



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 14 7835
Tópico: Eficiência Energética na Indústria

PROBLEMAS DE QUALIDADE DA ENERGIA E SUA INFLUÊNCIA NO RENDIMENTO DE SISTEMAS MOTRIZES INDUSTRIAIS

*ROGÉRIO D. DE
SOUZA. E SILVA
UFPA
ANTÔNIO FÉLIX T.
NEGRÃO JR.
UFPA

MARIA EMÍLIA DE
LIMA TOSTES
UFPA
HELDO SAMUEL DA
SILVA
UFPA
HELEN SANTOS DE
PAIVA
UFPA

UBIRATAN HOLANDA
BEZERRA
UFPA
ROBERTO C. BARROS
FREIRE
UFPA
NÉLITON SANTOS
MACIEL
UFPA

EDSON F. RIBEIRO
UFPA
FÁBIO M. SENA
UFPA

RESUMO

Este trabalho apresenta a modelagem matemática e resultados de simulações computacionais de dois tipos de cargas industriais acionadas por motores de indução: Bombas centrífugas e Correias transportadoras. Estima-se que a indústria consome cerca de 43 % da energia elétrica produzida no Brasil, ou seja, 150 bilhões de kWh/ano e 25 % deste total são compostos por bombas centrífugas e correias transportadoras. As simulações consideram diversas condições de operação e da rede de alimentação.

PALAVRAS-CHAVE

Conservação de Energia, Qualidade da Energia, Bombas Centrífugas, Correias Transportadoras, Sistemas Industriais.

1.0 INTRODUÇÃO

O estudo da eficiência energética tem sido um dos assuntos mais discutidos nos últimos anos, isso se deu devido ao crescimento incessante das atividades que exigem a utilização de energia elétrica. Este fato faz com que seja necessário expandir continuamente a capacidade instalada do sistema elétrico, para fazer face a esta demanda crescente. Para se ter uma idéia o

consumo de energia elétrica, no Brasil, em 1990 foi de 205 bilhões de kWh e em 2000 de 306 bilhões de kWh, um aumento de 49% em apenas 10 anos.

O parque industrial brasileiro consome cerca de 150 bilhões de kWh/ano [MME, 2004], ou seja aproximadamente 46,9 % da energia elétrica produzida em nosso país. Tais números mostram um grande potencial de redução de consumo de energia elétrica. Esta redução deve ser planejada através de estudos de otimização dos processos industriais, de forma que haja redução no consumo de energia elétrica sem haver redução do crescimento econômico do país. Em instalações elétricas industriais, uma das maiores demandas é o acionamento de cargas através de motores elétricos de indução, consumindo em média 55 % da energia elétrica destinada a este setor.

Para se ter uma idéia da importância dos sistemas motrizes no consumo de energia elétrica, ganhos de 1% representa a não entrada de usinas de mais de 230 MW – 4% equivaleriam a mais que uma turbina de Itaipu (Itaipu opera com 18 turbinas de 700MW –ONS, 2003). Se reduzirmos em 5% a energia elétrica destinada aos motores elétricos, será economizado, por ano, aproximadamente 4,13 Bilhões de kWh, equivalente a R\$ 455,00 milhões por ano.

Diante deste contexto, o presente trabalho apresenta a modelagem matemática de bombas

centrífugas e correias transportadoras, objetivando a simulação computacional desses sistemas, como forma de obter parâmetros de eficiência energética.

2.0 SISTEMAS MOTRIZES

O motor de indução é o tipo de motor elétrico mais utilizado e difundido, principalmente em processos industriais. Sua principal vantagem é a eliminação do atrito de todos os contatos elétricos deslizantes e uma construção bastante simples, o que possibilitou sua construção a um custo ainda mais baixo, sendo que estas máquinas são fabricadas para uma grande variedade de aplicações, desde alguns watts até muitos megawatts. Além de ser robusto em termos de operação, proporcionando vantagens econômicas consideráveis tanto na aquisição, quanto na manutenção [Haddad, 2001]. Atualmente tem-se disponível no mercado motores com estrutura otimizada, denominados motores de alto rendimento, os quais são projetados com melhorias de pontos vitais onde se concentra a maioria das perdas. Porém, outro aspecto essencial a ser considerado na eficiência de sistemas motrizes é a análise do carregamento, ou seja, os tipos de carga a serem acionadas. Na seção a seguir apresenta-se a modelagem de dois tipos de cargas estudadas neste artigo.

