

DESEMPENHO DE COMPRESSORES RECÍPROCOS OPERANDO COM VELOCIDADE VARIÁVEL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**Ronilson Rocha**

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais
Morro do Cruzeiro - Ouro Preto -MG
rocha@em.ufop.br

Márcio Fonte Boa Cortez

Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antonio Carlos, 6627 - Belo Horizonte -MG
fonteboa@demec.ufmg.br

Roberto Márcio de Andrade

Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antonio Carlos, 6627 - Belo Horizonte -MG
roberto@demec.ufmg.br

Resumo. *O compressor é o coração de todo sistema de refrigeração, principalmente quando se trata de um sistema de velocidade variável. Graças ao desenvolvimento da tecnologia dos dispositivos eletrônicos e dos avanços obtidos nas técnicas de controle, o compressor de velocidade variável tem sido cada vez mais solicitado. Entretanto, ainda existem aspectos operacionais relacionados com o sistema motocompressor operando com velocidade variável que devem ser cuidadosamente analisados com o objetivo de obter um bom desempenho e evitar falhas de funcionamento. Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica abordando alguns destes aspectos.*

Palavras chave: *Compressor Recíproco, Velocidade Variável, Sistema de Refrigeração*

1. Introdução

À medida que as necessidades do conforto humano e conservação de produtos sensíveis a temperatura aumentam, a demanda energética de sistemas de refrigeração cresce na mesma proporção, atingindo parcelas representativas no cenário mundial. Sob este aspecto, um grande incentivo tem sido dispensado ao desenvolvimento de sistemas de refrigeração cada vez mais eficientes no uso da energia e que assegurem um melhor desempenho de suas funções (Domijan et al., 1992). Também é necessário observar que a redução dos picos de energia resultantes do funcionamento do sistema é tão importante quanto a obtenção de uma significativa economia de energia através de um melhor desempenho de sistemas de refrigeração (Domijan et al., 1992; Miller, 1988).

Os sistemas mais comuns fazem uso do ciclo de compressão mecânica de vapor, sendo constituídos basicamente por um dispositivo de compressão (compressor), um dispositivo de expansão (em geral, uma espécie de estrangulamento) e dois trocadores de calor (condensador e evaporador). Cada um destes componentes apresenta um comportamento característico que atende às condições impostas pelos demais (Stoecker and Jones, 1985), sendo que as interações entre eles determinam o desempenho do sistema de refrigeração. O “coração” de todo sistema de refrigeração por compressão de vapor é o compressor, uma vez que suas características básicas estabelecem, além da vazão de refrigerante comprimido, a potência de entrada requerida pelo sistema (Garstang, 1990; Ruohoniemi, 1988; Riegger, 1988).

Os sistemas de refrigeração são atualmente dominados pelos compressores recíprocos (ou alternativos) e rotativos (parafuso, centrífugo e palhetas). Recentemente, um novo tipo de compressor, conhecido como “scroll”, tem sido objeto de grande quantidade de pesquisas e desenvolvimento em todo mundo (Riegger, 1988; Takebayashi et al., 1994; Winandy et al., 2002; Qureshi and A.Tassou, 1996). Com a finalidade de evitar a fuga do

gás refrigerante e a penetração de ar externo, os sistemas de refrigeração modernos normalmente fazem uso de unidades motocompressoras herméticas. Outra vantagem de compressores herméticos é a utilização do próprio refrigerante para o resfriamento do motor.

Discussões sobre a aptidão de um determinado tipo de compressor freqüentemente fazem referências em termos de eficiência volumétrica, adiabática e isoentrópica (Riegger, 1988). Na escolha do compressor são usualmente considerados vários fatores, tais como faixa de capacidade, eficiência energética, auto-lubrificação e custo (Riegger, 1988). Outro ponto a ser verificado é o acionamento elétrico empregado no compressor. Atualmente, a maioria dos compressores recíprocos herméticos em serviço são equipados com motores de indução monofásicos, embora o uso de motores de indução trifásicos ou motores de ímãs permanentes (ECM) representem opções mais interessantes devido a maior eficiência e maior simplicidade de acionamento.

A resposta de um sistema operando em regime permanente a uma redução da carga térmica é a diminuição da pressão e da temperatura de evaporação. Tal mudança nas condições de evaporação resulta na redução da capacidade do compressor, o que pode ser desejável por diversas razões, tal como controlar a temperatura de produtos que requerem alta estabilidade térmica (Stoecker and Jones, 1985). Basicamente, as técnicas de controle de capacidade consistem em variar a vazão de refrigerante no sistema de refrigeração. O método convencional de controle de capacidade é a variação discreta da velocidade do compressor, ligando e desligando o motor que o aciona (método "liga-desliga"). Esta estratégia de controle resulta em uma eficiência reduzida do sistema, perdas cíclicas, controle de temperatura pobre, baixa confiabilidade e altos custos de manutenção (Tassou and Qureshi, 1998).

Outras alternativas podem ser empregadas para o controle da capacidade de um sistema de refrigeração com melhores resultados que o método convencional, tais como (Qureshi and A.Tassou, 1996; Parreira and Parise, 1988): cilindro descarregado, realimentação de gás quente, compressores múltiplos, variação do volume nocivo, etc. Entretanto, com os avanços da engenharia de controle e a redução do custo dos conversores estáticos de potência, nenhum destes métodos citados é mais promissor que o uso de compressores de velocidade variável (Bahel and Zubair, 1989; Miller, 1988; Parreira and Parise, 1988; Domijan et al., 1992).

