



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCE-03
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO XIV
GRUPO DE ESTUDO DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - GCE**

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

**Jamil Haddad
Luiz Fernando Valadão Flores**

**Carlos Alberto Xavier Brandão*
Fátima Esper
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI**

**Valberto Ferreira da Silva
Roberto Akira Yamachita**

RESUMO

É imprescindível o uso eficiente da energia elétrica nas instalações industriais para a racionalização de custos. Neste aspecto, este trabalho enfoca os requisitos indispensáveis de operação e manutenção em sistemas de ar comprimido industriais e de uso ordinário, e a aplicação de Inversores de Frequência nestes sistemas, visando a otimização energética da sua utilização. Apresenta ainda uma metodologia de ensaio para avaliação energética de compressores. Esta deverá ser o mais simples possível, necessitando de poucas medições efetuadas com o equipamento em funcionamento e configuração normal.

PALAVRAS-CHAVE

Conservação de energia. Compressor de ar. Inversor de Frequência. Fator de potência. Distorção harmônica. Metodologia de ensaio.

1.0 - MOTIVAÇÃO

Considerada uma das principais utilidades dentro da indústria, o ar comprimido pode chegar a ser o principal consumidor de energia elétrica, relevando-se o fato do consumo energético de sua geração ser alto, se tornando um importante componente dos custos fabris. É importante o combate aos fatores de mau aproveitamento da energia elétrica, nos sistemas de ar comprimido, para minimizar os custos energéticos. Desta forma, deve-se levar em consideração a geração do ar comprimido, sua preparação e tratamento, seus comandos, cálculos de consumo e vazão, entre outros pontos de fundamental importância para que no final

atenda suas expectativas de utilização sem desperdício de energia.

Os Inversores de Frequência oferecem o método ótimo para combinar as taxas de fluxo do compressor aos requerimentos do sistema.

2.0 - SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

As instalações de ar comprimido podem representar grandes oportunidades de economia de energia desde que tenham um projeto adequado, que sejam operadas de forma correta e que ocorram manutenções eficientes.

2.1 O Projeto

Uma Central de Ar Comprimido deve ser concebida para atender as necessidades de sua implantação e devem ser previstas expansões futuras de consumo do ar comprimido.

Os indicadores de temperatura (termostatos), controladores de pressão máxima e mínima (pressostatos) e manômetros indicadores de pressão, além de acessórios fornecidos pelos fabricantes de compressores ou por empresas especializadas no setor requerem uma supervisão constante.

Cada tipo de instalação de uma Central de Ar Comprimido irá depender da qualidade do ar comprimido que será necessário para atender os diversos pontos de consumo.

Algumas medidas adotadas durante o projeto implicam em poucos investimentos e significam um bom aproveitamento do sistema, com redução do consumo de energia ao longo da vida útil da instalação.

* Universidade Federal de Itajubá – Grupo de Estudos Energéticos
Avenida BPS, 1303 - Pinheirinho - CEP 37500-903 - Itajubá - MG - BRASIL
Tel.: (035) 3629-1311 - Fax: (035) 3629-1411

2.1.1 Especificação do Compressor

A escolha do tipo de compressor mais adequado às necessidades atuais e futuras do processo produtivo é um aspecto importante a ser considerado.

O compressor deve atender à demanda de ar comprimido nos pontos de consumo. A pressão, também, é um elemento na seleção do compressor; verifica-se a mais alta pressão requerida. O ar deve ser produzido a uma pressão, apenas, ligeiramente superior ao valor máximo para compensar a perda de carga.

Um compressor deve ser dimensionado à pressão mínima necessária, pois o consumo específico (kWh/m³/min) de um compressor, aumenta com o valor da pressão a que o ar é produzido.

2.1.2 Qualidade do Ar Comprimido

A qualidade do ar comprimido é o fator mais importante a se alcançar nas linhas de produção, pois resulta no aumento da produtividade, na qualidade total do produto final e na redução de custos com o menor índice de manutenção.

