

SIMULAÇÃO DO POTENCIAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO COM ACIONAMENTO A VELOCIDADE VARIÁVEL

Victor de Paula Brandão Aguiar, Ricardo Silva Thé Pontes, Adson Bezerra Moreira e Celso Rogério Schmidlin Júnior

Universidade Federal do Ceará, Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes, Departamento de Engenharia Elétrica, Caixa Postal 6001, Campus do Pici, Bloco 705, 60455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil.

Carlos Almir Monteiro de Holanda

Universidade Federal do Ceará, Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Caixa Postal 6001, Campus do Pici, Bloco 705, 60455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil.

Abstract: The paper aims at to analyse the impact of the speed variation in the induction motor on the energy balance of the set motor-compressor, through the modelling of motor and mechanical behaviour of the air compressor in the time domain. It was applied speed control technique and was developed a simulator in Matlab[®] environment. The load behavior, to the constant pressure, is modeled and incorporated the simulator. *Copyright © 2007 CBEE/ABEE*

Keywords: variable speed drive, energy, motor, efficiency, air compressed system.

Resumo: O trabalho visa analisar o impacto da variação de velocidade do motor de indução sobre o balanço energético do conjunto motor-compressor, através da modelagem de um motor de indução e do comportamento mecânico do compressor de ar no domínio do tempo. Foi aplicada uma técnica de controle de velocidade e desenvolvido um simulador em ambiente Matlab[®]. O comportamento da carga, à pressão constante, é modelado e incorporado ao simulador.

Palavras Chaves: acionamento a velocidade variável, energia, motor, eficiência, sistema de ar comprimido.

1 INTRODUÇÃO

Conservação e uso eficiente de energia são consideradas necessidades imediatas e tarefas eficazes no combate ao aquecimento global e promoção do bem-estar humano. Nos últimos anos, a preocupação com o tema sustentabilidade energética tem confirmado graves problemas de conservação de energia que já vinham sendo observados.

Na indústria, caso um setor se apresente com gastos energéticos acima da tendência natural, a preocupação é maior com relação a eficiência deste, pois implica

diretamente na queda de competitividade de seus produtos devido ao aumento do valor agregado.

Os sistemas motrizes industriais formam a base de manipulação dos processos industriais. Se estes sistemas apresentam característica de consumo não-eficiente de energia, todo o processo fabril começa a ser prejudicado, tornando-se assim um grande desafio para a engenharia de eficiência energética. A variação de velocidade dos acionadores das cargas, tem sido um destes desafios.

A variação na velocidade propicia alterações no processo com ganhos energéticos para o sistema, tornando o acionamento do motor ótimo para a devida

operação. Os motores de indução trifásicos, podem ter sua velocidade variada a partir da frequência de alimentação, através de um conversor eletrônico de características apropriadas e aplicabilidade certa aos sistemas motrizes: os inversores de frequência (ALMEIDA, 2005).

Os sistema motrizes representam, aproximadamente, 50% da energia elétrica consumida no setor industrial, mediante dados do BEN (2005). Os compressores de ar e de refrigeração representam 18% da energia consumida pelos sistemas motrizes. Com esses dados, se justifica o estudo de eficiência energética do sistema de compressão de ar industrial, quando submetido a variação de velocidade no motor.

A pesquisa é realizada no LAMOTRIZ-UFC (Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes), visando a efficientização energética de sistemas de força motriz em consumidores industriais, com toda estrutura de suporte ao trabalho: plantas industriais montadas, sistema supervisorio das plantas, banco de dados, dissertações, teses e artigos científicos produzidos no âmbito da eficiência energética em sistemas motrizes.

2 SISTEMAS DE COMPRESSÃO DE AR

Os sistemas de compressão de ar possuem várias características importantes de operação. Dentre os diversos aspectos operacionais, devem ser destacados dois: o ciclo de trabalho do compressor e os métodos de controle de carga.