Os sistemas de velocidade variável tem sido cogitados para substituir os sistemas convencionais "liga-desliga" em diversas aplicações, uma vez que oferecem a redução do consumo e dos picos de energia. Isto seria vantajoso principalmente para as concessionárias de energia elétrica devido a melhoria da qualidade da energia da rede e redução das perdas nas linhas de transmissão. Estes sistemas possuem uma aplicação promissora em áreas onde existem limitações energéticas, tais como em sistemas isolados de energia renovável (solar, eólica, etc). Uma vez que são capazes de manter uma temperatura ótima na carga térmica, outra grande aplicação destes sistemas é na conservação de produtos cuja vida útil depende da estabilidade térmica, tais como medicamentos, vacinas, alimentos, etc. Entretanto, apesar de todas as vantagens obtidas com o uso de sistemas de velocidade variável, persistem alguns aspectos operacionais que devem ser cuidadosamente analisados com o objetivo de obter um bom desempenho destes sistemas.

Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica a respeito dos sistemas de refrigeração à velocidade variável. A intenção é destacar algumas de suas virtudes em relação aos sistemas convencionais e possíveis problemas operacionais. As opções mais comuns para o acionamento de um compressor de velocidade variável são apresentadas e discutidas. Neste trabalho, apenas o compressor recíproco é considerado por ser o tipo mais encontrado em sistemas de refrigeração de pequeno e médio porte.

2. Compressor recíproco

O compressor recíproco consiste de um êmbolo movendo-se alternadamente no interior de um cilindro, com válvulas de sucção e descarga convenientemente dispostas para permitir a compressão. Podem ser encontrados em unidades herméticas, semi-herméticas (unidades herméticas com cabeçote removível) ou abertas de um cilindro ou multicilindros. A refrigeração do cilindro depende da capacidade do compressor e da temperatura de descarga do fluido comprimido, podendo ser utilizadas aletas ou câmaras de água no cilindro e/ou no cabeçote. A lubrificação do conjunto pode ser forçada ou por meio de pescador. Para evitar danos ao compressor, é desejável que o refrigerante entre no compressor no estado de vapor superaquecido a fim de evitar a presença de gotículas de refrigerante líquido misturadas ao vapor (Stoecker and Jones, 1985).

O ciclo termodinâmico de funcionamento do compressor recíproco é composto por quatro processos que se repetem a cada revolução do eixo do compressor: compressão politrópica; descarga a pressão constante; expansão politrópica e sucção a pressão constante. A caracterização dinâmica de um sistema de refrigeração é de grande importância, uma vez que o seu comportamento transitório tem influência direta na determinação de seu desempenho (Katipamula and O'Neal, 1991). Para o estudo do comportamento termodinâmico ao longo de um ciclo de funcionamento do compressor, o modelo para a predição da pressão, temperatura e vazão em massa instantâneas pode ser derivado a partir das leis de conservação de energia e de massa, integralizadas no espaço para se obter as quatro fases de funcionamento do compressor, admitindo o cilindro como o volume de controle (Nascimento Filho, 1990; Parise, 1983). Este tipo de modelo é essencial para o projeto e a análise

do desempenho do compressor, embora não seja adequado para o estudo do sistema de refrigeração, uma vez o período de duração de um ciclo completo de funcionamento de um compressor típico pode ser considerado desprezível em relação à inércia dos trocadores de calor.

Para o estudo de um sistema de refrigeração, o uso de modelos quasi-estáticos do compressor é mais apropriado, uma vez que simplifica o estudo da dinâmica do sistema mantendo um nível razoável de exatidão. Os principais parâmetros para a avaliação do compressor recíproco são: a capacidade de refrigeração, a potência consumida, a vazão efetiva e a eficiência volumétrica. A eficiência volumétrica (η_v) é considerada um importante parâmetro na análise de desempenho do compressor (Stoecker and Jones, 1985; Martins, 1987). Ela é definida como a razão entre a vazão volumétrica que entra no compressor e a taxa de deslocamento¹ do compressor. O seu valor ideal é dado por:

$$\eta_v = 1 - R_{vn} \left(R_{cps}^{\frac{1}{n}} - 1 \right) \quad (1)$$

onde n = coeficiente politrópico, R_{cps} = razão de compressão e R_{vn} = razão entre o volume nocivo² e o volume coberto pelo pistão.

A aplicação da equação (1) na determinação da eficiência volumétrica de um compressor produz valores superestimados, uma vez que desvios do desempenho ideal crescem devido a várias perdas, o que resulta na redução da capacidade e um aumento na potência de saída. Na operação dos compressores, as perdas mais importantes estão associadas à dinâmica do pistão e às válvulas, a queda de pressão dentro do compressor, imperfeição das válvulas devido a uma ação mecânica imperfeita, desvios da compressão isentrópica, etc. A precisão de (1) melhora consideravelmente com o emprego de uma razão de volume nocivo efetiva, determinada experimentalmente através de um ensaio com o compressor funcionando com entrada fechada (Lin et al., 1981).

A definição da eficiência volumétrica pode ser utilizada para o cálculo da vazão em massa média do compressor \dot{m}_{cps} :

$$\dot{m}_{cps} = \frac{D\omega\eta_v}{2\pi v_s} \quad (2)$$

onde D = deslocamento volumétrico do cilindro, ω = velocidade angular do compressor e v_s = o volume específico do refrigerante durante o processo de sucção. A eficiência isentrópica do compressor η_{is} pode ser definida como:

$$\eta_{is} = \frac{\dot{m}_{cps}\Delta h_{is}}{P_{eixo}} \quad (3)$$

onde Δh_{is} = a variação da entalpia específica na compressão e P_{eixo} = potência mecânica no eixo.