A qualidade do ar comprimido depende muito da qualidade do ar atmosférico admitido pelos compressores. O ar atmosférico admitido deve ter as seguintes características:

2.1.3 Ar Atmosférico Seco

A temperatura do ar atmosférico e o índice de umidade relativa do ar contribuem muito para o surgimento da água condensada no sistema de ar comprimido.

O primeiro passo para a eliminação do condensado está na eficiência do resfriador posterior (After Cooler). Deve-se verificar se o After Cooler não está subdimensionado, se a pressão da água de refrigeração é adequada, pois a pressão irá influenciar na velocidade da água no interior do mesmo e velocidade alta não permite uma boa troca de calor. Quando a água de refrigeração não é tratada ou é inadequada, irá criar incrustações de minerais, iodo, etc., formando uma isolação térmica que não permitirá uma eficiente troca de calor entre o ar comprimido e a água de refrigeração. Assim, o ar comprimido irá sair do resfriador posterior ainda com alto teor de umidade, a qual irá se condensar adiante, na rede de distribuição e nos pontos de consumo do ar comprimido.

O segundo passo para eliminar o condensado consiste no separador de água que deve ser adequado e bem dimensionado.

O terceiro passo é o resfriamento do ar no reservatório, pois um de seus objetivos é permitir a troca de calor entre o ar comprimido e o meio ambiente que o cerca.

A instalação do compressor de ar deve ser feita em local coberto, ventilado, afastado de ambientes úmidos e/ou geradores de vapor como caldeiras, torres de resfriamento, centrais de resfriamento de água, etc.

O quarto passo para a eliminação do condensado deverá ser, em princípio, de forma mecânica (purgadores) e a mais eficiente possível.

2.1.4 Ar Atmosférico com Baixa Temperatura

Sendo os compressores máquinas volumétricas, o seu rendimento é tanto maior, quanto maior é a densidade

(kg/m³), ou seja, melhor relação entre a massa de ar atmosférico e o volume de ar admitido pelo compressor. Logo, o ponto de captação do ar deve estar em local de baixa incidência de calor. A temperatura do ar atmosférico deve ser a mais baixa possível para aumentar a eficiência volumétrica e diminuir o trabalho de compressão ou o consumo de energia elétrica.

2.1.5 Ar Atmosférico Limpo

O ar atmosférico deve ser o mais limpo possível, isto é, isento de partículas sólidas e gases ácidos. A poluição ambiental é extremamente prejudicial ao ar comprimido. É importante um programa de troca dos elementos do filtro do compressor e do filtro coalescente, evitando, desta forma, uma perda de carga muito grande e o desperdício de energia.

2.2 A Operação

O custo de operação de uma instalação de ar comprimido depende de um grande número de fatores como, por exemplo, o consumo de energia elétrica, o consumo de água no resfriamento, a manutenção da segurança na operação e a necessidade de sistemas de supervisão.

2.2.1 Administração do Consumo do Ar Comprimido

Para gerenciar o sistema de ar comprimido eficazmente, é de relevante importância se conhecer:

1. rendimento e a vazão real de cada compressor (capacidade total de geração).
2. consumo de ar comprimido por ponto de consumo, por área e o total.
3. consumo total por vazamentos (desperdícios).

A administração do sistema de ar comprimido é semelhante a um livro contábil, pois se deve registrar o que entra e o que sai. Na instalação de um novo dispositivo ou equipamento, deve-se registrar o consumo do mesmo e subtrair do valor gerado conhecido. Assim, tem-se um acompanhamento do consumo e do ar comprimido disponível no sistema.

A empresa deve conhecer o consumo de cada ponto de ar comprimido, bem como a pressão necessária para a maximização do processo produtivo.

Normalmente, ocorrem acréscimos de novos pontos de consumo de ar sem se levar em conta a capacidade real, total de geração e o consumo total. Assim, o sistema de ar comprimido acaba subdimensionado, causando uma queda de pressão no sistema.

