

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE COMPRESSORES OPERANDO COM O AR EM DIFERENTES TEMPERATURAS

Andréia Crico dos Santos, Paulo Gustavo dos Reis Oliveira, Roberta Borges Bianchi,
Sérgio Ferreira de Paula Silva (Dr.), Victor Rodrigues Faria

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia-MG.

andrea.crico@gmail.com, paulo_gustavo10@hotmail.com, roberta.bianchi29@gmail.com, sergio@eletrica.ufu.br,
victor.rfaria@gmail.com

Resumo - Pautado no contexto da Eficiência Energética, esse trabalho apresenta, primeiramente, aspectos gerais relacionados à operação de compressores em ambiente industrial. Em seguida são mostrados experimentos realizados em laboratório com o objetivo de se comparar a eficiência desses equipamentos quando operam com o ar de admissão em diferentes temperaturas. Por fim, é feita a análise dos resultados encontrados e são formuladas conclusões acerca da influência da temperatura no rendimento do processo de compressão de ar.

Palavras-Chave - admissão, ar, compressor, eficiência, temperatura.

COMPARATIVE STUDY OF ENERGY EFFICIENCY COMPRESSORS OPERATING WITH AIR AT DIFFERENT TEMPERATURES

Abstract - Based on the Energy Efficiency context, this paper first introduces general aspects related to compressors operation in industrial field. Then, laboratory experiments are presented in order to compare these devices efficiency when they operate with the intake air at different temperatures. Finally, after analyzing the results, conclusions are formulated about the temperature influence on air compression process.

Keywords - admission, air, compressor, efficiency, temperature.

I. INTRODUÇÃO

Eficiência Energética é um termo que está recebendo cada vez mais destaque em variados aspectos relacionados à organização da sociedade contemporânea. Esse fato é decorrência da incessante busca de práticas que, de forma

mais econômica e menos agressiva ao meio ambiente, permitam suprir a elevada demanda de energia do panorama mundial globalizado. Dessa maneira, busca-se articular o desenvolvimento aos aspectos social, financeiro e ambiental do modo mais salutar possível.

De acordo com o Plano Nacional de Eficiência Energética [1], o Brasil possui, há pelo menos duas décadas, programas de Eficiência Energética reconhecidos internacionalmente, dentre os quais podem ser citados: o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) e o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Mesmo antes destes, ainda em 1975, o Grupo de Estudos sobre Fontes Alternativas de Energia (GEFAE) organizou, em colaboração com o Ministério de Minas e Energia (MME), um seminário sobre conservação de energia, sendo esta uma iniciativa pioneira no país.

Nesse sentido, pode-se afirmar que a preocupação com a adoção de medidas que levem em consideração o conceito de Eficiência Energética ocorre também no contexto industrial. De acordo com a Confederação Nacional da Indústria (CNI), o potencial de conservação de energia elétrica na indústria brasileira pode ser avaliado como o equivalente a uma usina hidrelétrica com 6500 MW de potência instalada [2].

Em busca da melhora de desempenho, o levantamento energético pode ser interpretado como a primeira radiografia da unidade fabril. Através dele, avalia-se a quantidade de energia que é efetivamente consumida e de que forma a sua utilização é distribuída. A partir daí, estabelecem-se os principais fluxos e identificam-se os setores ou equipamentos onde é prioritário atuar. O foco de redução de perdas em indústrias é verificado nos sistemas motrizes – compressores, ventiladores, bombas, exaustores e correias transportadoras, pois esses sistemas representam mais de 64% do consumo industrial, que por sua vez representa 44% do consumo nacional de energia elétrica [3].

Tratando-se mais especificamente dos compressores, é possível afirmar que eles representam um dos equipamentos mais comuns no ambiente industrial, uma vez que sistemas de ar comprimido são amplamente utilizados como fonte de acionamento para diversos tipos de processos. Justifica-se, dessa forma, a necessidade de identificar oportunidades de melhoria da Eficiência Energética que resultem em redução de custos e de consumo de energia em sistemas de compressão de ar.