A avaliação do perfil de carga mecânica, representado pelo torque no eixo, é de fundamental importância para a definição de uma estratégia de acionamento elétrico do conjunto motocompressor, o qual deve ser capaz de proporcionar o perfil torque \times velocidade requerido pelas necessidades específicas da aplicação (Mohan et al., 1989; Rice, 1988). Uma vez que os compressores recíprocos representam uma carga mecânica excêntrica, o torque requerido para acionar um compressor recíproco não varia linearmente com a posição angular do eixo (Young and Liu, 1993), possuindo um rico conteúdo harmônico que depende da velocidade do compressor (Perrin et al., 1997). Entretanto o perfil de carga mecânica pode ser considerado constante para aplicações em sistemas de refrigeração de velocidade variável (Garstang, 1990), sendo dado por:

$$T_{cps} = \frac{P_{eixo}}{\omega} = \frac{\dot{m}_{cps}\Delta h_{is}}{\eta_{is}\omega} = \frac{D}{2\pi} \frac{\Delta h_{is}}{v_s} \frac{\eta_v}{\eta_{is}} \quad (4)$$

Observa-se que o torque de carga do compressor não depende diretamente da velocidade de rotação ω , sendo o resultado da interação entre dois fatores que são conflitantes entre si: as condições de operação e propriedades do refrigerante. O outro fator que determina o torque de carga é a eficiência do próprio compressor. Uma vez que o volume específico de entrada v_s é diretamente relacionado com a temperatura de evaporação do sistema, percebe-se que as necessidades de torque do compressor são muito dependentes da velocidade do compressor, sendo este um fator dominante em sua determinação, a não ser quando existem altas razões de compressão, quando o trabalho por unidade de massa Δh_{is} passa a ser o fator dominante no torque (Rice, 1988). Neste caso, ocorre uma forte queda na eficiência isentrópica devido a redução da necessidade de trabalho.

¹ volume coberto pelo êmbolo durante o tempo de sucção por unidade de tempo

² O volume nocivo é o volume mínimo residual quando o êmbolo encontra-se mais próximo ao cabeçote.

Considerando a carga não linear do compressor, sempre aparecem problemas associados com as vibrações e os ruídos acústicos (Young and Liu, 1993; Cho et al., 2000). As maiores fontes de vibração e ruídos no compressor recíproco estão relacionados ao movimento de seus componentes mecânicos (válvulas de sucção e descarga, amortecedores, fricção entre pistão e cilindro, etc.), à variação da força radial devido a compressão do refrigerante e ao ruído do motor elétrico. Em geral, quando um compressor recíproco opera a velocidade constante com um motor de indução monofásico, a maior frequência de ruído situa-se na faixa de 2 a 5 kHz (Cho et al., 2000).

3. Acionamento elétrico

Devido à facilidade de controle de velocidade, a utilização de motores de corrente contínua (CC) é a primeira opção a ser levada em conta quando se lida com aplicações de acionamentos a velocidade variável. Entretanto, o seu uso em compressores de velocidade variável não é justificado devido ao seu custo elevado, baixo desempenho e manutenção freqüente. Além disso, uma vez que o comutador deve operar em um ambiente de vapor refrigerante e óleo, a máquina CC é incapacitada para aplicações em compressores herméticos (Hollouda and Kelley, 1993).

Uma melhor opção para o acionamento de sistemas de velocidade variável é o uso de motores de indução trifásicos de corrente alternada utilizando conversores estáticos de potência. Neste caso, o controle de velocidade é mais complexo, uma vez que, além de ser necessário variar a frequência de alimentação, as características de resposta do motor devem ser ajustadas para atender às necessidades de torque solicitadas pelo compressor (Domijan et al., 1992). A máquina de indução deve operar com fluxo magnético constante a fim de evitar a saturação magnética e perdas excessivas (Miller, 1988). O método mais utilizado para que tais requisitos de acionamento sejam assegurados é variar a frequência de alimentação mantendo uma relação tensão/frequência (V/f) constante. Esta relação geralmente é determinada a partir de restrições externas visando limitar a corrente no conversor (Reggiani et al., 1983). Uma das limitações do método V/f é a necessidade de corrigir a relação volts/hertz em baixas frequências, uma vez que nesta faixa o fluxo constante não é mantido constante.

As perdas relativas ao acionamento do motor de indução trifásico podem ser classificadas em três categorias (Rice, 1988): perdas rotacionais e no cobre (inerentes ao motor de indução), dissipação de energia no conversor e perdas adicionais provocadas pela geração de harmônicos. As correntes harmônicas geram torques que afetam apreciavelmente a rotação do motor e provocam significativas perdas, sendo que o seu efeito depende da frequência e do projeto da máquina. Uma fonte adicional de perdas provocadas pelas correntes harmônicas avaliada para motores de indução é a sucção adicional de gás superaquecido antes da compressão. O conteúdo harmônico do conversor (uma perda direta na eficiência do motor) e a resultante da adicional sucção de gás superaquecido combinam-se, produzindo uma queda na eficiência isoentrópica do compressor. A redução da vazão de refrigerante para a refrigeração do motor a baixas velocidades tende a agravar este efeito (Miller, 1988). Para reduzir as perdas harmônicas, é preciso que a forma de onda de saída do conversor seja o mais próximo possível de uma senóide (Domijan et al., 1992). A melhor opção neste caso é a utilização de um acionamento por comando de largura de pulsos (PWM), cuja eficiência tende a ser similar ao observado com uma senóide pura. O uso de motores de indução com altos valores de reatância de dispersão implica em menores correntes harmônicas, e conseqüentemente, baixas perdas harmônicas (Miller, 1988; Domijan et al., 1992).