Quando a pressão de trabalho está abaixo da especificada no projeto, um cilindro pneumático torna-se mais lento e, desta forma, o tempo de operação aumenta resultando em queda de produtividade.

Quando o ar comprimido consumido se aproxima do gerado pelo compressor, deve-se tomar medidas preventivas para evitar que o sistema entre em colapso, medindo-se o consumo em cada ponto através de procedimentos normalizados e administrando o consumo parcial e global.

2.2.2 Vazamentos e Desperdícios

Os vazamentos e os desperdícios encontrados na maioria das empresas que utiliza o ar comprimido,

elevam os custos operacionais e diminuem a capacidade de todo o sistema instalado.

Para se reduzir o consumo de ar, pode-se proceder de diversas maneiras como, por exemplo, estudar a possível redução dos diâmetros utilizados em fundições, metalúrgicas e outros processos, bem como a pressão do ar comprimido.

Na Tabela 1, comparam-se as pressões utilizadas para diversos diâmetros de orifícios. Com os dados desta tabela, é possível fazer uma comparação dos custos da vazão de ar comprimido entre dois orifícios:

TABELA 1: PRESSÕES UTILIZADAS PARA DIVERSOS DIÂMETROS DE ORIFÍCIOS \varnothing

\varnothing (mm)	Pressão de operação		
	4 bar	5 bar	6 bar
3	0,408 m ³ /min	0,491 m ³ /min	0,574 m ³ /min
4	0,723 m ³ /min	0,873 m ³ /min	1,020 m ³ /min
5	1,135 m ³ /min	1,364 m ³ /min	1,593 m ³ /min

2.3 Manutenção

A manutenção deverá ser implementada de forma regular, com uma periodicidade que não deverá ir além de uma semana. Deverão constituir rotinas da manutenção a detecção sistemática e posterior eliminação dos vazamentos; a verificação do sistema de refrigeração; a verificação do nível e troca do óleo lubrificante; a troca e a limpeza do filtro de ar e do filtro coalescente; a limpeza do after cooler e do secador de ar comprimido e a verificação experimental da válvula de segurança e da tensão da correia, reapertando ou trocando esta última.

Deve-se prever uma inspeção completa em toda a linha de distribuição e em equipamentos que utilizam ar comprimido, dando atenção aos cilindros pneumáticos e válvulas de controle. De modo geral, a simples limpeza das máquinas e equipamentos permite reduzir as despesas com a energia elétrica.

3.0 - VARIÇÃO DE ROTAÇÃO

Sendo a vazão do compressor diretamente proporcional à rotação, a variação deste parâmetro resultaria, obviamente, num método de controle de vazão. A implementação desta forma de controle é utilizando Inversores de Freqüência e conduz à resultados econômicos satisfatórios com a otimização do consumo de energia elétrica, pois a potência varia proporcionalmente à velocidade de rotação.

3.1. Ensaio Laboratorial

O objetivo do ensaio laboratorial de um compressor alternativo é verificar experimentalmente a economia de energia elétrica propiciada pela aplicação de Inversores de Freqüência no acionamento de Compressores, fazendo-se o monitoramento das grandezas elétricas da rede de alimentação ao se variarem a pressão e a velocidade do ensaio.

3.1.1 Bancada de Ensaio

- Inversor de Freqüência SAMI GS – ABB de 30 [kVA].
- MIT de 220 V, 28 A, 60 Hz, 10 CV e 1750 rpm.
- Aparelho portátil para análise da energia elétrica.

3.1.2 Resultados Obtidos

Na Figura 1, observa-se que no gráfico I_{RMS} [mA] \square Pressão [kgf/cm²] a corrente requerida da rede de alimentação CA no modo V/f Quadrático é menor porque este propicia um torque menor em baixas velocidades (45 \square z). Isto ocorre porque a tensão do motor, nesta área de fluxo constante, é mantida menor em relação ao modo V/f Linear. O inversor opera com torques maiores no modo V/f Linear.