3.0 MODELAGEM DAS CARGAS

A modelagem matemática de elementos presentes em sistema elétricos industriais, é o primeiro passo para a simulação computacional desses sistemas. A representação adequada do comportamento das cargas mecânicas a serem acionadas por motores de indução, permitirá a análise do comportamento eletromecânico do motor de indução em função das características de cada tipo de carga.

Neste artigo são apresentados os modelos matemáticos para correias transportadoras e bombas centrífugas, ambos modelados em função do torque mecânico aplicado ao eixo do motor, apresentados a seguir.

Correia Transportadora

A correia transportadora é o meio mais versátil e difundido para movimentação de carga em instalações industriais. Essa movimentação de carga é executada por meio de uma força

requerida pela correia, fornecida por um motor [Manual Técnico, 1995]. Representa aproximadamente 2% das cargas industriais, porém em alguns segmentos, tais como indústrias mineradoras, são responsáveis por grande parte do consumo de energia elétrica [MME, 2004], representando um excelente foco para otimização, visando alcançar o máximo desempenho com menor consumo energético.

Os componentes básicos de um sistema de transporte por correia apresentados na Figura 1, são:

Correia: parte externa do sistema de transporte, elemento que entra em contato com a carga, comumente fabricado de fibras têxteis, deve possuir características robustas para transporte de diversos tipos de materiais;

Rolete de carga: são os elementos de sustentação da correia, basicamente divididos em: roletes transportadores, de retorno, auto-alinhadores e limpadores;

Tambor de tração (polia): encontra-se nas extremidades do equipamento e é responsável pela inversão de sentido e retorno da correia. As polias se dividem motoras e movidas, sendo a primeira acoplada a um motor e responsável pela tração na correia, enquanto a segunda tem a principal função de manter uma tensão suficiente, através dos esticadores, para o bom funcionamento do equipamento;

Conjunto de acionamento: equipamentos utilizados para impor movimento a correia, cujo elemento principal é o motor de indução.

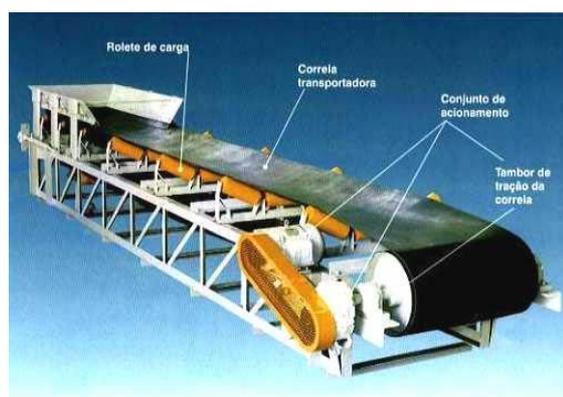


Figura 1. Sistema de transporte por correia.

Em um transportador, o motor terá que transmitir, para que seja possível o deslocamento do material, uma força tangencial à superfície do tambor de acionamento, capaz de superar o atrito da correia com os elementos do transportador, o

peso do material transportado, bem como vencer as condições do transporte nas mudanças de elevação. Essa força tangencial, transmitida pelo motor, é chamado Esforço Efetivo, coloquialmente denominada de tensão efetiva (T_e) [Manual Técnico, 1995].

Para a modelagem matemática de um transportador de correia, em função do torque do motor, deve-se considerar três grandezas mecânicas principais: tensão para mover a correia vazia (T_v), tensão para mover a carga (T_c) e tensão de elevação (T_h).

A tensão requerida para a movimentação da correia vazia é representada pela seguinte equação:

$$T_v = 0,32.C_f.C_v.P \quad (1)$$

em que:

C_f - fator de correção do comprimento, em metros;

C_v - coeficiente de atrito para vencer a resistência oferecida pelas partes móveis;

P - peso das partes móveis, em Kg/m.

