

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS TIPOS DE ACIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

VICTOR P. B. AGUIAR, CARLOS A. T. DE CARVALHO JR.

NCT - Núcleo de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia e Física, Universidade Federal de Rondônia

Campus de Porto Velho, 78900-000, Porto Velho, RO, Brasil

E-mails: victor@unir.br, tenório@unir.br

RICARDO S. T. PONTES, FRANCISCO R. P. MAGALHÃES, CARLOS A. M. DE HOLANDA

LAMOTRIZ/UFC - Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes, Departamento de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará

Caixa Postal: 6001, 60455-760, Fortaleza, CE, Brasil

E-mails: ricthe@dee.ufc.br, rodrigo@dee.ufc.br, almir@ufc.br

Abstract— Paper presents a study of energy efficiency on a compressed air system with screw compressor showing energy consumption according to the used drive. Screw compressors represents today about 50% of all produced compressors. They are applied in beverages industries, pharmaceutical industries, chemical industries and textile industries too. Three drive types are studied: two classics (“dual” and on/off) and variable speed drive (VSD). Using induction motor abc model was conducted the iterative method for the measurement of mechanical torque equivalent to the work's pressure from rated motor supply current. From the proposed methodology, the simulations were performed with all drive types and experimentally validated.

Keywords — Variable speed drive (VSD), screw compressor, energy efficiency, modeling system, induction motor.

Resumo— O artigo apresenta um estudo de eficiência energética em um compressor parafuso em um sistema de ar comprimido, onde é analisada a demanda de potência do sistema em função do tipo de acionamento utilizado. Os compressores de parafuso representam cerca de 50% de todos os compressores atualmente produzidos. Eles têm largas aplicações nas indústrias farmacêuticas, alimentícias e têxteis. São estudados três tipos de acionamentos: dois clássicos (carga/alívio e liga/desliga) e o acionamento à velocidade variável (AVV). Utilizando o modelo abc do motor de indução trifásico foi realizado um método iterativo para a determinação do conjugado mecânico externo nominal à pressão de trabalho, a partir de corrente de alimentação do motor, em operação nominal. Seguindo a metodologia proposta, foram realizadas as simulações acerca dos acionamentos citados anteriormente e validados experimentalmente.

Palavras-chave— Acionamento à velocidade variável (AVV), compressor parafuso, eficiência energética, modelagem do sistema, motor de indução trifásico

1 Introdução

O mundo passa por mudanças profundas em relação ao uso de suas reservas energéticas. Conservar a energia utilizada passa a ser importante e tornar os equipamentos mais eficientes também. Os sistemas motrizes são equipamentos utilizados em todo o mundo e segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) (2006) quase 50% da energia elétrica consumida no Brasil é devido aos sistemas motrizes que possuem motores de indução como dispositivo de conversão eletromecânica de energia.

Dentre os sistemas motrizes os sistemas de geração de ar comprimido são o segundo consumidor de energia elétrica no continente europeu, segundo Almeida (2000). Importante ressaltar que pesquisas relacionadas a sistemas motrizes direcionam o estudo para os motores e sua dinâmica, portanto a caracterização da carga mecânica é importante para qualquer informação sobre o balanço energético da máquina. (DEWAN, 1984)

2 Modelagem dos Acionamentos do Compressor Parafuso em um Sistema de Ar Comprimido

Nessa sessão, será comentado acerca da modelagem utilizada nos sistemas de acionamento.

2.1 Ciclo liga/desliga

No ciclo liga/desliga há o desligamento e a partida do motor, mediante condições operacionais no sistema de compressão.

A partir da pressão de trabalho, o motor é ligado ou desligado. Para que haja partida do motor, a pressão de trabalho deve chegar próxima do valor mínimo desta pressão ($p_{2_{min}}$), e para que haja o desligamento do motor a pressão de trabalho deve se aproximar da pressão de trabalho máxima ($p_{2_{max}}$), ambos em bar. A Figura 1 apresenta a dinâmica da pressão de trabalho.