Diante do que foi exposto, esse trabalho apresenta o propósito de comparar a eficiência de compressores



XI CEEL – ISSN 2178-8308
25 a 29 de novembro de 2013
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

operando em diferentes condições, com o intuito de concluir sobre a influência do fator temperatura no desempenho desses equipamentos.

II. EMBASAMENTO TEÓRICO

A. Compressores e suas Classificações

Um sistema de ar comprimido genérico pode ser basicamente representado por três partes: geração, distribuição e uso final. A geração consiste em compressores acionados por motores elétricos, controles para regular a quantidade de ar comprimido produzida e equipamentos de tratamento que removem contaminantes desse ar. A distribuição é responsável por transportar quantidades suficientes de ar limpo, seco, estável e de pressão adequada. Após as etapas de geração e distribuição, existe uma gama muito extensa de aplicações do uso final do ar comprimido, sendo possível citar: acionamento de ferramentas em sistemas pneumáticos, acionamento mecânico e comando de válvulas em sistemas de controle, jateamento, operações com sopro de ar, operações de inspeção, teste e limpeza, entre outros.

Percebe-se que os componentes que de fato demandam a maior parte de energia elétrica para o funcionamento de sistemas de compressão de ar são os compressores. Eles podem ser definidos como estruturas mecânicas industriais destinadas, essencialmente, a elevar a energia utilizável de gases, pelo aumento de sua pressão. Com relação ao princípio construtivo, esses equipamentos podem ser classificados como Compressores de Deslocamento Positivo ou Volumétricos e Compressores de Deslocamento Dinâmico [4].

Nos Compressores de Deslocamento Positivo ou Volumétricos, a elevação de pressão é conseguida através da redução do volume ocupado pelo gás. Inicialmente, certa quantidade de gás é admitida no interior de uma câmara de compressão, que então é cerrada e sofre redução de volume. Por fim, a câmara é aberta e o gás liberado para consumo. Trata-se, pois, de um processo intermitente, no qual a compressão propriamente dita é efetuada em sistema fechado, isto é, sem qualquer contato com a sucção e a descarga.

Já nos Compressores de Deslocamento Dinâmico, há dois órgãos principais, a saber: o impelidor e o difusor. O impelidor é um órgão rotativo munido de pás que transfere ao ar a energia recebida de um acionador. Essa transferência de energia se faz em parte na forma cinética e em outra parte na forma de entalpia. Posteriormente, o escoamento estabelecido no impelidor é recebido por um órgão fixo denominado difusor, cuja função é promover a transformação da energia cinética do ar em entalpia, com conseqüente ganho de pressão. Os compressores dinâmicos efetuam o processo de compressão de maneira contínua, e, portanto corresponde exatamente ao que se denomina, em termodinâmica, um volume de controle.

A partir dessa classificação inicial, pode-se ainda subdividir os tipos de compressores de acordo com o princípio de funcionamento de cada um. A Figura 1 a seguir mostra o esquemático dessas subdivisões.

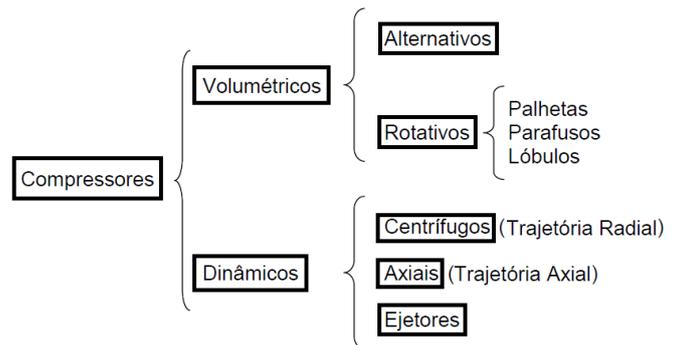


Fig. 1. Tipos de Compressores.

O compressor utilizado nos ensaios feitos para a realização desse trabalho é alternativo do tipo a pistão. Nesses compressores a compressão do gás é feita em uma câmara de volume variável (cilindro), por um pistão ligado a um mecanismo biela-manivela similar ao de um motor alternativo. Quando o pistão no movimento ascendente comprime o gás a um valor determinado, uma válvula se abre deixando o gás escapar, praticamente com pressão constante. Ao final do movimento de ascensão, a válvula de exaustão se fecha, e a de admissão se abre, preenchendo a câmara à medida que o pistão se move.