2.1 Ciclos de trabalho

Os compressores são divididos em volumétricos e dinâmicos, por princípio de funcionamento, e possuem ciclos de trabalhos que variam com o tipo de máquina. Segundo Rollins (1989), os compressores volumétricos atingem altas pressões (faixa entre 6,9 e 6900 bar) e baixas e médias vazões (até 283 m³/min), enquanto os compressores dinâmicos trabalham em baixas e médias pressões (máximo de 690 bar) e grandes vazões (ordem de 28300 m³/min).

Para este trabalho, o compressor utilizado é do tipo volumétrico, parafuso, óleo-injetado, 3 (hp), com perfil sigma 5/6, câmara de compressão para pressão de trabalho de 5 à 13 bar, presente no LAMOTRIZ na bancada do sistema de compressão de ar.

Identificou-se o ciclo de trabalho do compressor por Rodrigues (1991), como o ciclo sem uso de válvulas de admissão ou descarga. A partir deste diagnóstico, foi verificado o comportamento típico de compressores volumétricos tipo parafuso à pressão de trabalho constante, o que resulta em uma carga de conjugado médio constante durante o ciclo, análogo aos compressores volumétricos alternativos. (ROLLINS, 1989)

2.2 Métodos de controle de carga

Existem métodos usuais de controle de carga que interferem na demanda e consumo elétrico do sistema de compressão, (ALMEIDA, 2005). Levando-se em conta que o sistema de compressão procura manter a pressão de trabalho constante, ou dentro de limites próximos a um valor de referência, a vazão mássica do compressor é a variável a ser manipulada. (RODRIGUES, 1991)

O controle por estrangulamento na sucção interfere na demanda e no consumo elétrico do sistema de compressão visto que este provoca uma perda de carga, consequentemente, uma aumento na relação de compressão e uma pressão de trabalho constante. Esse fenômeno provoca um aumento no trabalho efetivo por unidade de massa. O estado termodinâmico do fluido também é alterado, reduzindo a massa específica e a vazão mássica.

Já o controle Liga/Desliga “ON/OFF” é tradicional e muito utilizado na indústria. Com um pressostato na descarga do compressor, este desliga o motor quando este atinge a pressão de trabalho máxima do sistema de compressão. Quando esta pressão de trabalho alcança o limite inferior de pressão (pressão de trabalho mínima), o motor é ligado novamente, mantendo a vazão de descarga constante. Um método de acionamento moderno e utilizado em compressores parafuso de médio e grande porte é o controle duplo (dual). Neste controle o pressostato na descarga do compressor, ao atingir a pressão de trabalho máxima, aciona a válvula de encaixe, dispositivo este que abre uma passagem de recirculação de ar entre os parafusos (lóbulo), retornando ar misturado a óleo para o filtro de óleo que em seguida é descarregado ao ambiente. Este processo, chamado de alívio, deixa o motor acoplado ao compressor à vazio. O tempo que o motor fica em alívio é controlado por um temporizador por determinado intervalo de tempo. Caso o tempo em alívio ultrapasse a duração de intervalo do temporizador, este desliga o motor. Caso a pressão mínima de trabalho seja alcançada antes do intervalo do temporizador, a válvula fecha a passagem e o processo de compressão reinicia.

Além destes métodos apresentados, há um terceiro com uso crescente: o método de acionamento a velocidade variável (VSD). Não há interferência da velocidade do motor nos dois métodos apresentados, e conforme Rodrigues (1991), nos compressores volumétricos tipo parafuso a vazão mássica (\dot{m}) é proporcional à velocidade do motor (ω) segundo a equação (1), estando a constante de proporcionalidade (K) em função do projeto construtivo do compressor.

$$\dot{m}_D(\omega) = \dot{m}_S(\omega) = \dot{m}(\omega) = K \cdot \omega \quad (1)$$

Assim o controle de vazão mássica do compressor é diretamente proporcional a velocidade do seu acionador, consequentemente, um método de controle da velocidade do motor de indução trifásico pode ser

utilizado com o objetivo de redução de demanda elétrica.