Ainda na figura 1, pode ser observado que os tempos em que a motor permanece ligado (T_{on}), e o

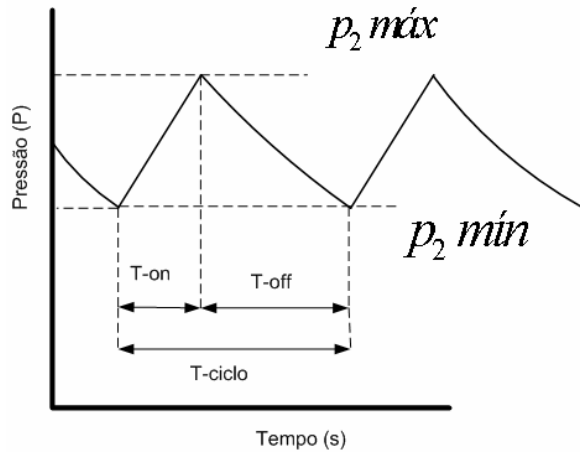


Figura 1. Dinâmica com ciclo liga/desliga.

tempo em que o motor permanece desligado (T_{-off}), em segundos, podem ser representados pelas equações 1 e 2 (AGUIAR, 2008).

$$T_{-on} = \frac{V_{res} \cdot (p_{2min} - p_{2máx})}{p_0 \cdot (\dot{V}_s - \dot{V}_c)} \quad (1)$$

$$T_{-off} = \frac{V_{res} \cdot (p_{2máx} - p_{2min})}{p_0 \cdot \dot{V}_s} \quad (2)$$

Onde o volume do reservatório de ar do sistema (V_{res}), em m^3 , a pressão atmosférica (p_0), em bar, a vazão volumétrica de saída do sistema (\dot{V}_s), em m^3/s , e a vazão volumétrica fornecida pelo compressor (\dot{V}_c), em m^3/s , são variáveis que modificam estes tempos pertencentes ao ciclo.

Importante salientar que nos sistemas de compressão, com esse tipo de acionamento, a pressão de trabalho oscila em torno de uma pressão média de trabalho.

2.2 Ciclo carga/alívio

O ciclo carga/alívio opera de modo análogo ao ciclo liga/desliga. A diferença está na operação em alívio. Esta operação difere do ciclo liga/desliga, pois o motor não é desligado. Há uma abertura na válvula de selagem (ou válvula de encaixe) da câmara de compressão, e este (compressor) não realiza trabalho útil ao sistema (compressão do ar) (HANN, 2004).

Nessa operação pode ser verificado que ficam acopladas ao motor de indução, toda a inércia do acoplamento mecânico (em geral por correias) e a inércia dos parafusos do compressor, além do atrito causado pelo óleo, na câmara de compressão, contra o movimento dos parafusos (RODRIGUES, 1991)

2.3 Acionamento à Velocidade Variável (AVV)

O acionamento à velocidade variável (AVV) diferente dos acionamentos clássicos citados anteriormente, possui uma diferença no trato das variáveis. Como toda máquina de fluxo, o compressor parafuso tem

como característica a equação 3 (RODRIGUES, 1991).

$$m_c = K \cdot \omega \quad (3)$$

A vazão mássica do compressor (m_c), em kg/s , é proporcional a velocidade mecânica do motor de indução (ω) (rad/s). Isso indica que o uso do AVV, fornece um controle da vazão mássica do compressor e, conseqüentemente, controle sobre a pressão de trabalho. A figura 2 apresenta o controle da pressão de trabalho a partir da vazão e a comparação com os ciclos clássicos.

A figura 3 apresenta a topologia relacionada ao

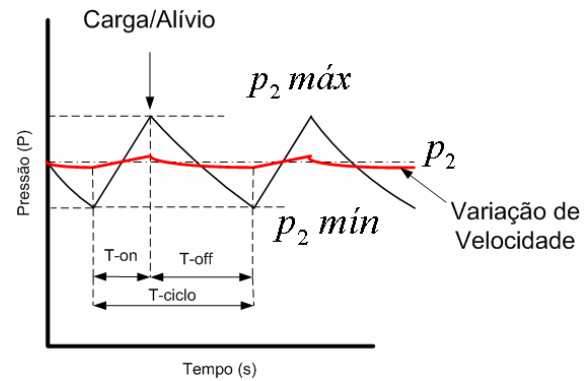


Figura 2. Dinâmica com AVV e controle da pressão de trabalho.

AVV e o controle da pressão a partir do controle da vazão (AGUIAR, 2008).

3 Tipo de Carga do Compressor Parafuso

Nas topologias apresentadas na sessão anterior, podemos verificar que há uma pressão média de trabalho, no caso das oscilações de pressão (liga/desliga e carga/alívio), e há uma pressão de trabalho constante (AVV).