Como vantagens desse tipo de compressor, pode-se citar o fato de ele alcançar altas pressões de trabalho e requerer mínima manutenção. Contudo, em geral, apresenta pequena capacidade em termos de vazão de gás.

B. Equacionamento

O rendimento de um sistema, de maneira geral, indica o quanto um equipamento real aproxima-se de um comportamento ideal, no qual não existiriam perdas. Teoricamente, o rendimento da compressão de ar (η) poderia ser determinado pela quantidade de energia útil contida no ar comprimido dividido pela quantidade de energia gasta para a sua produção. Na prática, a eficiência de um compressor é determinada a partir do rendimento termodinâmico (η_{th}) e do rendimento mecânico (η_m) [5]. A equação (1) indica como obter o valor de η a partir de η_{th} e η_m .

$$\eta = \eta_{th} \cdot \eta_m \quad (1)$$

A partir da equação (2) obtém-se o rendimento termodinâmico [5]:

$$\eta_{th} = \frac{W_{th}}{W} \quad (2)$$

Onde:

W_{th} = trabalho de compressão teórico (processo adiabático reversível);

W = trabalho de compressão real (processo politrópico).

A partir da equação (3) pode ser calculado o trabalho de compressão teórico (W_{th}) [5]:

$$W_{th} = R \cdot k \cdot T_1 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left[\left(\sqrt[k]{r_p} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (3)$$

Onde:

W_{th} = trabalho de compressão teórico, em [kJ/kg];

$R = 0,287$ [kJ/kg.k] (constante universal dos gases);
 T_1 = temperatura do ar na admissão, em [K];
 $n = 1,4$ (constante para o ar atmosférico em processo adiabático);
 k = número total de estágios;
 r_p = relação de compressão total.

Conforme mostra a equação (4), para encontrar o valor do trabalho de compressão real (W), é necessário calcular o valor de n' para um processo politrópico [5]:

$$\frac{n' - 1}{n'} = \frac{\log \frac{T_1}{T_2}}{\log \frac{P_1}{P_2}} \quad (4)$$

Onde:

P_1 = pressão do ar na admissão, em [bar];
 P_2 = pressão do ar na descarga, em [bar];

Então, para calcular o trabalho de compressão real (W) é utilizada novamente a equação (3), substituindo-se o valor do fator $\frac{n}{n-1}$ pelo valor de $\frac{n'-1}{n'}$ encontrado com o auxílio da equação (4).

Assim, de posse dos valores de W_{th} e W , o valor do rendimento termodinâmico (η_{th}) pode ser encontrado a partir da equação (2).

A partir da equação (5) é obtido o rendimento mecânico (η_m) [5]:

$$\eta_m = \frac{W_m}{W} \quad (5)$$

Onde:

W_m = trabalho efetivamente fornecido ao gás;
 W = trabalho total fornecido ao compressor.

Como o valor de η_m é decorrente das inevitáveis dissipações provocadas pelo atrito mecânico durante a transmissão de energia do acionador ao compressor, é comum considerar que η_m apresenta valores típicos na faixa entre 0,92 e 0,96.

Uma alternativa para buscar melhorar o rendimento do sistema de compressão de ar está relacionada à observação da temperatura do ar na admissão. Quanto mais baixa for a temperatura de aspiração de um compressor, menor será a energia necessária para sua compressão. Como indicação, pode-se dizer, aproximadamente, que: para cada 4°C de aumento na temperatura do ar de aspiração, o consumo de energia aumenta em 1% para obter o mesmo volume gerado; e para cada 3°C de redução da temperatura do ar aspirado, verifica-se aumento de 1% da capacidade do compressor para o mesmo consumo [5].

Quanto mais baixa for a temperatura do ar aspirado, maior será a quantidade de massa de ar que poderá ser aspirada pelo compressor com a mesma vazão volumétrica e mesma potência consumida neste trabalho, isto porque o ar mais frio é mais denso. Então, maior massa de ar poderá ocupar o mesmo volume do que quando ele está mais aquecido.