Nota-se que a corrente sem o Inversor, ou seja, com o MIT diretamente conectado à rede CA, é maior. Nota-se ainda, com base nestes resultados, a diferença significativa que recai em menos perdas de energia no sistema, principalmente em baixa velocidade.

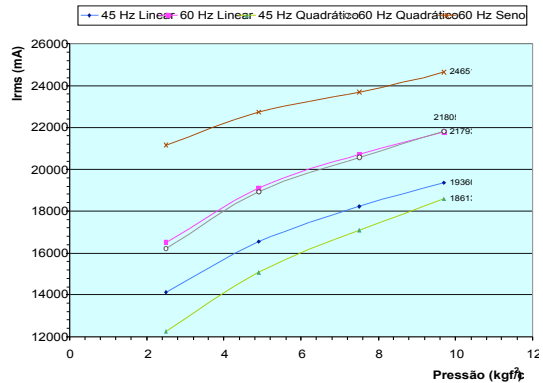


FIGURA 1 - I_{RMS} [mA] \square Pressão [kgf/cm²]

No gráfico P [W] \square Pressão [kgf/cm²] da Figura 2, observa-se que, para uma dada pressão, a potência elétrica consumida em 45 Hz é menor, já que o número de rotações por segundo do motor de acionamento do compressor é menor em 45 Hz do que em 60 Hz.

A potência ativa consumida com o Inversor é maior em 60 Hz, pois há uma perda de capacidade de carga do motor causada pelo conteúdo harmônico no mesmo, além de se suprir as perdas por chaveamento e condução nos semicondutores de potência. Porém, deve-se salientar que a grande vantagem de se operar com o Inversor é o controle em uma ampla faixa de velocidade e não em apenas um único ponto de operação.

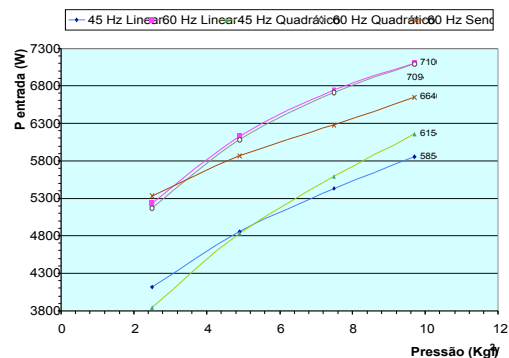


FIGURA 2 - P [W] \square Pressão [kgf/cm²]

O Inversor de Frequência aumenta o rendimento global diminuindo o consumo de reativo em comparação ao acionamento do MIT direto da rede de alimentação CA. A potência reativa necessária ao funcionamento do MIT é suprida pelo próprio Inversor. Observa-se na Figura 3, a vantagem de se utilizar o Inversor, sendo que o modo Quadrático apresenta a melhor performance.

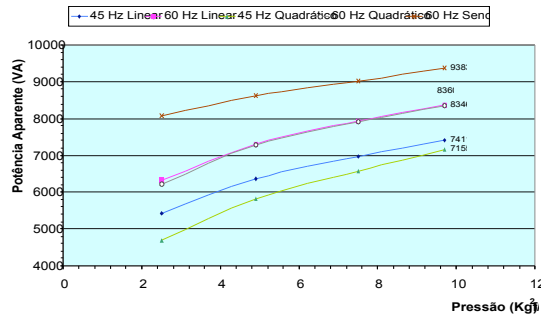


FIGURA 3 – S [VA] □ Pressão [kgf/cm²]

Os Inversores distorcem as formas de onda da corrente, resultando na adição de uma componente de distorção ao PF. Porém, o aparecimento da potência distorcível harmônica é compensada pela diminuição da potência reativa na operação com o Inversor, visto que a unidade retificadora produz um deslocamento entre a componente fundamental da corrente e a tensão da rede (dPF para Inversores PWM está entre 95 e 99%).