Podemos relacionar assim, mediante a independência da vazão com relação à pressão (DEWAN, 1984), que a carga a ser modelada, para o motor de indução, é uma carga constante durante o intervalo do ciclo. O mesmo é considerado para o AVV.

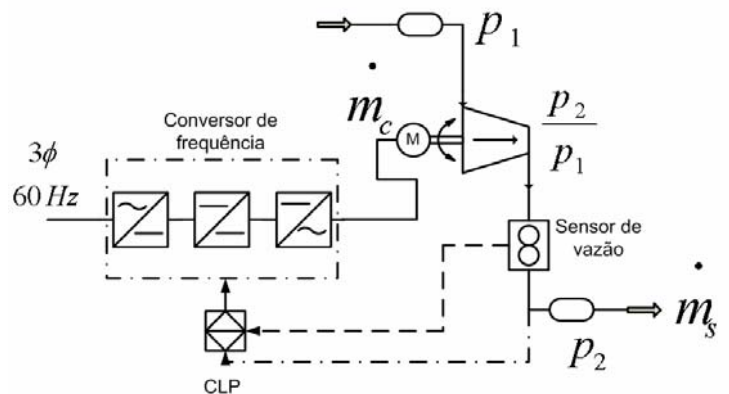


Figura 3. Sistema de controle da pressão de trabalho a partir do controle da vazão.

Tabela 2. Parâmetros do sistema de compressão.

p_2 (bar)	\dot{V}_c (m ³ /h)	C_{ext} (N·m)	C_{alivio} (N·m)
7,5	15,92	13,46	5,18

Com esta consideração, é possível determinar, a partir do sistema em condições nominais, o conjugado mecânico externo que seria aplicado ao motor na simulação.

4 Método iterativo para obtenção do conjugado mecânico externo

O método iterativo, precisa ter o modelo do motor descrito, além das considerações acerca do motor utilizado e dos dados nominais obtidos em ensaios com condições nominais de temperatura de admissão, pressão de trabalho e condições de carga nominal (vazão).

4.1 Modelo do Motor de Indução Trifásico

O modelo do motor de indução trifásico, simétrico, equilibrado e linear, é o mesmo apresentado por Krause (1995). O modelo é baseado na resolução da equação 4, onde as entradas são o conjugado mecânico externo (C_{ext}) e o vetor com as tensões do estator ($[V_s]$).

$$\begin{bmatrix} [V_s] \\ 0 \\ C_{ext} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_{ss}] & \left[\frac{\partial L_{rs}(\theta)}{\partial \theta} \right] \cdot \omega & 0 & 0 \\ \left[\frac{\partial L_{rs}(\theta)}{\partial \theta} \right] \cdot \omega & [R_{rr}] & 0 & 0 \\ [i_r]^T \cdot \left[\frac{\partial}{\partial \theta} L_{rs}(\theta) \right] & 0 & -B & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \dots \quad (4)$$

$$\dots + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{rs}(\theta)] & 0 & 0 \\ [L_{rs}(\theta)] & [L_{rr}] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

O motor utilizado no LAMOTRIZ/UFC e que compõe o sistema de compressão de ar, é um motor de 2,2 kW, acoplado ao compressor parafuso, perfil sigma 5/6 da “Kaeser Kompressoren”. O reservatório de ar possui volume de 0,3 m³ (V_{res}). Os dados relativos ao motor de indução são relacionados na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do motor de indução trifásico.

L_m (mH)	219,46
L_{ls} (mH)	11,50
L_{lr} (mH)	11,50
J (Kg·m ²)	0,013
B (N·m·s)	0,0008

Onde L_m é a indutância de magnetização, L_{ls} e L_{lr} são as indutâncias de dispersão do estator e rotor, respectivamente, J é o momento de inércia e B é o coeficiente de atrito viscoso.

4.2 Descrição do método iterativo

O método iterativo é apresentado na figura 4. Podemos observar que é necessário para iniciar o método iterativo, ter uma corrente de referência, e esta é obtida nos ensaios nominais, acerca de cada condição de operação do sistema de compressão.

Por isso é necessário realizar os ensaios a pressão de trabalho nominal e vazão nominal. Após a realização destes ensaios, obtém-se a corrente de referência como entrada deste método iterativo.