Nesse sentido, utilizando da equação (3), e modificando o valor da temperatura do ar na admissão (T'_1), tem-se um novo

valor de trabalho de compressão teórico (W'_{th}), conforme a equação (6) indica [5]:

$$W'_{th} = R \cdot k \cdot T'_1 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left[\left(\sqrt[k]{r_p} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (6)$$

Pode-se, então, calcular o percentual de perdas por temperatura elevadas na admissão:

$$T_{\%} = \frac{W_{th} - W'_{th}}{W_{th}} \cdot 100 \quad (7)$$

Substituindo na equação (7) os valores de W_{th} e W'_{th} obtidos, respectivamente, pelas equações (3) e (6), temos:

$$T_{\%} = \left(1 - \frac{T'_1 + 273,15}{T_1 + 273,15} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Onde:

$T_{\%}$ = percentual de perdas por temperaturas elevadas na sucção, em [%];

T_1 = temperatura inicial do ar, em [°C];

T'_1 = temperatura inicial do ar pós-otimização, em [°C].

A partir daí, o custo anual devido a temperaturas elevadas na captação de ar pode ser encontrado pela equação (7) a seguir [6]:

$$C_T = C_{ac} \cdot \frac{T_{\%}}{100} \quad (9)$$

Onde:

C_T = custo devido a temperaturas elevadas na admissão de ar, em [R\$/ano];

C_{ac} = custo anual da geração de ar comprimido, em [R\$/ano];

$T_{\%}$ = percentual de perdas por temperaturas elevadas na sucção, em [%];

III. APLICAÇÃO PRÁTICA

A. Objetivos do Experimento Realizado

Foi realizado um procedimento experimental com o intuito de comparar o desempenho de um compressor quando o ar de admissão era submetido a diferentes condições de temperatura. O compressor utilizado no experimento pertence ao Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Uberlândia (LEFE-UFU), local onde os ensaios foram realizados. Esse laboratório de pesquisa possui foco em estudar e desenvolver metodologias e técnicas de melhoria da eficiência energética em instalações industriais [7].

Para a realização desse trabalho foi usada a seguinte estrutura: um compressor a pistão com um reservatório de ar comprimido regulado por uma válvula elétrica de saída de ar (alívio de pressão); um motor de 1,5 cv; um painel que condiciona os sistemas de comando, medição e acionamento; e um microcomputador a partir do qual todas as ações podem ser realizadas por meio de um sistema supervisão.

A Figura 2 mostra o compressor utilizado no experimento.



Fig. 2. Compressor a pistão.

A partir da configuração disponibilizada pelo laboratório, foi necessário utilizar alguns acessórios que permitissem a realização das análises pretendidas. Como forma de variar a temperatura, montou-se um aparato que foi construído com: aparelho secador, tubos, joelhos e T de PVC com diâmetros de 60 milímetros, além de um termômetro para indicar a temperatura. No decorrer do experimento, encontrou-se dificuldade na medição de temperatura com o termômetro, por isso foi utilizado também um termovisor para obter resultados mais confiáveis.

Na Figura 3, pode-se observar o compressor com o aparato instalado:



Fig. 3. Compressor com o aparato para o experimento.

A metodologia adotada consistiu em medir a energia gasta e o tempo de funcionamento do compressor durante 15 ciclos de operação em duas situações distintas. A partir disso, foi realizada a comparação entre o desempenho de cada caso analisado.

Durante a coleta de dados, o secador ficou ligado sempre com a mesma velocidade em ambos os experimentos, ou seja, o fluxo de ar na admissão não foi alterado. Caso isso não ocorresse, os resultados poderiam ser invalidados, uma vez que se houvesse um fluxo maior de ar em alguma situação, menor seria o trabalho realizado pelo compressor.

Também é importante citar que o compressor foi submetido à mesma condição de funcionamento nos dois experimentos. Uma válvula foi ligada para simular uma carga, de modo que a pressão variasse de 2,5 a 3,0 kgf/cm³. Quando a pressão atingia o valor de 2,5 kgf/cm³ o compressor era ligado e, ao atingir a pressão de 3,0 kgf/cm³, o mesmo era desligado.