3 TÉCNICA DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE E MODELAGEM DO MOTOR DE INDUÇÃO

3.1 Controle Escalar de Velocidade

Das técnicas de controle de velocidade do motor de indução, a técnica de controle escalar de velocidade foi a utilizada com a consideração inicial de um conjugado médio mecânico constante.

As expressões que descrevem o desempenho do motor nas condições do controle escalar estão listadas nas equações (2) e (3).

$$\frac{V_1}{f_1} = \frac{V_2}{f_2} = \dots = \frac{V_n}{f_n} = 4,44 \cdot N_n \cdot K_e \cdot \phi_{EF} \quad (2)$$

$$C_e = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{P}{2} \right)^2 \cdot \phi_{EF} \cdot \left(\sum |F_{mmEF}| \right) \cdot \sin(\delta_{FmmEF}) \quad (3)$$

Onde:

N_n é o número efetivo de espiras responsável pelo acoplamento magnético no entreferro.

K_e é o fator de empilhamento da bobina.

ϕ_{EF} é o fluxo magnético no entreferro.

P é o número de pólos.

$\sum |F_{mmEF}|$ é o módulo da força magnetomotriz resultante no entreferro.

δ_{FmmEF} é o ângulo de conjugado eletromagnético.

Pode ser verificado que na equação (2) a razão “V/f” mantém o fluxo magnético no entreferro constante e este mantém, pela equação (3), o conjugado eletromagnético constante. A técnica apresenta resultados satisfatórios para uma faixa de frequência de até 50% da frequência nominal (MOREIRA, 2006, SCHMIDLIN, 2006).

3.2 Modelagem do Motor de Indução

Utilizando a técnica de controle escalar de velocidade, o modelo matemático do motor apresentado por Krause (1986), chamado modelo do motor de indução trifásico simétrico e equilibrado no domínio do tempo foi considerado para a aplicação. O modelo é descrito pela equação (4), as variáveis de entrada (x) e saída (y) pela equação (5) e nas expressões (6) e (7) estão descritos os parâmetros do sistema de equações diferenciais que descreve o modelo. Uma das variáveis de entrada é o conjugado externo ou de carga aplicado ao motor, que representa o comportamento da carga específica.

O modelo foi implementado em ambiente Matlab®, e foi usado o método de resolução numérica de equações diferenciais ordinárias de Runge-Kutta, (ONG, 1998).

$$\frac{d}{dt}[y] = -[D^{-1}][A][y] + [D^{-1}][x] \quad (4)$$

$$y = \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \\ \omega \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} V_s \\ V_r \\ C_{ext} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$D = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr}(\theta) & 0 \\ L_{sr}(\theta) & L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & -J \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A = \begin{bmatrix} R_{ss} & \frac{\partial}{\partial \theta} L_{sr}(\theta) \cdot \omega & 0 \\ \frac{\partial}{\partial \theta} L_{sr}(\theta) \cdot \omega & R_{rr} & 0 \\ [i_r]^T \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} L_{sr}(\theta) & 0 & -B \end{bmatrix} \quad (7)$$

Onde:

$[i_s]([i_r]) \rightarrow$ vetor das correntes do estator (rotor)

$[V_s]([V_r]) \rightarrow$ vetor das tensões do estator (rotor)

$[R_{ss}](R_{rr}) \rightarrow$ matriz diagonal das resistências do estator (rotor)

$[L_{sr}(\theta)] \rightarrow$ matriz das indutâncias mútuas estator-rotor

$\frac{\partial}{\partial \theta} L_{sr}(\theta) \rightarrow$ derivada espacial da matriz das indutâncias mútuas estator-rotor

$[L_{ss}](L_{rr}) \rightarrow$ matriz das indutâncias próprias do estator (rotor)

$[i_r]^T \rightarrow$ vetor transposto das correntes do estator

$C_{ext} \rightarrow$ conjugado externo (mecânico) aplicado ao eixo do motor

$J \rightarrow$ Momento de Inércia

$B \rightarrow$ Coeficiente de atrito viscoso

4 MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA

Para obtenção dos parâmetros do sistema que será usado na simulação, foram realizados ensaios que são descritos a seguir.