4.3 Ensaios para obtenção dos valores nominais de pressão de trabalho, vazão e conjugado externo

A tabela 2 apresenta os resultados nominais de vazão volumétrica e conjugado mecânico externo, para as pressões de trabalho de 7,5 bar. É também apresentado nessa tabela, o conjugado equivalente ao momento de alívio (C_{alivio}), do ciclo carga/alívio para a pressão de trabalho.

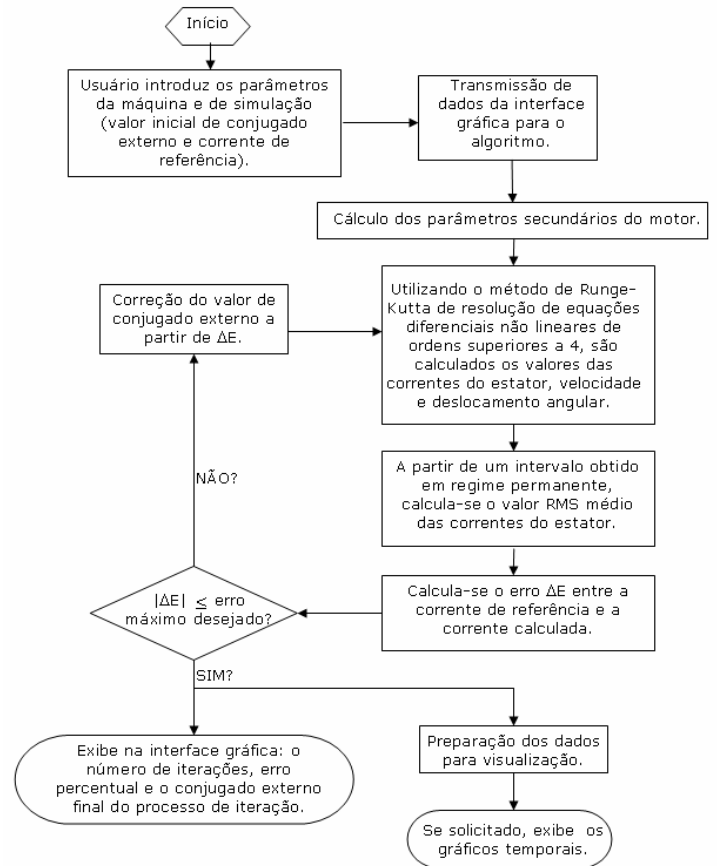


Figura 4. Fluxograma do método iterativo proposto.

5 Parâmetros e condições para simulação do sistema de compressão e acionamentos

Nesse momento do artigo é necessário definir carga pneumática como a porcentagem da vazão volumétrica de saída do sistema (\dot{V}_s), pela vazão volumétrica nominal do compressor (\dot{V}_c), para aquela condição de pressão de trabalho.

Para a situação de simulação do motor de indução trifásico foi utilizado o bloco da máquina assíncrona, no modo motor, do SIMULINK/MATLAB. Foram realizados ensaios para as seguintes condições de carga pneumática: 50%, 67%, 83% e 100%, conforme metodologia de análise gráfica apresentada por Almeida (2005).

5.1 Simulação com AVV

Para a simulação do AVV, foi utilizada uma ponte inversora conectada a uma fonte CC ideal. O controle da ponte inversora foi realizado com um bloco gerador de sinais PWM senoidal.

5.2 Simulação com ciclo liga/desliga e carga/alívio

Para este acionamento, foram utilizados os cálculos dos tempos de “on” e “off”, e estes são disponibilizados na tabela 3 para 7,5 bar.

Os cálculos de potência do momento que o motor se mantém ligado e o cálculo da demanda do ciclo para aquela condição de carga é dada pelas equações 5 e 6. Podemos notar que a equação leva em conta a potência na partida ($P_{partida}$), em Watts (W), e o tempo de partida ($T_{partida}$), em segundos, visto que é de fácil identificação na simulação proposta. A potência em regime (P_{regime}), em Watts (W), também é utilizada.

$$P_{on} = \frac{((T_{partida} \cdot P_{partida}) + (T_{on} - T_{partida}) \cdot P_{regime})}{T_{on}} \quad (5)$$

$$P_{demanda_{on/off}} = \frac{T_{on} \cdot P_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (6)$$

A demanda de potência no ciclo carga/alívio ($P_{demanda_{dual}}$) é dada pela adição no denominador da expressão 6, da energia consumida durante o período de alívio ($T_{off} \cdot P_{alívio}$).