Outra opção de acionamento do compressor é o motor "brushless-DC" ou motor síncrono comutado eletronicamente (ECM). O ECM, mesmo considerando as perdas em seu conversor, têm desempenho igual ou melhor que a de um motor de indução de alta eficiência alimentado por uma senóide pura. Isto implica que o consumo de energia e o pico de demanda tem uma redução adicional na operação a velocidade variável com o uso do ECM (Rice, 1988; Hollouda and Kelley, 1993). Por ser um motor de imã permanente, o ECM possui vantagens inerentes sobre os motores de indução, tal como a eliminação das perdas no cobre do rotor e a redução das perdas no núcleo. O conversor estático para o acionamento do ECM é menos susceptível às perdas harmônicas que os conversores para os motores de indução, o que assegura maior eficiência a baixas velocidades (Rice, 1988). Porém, a capacidade inicialmente relatada para os motores ECM é prejudicada por duas possíveis falhas que não existem no motor de indução (Rice, 1988):

- é grande o problema da desmagnetização em superfícies magnéticas em baixas temperaturas, especialmente com os materiais de ferrite, utilizados na fabricação dos imãs. Também é necessário prevenir a ocorrência de altas correntes do motor que poderiam desmagnetizar os imãs permanentes;
- os imãs permanentes do ECM são colados circunferencialmente com adesivo na superfície do núcleo de ferro do rotor. Várias aproximações têm sido tentadas, visando evitar que o adesivo magnético ou pedaços deste desloquem-se em altas velocidades. Na aplicação em compressores herméticos, esta situação é agravada devido ao fato que o gás refrigerante tende a dissolver este adesivo. Outra possibilidade é embutir os imãs

permanentes no rotor através de tiras de metal ou malhas de fios. Entretanto, além de aumentar ao custo final, esta solução produz vários graus de perdas de eficiência devido às correntes parasitas.

Comparativamente, para uma mesma aplicação em compressores, o preço de um motor de indução em relação a um ECM similar é menor, principalmente porque o aumento do custo devido ao uso de ímãs permanentes não compensa a redução do conteúdo de aço do motor (Rice, 1988; Ruohoniemi, 1988; Riegger, 1988). Por outro lado, apesar de sua eficiência do acionamento ser menor, o motor de indução ainda é capaz de promover uma ampla modulação de ganhos do sistema, de forma que as vantagens em eficiência do ECM podem ser justificadas com base em um ganho marginal predominante a baixas velocidades (Rice, 1988).

Um inconveniente para aplicações domésticas é o fato que a grande maioria dos sistemas de refrigeração atualmente em serviço utiliza compressores herméticos acionados por motores de indução monofásicos (Domijan et al., 1992; Young and Liu, 1993). Isto ocorre devido ao baixo custo da máquina de indução monofásica para esta faixa de aplicação (sistemas com potência abaixo de 1 CV) e a disponibilidade somente de energia monofásica na maioria das residências. Em sua forma mais simples, um motor monofásico consiste de um enrolamento de estator distribuído, conhecido como enrolamento principal, e de um rotor de gaiola. Uma vez que esta configuração não é capaz de proporcionar um torque de partida, um enrolamento de estator auxiliar é utilizado para esta finalidade. Vários tipos de motores monofásicos foram desenvolvidos visando atender as necessidades de torque, sendo o método usado em sua partida a principal diferença entre eles (Del Toro, 1994):

- motor de fase dividida (partida resistiva): as características construtivas conferem ao enrolamento auxiliar alta resistência elétrica e baixa reatância em relação ao enrolamento principal, não sendo necessário o uso de impedância externa. Devido ao fato que o enrolamento auxiliar ser dimensionado apenas para serviço intermitente, este deve ser desligado através de chaves centrífugas ou relés de corrente quando o motor atingir a velocidade de operação;
- motor com capacitor de partida: neste caso, um capacitor é colocado no circuito do enrolamento auxiliar, selecionado de forma a produzir uma defasagem no tempo de 90° entre as correntes do principal e do auxiliar, resultando em um torque de partida maior que no caso de um motor com partida resistiva;
- motor com capacitor permanente: em velocidades normais, o motor com capacitor de partida possui um campo magnético girante elíptico, o que provoca uma operação mais suave e menos ruidosa. Esta condição pode ser obtida na prática utilizando um enrolamento auxiliar idêntico ao principal, e inserindo em seu circuito um capacitor permanente selecionado para fornecer o campo girante de amplitude constante;
- motor com capacitor permanente e capacitor de partida: o elevado torque do motor com capacitor de partida pode ser combinado com as boas condições de operação do motor com capacitor permanente através do uso de dois capacitores, sendo um utilizado apenas durante a partida.

A função do capacitor é simular uma segunda fase a partir de uma alimentação monofásica para o enrolamento auxiliar. Devido a assimetria de seus enrolamentos, o torque gerado por um motor de indução monofásico é flutuante, implicando em maiores variações da velocidade no eixo e mais problemas relacionados com a vibração. Para solucionar este problema, é necessário o uso de estratégias de controle que reduzam a flutuação de velocidade do motor de indução monofásico (Young and Liu, 1993). Uma possível proposta para solucionar este problema é o uso de um capacitor variável eletronicamente para ajustar a capacitância série no circuito auxiliar conforme as condições de operação (Lettenmayer et al., 1991; Muljadi et al., 1993). O motor monofásico não é uma opção recomendável para utilização em sistemas de refrigeração de velocidade variável, devido a sua baixa eficiência e a relativa complexidade de acionamento.

