

DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO APLICANDO O CONTROLE ADAPTATIVO FUZZY

Francisco Ernesto M. Garcia.

Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos
Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus
Santa Mônica - Bloco 1M - Uberlândia/MG
femgarcia@mecanica.ufu.br

Enio P. Bandarra Filho

Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos
Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus
Santa Mônica - Bloco 1M - Uberlândia/MG
bandarra@mecanica.ufu.br

Resumo. *O presente trabalho se concentrou na avaliação do desempenho energético de um aparelho de ar condicionado comercial tipo Self-Contained com capacidade de refrigeração de 5TR (17,5 kW). Entretanto, devido à dificuldade em controlar as condições ambientes, optou-se pela substituição dos trocadores de calor a ar por trocadores em que o fluido secundário era a água, nessas condições, o sistema adaptado tornou-se um resfriador de Líquido “Chiller”. Para estes sistemas de refrigeração, o controle convencional on-off com velocidade fixa é a principal causa da perda de eficiência energética. Neste trabalho, procurou-se desenvolver uma alternativa para substituição destes sistemas de controle convencional, na qual a mais promissoras, encontram-se os sistemas de refrigeração com o controlador adaptativo atuando na velocidade do compressor, utilizando um variador de frequência trifásico. As vantagens do uso dos sistemas com velocidade variável sob o ponto de vista de redução de consumo de energia, representam um melhoramento energético e econômico, que beneficia os usuários nas distintas áreas de aplicações.*

Palavras-chave: Sistema de refrigeração, desempenho, controle.

1. INTRODUÇÃO

Uma grande parte das instalações frigoríficas com oito ou mais horas de uso diário contínuo, ou que apesar de recentes, mostram-se ineficientes por falhas no projeto, execução, ou ainda, por falta de manutenção adequada, sendo passíveis de apresentarem defeitos com o tempo. Tanto em um caso como em outro, a busca do usuário é melhorar qualquer sistema de refrigeração ligada à eficiência no consumo energético.

A economia de energia é parte propiciada pela otimização do desempenho dos equipamentos como resultado de uma racionalização e de técnicas de controle aplicadas a estes sistemas. Aspectos importantes, como por exemplo, custos da energia elétrica, trouxeram aos ambientes residenciais, comerciais e, principalmente, o industrial, estratégias e tecnologias com o objetivo de corresponder às exigências requeridas em função da relação entre o rendimento em cada instalação com as diferentes condições de operação, para obtenção de um controle com uma maior qualidade e confiabilidade nos processos termodinâmicos e mecânicos, além, é claro, de um menor consumo de energia. Os incrementos de custos da eletricidade e o contínuo ênfase na conservação da energia, estão direcionando os trabalhos de pesquisa para o desenvolvimento de novas tecnologias que sejam economicamente viáveis em novos sistemas de HVAC, Borja (2006).

É interessante observar que a contínua evolução das estratégias de controle tem proporcionado grandes avanços que podem ser aplicados a sistemas de refrigeração. Por tanto, é muito importante

destacar que a utilidade dos controladores *fuzzy*, que dispensam a modelagem matemática clássica dos sistemas físicos, dependem do conhecimento prévio que um especialista possui sobre o processo que se deseja controlar. Aprea et al. (2005), avaliaram experimentalmente o desempenho de um sistema de compressão de vapor capaz de operar como um sistema de refrigeração do tipo resfriamento de líquido, “*chiller*”, e uma bomba de calor. É comparado um algoritmo de controle básico baseado na lógica *fuzzy* com o rendimento do controle termostático clássico de ciclos tipo liga/desliga, *On-Off*, no compressor operando na frequência nominal de 50 hertz. Os resultados levantados para o compressor rotativo tipo *scroll* apresentaram um ótimo rendimento devido à facilidade de operar com frequências mínimas da ordem de 15 Hz em comparação com o compressor recíprocante semi-hermético, que possui o limite inferior de frequência da ordem de 30 Hz. Nesta faixa de frequências reduzidas, abaixo de 30 Hz, o compressor recíprocante apresenta consideráveis vibrações e incremento de ruídos, além de não lubrificar adequadamente os cilindros. Especificamente, no que se refere ao sistema de resfriamento de líquido, operando com diferentes temperaturas de *setpoint* da água (7, 11 e 15°C) resfriada do evaporador e para diferentes vazões da bomba de água, uma significativa economia de energia da ordem de 20% foi alcançada com o uso do compressor rotativo tipo *scroll*. Resultados similares foram obtidos quando o sistema operou como uma bomba de calor. O melhor desempenho energético foi obtido quando a velocidade do compressor *scroll* variou. Isso se deve, basicamente, à eficiência global do sistema e também pela menor relação de compressão à medida que a velocidade do compressor diminui.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi baseado no aprimoramento do desempenho dos sistemas de refrigeração de compressão a vapor, reduzindo o consumo de energia do principal componente, compressor. Esta redução no consumo de energia pode ser obtida através de mudanças em sua velocidade, através de procedimentos de controle e gerenciamento próximos de seu limite de eficiência termodinâmica.