O PF do Inversor PWM é relativamente alto em todas as velocidades devido à ponte retificadora a diodos na entrada, como se observa na Figura 4. A potência demandada da rede de alimentação é quase que totalmente potência ativa.

PF pode ser melhorado com a adição de reatores de linha ou transformadores na entrada do Inversor que o isolam da rede elétrica, os quais controlam, também, as tensões transitórias.

Nota-se o incremento do fator de potência com o uso do Inversor, sendo que o modo Quadrático apresenta a melhor performance.

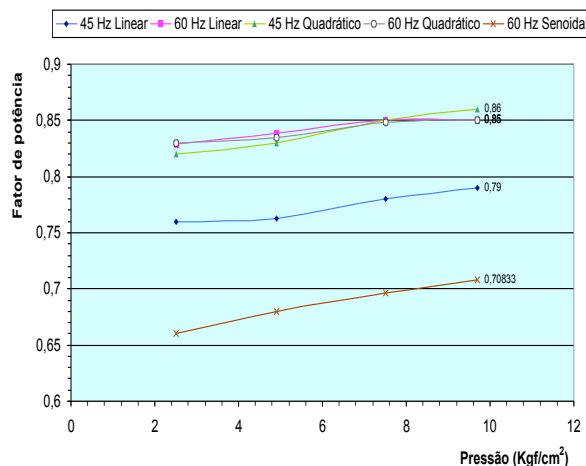


FIGURA 4 – Fator de Potência □ Pressão [kgf/cm²]

No gráfico THD_% □ Pressão [kgf/cm²] da Figura 5, THD_% (Total Harmonic Distortion) é maior em 45 Hz do que em 60 Hz.

Independente do modo de operação, observa-se que as distorções são elevadas, de modo que, na prática, se necessita da colocação de reatores de choque para redução das amplitudes das harmônicas injetadas na rede.

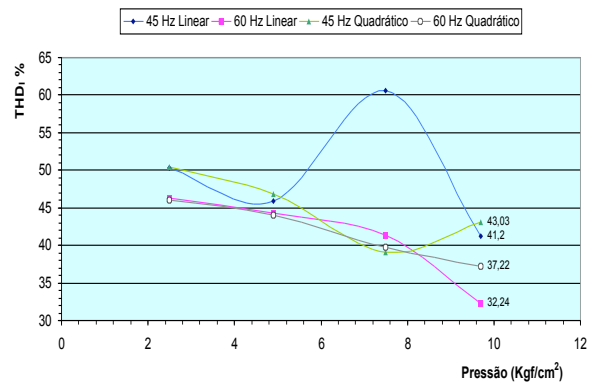


FIGURA 5 – THD_% □ Pressão [Kgf/cm²]

4.0 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO DE COMPRESSORES INDUSTRIAIS

4.1. Ensaio Convencional

No ensaio convencional em compressores alternativos, o compressor é ligado com o registro de saída de ar fechado e é mantido assim até que se atinja determinada pressão, quando se abre este de modo a se obter um regime permanente. Deve-se fazer, então, leituras de pressão e temperatura do ar na saída do 1^o estágio, na entrada e saída dos outros estágios, leituras de pressão no reservatório, potência fornecida ao motor elétrico, vazão de ar admitido pelo compressor, vazão de água de refrigeração, temperatura da água de refrigeração na entrada e saída do compressor e, ainda, leitura das condições ambientes de pressão, temperatura e umidade.

Repete-se o procedimento anterior para outras condições de regime permanente alterando-se a abertura do registro de saída de ar.

Obtidas as leituras, pode-se, então, avaliar o compressor calculando seus rendimentos.

4.2. Ensaio Proposto

Na metodologia de ensaio proposta, o valor de desempenho obtido representa um valor médio para a faixa de trabalho do equipamento, determinada pelos limites mínimo e máximo do pressostato (ou válvula de alívio) acoplado ao reservatório.