1) CASO 1

O secador foi ligado emitindo ar frio. Mediu-se o tempo total de funcionamento do sistema e também o tempo de funcionamento de cada vez que o compressor entrava em operação. Os valores de temperatura na admissão e as energias iniciais e finais foram anotados.

2) CASO 2

O secador foi ligado emitindo ar quente. O restante do procedimento é semelhante ao CASO 1.

B. Testes e Medições

1) CASO 1

Durante esse processo, a energia total consumida foi de 0,087 kWh.

A temperatura média do ar na admissão foi de 38,6°C (obtida por meio do termômetro). No decorrer do experimento foi monitorado o valor da temperatura medida em determinado ponto usando o termovisor, sendo que tais valores foram: 30,4°C e 32,1°C, resultando em uma média de 31,25°C. As Figuras 4 e 5 mostram as imagens do termovisor durante as duas medições.



Fig. 4. Imagem do termovisor a 30,4°C.



Fig. 5. Imagem do termovisor a 32,1°C.

A Figura 6 a seguir indica a variação de pressão durante o experimento para a temperatura de admissão do ar no caso 1.

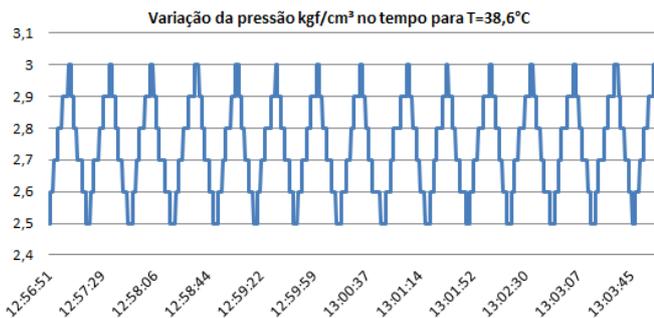


Fig. 6. Variação de pressão a 38,6°C.

Com os dados do gráfico da Figura 6, foi possível montar a Tabela I que é apresentada a seguir:

Tabela I - Tempos de operação do compressor com ar frio.

$T_1=16,58s$	$T_2=16,64s$	$T_3=16,04s$	$T_4=16,60s$	$T_5=15,84s$
$T_6=15,70s$	$T_7=17,02s$	$T_8=16,91s$	$T_9=17,66s$	$T_{10}=15,58s$
$T_{11}=16,76s$	$T_{12}=16,33s$	$T_{13}=16,29s$	$T_{14}=16,10s$	$T_{15}=15,29s$

Somando o tempo de operação do compressor com ar frio de cada um dos quinze períodos mostrados na Tabela I, obteve-se um tempo de compressor ligado de 245,34 segundos ($T_{C1} = 245,34 s$).

O tempo total do sistema foi de 7 minutos e 12 segundos ($T_{S1} = 7' 12'' = 432 s$).

2) CASO 2

Durante esse processo, a energia total consumida foi de 0,095 kWh.

A temperatura média do ar na admissão foi de 42,55°C. Não foi possível fazer essa medição utilizando o termômetro e, assim, com o uso do termovisor na mesma posição utilizada durante o caso 1 obtiveram-se as seguintes leituras: 34,8°C e 34,1°C, resultando em uma média de 34,45°C. As Figuras 7 e 8 mostram as imagens obtidas do termovisor para essas medições.

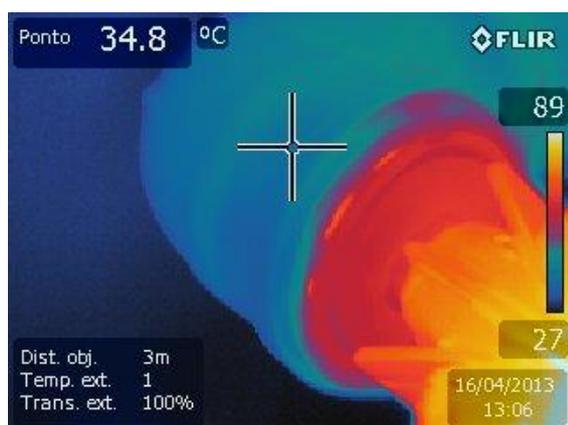


Fig. 7. Imagem do termovisor a 34,8°C.