4.1 Determinação dos Parâmetros do Motor de Indução

Os parâmetros do motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo, 4 pólos, 3 hp e carcaça de alumínio foram obtidos a partir dos ensaios à vazio e com rotor bloqueado. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros do motor de indução	
Parâmetro	Valor
Resistência do Estator (Ω)	4,34
Resistência do Rotor (Ω)	4,34
Indutância de Magnetização (mH)	219,4
Indutância Dispersão Estator (mH)	11,5
Indutância Dispersão Rotor (mH)	11,5
J (N.m.s)	0,0008
B (kg.m ²)	0,0013

4.2 Determinação dos Parâmetros do Compressor

Os parâmetros do compressor foram obtidos a partir de ensaios realizados no laboratório LAMOTRIZ-UFC na planta do sistema de compressão.

Como a operação ocorre com pressão de trabalho constante, o compressor entrega um conjugado externo (C_e) constante ao motor, e com base nessa hipótese desenvolve-se uma metodologia para a obtenção dos valores de conjugado externo (C_e). A partir dos ensaios, utilizando a frequência da rede (60 Hz) foi obtido via sistema supervisor de aquisição de dados os valores de pressão, valores RMS de corrente, tensão, potência ativa, reativa e aparente. O tempo para aquisições é variável sendo fixado em 10 segundos para esta aplicação.

Com o suporte citado, pôde ser verificado um valor de conjugado externo (C_e) para determinada corrente a partir de um método iterativo com o simulador em ambiente Matlab®. São testados valores de conjugado (C_e^*), obtendo-se valores de corrente RMS, e a diferença entre a corrente obtida na simulação (I_a^*) pela

corrente média do ensaio (I_a) é o termo que representa o erro da iteração. O incremento ou decremento no próximo valor de conjugado externo é função deste erro. A Tabela 2 mostra os valores médios de corrente obtidos experimentalmente, com o respectivo valor de conjugado externo para cada pressão de trabalho. O erro para convergência do processo iterativo foi 1%.

Tabela 2: Pressão de trabalho, conjugado externo e média de valores de corrente adquiridos.

Pressão de Trabalho (bar)	Valores de corrente adquiridos (A)	Conjugado Externo (N.m)
	I_a	C_e
7	4,5	12,28
6	4,1	11,53
5	3,9	10,47

Os ensaios para obtenção dos dados da Tabela 2, foram iniciados com o sistema de compressão despressurizado e com temperatura ambiente e do motor a 25° C.

Após o cálculo dos valores de conjugado de carga foram checados os dados experimentais obtidos via sistema supervisor e os dados obtidos na simulação. Os erros nas variáveis elétricas não ultrapassou 5%.

5 SIMULAÇÃO E ANÁLISE

Para cada nível de pressão foram realizados testes variando a tensão e a frequência, utilizando a técnica “V/f” constante. Foi utilizada uma faixa de 42 a 60 Hz, faixa essa que mantém o fluxo magnético do entreferro constante e a temperatura do óleo na câmara de compressão satisfatória.

Nas Figuras 1, 2 e 3 observamos o comportamento das potências no motor e da potência mecânica, para cada nível de pressão de trabalho estabelecida (7, 6 e 5 bar respectivamente).

