrão por um motor de alto rendimento.

Uma vez que os outros parâmetros especificados tenham sido satisfeitos, o rendimento deve ser um fator determinante na seleção do motor.

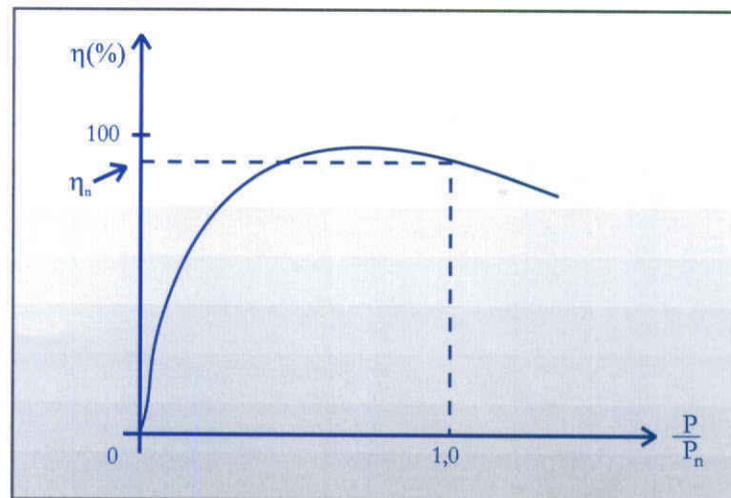


Figura 5 –
Comportamento do
rendimento em função da
carga.

A figura 5 mostra que para cargas pequenas, em relação a sua potência nominal, o rendimento é baixo, já que as perdas fixas tornam-se grandes comparadas com a potência fornecida. Quando o carregamento do motor cresce, o rendimento se eleva e, quando o motor opera com mais de 50% de sua potência nominal, o rendimento é muito próximo dos valores de rendimento nominal e máximo, que para alguns motores ocorre a 75% da potência nominal.

No Brasil, o rendimento é determinado através da norma NBR 5383, que está sendo revisada para se basear no método de segregação das perdas com dinamômetro da norma canadense CSA C390-M1985.

Fator de Potência

O fator de potência é o fator que relaciona a potência que o motor realmente precisa para acionar a carga e suprir suas perdas internas, chamada potência ativa, e a potência total solicitada à rede, chamada potência aparente. A potência aparente engloba duas componentes distintas de potência:

- Potência ativa (P), relacionada com trabalho mecânico e perdas, W;
- Potência reativa (Q), necessária para magnetização, ou seja, para assegurar a existência dos campos magnéticos, VAR.

É importante que se trabalhe com alto valor de fator de potência. A legislação atual exige que as indústrias de determinado grupo tarifário operem com fator de potência mínimo de 0,92. Abaixo deste valor, existem grandes penalizações financeiras aos consumidores. (Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL nº 456, de 29/11/2000, publicada em 30/11/2000).

A correção do fator de potência geralmente pode ser feita com a instalação de capacitores, que apresentam a propriedade de reduzir a energia reativa indutiva da rede de alimentação.

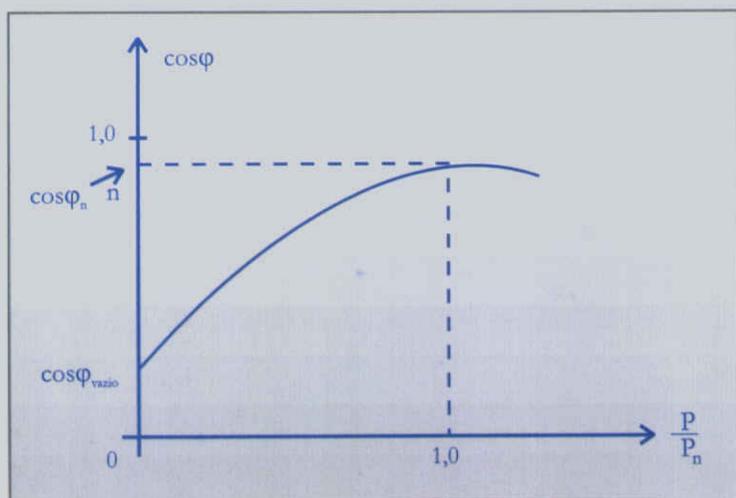


Figura 6 – Comportamento do fator de potência em função da carga.