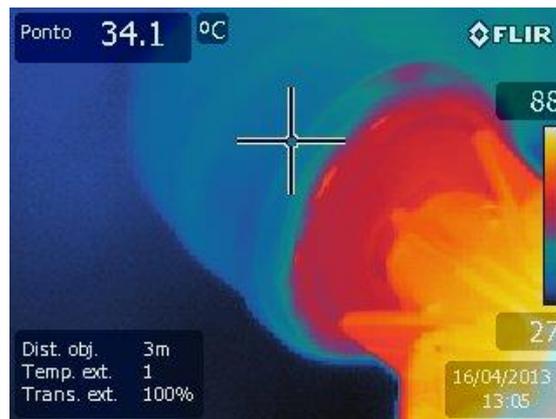


Fig. 8. Imagem do termovisor a 34,1°C.

A fim de se encontrar a temperatura do ar de admissão no caso 2, foi feita uma análise proporcional, levando-se em consideração os resultados obtidos com o termovisor e o termômetro durante o experimento do caso 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} 31,25^{\circ}\text{C} \rightarrow 38,6^{\circ}\text{C} \\ 34,45^{\circ}\text{C} \rightarrow x \end{array} \right\} \rightarrow x = 42,55^{\circ}\text{C}$$

A Figura 9 a seguir indica a variação de pressão durante o experimento para a temperatura de admissão do ar no caso 2, 42,55°C.

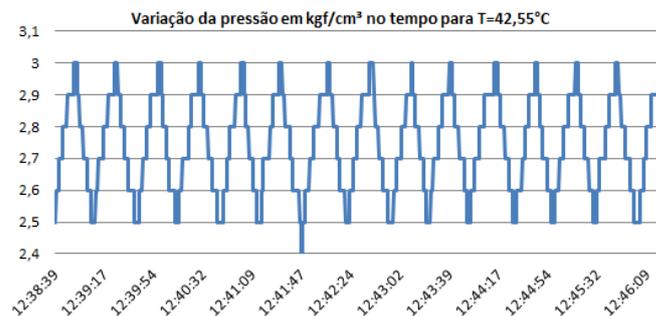


Fig. 9. Variação de pressão a 42,55°C.

Com os dados do gráfico da Figura 9, foi montada a Tabela II a seguir:

Tabela II - Tempos de operação do compressor com ar quente.

$T_1 = 16,71 s$	$T_2 = 17,97 s$	$T_3 = 17,96 s$	$T_4 = 17,54 s$	$T_5 = 17,71 s$
$T_6 = 17,25 s$	$T_7 = 20,68 s$	$T_8 = 18,43 s$	$T_9 = 17,32 s$	$T_{10} = 17,08 s$
$T_{11} = 19,15 s$	$T_{12} = 16,44 s$	$T_{13} = 17,89 s$	$T_{14} = 17,25 s$	$T_{15} = 18,73 s$

Somando o tempo de operação do compressor com ar quente de cada um dos quinze períodos mostrados na Tabela II, obteve-se um tempo compressor ligado de 268,11 segundos ($T_{C2} = 268,11 s$).

O tempo total do sistema foi de 7 minutos e 42 segundos ($T_{S2} = 7' 42'' = 462 s$).

C. Análise de Resultados

De acordo com a descrição teórica, aplicando a equação (8), é possível obter o percentual de perdas para o caso dos ensaios realizados:

$$T\% = \left(1 - \frac{38,6 + 273,15}{42,55 + 273,15}\right) \times 100 = 1,25\%$$

Fazendo a análise dos dados experimentais, sendo R a relação entre o tempo do compressor ligado (T_C) e o tempo total do sistema (T_S), tem-se em cada caso:

Caso 1)

$$R_1 = \frac{T_{C1}}{T_{S1}} = 0,5679 \text{ ou } 56,79\%$$

Isto significa que do tempo total que o sistema ficou ligado no caso 1, o compressor ficou em atividade em 56,79% desse tempo.