Para movimentação da carga é necessário uma tensão obtida através de:

$$T_c = 0,32.C_f.C_c.P_m \quad (2)$$

em que:

C_c - coeficiente de atrito;

P_m - peso do material transportado, em kg/m.

A tensão para movimentação da carga em variações de elevação representa-se através da equação:

$$T_h = P_m.H \quad (3)$$

em que:

P_m - peso do material transportado, em kg/m;

H - altura de elevação da carga, em m.

Somando-se todos os elementos de tensão considerados nas equações de 1 a 3, obtém-se a Tensão Efetiva (T_e), expressa através de:

$$T_e = 0,32.C_f.[(P.C_v) + (P_m.C_c)] \pm P_m.H \quad (4)$$

O valor de potência do motor (P_m) necessária para o acionamento da carga é dado pela equação:

$$P_m = \left(\frac{(T_e.V)/k}{\eta_c} \right) \quad (5)$$

em que:

T_e - tensão efetiva, kgf;

V - velocidade da correia transportadora;

η_c - rendimento da correia.

Bomba Centrífuga

São máquinas nas quais a movimentação do líquido é produzida por forças que se desenvolvem na massa líquida, em consequência da rotação de rotor com um certo número de pás especiais. A distinção entre os tipos de bombas de fluxo é feita, fundamentalmente, em função da forma como o rotor cede energia ao líquido, bem como pela orientação do líquido ao passar pelo rotor.

De acordo com a norma NBR10131 (Nov/1987), *Bombas (Hidráulicas) de Fluxo*, denomina-se centrífuga ou radial a bomba de fluxo aquela que o formato do rotor impõe um escoamento segundo planos perpendiculares ao eixo.

Segundo [MME, 2004] bombas centrífugas consomem cerca de 22 % de energia do total fornecido as indústrias brasileiras, representando significativo potencial para redução de consumo de energia.

Neste trabalho a modelagem matemática da bomba centrífuga foi realizada em função do torque requerido pelo motor de indução. Desta forma, deve-se considerar a seguinte equação:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

em que:

P_h - potência hidráulica da bomba, em kW;

- ρ - massa específica do fluido, em kg/m³;
 g - aceleração da gravidade, em m/s²;
 H - altura total de elevação da bomba, metros;
 Q - vazão, em m³/s.

Para determinação da potência do motor (P_m) requerido pelo motor tem-se:

$$P_m = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{\eta_b} \quad (7)$$

Consequentemente, o torque necessário para acionar a carga é dado por:

$$T = P_m \cdot n \quad (8)$$

em que:

- P_m - potência mecânica do motor, em kW;
 η_b - rendimento da bomba centrífuga;
 T - torque, em N.m;
 n - rotação do eixo do motor, em rpm.

Observa-se nas equações 7 e 8, que as variáveis fundamentais para o dimensionamento do sistema de bombeamento são a vazão e altura de elevação. A vazão é característica intrínseca das máquinas de fluxo, sendo proporcional a rotação do motor, esta propriedade pode ser representada através das seguintes relações:

Vazão (Q) proporcional a velocidade (V):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (9)$$

Altura proporcional ao quadrado da velocidade:

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \quad (10)$$

Potência (P) diretamente proporcional ao cubo da velocidade:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^3 \quad (11)$$

As relações de 9 a 11, mostram a variação da potência do sistema em proporção três vezes maior a velocidade do motor. Tal característica

das máquinas de fluxo (bombas e ventiladores) deve ser analisada cuidadosamente, principalmente quando for realizada a substituição dos motores convencionais por máquinas de alto rendimento, em virtude da maior velocidade características de motores projetados para obter maior rendimento, conforme pode ser verificado na Figura 2.

A Figura 2 apresenta as velocidades do motor convencional (cinza) e alto rendimento (preto) em função da potência, observa-se eu para determinados valores de potência a velocidade do motor de alto rendimento é maior, nestes casos segundo [Hsu *et al*, 1995], em sistemas de bombeamento e ventilação industrial, pode haver aumento no consumo de energia na utilização de motores de alto rendimento.