A figura 6 mostra que em vazio o fator de potência é muito baixo, já que a potência ativa entregue ao motor é a necessária para suprir somente as perdas. Efeito análogo ao que ocorre em vazio ou com pouca carga ocorre quando o motor está superdimensionado. Observa-se que o fator de potência cresce proporcionalmente ao carregamento do motor, atingindo valores razoáveis quando o motor está operando a partir de 75% de sua potência nominal.

Fator de Serviço

O fator de serviço é um multiplicador que, aplicado à potência nominal, indica a carga permitida que pode ser aplicada continuamente ao motor, sob tensão e frequência nominais e com limite de elevação de temperatura do enrolamento estabelecido. A utilização do fator de serviço implica vida útil inferior àquela do motor com carga nominal. Entretanto, sua utilização permite atender a esporádicos picos de carga sem que seja necessário superdimensionar o motor.

Os valores declarados, por exemplo, rendimento e fator de potência, não são garantidos pelo fabricante quando o motor estiver operando acima da potência nominal. A norma NBR 7094 prevê que, para motores de 1,5 a 200 cv, o fator de serviço, quando especificado, deve ser igual a 1,15; caso não seja especificado, ele é subentendido unitário.

Características de Aceleração

Os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola são classificados em categorias, segundo a norma NBR 7094, conforme suas características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida.

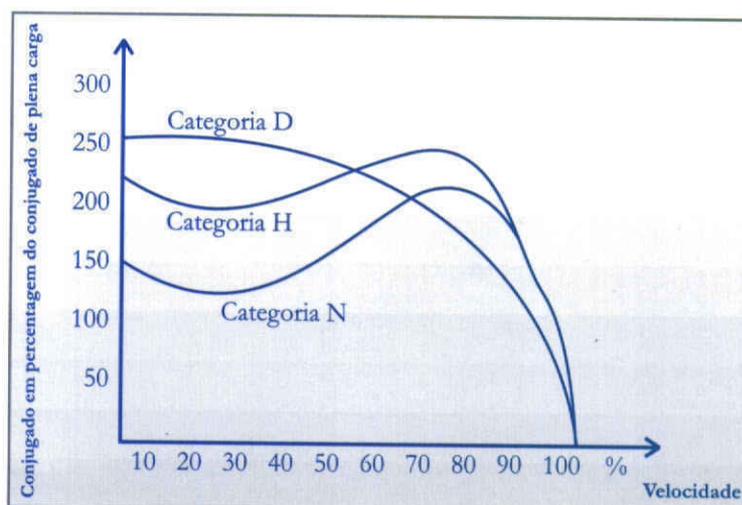


Figura 7 – Curvas de conjugado por velocidade das diversas categorias.

Da figura 7, destacamos e definimos alguns pontos importantes:

- Conjugado nominal é o conjugado desenvolvido pelo motor à potência nominal, sob tensão e frequência nominais;
- Conjugado de partida ou com rotor bloqueado é o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor quando o seu eixo está bloqueado;
- Conjugado mínimo é o menor conjugado desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo;
- Conjugado máximo é o maior conjugado desenvolvido pelo motor, sob tensão e frequência nominais, sem queda brusca de velocidade;
- Escorregamento nominal refere-se à diferença entre a velocidade do motor a plena carga e a velocidade síncrona.

Cada categoria é adequada a um tipo de carga e se caracteriza como:

- **Categoria N** – Possui conjugado de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Constitui a maioria dos motores encontrados no mercado que se prestam ao acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes e ventiladores;
- **Categoria H** – Possui conjugado de partida alto, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Usado para cargas que exigem maior conjugado de partida, como peneiras, transportadores, carregadores, cargas de alta inércia, britadores, etc;
- **Categoria D** – Possui o mais alto conjugado de partida, corrente de partida normal e alto escorregamento (+ de 5%). Usado em prensas excêntricas, onde a carga apresenta picos periódicos. Usado também em elevadores e cargas que necessitam de conjugados de partida muito altos e corrente de partida limitada.