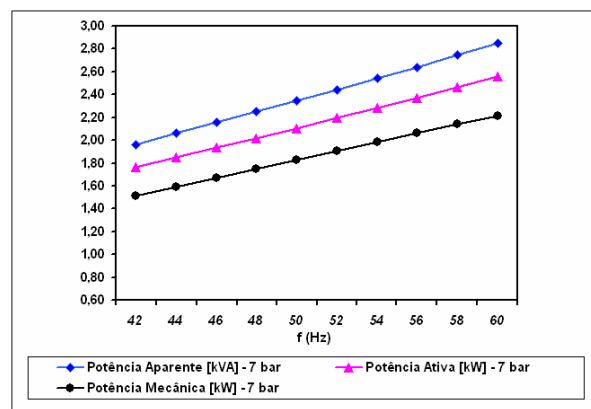


Figura 1: Potências do motor para operação com pressão de trabalho de 7 bar

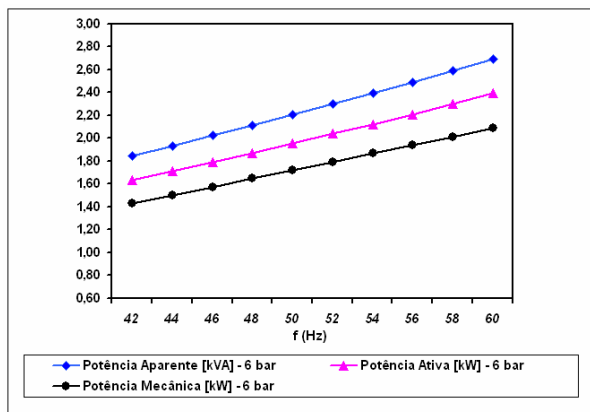


Figura 2: Potências do motor para operação com pressão de trabalho de 6 bar

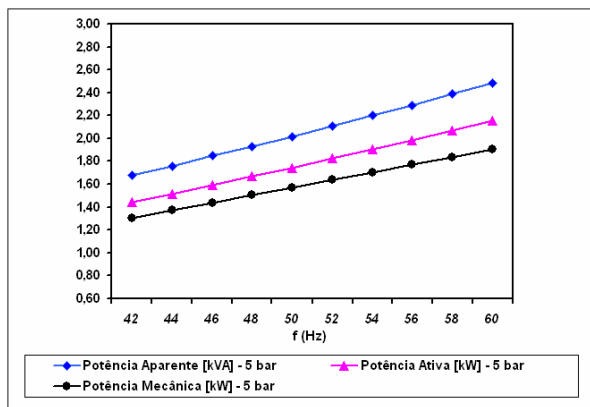


Figura 3: Potências do motor para operação com pressão de trabalho de 5 bar

Verifica-se nas Figuras 1, 2 e 3 que o comportamento das potências com a variação de frequência de alimentação é linear, sendo maior a inclinação na curva de potências aparente que nas curvas de potência ativa e mecânica.

Para pressões de 5, 6 e 7 bar, o comportamento do conjugado eletromagnético e da corrente do estator é mostrado nas Figuras 4 e 5 respectivamente. Observa-se que o conjugado desenvolvido e a corrente se mantêm constantes em determinado valor, para cada nível de pressão de trabalho e para a variação da frequência de alimentação, mostrando uma relação direta entre a corrente de alimentação do motor e o conjugado.