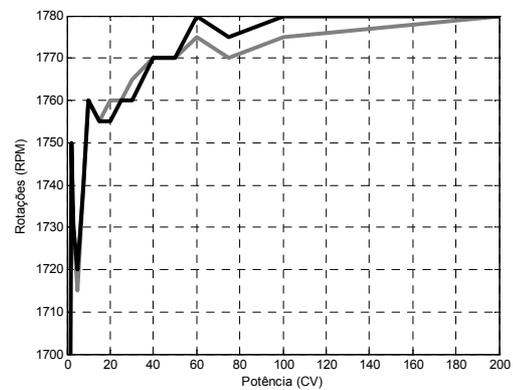


Figura 2. Velocidade do motor versus potência

4.0 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Após a modelagem matemática dos sistemas motrizes considerados, realizou-se a implementação computacional. Utilizou-se para tanto o *software Simulink*TM da *Mathworks*TM, bastante utilizado na comunidade científica para simulação dinâmica de sistemas. Considera-se neste artigo um modelo dinâmico de segunda ordem do motor de indução.

Realizou-se as simulações considerando diversas condições de alimentação, tais como: tensão nominal, sobretensão e subtensão, analisando-se o impacto de tais distúrbios no rendimento do sistema motriz.

Sistema de Transporte por Correia

A simulação do sistema de correia transportadora acionado por um motor de indução, foi realizada considerando um caso hipotético de transporte de minério, possuindo as seguintes configurações mecânicas e elétricas:

Características mecânicas:

- Peso das partes móveis (Pm): Corresponde ao peso das partes móveis do transportador por metro linear. Os valores de P são baseados no peso total da correia transportadora em uso, peso total dos tambores envolvidos pela correia, peso total dos rolos de carga e peso total dos rolos de retorno, nesta simulação utilizou-se um peso de 51 kg.

- Coeficientes de Atritos de Carga : Devem ser considerados dois coeficientes, sendo um na determinação horizontal da carga e um para determinação da tensão da correia vazia.

- Fator de correção de comprimento: obtido através de tabela fornecida em [Manual Técnico, 1995]. Para o caso do transportador simulado, o fator de correção de comprimento é 316.

- Peso do material transportado: Utilizou-se o valor de 94.44kg/m como o peso do material transportado.

- Altura de Elevação da Carga: Altura em que a carga se encontra em relação ao solo. No caso estudado, a carga encontra-se a 18 metros do solo.

Características elétricas:

De acordo com o projeto realizado, necessitou-se de um motor trifásico de 50 CV, 4 pólos, com tensão de fase de 220 V e rendimento de 0,91 para acionar a carga.

Foram utilizados para análise os valores de tensão de alimentação apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Valores de tensão utilizados na simulação.

Tensão Nominal (V)	Sobretensão			Subtensão		
	5%	7,5%	10%	5%	7,5%	10%
220	231	236,5	242	209	204	200

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para rotação do motor. Observa-se na curva cinza o valor de rotação para tensão nominal, o valor encontrado em regime permanente mantendo-se

o carregamento constante foi de 1639,7 rpm, enquanto que considerando a tensão 10 % acima do valor nominal obteve-se o valor de 1672,1 rpm, conforme a curva na cor preta. A curva azul representa a rotação sob condição de subtensão, com valor de 10 % abaixo do nominal, resultando em 1599,7 rotações por minuto.

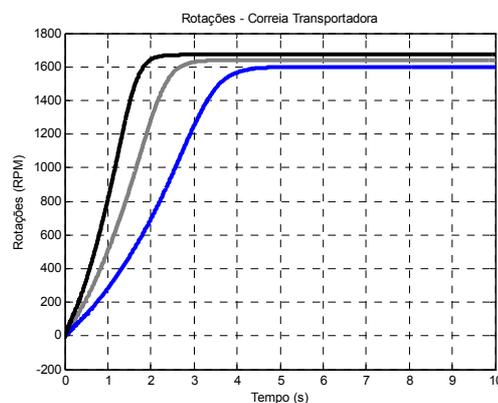


Figura 3. Rotações de um motor de indução acionando uma correia transportadora.