Características da Rede de Alimentação

A operação eficiente dos motores de indução trifásicos depende, entre outras coisas, da qualidade da rede elétrica de alimentação. As principais distorções que ocorrem nas redes trifásicas são:

- Variação da tensão e/ou frequência;
- Desequilíbrio da rede trifásica, com as tensões apresentando diferentes amplitudes e/ou defasagens;
- Conteúdo de harmônicos.

Uma visão detalhada de cada distorção é apresentada na parte 3.

Características Construtivas

Os invólucros dos motores elétricos, conforme as características do local em que serão instalados e de sua acessibilidade, devem oferecer um determinado grau de proteção (padronizado). Assim, por exemplo, um motor a ser instalado num local sujeito a jatos d'água deve possuir um invólucro capaz de suportar tais jatos, sob determinados valores de pressão e ângulo de incidência, sem que haja penetração de água.

Dicas para Prolongar a Vida Útil do Motor

O motor de indução trifásico é uma máquina robusta que, quando utilizado apropriadamente, irá operar por vários anos com o mínimo de manutenção. Entretanto, uma manutenção preventiva e uma inspeção do motor e do sistema elétrico de alimentação irão aumentar a sua vida útil.

A vida de um motor praticamente termina quando o isolamento dos seus enrolamentos se deteriora, tornando-se ressecado e quebradiço.

A melhor maneira de prevenir defeitos é seguir as instruções de manutenção do fabricante e observar o desempenho normal do motor. A interpretação adequada destas observações pode ajudar a evitar sérios defeitos ou falhas do motor. Questões como as listadas abaixo devem ser respondidas:

- O motor está mais ruidoso que o normal?
- A temperatura na carcaça do motor está acima do normal?
- O tempo de aceleração do motor para atingir a velocidade de operação está acima do normal?
- Há aumento da vibração?

Os Cuidados na Limpeza do Motor

A limpeza do motor é um ponto primordial da sua manutenção. A presença de poeira, umidade, partículas em suspensão, óleo, etc. é a principal causa de falhas dos motores. Falhas do sistema isolante são freqüentemente causadas pela ação da umidade.

A limpeza da superfície externa é extremamente importante, pois é através dela que o calor gerado pelas perdas do motor é liberado para o exterior. Uma camada de sujeira dificulta a liberação deste calor, o que provoca a elevação de temperatura, principalmente nos motores em regime contínuo. Isto pode reduzir consideravelmente a vida útil da isolação do enrolamento. Esta limpeza deve ser feita esfregando-se um pano (que não solte fiapos) embebido em solvente.

A presença de sujeiras e/ou resíduos estranhos no óleo de lubrificação do mancal ou na graxa do rolamento provoca alterações nas suas propriedades lubrificantes, aumentando as perdas por atrito e, conseqüentemente, a temperatura.

A grade de proteção do ventilador nunca deve acumular detritos, para se obter uma boa renovação do ar de refrigeração.

A Lubrificação do Rolamento e do Mancal

Os mancais devem ser periodicamente inspecionados, de modo a garantir uma lubrificação correta. Uma consulta ao fabricante ou a seu representante local, aliada à própria experiência prática do usuário, pode definir a periodicidade desta inspeção.

O fabricante do motor sempre apresenta recomendações sobre procedimentos e uso das graxas ou óleos lubrificantes adequados ao seu produto. Não se devem misturar diferentes graxas, pois elas podem se deteriorar mutuamente e, conseqüentemente, privar o rolamento da lubrificação adequada.

Uma quantidade reduzida ou um volume excessivo de lubrificante nos mancais é prejudicial ao motor. O excesso de graxa é uma das causas mais comuns de falhas do rolamento, pois aumenta o atrito e, conseqüentemente, a temperatura.

Vibração

Um notável aumento na vibração do motor é um indicativo de defeitos. Se isto ocorrer, checar:

- Se os parafusos da montagem estão apertados;
- Se o eixo está apropriadamente alinhado;
- Se alguns rolamentos devem ser trocados.

Identificar a fonte de vibração pode, às vezes, ser difícil. Neste caso, o usuário deve procurar uma assistência técnica especializada.