2. BANCADA EXPERIMENTAL

Inicialmente foi doado ao laboratório de energia e sistemas térmicos (LEST) um aparelho comercial de ar condicionado tipo *self-contained* com capacidade de 5TR com mais de 20 anos de uso da marca Hitachi, com parte de seus equipamentos danificados. A partir daí, foi sugerido a construção de uma bancada experimental para avaliar o desempenho do referido equipamento, porém alterando sua configuração, já que o condensador e evaporador realizavam a troca de calor com o ar. Nessas condições, foi conseguido junto a uma empresa de trocadores de calor, ACP Termotécnica, um evaporador e condensador de tubos concêntricos com troca de calor com água. Através destas alterações, foi possível controlar e medir as variáveis utilizando água, já que no caso de se operar com o ar seria necessário o controle de parâmetros como a umidade, entre outros.

Para o resfriamento da água de condensação, foi utilizado um circuito secundário composto por uma torre de resfriamento, instalada no lado externo ao laboratório. A água de alimentação do evaporador, que era responsável pela variação da carga térmica, foi circulada por intermédio de uma bomba e era proveniente do tanque armazenamento térmico, que continha uma resistência elétrica, com potência de 15 kW. Na figura 1 ilustra a bancada experimental que foi construída no início dos ensaios.



Figura 1. Bancada experimental com isolamento no início dos ensaios.

Como pode ser observado na figura anterior, o compressor utilizado era um modelo hermético da Hitachi e pelo tempo de utilização (mais de 20 anos) apresentou diversos problemas, operando de forma irregular, o que acarretou na sua substituição.

Nessas condições, foi solicitado a uma empresa nacional de compressores, Bitzer compressores, a doação de um modelo de mesmas características, que pudesse substituir o modelo antigo da bancada. Conforme pode ser observado na figura 2 o equipamento experimental apresenta inclusive isolamento térmico no condensador e incorpora o novo compressor para os ensaios, sendo o modelo Octagon semi-hermético. O sistema foi totalmente instrumentado com sensores de temperaturas tipo PT-100 e sensores de pressão manométrica piezos-resistivos.



Figura 2. Foto do sistema de refrigeração de compressão a vapor.

3. CONTROLADOR FUZZY ADAPTATIVO

São controladores que se reajustam automaticamente para adaptar-se as novas características do processo que se deseja controlar, Cardenas (2002). A necessidade de identificar estas mudanças e de se adaptar as novas condições acrescenta aos controladores *fuzzy* adaptativos dois componentes extras, que não estão presentes nos controladores *fuzzy* convencionais, como pode ser observado na

figura 3. O primeiro componente é o “Monitor do Processo” cujo trabalho é detectar as mudanças nas características do processo, pode ser uma medida do rendimento que rejeita a bondade da atuação do controlador ou um parâmetro baseado no estado do processo. O segundo componente adicional é o “mecanismo de adaptação”, a partir da informação proporcionada pelo monitor do processo, este atualiza os parâmetros do controlador tais como: fator de escala de cada variável, conjunto difuso de cada nome lingüístico ou as regras da base de conhecimento.