A Figura 4, ilustra as formas de onda de corrente no rotor do motor de indução. O gráfico em preto resulta da simulação na condição de subtensão, enquanto que na curva azul, mostra a forma de onda de corrente quando o motor é alimentado pela tensão nominal. Observa-se a curva na cor preta com maior amplitude tanto em regime transitório quanto em regime permanente.

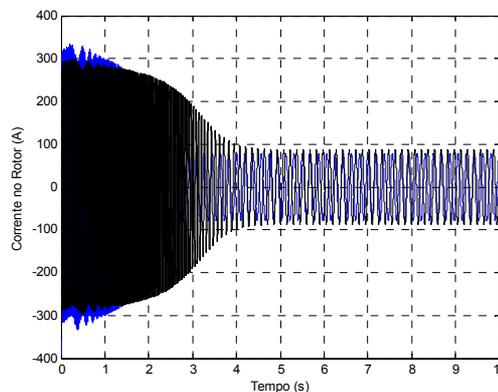


Figura 4. Corrente no Rotor (acionamento de correia transportadora).

A Tabela 2 apresenta os valores de variação de corrente no estator e rotor, sob as condições de ensaio.

Tabela 2: Valores de Corrente – Correia Transportadora

Corrent	Tensão	Sobretensão	Subtensão

e (A rms)	Nominal				
		10% Redução	10% Acréscimo		
Corrente no rotor (A rms)	54,22	48,47	10,6 %	61,33	4,3 %
Corrente no estator (A rms)	56,89	50,51	11,2 %	63,56	11,7 %

A Figura 5 representa o torque eletromagnético do motor de indução, considerando também tensão nominal (cinza), bem como subtensão (preto).

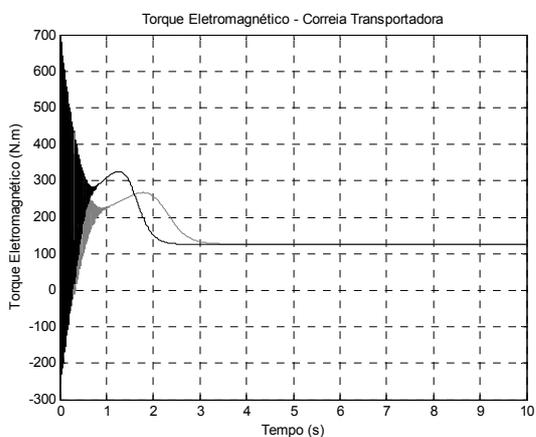


Figura 5. Torque Eletromagnético para o acionamento da correia transportadora.

Sistema de Bombeamento

O sistema de bombeamento considerado nesta simulação, consiste em uma instalação típica para captação de água potável, com as seguintes características principais: bomba centrífuga cuja vazão é 0,5 m³/s, altura total (recalque e elevação) de 15 m.

De acordo com o projeto, tornou-se necessário a utilização de um motor de indução trifásico, quatro pólos de 150 CV e rendimento de 0,94. A carga máxima acionada pelo motor, ou seja a condição de plena carga, foi de 52,42 N.m.

Observa-se na Figura 6 as curvas referentes a rotação do motor de indução em função da variação da tensão de alimentação. Com o sistema sendo alimentado com o valor nominal de tensão verificou-se a velocidade em regime permanente alcançando 1545 rotações por minuto, conforme a curva cinza. Na condição de

sobretensão de 10 % do valor nominal, obteve-se 1600,4 rpm (curva na cor preta), para 5 % 1575,5 rpm. Na simulação de subtensão verificou-se rotação de 1484,4 rpm, considerando uma redução de 7,5 % da tensão nominal, a curva em azul na Figura 6 representa a rotação com tensão de alimentação de 200 V, atingindo em regime permanente 1465 rpm.

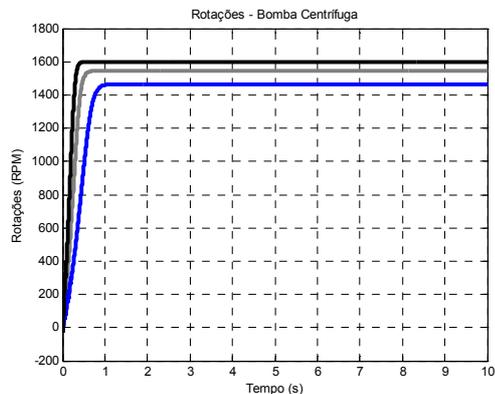


Figura 6. Rotações de um motor de indução acionando uma bomba centrífuga.