As vazões volumétricas para cada condição de

Tabela 3. Tempos do ciclo liga/desliga para 7,5 bar

Carga pneumática (%)	T_{on} (s)	T_{off} (s)
100 %	∞	0
83 %	366	73
67 %	183	92
50 %	122	122

carga, em cada condição de pressão de trabalho é dada pela constante K da equação 7. Os valores para cada nível de carga pneumática estão na tabela 4.

$$K \approx \frac{\dot{V}_{C_{nom}}}{60} \quad (7)$$

Para ambos os ciclos, liga/desliga e carga/alívio, a vazão volumétrica correspondente ao ciclo será calculada pela equação 8.

$$\dot{V}_{S_{on/off}} = \frac{(\dot{V}_{C_{nom}} \cdot T_{on})}{T_{on} + T_{off}} \quad (8)$$

Tabela 4. Vazão volumétrica correspondente a cada nível de carga pneumática, para determinada pressão de trabalho

Carga pneumática (%)	\dot{V}_s (m^3/h)	
	7,5bar	6,5bar
100 %	15,92	16,07
83 %	13,30	13,40
67 %	10,60	10,70
50 %	7,96	8,03

6 Simulação e resultados experimentais do sistema de compressão

O processo de simulação, para cada tipo de acionamento, nos forma um gráfico demanda por carga pneumática que já foi utilizado por Almeida (2005) e de ótima compreensão sobre o sistema. Assim, também foi montado o gráfico rendimento por carga pneumática. Para este gráfico utilizamos o coeficiente isentrópico (k), adimensional, igual a 1,41 (HANH, 2004) e a equação 9 demonstra a potência entregue ao fluido (P_f) (HANN, 2004).

$$P_f = \frac{k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \cdot \dot{m}_s \quad (9)$$

Podemos observar que a equação 9 trata da vazão mássica de saída (\dot{m}_s), em kg/s, a temperatura de admissão (T_1), em °K, e a constante universal relacionada ao ar atmosférico (R), com valor de 288 J/kg.K. Portanto para que ocorra a transformação da vazão volumétrica em vazão mássica consideramos as condições de transformação do sensor de vazão que é a massa específica (μ) de 1,205 kg/m³.

6.1 Pressão de trabalho à 7,5 bar - Simulação

Partindo para a simulação do sistema, com seus respectivos acionamentos, obtivemos a curva potência por carga pneumática. A figura 5 apresenta esta relação.

Tabela 7. Redução da Demanda em Relação ao AVV à 7,5 bar – Resultados Experimentais

Carga pneumática (%)	Liga/desliga	Carga/alívio
100 %	3,90 %	3,90 %
83 %	5,26 %	12,02 %
67 %	-2,75 %	17,55 %
50 %	-23,02 %	17,28 %

Pode ser observado que o acionamento com maior potência para todas as operações abaixo de 100% de carga nominal é o ciclo carga/alívio. Nessa

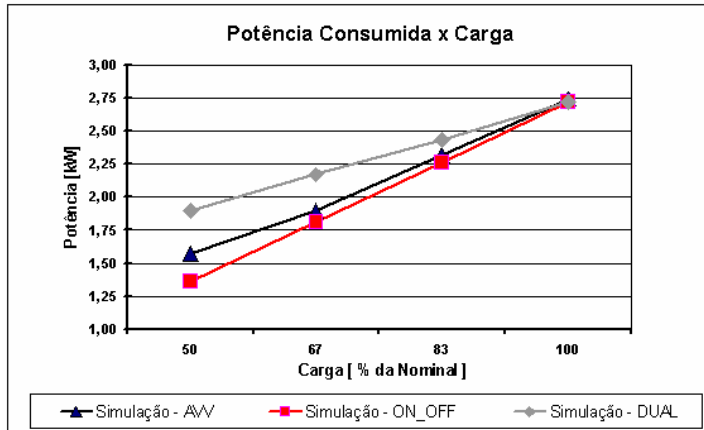


Figura 5. Potência x Carga pneumática à 7,5 bar – Simulação.

condição, ainda se pode verificar que o ciclo liga/desliga possui menor potência para as cargas pneumáticas menores que 100%, sendo mais eficiente em um ciclo de trabalho a carga constante que o AVV. A tabela 5 apresenta a redução de demanda em relação ao AVV com o uso dos ciclos clássicos ao mesmo nível de carga pneumática.

Os valores negativos demonstram que não houve redução e sim aumento da demanda do AVV em relação à do ciclo correspondente.