Caso 2)

$$R_2 = \frac{T_{C2}}{T_{S2}} = 0,5803 \text{ ou } 58,03\%$$

Isto significa que do tempo total que o sistema ficou ligado no caso 2, o compressor ficou em atividade em 58,03% desse tempo.

Como era de se esperar, R_2 é maior que R_1 . Isso indica que, a uma temperatura de admissão maior, o compressor permanece ligado por mais tempo, resultando em um maior consumo de energia.

A partir dos resultados obtidos com os experimentos realizados, o percentual de perdas para a situação pode ser calculado da seguinte maneira:

$$T'\% = \left(1 - \frac{0,5679}{0,5803}\right) \times 100 = 2,13\%$$

Muito embora o valor observado em laboratório seja superior ao valor teórico, é evidente o decréscimo da eficiência do processo de compressão quando a temperatura de admissão é elevada. A diferença entre o valor do percentual de perdas obtido a partir da equação teórica e da análise prática dos resultados propriamente ditos pode ser devido a uma série de fatores, como o fato de a temperatura ambiente não ser controlada, os termômetros usados não apresentarem excelente precisão, a temperatura do secador não ser constante, entre outros.

IV. CONCLUSÃO

Apesar da pequena discrepância entre o percentual de perdas obtido a partir dos métodos teórico e prático, o estudo em questão atendeu satisfatoriamente às expectativas do que foi proposto.

Na comparação entre a eficiência do compressor operando em diferentes temperaturas percebe-se que, quanto mais baixa for a temperatura do ar na admissão, maior será a quantidade de massa de ar que poderá ser aspirada pelo compressor com a mesma potência consumida. Isso acontece porque o ar frio é mais denso. Assim sendo, o compressor precisa realizar menos trabalho para comprimi-lo, permanecendo menos tempo ligado para manter as condições desejadas, no caso do experimento, pretendia-se manter a

pressão entre 2,5 e 3,0 kgf/cm³. Se o tempo ligado reduz, a energia consumida, que é diretamente proporcional a essa variável, também diminui, aumentando a eficiência do processo.

É necessário sempre buscar práticas que viabilizem a eficiência energética a qual, conforme comentado anteriormente, beneficia não só fornecedores e consumidores de energia, mas também as relações sociais, econômicas e ambientais no cenário mundial atual. Nesse sentido, deve-se ter atenção a ações que, apesar de à primeira vista parecerem simples, podem melhorar consideravelmente a eficiência de sistemas. De acordo com o mostrado nesse trabalho, é possível afirmar que as temperaturas dos locais onde se instalam compressores, principalmente em indústrias onde sua aplicação é maior, é um fator importante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Uberlândia (LEFE-UFU) pela viabilização técnica da realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Plano Nacional de Eficiência Energética – Premissa e Diretrizes Básicas. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/PlanoNacEfiEnergetica.pdf>>. Acesso em: 10/04/13.
- [2] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Eficiência Energética na Indústria e nas Residências no Horizonte Decenal (2010-2019). Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20100809_4.pdf>. Acesso em: 15/04/13.
- [3] NEIVA, E. Eficiência energética traz ganhos ambientais, financeiros e sociais para a indústria brasileira. Corrente Contínua. Brasília-DF, v.XXXIII, n.234, 2010.
- [4] PACHECO, L.M. Tipos de Compressores, Princípios Construtivos, Funcionais e suas Aplicações. Curso Técnico em Eletrônica, SENAI, Pindamonhangaba, 2011.
- [5] PROCEL INDÚSTRIA, ELETROBRAS. Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido – Manual Prático. Rio de Janeiro-RJ, p.87, 2010.
- [6] MARTINS, A. A.; DELAIBA, A. C.; BISPO, D.; JÚNIOR, R. G.; SILVA, S. F. P. Procedimentos de Análise de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido Industriais. IX INDUSCON, São Paulo-SP, 2010.
- [7] SILVA, S. F. P.; DELAIBA, A. C.; BISPO, D. Especificação de um Laboratório de Pesquisa e Ensino de Eficiência Energética para Ambientes Industriais. Eletrônica de Potência, v. 13, p. 217-224, 2008.