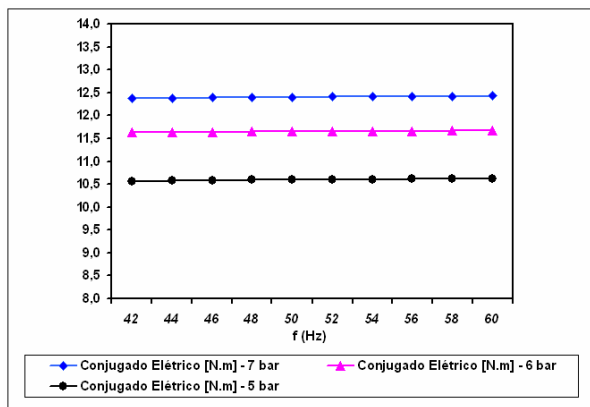


Figura 4: Conjugado Eletromagnético para pressões de trabalho de 5, 6 e 7 bar

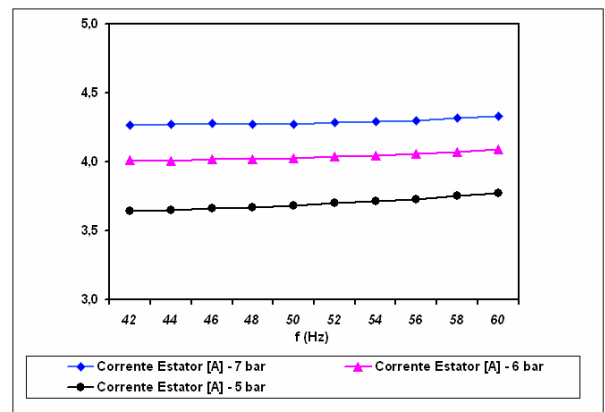


Figura 5: Corrente de alimentação para pressões de trabalho de 5, 6 e 7 bar

Observando as Figuras 6 e 7, verifica-se que a tendência da potência ativa e da potência mecânica desenvolvida seguem o mesmo comportamento. Então para cada frequência de alimentação do motor, e conseqüentemente, para cada velocidade do acionamento, há redução na energia consumida pelo motor. A partir da equação (1), verifica-se que para determinada pressão de trabalho, de 70% a 100% da vazão nominal, a velocidade do motor é proporcional a carga requerida pelo sistema de compressão, ou seja, qualquer redução de vazão (carga) do compressor, acompanhada de uma redução de velocidade do motor resulta em economia no consumo de energia elétrica do motor para um mesmo trabalho.

Na Figura 8, é observado que com a variação da pressão de trabalho, em velocidades acima de 54 Hz, a tendência do rendimento é se manter constante. Já para velocidades abaixo de 50 Hz nota-se um suave aumento do rendimento com a diminuição da pressão de trabalho.

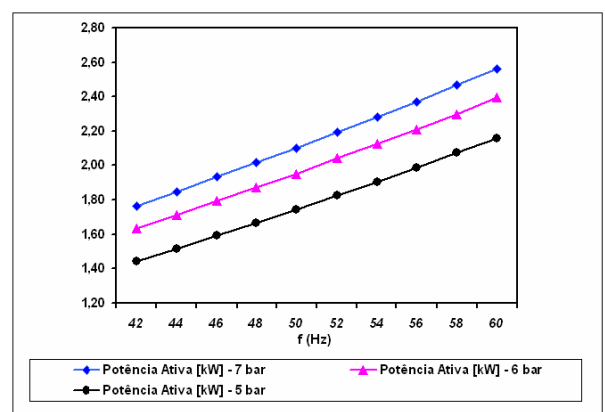


Figura 6: Potência ativa para pressões de trabalho de 5, 6 e 7 bar

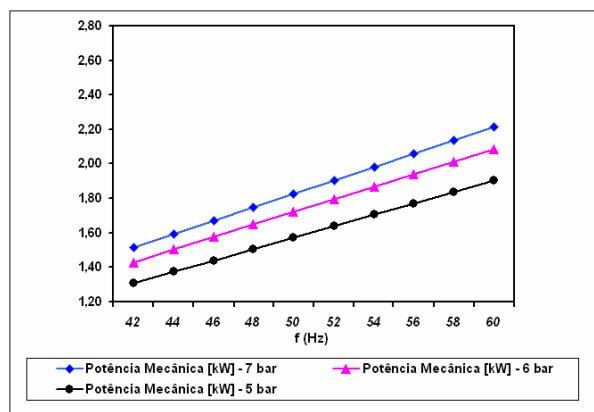


Figura 7: Potência mecânica para pressões de trabalho de 5, 6 e 7 bar

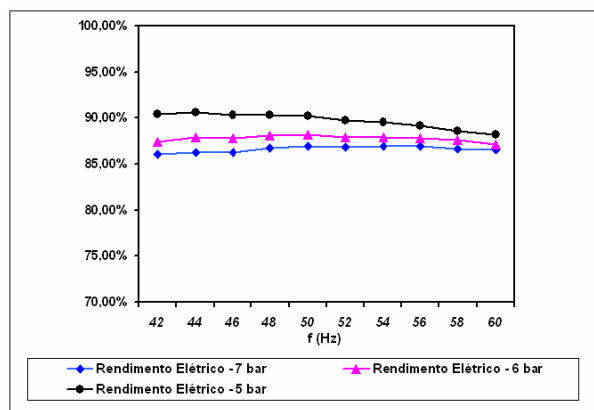


Figura 8: Rendimento elétrico para pressões de trabalho de 5, 6 e 7 bar

6 CONCLUSÕES

Este trabalho nos mostra que há potencial de ganhos energéticos no sistema de compressão com o acionamento à velocidade variável.