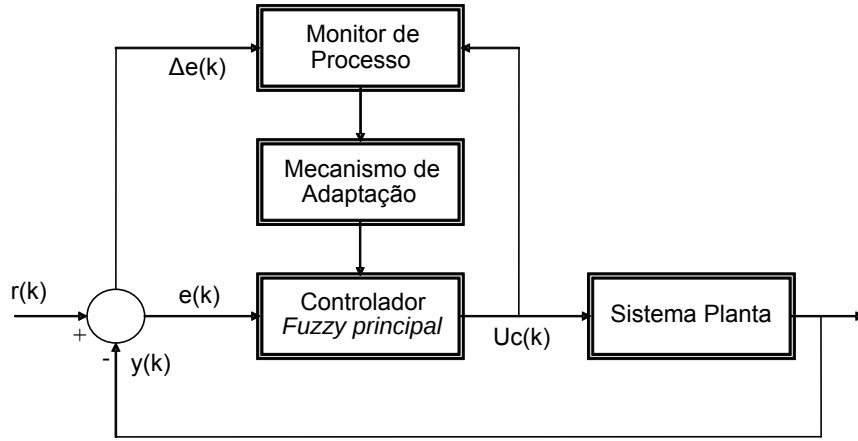


Figura 3. Controlador *Fuzzy* Adaptativo.

A definição das variáveis de entrada do controlador *fuzzy* principal é avaliada a partir do sinal do erro e da variação do erro, assim definidas:

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (1)$$

$$\Delta e(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \quad (2)$$

onde k e Δt referem-se ao instante e ao intervalo de tempo utilizados e $y(k)$ é a leitura do sensor de temperatura.

O monitor de processo capta as mudanças a partir da média absoluta da derivada do erro $|\Delta \bar{e}|$ e a média absoluta da saída do controle $|\bar{u}_c|$ observando os três últimos tempos de amostragem. Estes valores são calculados da seguinte forma:

$$|\Delta \bar{e}| = \frac{|\Delta e(k)| + |\Delta e(k-2)| + |\Delta e(k-3)|}{3} \quad (3)$$

$$|\bar{u}_c| = \frac{|u_c(k)| + |u_c(k-2)| + |u_c(k-3)|}{3} \quad (4)$$

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após a montagem, instalação e instrumentação do sistema de refrigeração, passou-se à fase de operação do sistema. Esta fase caracterizou-se por diversos ajustes nas condições de operação, que consistiram na solução de problemas de implementação e montagem, de acordo com os recursos disponíveis.

Devido à complexidade do sistema de refrigeração, diversos ensaios de conhecimento do comportamento das variáveis e suas interações tiveram que ser realizados. Tais ensaios fazem parte

da metodologia de familiarização com o sistema, que foi de fundamental importância no desenvolvimento dos controladores.

4.1 Conhecimento de condições da nova bancada experimental.

A frequência de rotação do compressor foi pré-estabelecida como a variável a ser manipulada no sistema de refrigeração. Inicialmente foram realizados ensaios com o sistema em malha aberta, mantendo a temperatura da água na entrada do evaporador (T8) a 20°C com uma vazão de água constante em 0,21 kg/s, alterando a frequência de rotação do compressor na faixa entre 32 Hz (900 rpm) e 70 Hz (2100 rpm). Na figura 4 observam-se as mudanças no COP e vazão do refrigerante com uma massa de refrigerante R-22 de 2,765 kg figura 4a, e com uma massa de refrigerante R-22 de 3,265 kg figura 4b. É importante destacar como se observa na figura 4a, que para 60 Hz (frequência nominal) o sistema não apresenta o máximo COP, apesar de ter sua máxima vazão de refrigerante de 0,024 kg/s, também, tanto acima dos 65 Hz quanto abaixo dos 40 Hz, encontra-se o mínimo COP, no valor de 1,039, que é afetado pelos valores reduzidos da vazão do fluido refrigerante, da ordem de 0,016 kg/s. Já os máximos valores alcançados para o COP, entre 1,765 e 1,882, nesse ensaio, se encontram na faixa de frequências de 41,1 e 50,38 Hz, o que se deve, à boa capacidade de refrigeração ($\dot{Q}_{ev}$), da ordem de 4 kW e o consumo de potência reduzido, observado na figura 5a.