4. Controle de capacidade

4.1. Sistemas convencionais “liga-desliga”

Nesta estratégia de controle de capacidade, a temperatura no interior da câmara frigorífica é monitorada por um termostato e comparada com a referência desejada, acionando ou desligando o conjunto motocompressor. Este controle apresenta uma série de problemas, entre os quais podem ser citados:

- as perdas dependem da resposta transitória e geralmente são atribuídas à dinâmica do refrigerante ao invés da massa térmica dos trocadores de calor. Uma vez que a resposta transitória do sistema não é uma simples função da massa térmica dos trocadores de calor, a degradação do desempenho é diferente para os modos de refrigeração e aquecimento. Desta forma, as perdas são variáveis com a porcentagem

de tempo em operação durante cada ciclo “liga-desliga”. As perdas são grandes para pequenas frações de tempo ligado e a medida que esta aumenta, há uma redução das perdas até que um mínimo seja atingido, a partir do qual elas voltam a aumentar (O’Neal and Katipamula, 1991);

- uma grande perda é causada pela migração do refrigerante do condensador para o evaporador enquanto o compressor está desligado. Esta migração é causada por uma perceptível diferença de potência devido à perda de capacidade imediatamente após a partida em conjunto com a troca direta de calor entre condensador e evaporador. Para uma dada razão cíclica, o aumento da porcentagem de tempo ligado (com a conseqüente redução da porcentagem do tempo desligado), reduz o tempo que o refrigerante tem para migrar para o evaporador, aumentando a eficiência no ciclo (O’Neal and Katipamula, 1991);
- os sistemas convencionais são projetados para satisfazer a carga térmica máxima. Entretanto, a maior parte do tempo, os sistemas de refrigeração operam com carga térmica de refrigeração substancialmente abaixo da capacidade de projeto. O resultado é o aumento da transferência de calor em ambos trocadores de calor acima do necessário. Isto resulta na redução da eficiência do compressor, uma vez que o sistema opera a baixas temperaturas de evaporação e altas temperaturas de condensação (Garstang, 1990; Tassou and Qureshi, 1998);
- para assegurar uma operação eficiente do dispositivo de expansão (válvula de expansão), a pressão diferencial entre os lados de baixa e alta pressão do compressor é mantida artificialmente alta, desprezando a possibilidade oferecida pelas variações da temperatura ambiente e da carga térmica do sistema de operar a baixas temperaturas de condensação com maior eficiência (Tassou and Qureshi, 1998);
- além dos problemas relacionados com a queda de eficiência no sistema de refrigeração em virtude do controle, o sistema varia entre os estados de operação ligado/desligado para a manutenção de um estreito controle de temperatura, e, sob severas condições de carga, tais variações provocam rápidos ciclos “liga-desliga” no compressor. Desta forma, é necessário o estabelecimento de um compromisso entre a precisão de ajuste da temperatura e a freqüência de ciclos “liga-desliga” aceitável no compressor (Garstang, 1990).
- os sistemas convencionais “liga-desliga” provocam perdas cíclicas no sistema de refrigeração. Estas perdas são compostas pela energia utilizada para o restabelecimento das condições normais de operação (desenvolvimento da pressão diferencial do sistema e redistribuição do refrigerante para uma posterior equalização ou bombeamento) e a energia consumida na partida do conjunto motocompressor (Domijan et al., 1992; Garstang, 1990; Bahel and Zubair, 1989; Hollouda and Kelley, 1993; Miller, 1988);
- o sistema “liga-desliga” apresenta picos de energia, compostos pela energia necessária para o restabelecimento das condições normais de operação do sistema, que ocorrem principalmente durante o religamento do sistema. Uma estratégia para minimizar tais picos de energia é proporcionar ao sistema uma partida suave, gerando a expectativa de baixas correntes e reduzidos picos de energia na rede elétrica durante a partida do sistema (Mohan et al., 1989; Domijan et al., 1992).

4.2. Sistemas de velocidade variável

Nesta estratégia, o controlador aumenta ou reduz continuamente a velocidade de rotação do motor que aciona o compressor de acordo com as necessidades da carga térmica, obtendo uma regulação precisa e estável da temperatura. Desta forma, um sistema com velocidade variável proporciona um maior ajuste da capacidade do sistema e uma melhor regulação de temperatura que o sistema convencional (Riegger, 1988; Hollouda and Kelley, 1993), sendo considerado um dos métodos mais efetivos em termos da potência de consumo específica (potência por vazão em massa) (Parreira and Parise, 1988). Entre as principais vantagens dos sistemas de velocidade variável, podem ser citadas:

- um sistema de velocidade variável é naturalmente capacitado para proporcionar uma larga faixa de modulação de capacidade, sendo esta uma de suas maiores vantagens, uma vez que é capaz de ajustar precisamente a saída do compressor de acordo com as variações da carga térmica;
- considerando que os sistemas de refrigeração operam geralmente com carga substancialmente menor que a capacidade projetada, a dimensão dos trocadores de calor pode ser reduzida, uma vez que a operação ocorre sob condições mais próximas das desejadas (Garstang, 1990; Bahel and Zubair, 1989; Tassou and Qureshi, 1998). Por outro lado, uma vez que os trocadores de calor projetados para capacidade plena são mais eficientes com capacidade reduzida, altos coeficientes de eficácia são obtidos para operações com baixas vazões de refrigerante (Domijan et al., 1992; Hollouda and Kelley, 1993; Miller, 1988);

- melhor desempenho do ciclo refrigerante com carga térmica reduzida, devido à redução da razão de compressão e da troca de calor (Bahel and Zubair, 1989);
- o funcionamento contínuo de sistemas de refrigeração melhora a reabilitação do sistema (Domijan et al., 1992), proporciona operações com poucas paradas e partidas, praticamente elimina as perdas cíclicas e reduz a fadiga dos componentes (Bahel and Zubair, 1989).
- o uso de conversores eletrônicos de potência para acionar e controlar a velocidade do compressor permite eliminar os grandes picos de partida do motor elétrico (Domijan et al., 1992; Garstang, 1990; Miller, 1988). Também existe ainda a possibilidade de elevar o fator de potência³ para um valor unitário, o que melhora a qualidade da energia da rede e a eficiência do sistema, aumentando a vida útil do motor e reduzindo as perdas distribuídas do sistema elétrico (Domijan et al., 1992; Garstang, 1990; Tassou and Qureshi, 1998).