É verificado que, para a pressão de trabalho de 7 bar, uma redução de 30% na vazão nominal do compressor, que significa uma redução de 30% da velocidade do motor, resulta em uma diminuição de cerca de 30% na potência elétrica requerida do motor. Para 6 e 5 bar a redução de potência elétrica requerida se mantém acima de 30%, mostrando um potencial de ganho energético, em simulação, na variação de velocidade das principais pressões de trabalho utilizadas industrialmente sem influência do consumo final ou de curva de carga de consumo temporal.

O aumento da pressão de trabalho também influencia na potência elétrica requerida do motor. Este aumento eleva a potência elétrica requerida em patamares maiores nas velocidades mais baixas. Aumentado a pressão de trabalho de 5 pra 6 bar, a 60 Hz, o aumento de potência elétrica requerida é de 11%, enquanto que em 42 Hz, é de 13%. De 5 para 7 bar, o aumento na demanda é de 19% para 60 Hz e 22% para 42 Hz. Seguindo a mesma tendência, a elevação de 6 para 7 bar na pressão de trabalho, efetua aumento de potência

elétrica requerida mais razoável. A 60 Hz o aumento é de 7% enquanto que a 42 Hz é de aproximadamente 8%.

O trabalho amplia o horizonte da pesquisa, mostrando a importância de resultados em simulação da técnica de acionamento proposta, confirmando o potencial em eficiência energética com acionamento à velocidade variável. A mesma metodologia pode ser aproveitada para outro método de controle de carga, investigando o método mais eficiente, e os valores podem ser comprovados na bancada experimental do laboratório LAMOTRIZ - UFC.

7 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP, ao Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes – LAMOTRIZ/UFC pelo aparato técnico e ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará – DEE/UFC.

8 REFERÊNCIAS

- Almeida, A.T., Ferreira, Fernando J.T.E. and Dick Both (2005). Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives with Electric Motor Systems. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* N°01, Volume nº 41, páginas 188-199.
- BEN - Balanço Energético Nacional (2005). MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
- Dewan, S.B., Slemon, G.R., Straughen, A. (1984). *Power Semiconductor Drives*, Editora John Wiley & Sons, New York, EUA.
- Hahn, Andreas (2004). *Guia Avançado: Compressores ELETROBRÁS/PROCEL*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Krause, Paul C. (1986). *Analysis of Electric Machinery*, capítulo 4. Editora McGraw-Hill, New York, EUA.
- Moreira, Adson Bezerra. (2006). *Análise da Operação de Sistemas de Ventilação Industrial visando à Eficiência Energética*, capítulo 6. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Fortaleza, Brasil.
- Ong, Chee-Mun (1998). *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, capítulo 6. Editora Prentice-Hall, New Jersey, EUA.
- Pauwels, K.M (2001). Energy Savings with Variable Speed Drive. *Proceedings of 16th International*

- Conference and Exhibition on Electricity Distribution (IEE)*, **Volume nº 4**, páginas 4.25 .
- Perrin, M., Kohn, G., Mugford, S., Seggewiss, G. (1997). Induction Motors, Reciprocating Compressors and Variable Frequency Drives. *Proceedings of 44th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, **Volume nº 1**, páginas 1-9.
- Rodrigues, P.S.B. (1991). *Compressores Industriais*, Editora Didática e Científica, Rio de Janeiro, Brasil.
- Rollins, John P. (1989). *Compressed Air and Gas Handbook*, páginas 109 e 229. Editora Prentice-Hall, New Jersey, EUA.
- Schmidlin J., Celso Rogério. (2006). *Operação do conjunto: Bomba centrífuga, Motor de Indução Trifásico e Conversor de frequência, visando a Eficiência no uso da energia elétrica* , capítulo 2. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Fortaleza, Brasil.