O rendimento em simulação é apresentado na figura 6. Pode-se observar que os melhores rendimentos estão no ciclo liga/desliga, e os piores rendimentos no ciclo carga/alívio.

6.2 Resultados experimentais à 7,5 bar

Os resultados experimentais são apresentados na figura 7. Podemos observar o comportamento diferenciado entre o simulado e o experimental para o ciclo liga/desliga e o AVV. A tabela 6 apresenta o erro entre os valores de simulação e valores experi-

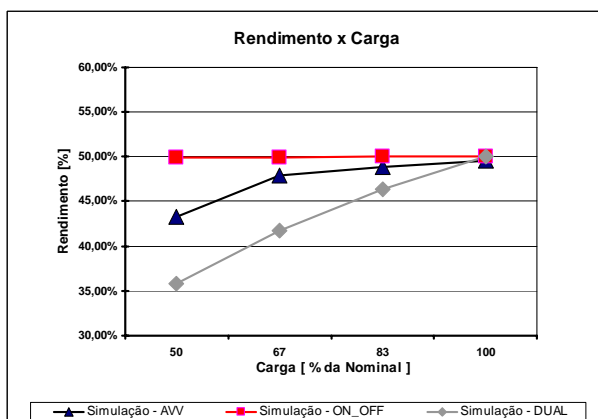


Figura 6. Rendimento x Carga pneumática à 7,5 bar - Simulação.

Tabela 5. Redução da Demanda em Relação ao AVV à 7,5 bar - Simulação

Carga pneumática (%)	Liga/desliga	Carga/alívio
100 %	-0,92 %	-0,92 %
83 %	-2,35 %	5,37 %
67 %	-4,19 %	14,64 %
50 %	-13,32 %	20,75 %

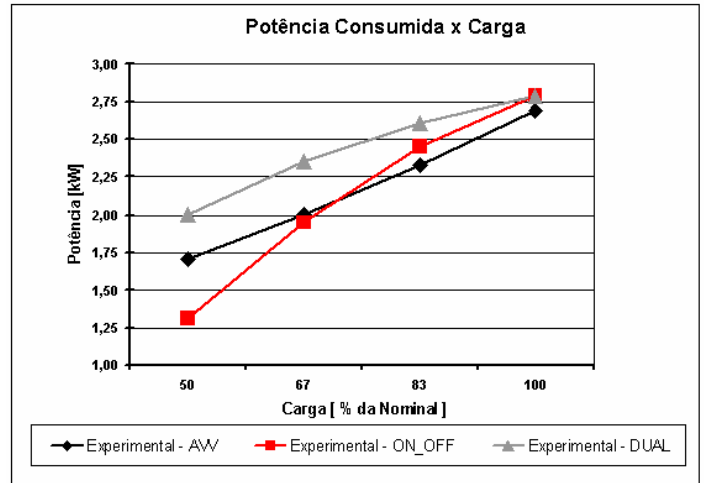


Figura 7. Potência x Carga pneumática à 7,5 bar – Resultado Experimental.

mentais.

A tabela 7 apresenta a redução da demanda em relação ao AVV, agora com valores experimentais. Na figura 8 são apresentadas as curvas de rendimento experimental.

Pode ser notado que houve mudança na tendência em simulação, o liga/desliga demanda menos potência que o AVV para cargas pneumáticas acima de 70 %.

O rendimento apresenta diferença entre a simulação e os resultados experimentais. O AVV apresen-

Tabela 6. Erro entre potência medida e simulação à 7,5 bar

Carga pneumática (%)	AVV	Liga/desliga	Carga/alívio
100 %	1,86 %	2,92 %	2,92 %
83 %	0,60 %	8,45 %	6,95 %
67 %	5,87 %	7,46 %	8,55 %
50 %	8,66 %	3,49 %	5,54 %

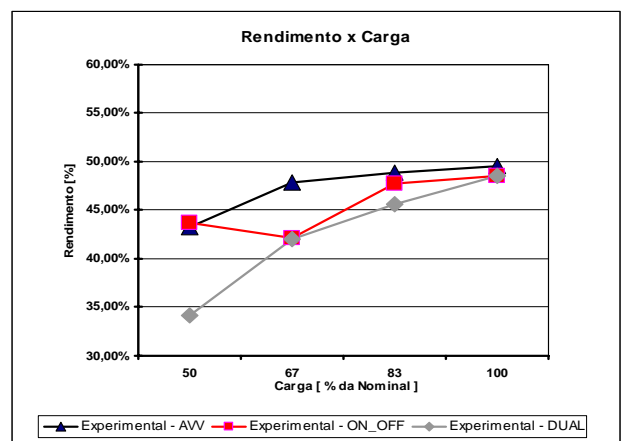


Figura 8. Rendimento x Carga pneumática à 7,5 bar – Resultado Experimental.

ta melhores rendimentos que o liga/desliga.