Apesar das vantagens dos sistemas de velocidade variável, existem alguns problemas relacionados a operação à velocidade variável que devem ser levados em conta:

- a operação a velocidade variável requer um projeto mecânico do conjunto motocompressor mais complexo que o de um sistema que opera a velocidade fixa, uma vez que é necessário assegurar que todas as frequências de ressonâncias estruturais sejam evitadas dentro da maior faixa possível de operação (Qureshi and A.Tassou, 1996; Perrin et al., 1997);
- em baixas velocidades de rotação, devido à baixa vazão de refrigerante, pouco vapor resfriado é disponível para a refrigeração do motor em um compressor hermético, exatamente quando este está mais aquecido. Também há a possibilidade do fluxo de refrigerante ser inadequado para o retorno de óleo para o compressor, aumentando os problemas de lubrificação. Isto requer maiores estudos nas técnicas de lubrificação e arrefecimento do compressor (Bahel and Zubair, 1989; Garstang, 1990; Miller, 1988; Rice, 1988; Qureshi and A.Tassou, 1996);
- a operação a velocidade variável pode provocar o funcionamento imperfeito das válvulas do compressor, uma vez que as mesmas são projetadas para operar a uma velocidade fixa (Qureshi and A.Tassou, 1996). Por outro lado a frequência de abertura e fechamento das válvulas de palheta podem ajustar uma frequência harmônica a uma velocidade de rotação específica, possibilitando falhas no funcionamento devido ao bloqueio das válvulas (Bahel and Zubair, 1989);
- em sistemas de velocidade variável, é importante o estabelecimento de um controle de aceleração do compressor visando evitar variações bruscas da velocidade e o aparecimento de sobrecorrentes devido a dramáticas mudanças de carga (Garstang, 1990);
- é necessário estabelecer limites de velocidade para o compressor de velocidade variável visando a sua preservação, principalmente devido ao desgaste mecânico das válvulas (Garstang, 1990; Miller, 1988; Rice, 1988). Estes limites de velocidade para um compressor recíproco, de acordo com Rice, 1988, estão na faixa de 25% a 100% da velocidade nominal;
- o controle de sistemas de refrigeração a velocidade variável pode ser mais complexo, uma vez que, além de proporcionar maior precisão no ajuste de temperatura, o controlador também assume as funções de proteção do equipamento com relação a possíveis danos e controle do consumo de energia (Domijan et al., 1992);
- ainda hoje, os conversores de eletrônicos de potência e as estratégias de acionamento à velocidade variável não foram suficientemente desenvolvidos para a aplicação em compressores. Além disso, a integração do conversor com o conjunto motocompressor não tem sido feita de modo adequado, contribuindo substancialmente para o aumento do custo e a perda da confiabilidade da instalação (Tassou and Qureshi, 1998);
- as harmônicas geradas pelo chaveamento dos conversores eletrônicos de potência distorcem a forma de onda de entrada, degradando a qualidade da energia da rede elétrica. Estas harmônicas também produzem interferência de radio frequência. Embora a introdução de um filtro de entrada possa reduzir as correntes harmônicas na rede elétrica a níveis aceitáveis, isto pode representar um aumento de complexidade ao projeto do conversor (Mohan et al., 1989; Qureshi and A.Tassou, 1996);

³o fator de potência pode ser expresso como o deslocamento de fase entre as componentes fundamentais das formas de onda de tensão e corrente.

- as correntes harmônicas produzem uma perda adicional no cobre e no ferro da máquina, bem como no próprio conversor eletrônico, reduzindo a eficiência do acionamento (Wells et al., 1994; Anderson et al., 1991). Além disso, os picos de tensão presentes na forma de onda na saída podem determinar um maior esforço ao motor e ao conversor eletrônico, reduzindo a vida útil do acionamento (Tassou and Qureshi, 1994);
- as componentes harmônicas da saída dos conversores eletrônicos de potência também aumentam o nível de vibração e ruído acústico do conjunto motocompressor. Embora o ruído mecânico seja predominante em altas velocidades de rotação, em baixas velocidades prevalece o ruído causado pelo chaveamento do conversor estático. Uma forma para evitar este problema é adotar uma frequência de chaveamento do conversor eletrônico acima da faixa audível de 20 kHz. Entretanto, esta solução pode provocar sérios problemas de dv/dt no motor, além de aumentar as correntes de fuga e as perdas no conversor (Cho et al., 2000; Mohan et al., 1989);
- um grande problema para quantificar a eficiência de um sistema de refrigeração é a sua dependência com a velocidade de rotação do compressor (Lin et al., 1981; Fuchs et al., 1997; Mohan et al., 1989), o que torna necessário avaliações experimentais para determinar os parâmetros específicos. Devido a falhas no projeto dos controladores, calibração inadequada ou do uso de instrumentos inadequados, os resultados obtidos em testes comparativos podem ser relativamente confusos, possibilitando a geração de interpretações erradas (Garstang, 1990).
- os compressores utilizados em testes devem sempre ser checados quanto ao desempenho esperado, uma vez que eles influenciam nos resultados (Garstang, 1990). Também é necessário considerar a influência das harmônicas sobre a exatidão nas medições das grandezas elétricas (Anderson et al., 1991). Alguns procedimentos para ensaios e testes de compressores com o objetivo de determinar o seu desempenho podem ser encontrados em normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1979, e do Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1986.