O valor do desempenho de uma máquina genérica está diretamente relacionado ao que se considera como energia útil transformado por esta. Da mesma forma, para um compressor, o valor de seu desempenho estará relacionado à forma de utilização do ar comprimido produzido.

De uma maneira geral, é bastante comum a utilização do ar comprimido somente como energia de pressão para produção de trabalho mecânico. Assim, a energia

útil produzida será determinada supondo uma transformação isobárica. Os valores de desempenho obtidos serão menores em relação aos obtidos pela metodologia convencional, sendo, contudo, bastante representativos.

4.3. Metodologia do Ensaio Proposto

Para o ensaio, tem-se o compressor em sua configuração normal de trabalho, funcionando pelo pressostato que atua no motor elétrico, ligando e desligando-o ou pela válvula de alívio.

A metodologia aplicada para o ensaio consiste no monitoramento do pressostato (ou válvula de alívio) e algumas medições da seguinte forma:

- Estando o motor elétrico do compressor desligado pelo pressostato de máxima do reservatório, abre-se a válvula de saída de ar e espera-se até que o pressostato de baixa acione o motor, quando se deve imediatamente fechar a saída de ar bem como cortar a alimentação do motor elétrico;
- Tomam-se as medidas das condições ambientes de pressão –atmosférica (P_0) e a temperatura (T_0);
- Espera-se estabilizar a temperatura do ar do reservatório com o ambiente e mede-se a pressão do reservatório (P_1) e a temperatura (T_1);
- Energiza-se, então, o motor elétrico tomando-se medidas periódicas da corrente elétrica (I) (por exemplo, de 5 em 5 segundos) até que o motor desligue pela ação do pressostato de máxima, quando então se deve anotar o tempo total de funcionamento (t);
- Espera-se estabilizar a temperatura do ar do reservatório com o ambiente e mede-se a pressão no reservatório (P_2) e a temperatura (T_2);
- Finalmente, desacopla-se o motor elétrico do compressor e mede-se sua corrente (corrente a vazio).

4.4 Cálculos

Sendo:

- Volume do Reservatório: $V = \text{m}^3$;
- Tempo total de funcionamento $t = \text{s}$;
- Corrente a vazio $I_0 = \text{A}$;
- Corrente Média $I_t = \text{A}$.

Tem-se:

a) Massas:

Considerando o ar como gás ideal, tem-se:

$$m_1 = P_1 \cdot V / R \cdot T_1 = \text{kg} \quad (\text{onde: } R=0,287 \text{ kJ/kg K})$$

$$m_2 = P_2 \cdot V / R \cdot T_2 = \text{kg}$$

$$\Delta m = m_2 - m_1 = \text{kg}$$

b) Energia Útil:

A energia útil será dada, em função do usuário, pelo trabalho de uma transformação isobárica dada por:

$$W = \Delta m P V = \Delta m \cdot R \cdot T = \text{kJ}$$

Nota: Admitiu-se para o cálculo da energia útil uma transformação isobárica uma vez que, normalmente, o calor produzido na compressão não é aproveitado e que os processos exigem pressão constante.

Caso o processo aproveitasse o calor gerado e não exigisse pressão constante, seria admitido para o cálculo da energia útil uma transformação isotérmica dada por:

$$W = \Delta m \cdot R \cdot T \ln P_f / P_i$$

c) Energia Fornecida:

Pelo método da linearização, pode-se obter a potência elétrica média (P_{el}) consumida durante o funcionamento do motor elétrico.

$$W_{fornecido} = W_{entr} = P_{el} \times t = \text{kJ}$$

Nota: A potência elétrica média pode ser obtida através de um programa computacional, porém pode também ser obtida facilmente por cálculo manual.

d) Rendimento Global:

$$\eta_g = W_{saída} / W_{entr.} = W_{útil} / W_{fornec.} = \%$$

4.3.1. Método da Linearização

A avaliação do carregamento de um motor elétrico tem-se mostrado um dos grandes problemas para os profissionais ligados à área de conservação de energia.