Regime de Partidas do Motor

Devido ao valor elevado da corrente de partida dos motores de indução, o tempo gasto na aceleração de cargas de inércia apreciável resulta na elevação rápida da temperatura do motor. Se o intervalo entre partidas sucessivas for muito reduzido, isto levará a uma elevação de temperatura excessiva nos enrolamentos, danificando-os ou reduzindo a sua vida útil. A norma NBR 7094 estabelece um regime de partida mínimo que os motores devem ser capazes de realizar:

- Duas partidas sucessivas, sendo a primeira feita com o motor frio, isto é, com seus enrolamentos à temperatura ambiente, e a segunda logo a seguir, porém após o motor ter desacelerado até o repouso;
- Uma partida com o motor quente, ou seja, com os enrolamentos à temperatura de regime.

Sistema de Proteção

Os dispositivos de proteção devem ser corretamente dimensionados e instalados para proteger o motor durante as partidas, sobrecargas e curtos-circuitos. Se for instalado banco de capacitores de correção do fator de potência junto ao motor, então é necessário redimensionar os dispositivos de proteção.

Locais para Instalação de Motores

Devem-se evitar locais pouco ventilados que resultem no aumento da temperatura ambiente ao redor do motor, prejudicando a troca de calor do motor, tais como:

- Poços;
- Proximidades de paredes;
- Cubículos fechados;
- Saída da refrigeração de um motor na entrada da refrigeração do outro.

Influência da Rede Elétrica na Operação do Motor

Mesmo que o motor esteja em perfeitas condições, seu rendimento e sua vida podem ser reduzidos se o sistema elétrico apresentar uma baixa qualidade de energia. O monitoramento da tensão é uma maneira importante de prevenir problemas decorrentes de uma baixa qualidade de energia.

Variação da Amplitude da Tensão

O rendimento e o fator de potência dos motores de indução trifásicos variam segundo o valor da tensão de alimentação. Estes motores são projetados para suportarem variações em torno de 10% da tensão nominal.

As principais causas de alteração da amplitude da tensão são transformadores e/ou cabos subdimensionados e, também, fator de potência reduzido.

Uma tensão de alimentação abaixo do valor nominal do motor provoca aumento da corrente e da temperatura, e ainda redução dos conjugados de partida e de regime. Tensão abaixo do valor nominal geralmente é causada por queda de tensão excessiva na rede. Se o motor estiver conectado na extremidade final de um longo cabo de alimentação, pode ser conveniente uma reconfiguração do sistema.

Dependendo da causa, a tensão da rede pode ser restaurada por meio dos seguintes procedimentos:

- Ajuste do tap do transformador, quando possível;
- Instalação de equipamentos de ajuste automático do tap do transformador, se a carga varia consideravelmente ao longo do dia;
- Instalação de banco de capacitores, que elevam a tensão ao mesmo tempo que corrigem o fator de potência;
- Redimensionamento dos cabos de alimentação.

Por outro lado, um valor de tensão acima do nominal acarreta redução do fator de potência e aumento da corrente de partida.

Uma tensão permanentemente elevada, via de regra, corresponde a uma ligação errada do tap do transformador.

Se um motor estiver superdimensionado, talvez seja possível aumentar o seu fator de potência e a sua eficiência, alimentando-o com tensão reduzida.

Sendo o conjugado dos motores de indução trifásicos proporcional ao quadrado da tensão, motores alimentados com tensão abaixo do valor nominal apresentam dificuldades para partir ou acionar cargas de alta inércia. Por exemplo, se a tensão de alimentação for 80% do valor nominal, o conjugado de partida disponível é somente cerca de 64% do seu valor original.

O nível de tensão da rede deve ser regularmente monitorado e registrado, preferencialmente durante um ciclo completo de operação.

A figura 8 mostra o efeito da variação da amplitude da tensão no rendimento, no fator de potência, na corrente e na velocidade de um motor de indução trifásico operando com carga constante e inferior ao seu valor nominal.