5. Conclusões

A avaliação do perfil de carga mecânica do compressor é de suma importância, uma vez que, além de ser necessário para o dimensionamento da máquina elétrica, proporciona informações fundamentais para o estabelecimento de uma estratégia adequada de controle para o acionamento elétrico. Embora o torque de carga proporcionado por um compressor recíproco não seja linear e possua um rico conteúdo harmônico, o perfil de carga mecânica pode ser considerado constante para aplicações em sistemas de refrigeração de velocidade variável. Este perfil de carga depende, além da eficiência do próprio compressor, da interação entre dois fatores conflitantes: as condições de operação e propriedades do refrigerante.

Atualmente, a melhor opção para acionamentos de compressores é a utilização de motores de indução trifásicos, por ser uma máquina robusta, barata e capaz de modular uma ampla faixa de velocidade. A utilização do motor de ímã permanente (ECM) tem se mostrado uma proposta promissora para o futuro devido a sua maior eficiência e maior simplicidade de acionamento. Entretanto, a maioria dos compressores herméticos atualmente em serviço são equipados com motores de indução monofásicos, cujo acionamento é mais complexo e menos eficiente. Várias estratégias de controle tem sido propostas para melhorar o desempenho de um motor de indução monofásico, consistindo em um problema de difícil solução. Para sistemas de velocidade variável, a solução mais simples e viável é substituir o motor de indução monofásico por um motor de indução trifásico ou ECM, uma vez que a resposta de torque destes motores é bastante superior.

Quase todas limitações dos sistemas convencionais estão relacionadas ao regime intermitente de operação do compressor, o qual é responsável por picos indesejáveis de energia, perdas cíclicas, um pobre controle de temperatura e problemas de manutenção. Outra limitação dos sistemas convencionais é a necessidade de operar com altas razões de compressão, o que sacrifica a eficiência. Nos sistemas de velocidade variável, tais limitações são praticamente eliminadas devido à operação contínua do sistema. Entretanto, os sistemas de velocidade variável apresentam alguns problemas operacionais, os quais podem ser atribuídos principalmente à concepção de projeto inadequada dos compressores recíprocos. Sob este ponto de vista, uma simples conversão de um sistema convencional pode apresentar resultados frustrantes, sendo necessário o desenvolvimento de compressores específicos para aplicação em velocidade variável.

Alguns problemas dos sistemas de velocidade variável podem ser superados pela imposição de limites de operação. Por exemplo, o estabelecimento de períodos de repouso do compressor quando da operação a baixas frequências pode representar um elemento essencial para a filosofia de controle do sistema de refrigeração a

velocidade variável, visando a prevenção de danos por sobreaquecimento do motor do compressor ou lubrificação inadequada. O conversor eletrônico de potência pode ser considerado uma segunda fonte de problemas operacionais para um sistema de velocidade variável devido a geração de harmônicas.

Embora a tecnologia de sistemas de refrigeração a velocidade variável seja bastante promissora, percebe-se que ainda não se encontra completamente desenvolvida, sendo necessário um maior esforço multidisciplinar para que atinja a sua plenitude. Uma vez que o compressor é o principal componente de todo sistema de refrigeração, é desnecessário afirmar que parte deste esforço deve consistir no seu desenvolvimento tecnológico. Embora os compressores recíprocos dominem os sistemas de refrigeração atuais, talvez o uso de outros tipos de compressores possa ser mais interessante para aplicações de velocidade variável. O desenvolvimento de técnicas específicas para o acionamento elétrico e o uso de conversores PWM de alta eficiência, aliado a estratégias para a eliminação de harmônicas, podem representar um grande ganho de desempenho para os sistemas de refrigeração. Também é necessário considerar novos métodos para a avaliação experimental destes sistemas, uma vez que os resultados obtidos através dos métodos tradicionais podem ser relativamente confusos e gerar interpretações erradas.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da CAPES e FAPEMIG a este trabalho

7. Referências

- Anderson, K., Mech, B., and Airah, M., 1991, Variable frequency speed control: how it works - Part 1 and 2, "Australian Refrigeration Air Conditioning and Heating".
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1979, ABNT MB-1289/79: Compressores de refrigeração.
- Bahel, V. and Zubair, S. M., 1989, An assessment of inverter-driven variable-speed air conditioners: sample performance comparison with a conventional system, "ASHRAE Trans.", Vol. 95.
- Cho, K. Y., Yang, S. B., Kim, H., and Kim, J. C., 2000, Improving sound quality of reciprocating compressor using random PWM, conf. publ., I., editor, "8th international Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives".
- Del Toro, V., 1994, "Fundamentos de máquinas elétricas", Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro.
- Domijan, A., Hancock, O., and Maytrott, C., 1992, A study and evaluation of power electronic based adjustable speed motor drivers for air conditioners and heat pumps with an example utility case study of the Florida Power and Light Company, "IEEE Trans. on Energy Conversion", Vol. 7, No. 3.
- Fuchs, E., Huang, H., Vandenput, A., Holl, J., Appelbaum, J., Zak, Z., and Erlicki, M., 1997, Optimization of induction motor efficiency - single-phase induction motors, Final report, EPRI.
- Garstang, S. W., 1990, Variable frequency speed control of refrigeration compressors - Part 1 and 2, "Australian Refrigeration, Air Conditioning and Heating".
- Hollouda, M. A. and Kelley, A. W., 1993, Adjustable speed drive for residential applications, "PESC 93". IEEE.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1986, Std 839-1986: Procedures for testing single-phase and polyphase induction motors for use in hermetic compressor.
- Katipamula, S. and O'Neal, D. L., 1991, Performance degradation during on-off cycling of single-speed air conditioners and heat pumps: experimental results, "ASHRAE Trans.", Vol. 97.
- Lettenmayer, T. A., Novotny, W. N., and Lipo, T. A., 1991, Single-phase induction motor with an electronically controlled capacitor, "IEEE Trans. on Industry Applications", Vol. 27, No. 1.
- Lin, S., Xistris, G., and Sigalas, M., 1981, Performance evaluation of a reciprocating compressor through blanked suction test data, "ASHRAE Trans.", Vol. 97.
- Martins, P., 1987, Modelamento matemático de sistemas de refrigeração água-água operando em regime permanente, com análise da velocidade de rotação do compressor, M.Sc, UFMG, Belo Horizonte.
- Miller, W. A., 1988, Laboratory efficiency comparisons of modulating heat pump components using adjustable speed drives, "ASHRAE Trans.", Vol. 94.