7 Conclusões

Conclui-se no artigo que os modelos apresentados são satisfatórios para a modelagem do sistema de ar comprimido e seus respectivos acionamentos. Os erros relativos não ultrapassam 10%, para um patamar máximo de 2,75 kW de potência, o que dá um erro menor que 275 W.

Observa-se também que o ciclo liga/desliga é mais eficiente (em laboratório) para cargas pneumáticas abaixo de 70% enquanto o AVV apresenta melhores resultados para cargas superiores a 70% o que no caso do compressor parafuso é perfeitamente aceitável, visto que ele não deve trabalhar em velocidades abaixo desse patamar (para manter a viscosidade do óleo presente na câmara de compressão, além de manter a selagem do sistema). Pode-se destacar que o ciclo carga/alívio possui os piores resultados tanto em rendimento quanto em demanda de potência, para 7,5 bar. Destaca-se ainda que, comercialmente, é utilizado o ciclo carga/alívio, e este tem resultados piores que a topologia utilizada com AVV, conforme apresentado na figura 3.

É relevante comentar que os erros, principalmente em valores de carga pneumáticas acima de 70% e nos rendimentos, podem ser relativos à: dificuldade de reprodução da simulação em ambiente laboratorial (visto que o nível de automação não foi implementado – controle manual de válvulas e chaves de acionamento), controle da temperatura da sala onde se encontrava o sistema e da ausência de alguns sensores que levariam a melhor análise dos resultados experimentais, como um sensor de temperatura para aquisição da temperatura de descarga. Outro fator importante a ser comentado é que o modelo linear, simétrico e equilibrado apresentado por Krause (1991) é desenvolvido para alimentação senoidal pura e não para alimentação via conversor de frequência (alimentação não-senoidal). E ainda pode ser observado uma diferença desprezível entre as demandas de potência, para cargas pneumáticas maiores que 70%, entre os ciclos liga/desliga e o AVV (em simulação).

Podemos destacar ainda que o modelo do motor trifásico, simétrico, linear e equilibrado, para simulação com AVV e conjugado mecânico constante, não é satisfatório para velocidades 50% menores que a nominal. Há saturação do motor e o modelo não leva

em conta a saturação magnética (DE ANDRADE, 2004).

Agradecimentos

Ao departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará – UFC, ao departamento de Engenharia e Física da Universidade Federal de Rondônia – UNIR e a FUNCAP pelo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

- Almeida, A., Ferreira Fernando, J. T. E., Dick Both (2005). Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives with electric Motor Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **41**(1): 188–199.
- Almeida, A., Fonseca, P., Ferreira, F., Falkner, H., Reichert, J., Tönsing, E., Malmose, K., Previ, A., Dominioni, A., Pillo, M., Russo, S., Guisse, F., Blaise, J., Clair, E., Diop, A. (2000). Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives, *SAVE II Programme*, Coimbra.
- Aguiar, V. P. B. (2008). Estudo de Eficiência Energética no Acionamento de um Compressor Parafuso em um Sistema de Ar Comprimido, *Dissertação apresentada a Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre*, Fortaleza, pp. 029–032.
- Balanço Energético Nacional. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2006
- De Andrade, D. A., Neto, L. M., Freitas, M. A. A., Paula, H., Domingos, J. L. (2004). Effects of Magnetic Saturation on Induction Machines Driven by Static Converters, *Revista Controle e Automação*, **15**(2): 181–189.
- Dewan, S. B., Slemon, G. R., Straughen, A. (1984). Power Semiconductor Drive, Nova York, pp. 001–034.
- Hann, A. (2004). Compressores: Guia Avançado, Rio de Janeiro: Eletrobrás.
- Krause, P. (1995). Analysis of Electric Machinery, New York, pp. 001–034.
- Rodrigues, P. S. B. (1991). Compressores Industriais, Rio de Janeiro, pp. 001–034.