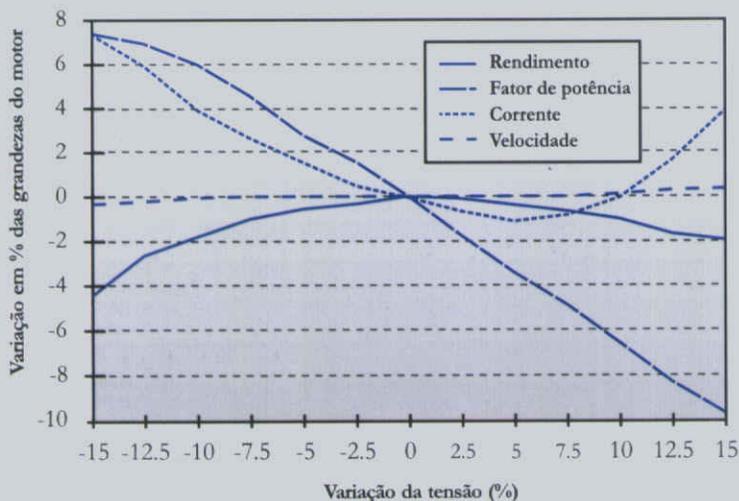


Figura 8 – Influência da variação da tensão no desempenho de um Motor de Indução Trifásico.

Observa-se que o fator de potência é a grandeza mais afetada. Embora, nesta figura, a velocidade (RPM) aparente permanecer praticamente inalterada, na realidade, o que interessa é o escorregamento que pode variar de alguns pontos percentuais.

Os motores de alto rendimento apresentam a vantagem adicional de serem menos sensíveis à variação da amplitude da tensão, devido a melhores projetos e materiais de construção.

Desequilíbrio da Rede Elétrica

Entre as causas do desequilíbrio de um sistema trifásico, a principal é a ligação desproporcional de cargas monofásicas, tais como sistemas de iluminação e motores monofásicos. Outras causas de desequilíbrio podem ser:

- A utilização de cabos com bitolas diferentes. Isto pode ocorrer em pequenas instalações onde transformou-se uma rede monofásica em trifásica;
- Uma falta de fase-terra não identificada;
- Um circuito aberto em algum ponto do sistema de distribuição.

O desequilíbrio das tensões provoca vários problemas, tais como:

- Desperdício de energia devido à existência de maiores perdas provocadas por altas correntes desequilibradas (redução da eficiência);
- Elevação da temperatura acima dos limites aceitáveis pelo motor;
- Redução do conjugado disponível para a carga, pela existência de componente de campo magnético girante em sentido contrário ao da rotação do motor;
- Pequena redução do fator de potência.

Segundo a NBR 7094, um sistema trifásico é considerado praticamente equilibrado se:

- a componente de seqüência zero não exceder a 1% da componente de seqüência positiva;

e também se:

- a componente de seqüência negativa não exceder a 1% da componente de seqüência positiva por um período prolongado ou a 1,5% durante um período curto não superior a alguns minutos.

O cálculo do desequilíbrio só pela consideração de amplitudes diferentes pode acobertar erros, mas como a medição da defasagem exige instrumentação sofisticada, em nível industrial, a NBR 7094 admite, para fins práticos, que o desequilíbrio da rede seja definido pela seguinte expressão aproximada:

$$\text{Desequilíbrio de tensão} = \frac{\text{Máxima tensão medida} - \text{Valor médio das tensões medidas}}{\text{Valor médio das tensões medidas}} \times 100$$

Por exemplo, suponha que foram feitas medições nas três fases de uma rede e os seguintes valores foram encontrados: $V_a = 210 \text{ V}$; $V_b = 215 \text{ V}$ e $V_c = 205 \text{ V}$.

- O valor médio é 210 V;
- A diferença entre a máxima tensão e o valor médio é 5 V;
- O desequilíbrio de tensão é 2,4% ($100 \times 5 / 210$).

A figura 9 ilustra a influência do desequilíbrio das tensões no desequilíbrio das correntes, para as condições de partida, plena carga e em vazio. Por exemplo, um desequilíbrio de 2,4% das tensões provoca um desequilíbrio das correntes de plena carga na faixa de 16 a 20%.