Por outro lado, como forma de comparação e na procura de um ponto ótimo de funcionamento, vale ressaltar na figura 4b, que com o acréscimo de 0,5kg para uma massa refrigerante R-22 de 3,265 kg no sistema, obteve-se um aumento considerável na vazão do refrigerante para valores variando entre 0,30 e 0,39 kg/s. Do ponto de vista do desempenho do sistema, COP, foram observados na figura 4b valores superiores aos apresentados na figura 4a, apresentando um valor mínimo de 2,41 e máximo de 3,17. Ainda, que novamente o COP máximo de operação tenha sido obtido para frequências de rotação do compressor da ordem de 50 Hz (1500 rpm) e não a sua frequência nominal de 60 Hz (1750 rpm).

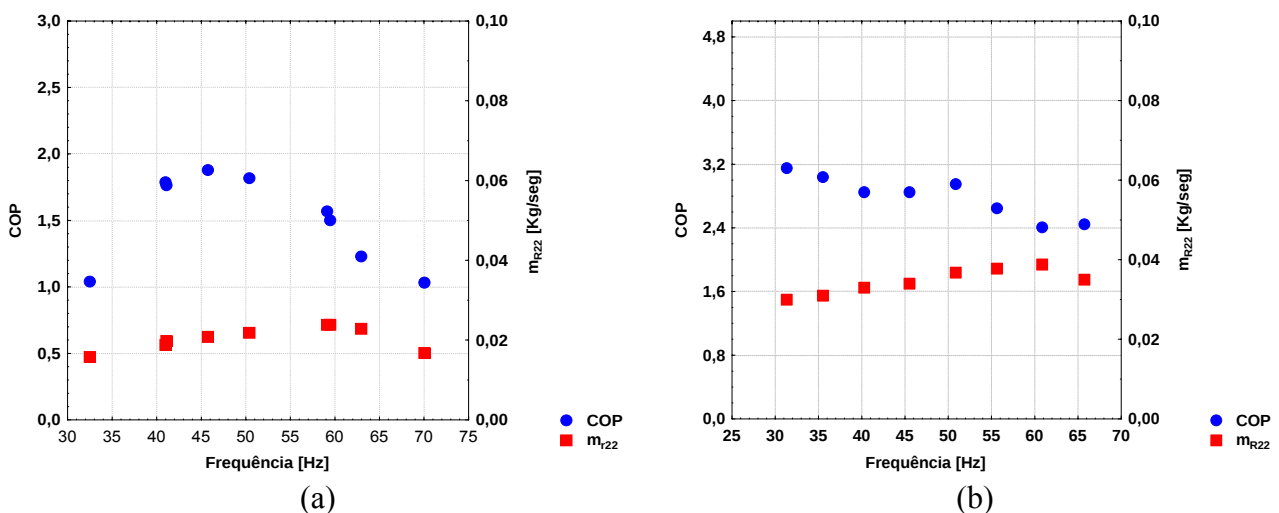


Figura 4: Variações do COP e vazão mássica (m_{R22}) em função da frequência de operação do compressor. (a) com uma massa inicial de refrigerante R-22 de 2,765 kg. (b) com uma massa de refrigerante R-22 de 3,265 kg.

Como seria de esperar, com o aumento da massa do sistema, houve um leve incremento no consumo de potência em toda a faixa de operação de frequências de trabalho do compressor, como observado na figura 5b em comparação à figura 5a.