- Mohan, N., Undeland, T., and Robbins, W., 1989, "Power electronics: converters, applications and design", John Wiley & Sons, Inc.
- Muljadi, E., Zhao, Y., Liu, T., and Lipo, A., 1993, Adjustable AC capacitor for a single-phase induction motor, "IEEE Trans. on Industry Applications", Vol. 29, No. 3.
- Nascimento Filho, J., 1990, Análise comparativa de modelos de compressores recíprocos, M.Sc, UFMG, Belo Horizonte.
- O'Neal, D. L. and Katipamula, S., 1991, Performance degradation during on-off cycling of single-speed air conditioners and heat pumps: model development and analysis, "ASHRAE Trans.", Vol. 97.
- Parise, J. A. R., 1983, "Theoretical and experimental analysis of a diesel engine driven heat pump", Ph.D, Victoria University of Manchester, United Kingdom.
- Parreira, E. P. and Parise, J. A. R., 1988, Performance analysis of capacity control devices for heat pump reciprocating compressors, "International Compressor Engineering Conference at Purdue", Vol. II.
- Perrin, M., Kohn, G., Mugford, S., and Seggewiss, G., 1997, Induction motors, reciprocating compressors and variable frequency drives, "Conference of Petroleum and Chemical Industry -44th annual meeting IEEE Industry Applications".
- Qureshi, T. Q. and A.Tassou, S., 1996, Variable-speed capacity control in refrigeration systems, "Applied Thermal Engineering", Vol. 16, No. 2, pp. 103–113.
- Reggiani, U., Tassoni, C., and Figalli, G., 1983, Analysis of an inverter-fed single-phase induction motor drive, "IFAC", Switzerland.
- Rice, C. K., 1988, Efficiency characteristics of speed-modulated drives at predicted torque conditions for air-to-air heat pumps, "ASHRAE Trans.", Vol. 94.
- Riegger, O. K., 1988, Variable-speed compressor performance, "ASHRAE Trans.", Vol. 94.
- Ruohoniemi, T. J., 1988, Measured efficiency of variable-speed drives in heat pumps, "ASHRAE Trans.", Vol. 94.
- Stoecker, W. F. and Jones, J. W., 1985, "Refrigeração e Ar Condicionado", McGraw-Hill do Brasil, São Paulo.
- Takebayashi, M., Sekigami, K., Tsubono, I., Kohsokabe, H., Suefuji, K., and Inaba, K., 1994, Performance improvement of a variable-speed controlled scroll compressor for household air conditioners, "ASHRAE Trans.", Vol. 100.
- Tassou, S. A. and Qureshi, T. Q., 1994, Performance of variable-speed inverter/motor drive for refrigeration applications, "IEE Computing & Control Engineering Journal".
- Tassou, S. A. and Qureshi, T. Q., 1998, Comparative performance evaluation of positive displacement compressors in variable-speed refrigeration applications, "International Journal of Refrigeration", Vol. 21, No. 1, pp. 29–41.
- Wells, J., Johnson, B., Johnson, J., Motes, T., Foster, J., and Council, M. E., 1994, Heat pump harmonic evaluation, "Electric Power Systems Research", Vol. 30, pp. 175–181.
- Winandy, E., Saavedra, C., and Lebrun, J., 2002, Experimental analysis and simplified modelling of a hermetic scroll refrigeration compressor, "Applied Thermal Engineering", , No. 22, pp. 107–120.
- Young, C.-M. and Liu, C.-H., 1993, Vibration analysis of rolling piston-type compressors driven by single-phase induction motors, "Proceeding of the Industrial Electronics, Control and Instrumentation - IECON'93", Vol. 2, pp. 918–923.

PERFORMANCE OF VARIABLE SPEED RECIPROCATING COMPRESSORS: A BIBLIOGRAPHICAL REVIEW

Ronilson Rocha

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais
Morro do Cruzeiro - Ouro Preto -MG
rocha@em.ufop.br

Márcio Fonte Boa Cortez

Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antonio Carlos, 6627 - Belo Horizonte -MG
fonteboa@demec.ufmg.br

Roberto Márcio de Andrade

Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antonio Carlos, 6627 - Belo Horizonte -MG
roberto@demec.ufmg.br

Abstract. *The compressor is the “heart” of all refrigeration systems, mainly if this system operates at variable speed. Due to the development of electronic technology and control techniques, the use of variable speed compressors became more effective. However, some operational aspects related to variable speed systems have to be carefully analysed aiming to obtain a good performance and to avoid fails. This work presents a bibliographical review about any aspects related to operation of speed-variable compressors.*

Keywords. *Reciprocating Compressor, Variable-Speed, Refrigeration System*