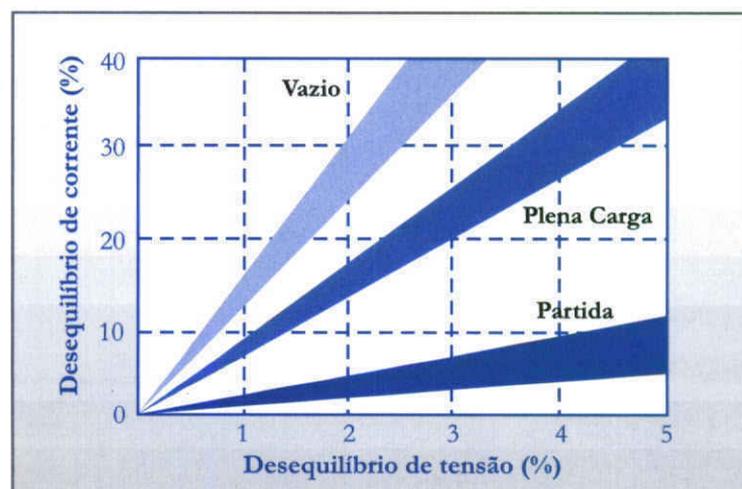


Figura 9 – Efeito do desequilíbrio da tensão nas correntes de um motor de indução trifásico.

Estudos já demonstraram que um pequeno desequilíbrio de 3,5% na tensão pode aumentar as perdas do motor em 20%. Um desequilíbrio de 5% ou mais pode destruí-lo rapidamente.

Severos desequilíbrios (acima de 5%) causam problemas imediatos, mas pequenos valores na faixa de 1% a 2% também são prejudiciais, pois podem ocasionar significativos aumentos no consumo de energia por muito tempo, sem serem detectados, principalmente se o motor está superdimensionado. A tensão da rede deve ser regularmente monitorada e um desequilíbrio maior do que 1% deve ser corrigido.

Segundo a norma NBR 7094, devem-se aplicar fatores de redução para a potência disponível no eixo de motores da categoria N quando os mesmos são alimentados por tensões desequilibradas, de modo que a elevação de temperatura admissível não seja excedida.

Para as outras categorias, é recomendável consultar o fabricante ou examinar as medições de temperatura de funcionamento.

A figura 10 indica os fatores de redução que devem ser adotados conforme o valor percentual do desequilíbrio das tensões da rede.

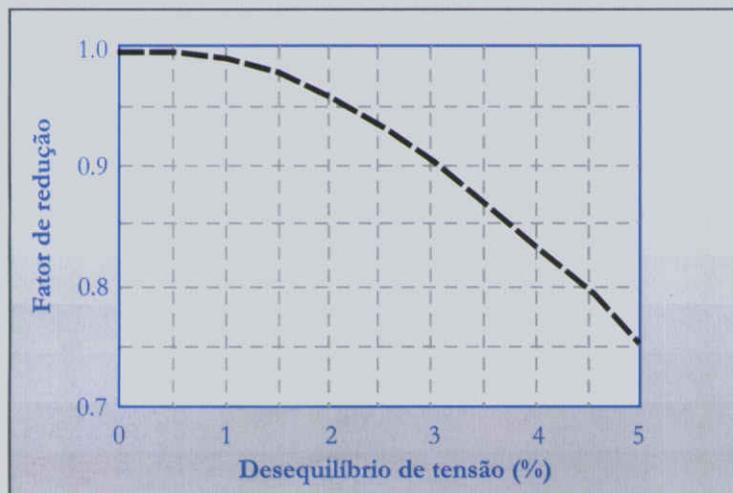


Figura 10 – Curva do fator de redução para a potência disponível no eixo.

Harmônicos

Dentre as diversas formas de se acionar um motor elétrico, existe o emprego cada vez maior de inversores de frequência. Ocorre que a utilização de tais inversores causa distorção das formas de onda da tensão e/ou da corrente. As curvas das tensões e correntes apresentam um comportamento diferente de uma senóide pura e, então, diz-se que elas contêm uma série de harmônicos.

Os harmônicos aumentam as perdas do motor, reduzem o conjugado disponível para a carga e provocam a existência de conjugados pulsantes. Em consequência, o motor apresenta aquecimento, vibração e redução de sua eficiência. Os harmônicos podem ainda ocasionar redução da vida útil, pela danificação dos rolamentos, fadiga no eixo ou deterioração do sistema de isolamento.