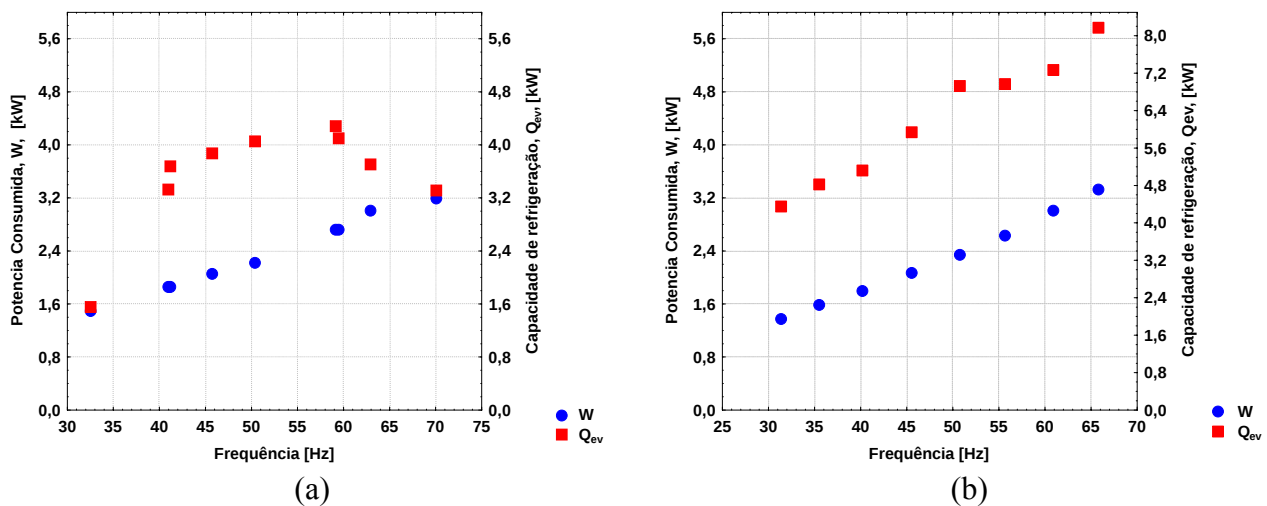


Figura 5: Variações Capacidade de evaporação ($\dot{Q}_{ev}$) e potência consumida (W) em função da frequência de operação do compressor. (a) com uma massa inicial de refrigerante R-22 de 2,765 kg. (b) com uma massa de refrigerante R-22 de 3,265 kg.

4.2 Melhoramento do sistema com malha fechada.

A fim de verificar a eficiência do controlador foi implementado também o controlador: *On-Off* (base do controle de aparelhos de sistemas de refrigeração e ar condicionado de janela, com frequência de 60 Hz (1750 rpm)). Os experimentos realizados foram desenvolvidos da seguinte forma:

Os controladores atuavam no sinal de controle de forma que a temperatura da água na saída do evaporador (T_5) se mantivesse em torno do sinal de referência, neste caso 13,5°C. Foi mantida a mesma temperatura inicial na água de entrada do evaporador (T_8) em 20°C, assimilando a ambientes externos aos controlados através da resistência elétrica no reservatório do evaporador.

Durante os experimentos, além das temperaturas e pressões do sistema foram registrados os consumos de potência em kW do compressor utilizado.

Na seguinte figura, observa-se o comportamento das pressões do sistema quando trabalha o controlador *On-Off*. Cada vez que o sistema é ligado imediatamente se produz as máximas pressões de alta que permanecem durante o ciclo *On*. No instante quando se liga o compressor se registra um pico de corrente de aproximadamente 15,2 A, e após registra-se o consumo médio de corrente no ciclo *On* de 10,6 A com uma duração de 160 segundos. Por outro lado, o comportamento de nossa bancada para o período de *Off*, quando a (T_5) atinge o *setpoint* pré-estabelecido, tarda aproximadamente 90 segundos sem manter ligadas as resistências elétricas dentro do reservatório do evaporador.