O método apresentado parte de medições elementares nos motores elétricos: a corrente de trabalho (I_t) ou a rotação de trabalho (n_t).

Efetuada esta medição, com o motor em suas condições reais de funcionamento, a meta final será o cálculo da potência elétrica (P_{el}) seguindo as seguintes fases:

- Medição, ou avaliação da rotação de trabalho;

Pode-se calcular a rotação de trabalho (n_t) através da linearização da curva corrente em função da rotação típica de um motor de indução,

- Cálculo do conjugado e potência de trabalho;

Para o cálculo do conjugado de trabalho é necessário uma linearização da curva característica do conjugado em função da rotação para motores de indução

- Cálculo do rendimento do motor;

No cálculo do rendimento de trabalho, faz-se uma aproximação da curva de rendimento em função da porcentagem de potência nominal como sendo uma relação funcional do tipo parábola.

- Cálculo da potência elétrica;

A potência elétrica útil de um motor é dada como sendo a potência de eixo dividida pelo rendimento.

5.0 - CONCLUSÕES

A análise de um sistema de ar comprimido vai desde o ponto de captação do ar atmosférico, geração do ar, tratamento e preparação do ar comprimido, distribuição do ar até o seu uso final, enumerando as causas de desperdício de energia elétrica. A constatação prática de algumas falhas destes requisitos resultou no guia de uso de compressores.

O projeto de implantação do compressor de ar e uma correta administração do consumo do ar comprimido são aspectos essenciais para a redução dos custos energéticos. A aplicação de Inversor de Frequência é benéfica ao sistema de ar comprimido, nas plantas industriais, absorvendo da rede elétrica apenas a potência necessária.

A particular vantagem da metodologia de ensaio apresentada é a possibilidade de realização da mesma em campo com o compressor em funcionamento e de

forma extremamente simplificada. Os instrumentos necessários para as medições são de fácil obtenção e utilização. Basicamente, necessita-se de um amperímetro do tipo alicate, um termômetro, cronômetro, barômetro e manômetro que, normalmente, já vem acoplado ao reservatório. Para a obtenção da potência elétrica consumida necessita-se, além de medir a corrente elétrica de uma das fases, medir a corrente do motor quando este está sem carga. Contudo, esta pode ser medida facilmente mediante o deslocamento do motor e desacoplamento da correia.

Caso se deseje o constante monitoramento do consumo de ar comprimido e do desempenho do compressor, pode-se instalar um horímetro na alimentação do motor elétrico a fim de medir o tempo acumulado de funcionamento do compressor e comparar com valores de referência, obtidos em ensaio anterior.

Outra vantagem desta metodologia é a obtenção de um valor de desempenho bastante coerente com a realidade, uma vez que este representa um valor médio para as condições reais de trabalho.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Rodrigues, Paulo Sérgio B. "Compressores Industriais". Rio de Janeiro, Editora Didática e Científica Ltda., 1991.

[2] Flôres, Luiz Fernando Valadão. "Máquinas e Aparelhos Térmicos". Universidade Federal de Itajubá, MG, Notas de Aula, 2002.

[3] R. A. Gutzwiller, R. J. Gerhart, and H. N. Hickok. "A 10000 hp a.c. adjustable frequency compressor drive - The economics of its application". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 1, January/February 1984.

[4] David E. Rice. "A suggested energy-savings evaluation method for a.c. adjustable-speed drive applications". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 6, November/December 1988.

[5] S. B. Dewan, A. Straughen and G. R. Slemon. "Power Semiconductor Drives". The University of Toronto, 1984.

[6] "ASD Master – Adjustable Speed Drive Evaluation Methodology and Applications Software". User's Guide and User's Manual, Electric Power Research Institute, September 1996.

[7] ABB. "Frequency converters ACS 501 - 2.2 to 75 kW". SAMI GS User's Manual.