A Tabela 3 mostra alguns dos valores obtidos nas simulações, observe que o sistema sendo alimentado com tensão abaixo do valor nominal, o valor de corrente no estator pode aumentar em até 26,7 %, resultando em acréscimo das perdas, podendo levar a saturação da máquina.

Tabela 3: Valores de Corrente – Bomba Centrífuga

Corrente (A rms)	Tensão Nominal	Sobretensão		Subtensão	
		10%	Redução	10%	Acréscimo
Corrente no rotor (A rms)	24,25	21,55	11 %	28,21	16 %
Corrente no estator (A rms)	25,38	22,85	9,9 %	28,94	26,7 %

As formas de onda do toque eletromagnético, sob as condições simuladas são apresentadas na Figura 7.

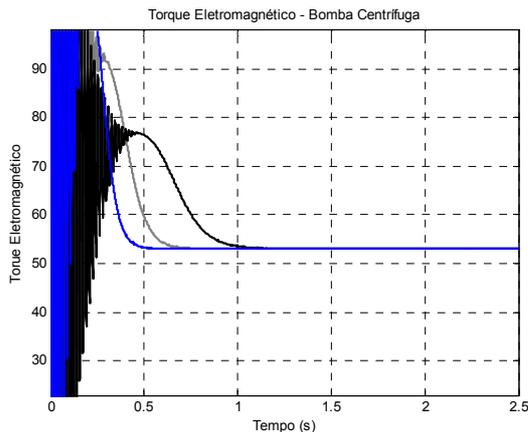


Figura 7. Torque Eletromagnético para o acionamento de uma bomba centrífuga.

Observa-se na forma de onda em preto o torque para condição de subtensão, em que a máquina tem resposta mais lenta, em relação a curva de valor nominal, em cinza, para adequar o torque ao valor necessário.

6.0 CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou a modelagem e simulação computacional de bombas centrífugas e correias transportadoras, acionadas por um motor de indução.

As rotações do motor assíncrono diminuem, quando aumenta-se a carga. A característica do rendimento mostra que este é baixo para cargas reduzidas, torna-se maior com o aumento da carga e adquire o seu valor máximo em correspondência ao valor nominal da carga do motor.

Verificou-se parâmetros como: rotação, corrente no rotor e estator, e torque eletromagnético, e a

dependência destes a qualidade da tensão fornecida. O aumento da tensão de alimentação resulta na redução das correntes no estator e rotor, porém aumento na rotação do mesmo, que para acionamento de bombas resulta em elevação das perdas.

Observou-se nos sistemas operando com subtensão o aumento da corrente absorvida, para manter o torque, o que provocará a elevação das perdas por efeito joule, provocando elevação de temperatura, reduzindo o rendimento do sistema.

Os resultados apresentados a partir dos sistemas modelados, mostram a importância da simulação computacional para estimação e análise de parâmetros de sistemas motrizes de qualquer dimensão, contribuindo para os estudos de eficiência energética.

9.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Haddad, J. et al (2001). Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos. Ed. Efei, 2ª edição.
- [2] Mamede Filho, j. (1997) Instalações Elétricas Industriais, Ed. LTC, 5ª edição.
- [3] Krause, P.C. (1995) Analysis of Electric Machinery, Ed. IEEE Press, 1ª edição.
- [4] Hsu, J.S et al (1995) Efficiency and Reliability Assessments of Retrofitted High-Efficiency Motors. IEEE Xplore.
- [5] Ministério de Minas e Energia (2004), Balanço Energético Nacional, Ano Base 2003, Brasília, Dezembro.
- [6] Catálogo Geral de Motores (2002) – Motores WEG, setembro.
- [7] Manual Técnico (1995) - Correias Transportadoras Elevadoras. Correias Mercúrio, 2ª edição.