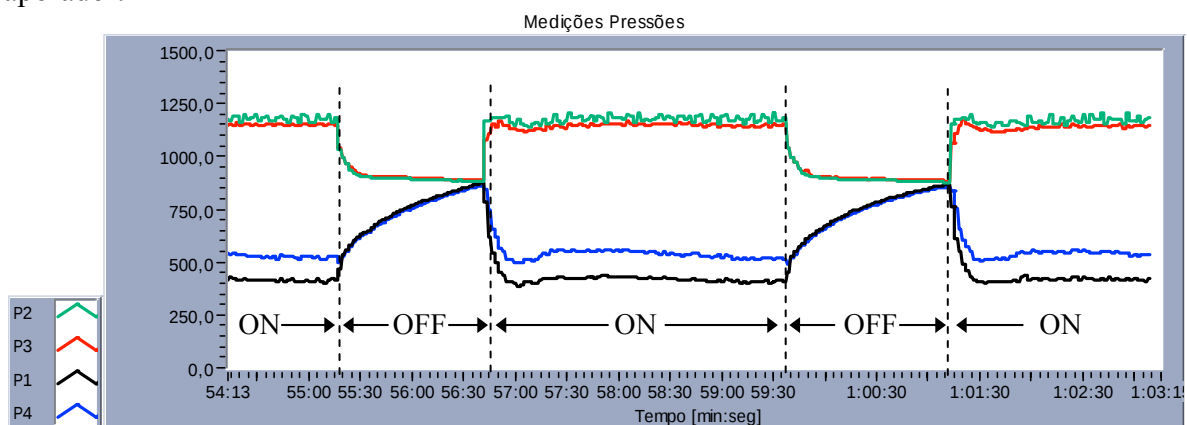
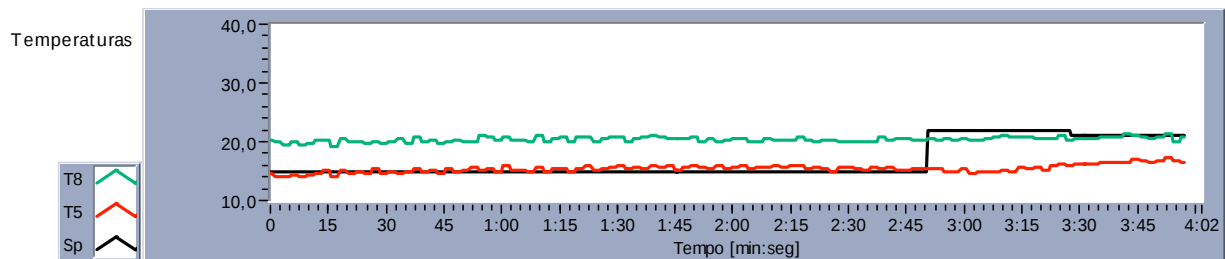


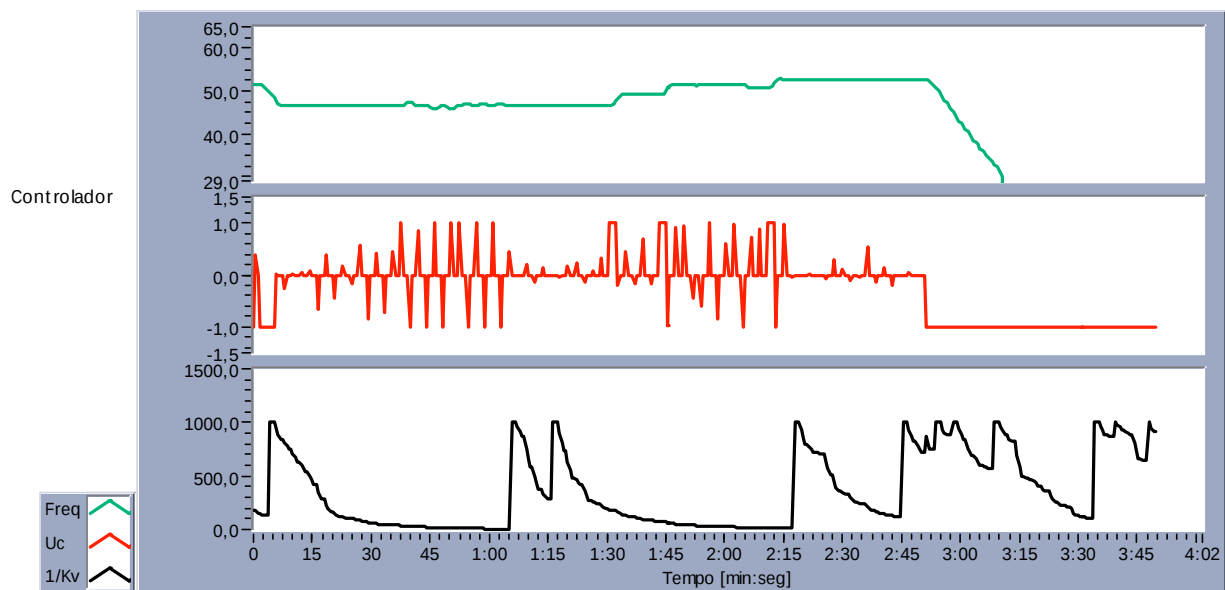
Figura 6: Comportamento das pressões do sistema com controle *On-Off*.