Segundo a NBR 7094, os motores de indução trifásicos (exceto os motores de categoria N) e os motores de indução monofásicos devem poder funcionar sob uma tensão de alimentação cujo fator de harmônicos de tensão (FHV) seja igual ou inferior a 0,02, salvo declaração em contrário do fabricante. Os motores de categoria N devem poder funcionar sob uma tensão de alimentação cujo FHV seja igual ou inferior a 0,03. O FHV deve ser calculado usando a seguinte expressão:

$$FHV = \sqrt{\sum \frac{u_n^2}{n}}$$

onde:

u_n → valor por unidade do harmônico de tensão, referido à tensão nominal;

n → ordem do harmônico (que não seja divisível por três no caso de motores trifásicos).

Geralmente é suficiente considerar os harmônicos de ordem inferiores a 13.

Por exemplo, suponha um motor da categoria N alimentado por um inversor fonte de tensão de 6 pulsos. A tensão aplicada ao motor tem o seguinte conteúdo harmônico:

Ordem do harmônico	5	7	11	13
Amplitude do harmônico	$V_n/5$	$V_n/7$	$V_n/11$	$V_n/13$

$$FHV = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{5}\right)^2}{5} + \frac{\left(\frac{1}{7}\right)^2}{7} + \frac{\left(\frac{1}{11}\right)^2}{11} + \frac{\left(\frac{1}{13}\right)^2}{13}} = 0,11 > 0,03$$

Logo, a alimentação do motor por este inversor somente é permitida se forem utilizados filtros para os harmônicos.

Os motores de alto rendimento suportam mais facilmente os efeitos prejudiciais dos harmônicos, por apresentarem uma maior margem térmica e menores perdas. Os harmônicos podem ser minimizados com a instalação de filtros. Os filtros passivos apresentam um custo correspondente a uma parcela reduzida do valor do dispositivo de controle de velocidade (inversor de frequência).

O que Fazer Quando o Motor Danificar?

A queima do motor provoca uma tomada de decisão: ou se compra um motor novo ou providencia-se o seu reparo. Esta decisão deve ser influenciada por:

- Custo operacional do motor reparado em relação ao motor novo;
- Idade do motor;
- Características elétricas ou mecânicas especiais;
- Necessidade de ter o motor de volta em operação imediatamente.

O reparo do motor, geralmente, apresenta um menor custo inicial em relação ao custo da aquisição do motor novo. Entretanto, o motor reparado pode apresentar um rendimento menor. Em geral, isto se deve ao fato de que, no reparo do motor, as suas características elétricas e/ou magnéticas e/ou mecânicas de projeto são muitas vezes alteradas, aumentando-se suas correspondentes de perdas.

Uma das principais causas do aumento destas perdas é o processo utilizado para remoção das bobinas do estator. A prática normalmente utilizada é a de aquecer o núcleo numa estufa para facilitar a remoção do enrolamento. No entanto, se o núcleo do estator for aquecido demasiadamente, ele perde as suas propriedades através da ruptura da isolamento entre as lâminas do pacote magnético, provocando aumento das perdas do núcleo. Outras práticas de remoção do enrolamento conhecidas são o uso de maçarico e o uso de combustíveis. Estas práticas são extremamente danosas e devem ser evitadas. É fundamental que as perdas dos motores não sejam aumentadas durante o processo de reparo, pois isto aumentará o desperdício de energia elétrica ano após ano.

Se observarmos que os motores elétricos são os maiores responsáveis pelo processamento de energia elétrica das indústrias, podemos concluir que rebobinar ou não motores queimados deve ser uma decisão baseada não só na comparação de preços entre a compra de um motor novo ou do seu reparo, mas também no custo operacional do motor ao longo dos anos, horas de operação no ano, fator de carga, preço da energia elétrica e análise econômica (payback).

Se o reparo for a opção a ser adotada, é importante procurar uma empresa especializada envolvida com a questão do rendimento do motor.

Escrito por:

Reinaldo Shindo – CEPEL

George Alves Soares – CEPEL

Ronaldo de Paula Tabosa – PROCEL/ELETROBRÁS

Editado por:

CEPEL & ELETROBRÁS

Agosto/1998 – 1ª edição.