Estes resultados estimularam testes experimentais realizados com condições de operação do sistema. O efeito do controlador lógico difuso adaptativo operando o sistema com condições pré-estabelecidas como, por exemplo, a temperatura da água de entrada do evaporador (T8) em 20°C, assimilando a ambientes externos aos controlados através da resistência elétrica no reservatório do evaporador é mostrado na figura 7a.

Para os primeiros 2 minutos e 50 segundos, o sistema converge mantendo a temperatura da água na saída do evaporador (T5) referenciada ao *setpoint* (Sp), o controlador detecta condições de equilíbrio do processo através do qual diminui o valor do fator de escala (Kv), ou seja, fica robusto sua sensibilidade, gerando assim baixos sinais de saída (Uc) que graduam levemente a frequência adequada do compressor, como pode ser observado na figura 7b. Esse efeito com o controlador robusto mantendo a temperatura da água na saída do evaporador (T5) a uma temperatura *setpoint* previamente estabelecida, registra-se suaves tempos transitórios na evolução das pressões do sistema, ver figura 8.



(a)



(b)

Figura 7: Efeitos do controlador lógico difuso adaptativo no sistema. (a) evolução das Temperaturas de controle e de referência no evaporador. (b) Sensibilidade ($1/Kv$), sinal de saída (Uc) do controlador.

Após dos 2 minutos e 50 segundos, quando no sistema há uma alteração significativa, por exemplo, alteração no *setpoint* (Sp) mostrada na mesma figura 7a, o controlador observando a condição inicial de elevados erros e de pequeno controle, atua de forma a aumentar sua sensibilidade através de seu fator de mecanismo interno de adaptação. Nas figuras 7b e 8 pode ser observado o momento que o controlador com sua máxima sensibilidade adaptada atua no sistema diminuindo imediatamente a frequência do compressor, ou seja, um decremento imediato nas

pressões de alta, com objetivo de levar a temperatura da água na saída do evaporador (T5) a uma nova temperatura de *setpoint* estabelecida no controlador, por tanto apresentam mudanças nos tempos transitórios.

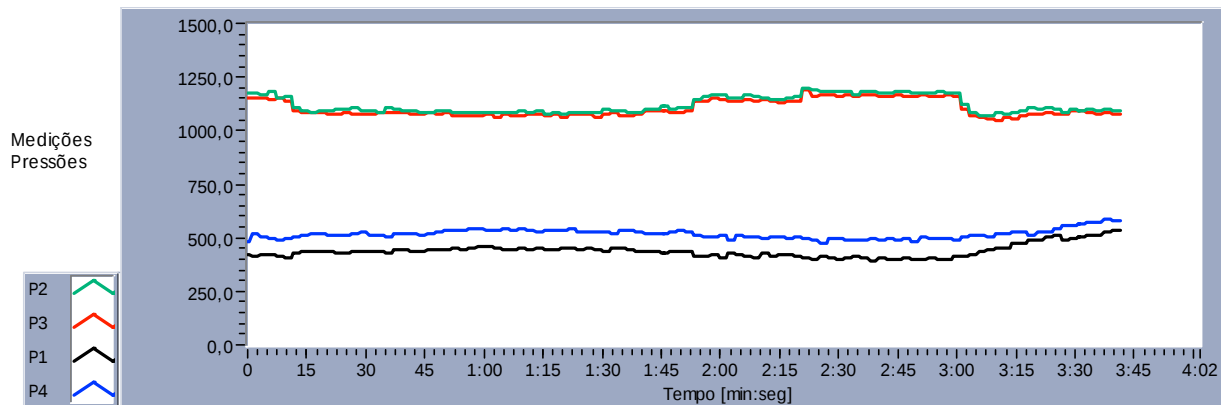


Figura 8: Evolução das pressões do sistema com o controlador lógico difuso adaptativo

Nesse momento, é interessante realizar uma comparação das demandas de potências médias, para que se possa ter uma idéia do ganho com a aplicação do controlador em relação ao comumente encontrado no mercado (*On-Off*). Como seria de esperar, a redução na demanda de potência consumida ao aplicar um controlador lógico difuso adaptativo permitiu um melhoramento no COP do sistema em comparação ao controlador *On-Off*. Do ponto de vista econômico, considerando parâmetros elétricos de trabalho para um motor trifásico do compressor, como o número de pólos, baixa tensão de alimentação (< 1 kV), energia de perdas consumida pelo motor, rendimento nominal mínimo, período de trabalho contínuo do motor de 8 horas diárias durante 22 dias do mês, além de outros, (WEG Equipamentos Elétricos S/A, 2004). A determinação da eficiência de energia consumida no compressor com os controladores aplicados é realizada pela Equação 5, a seguir.

$$W_u = \int_0^T P(t) dt \quad (5)$$

Como essa energia tem um custo $C_{\$}$, que depende muito das condições em que é fornecida, é possível determinar o encargo com a energia utilizada durante os processos, neste caso considerando o tipo de fornecimento de baixa tensão com tarifa R\$ 0,603118 por kWh, fornecida pela CEMIG (Julho-2006), tem-se,

$$E_w = W_u \cdot C_{\$} \quad (6)$$

Nessas condições, observa-se na tabela 1 a demanda de potência, o consumo de energia e o custo mensal nos distintos tipos de controle.

Tabela 1: Comparação entre os controladores aplicados.

Tipo de Controle	Demanda Potência	Energia Ativa consumida mensalmente	Custo (R\$) mensal
<i>On – Off</i> compressor Hitachi (modelo ano 1988)	3,71 kW	652,9 kWh	R\$ 393,81
<i>On – Off</i> compressor Bitzer	2,92 kW	513,9 kWh	R\$ 309,94
<i>Fuzzy Adaptativo</i>	2,40 kW	422,4 kWh	R\$ 254,76

Como pode ser observado, a economia anual em gasto com energia elétrica utilizando o controlador fuzzy adaptativo em relação ao *On-Off* trabalhando com o novo compressor bitzer é de aproximadamente R\$ 700,00 em relação ao compressor original do sistema ar condicionado self-contained (Hitachi ano 1988) a economia anual é de R\$ 1.670,00. Vale ressaltar, ainda, que os novos compressores apresentam tecnologias mais recentes, o que proporciona melhor rendimento e menor consumo de energia, como seria de esperar. Resumindo, em menos de dois anos é possível somente com a economia de energia elétrica pagar o investimento em um variador de frequência. Além disso, não foi computado o gasto com manutenção geral do equipamento.

É importante lembrar que é uma análise econômica ao nível de energia ativa consumida, porém existem outras considerações a nível industrial, por exemplo, a determinação do encargo com energia reativa que dependem dos conhecimentos sobre instalação elétrica em que se incluiria o motor trifásico do compressor. Seria necessário analisar, atendendo a instalação de utilização de energia elétrica, qual é o melhoramento da energia reativa, harmônicas, entre outros; correspondente ao motor do compressor trabalhando com o variador de frequência.

5. CONCLUSÕES

O estudo do comportamento dinâmico simultâneo das variáveis possibilitou o conhecimento dos efeitos e de interações das mesmas, podendo concluir que a viabilidade de construir malhas de controle simples que se possam aplicar a setores individuais da bancada.

O aumento na carga de refrigerante do sistema tende a otimizar e manter o COP constante independentemente da velocidade do compressor.

Mudanças na velocidade do compressor permitem que o sistema opere mais confortavelmente e adequadamente para altas e baixas cargas frigoríficas.

A economia de energia e o melhoramento no rendimento deste tipo de sistema foram obtidos por um controle adaptativo com um conjunto de regras *fuzzy* que permitem tratar de forma adequada a grande variação da carga térmica do ambiente climatizado ao longo de um dia. As condições climáticas externas são igualmente determinantes na demanda de energia necessária à climatização.

O inversor de frequência foi à ferramenta importante na economia de energia para este tipo de aplicação, o qual, além propicia a variação da vazão do fluido, entre outros aspectos. Contrariamente, o jeito de se ligar o sistema neste projeto, de forma direta com o compressor no modo mais simples, controlador *On-Off*, fica sujeito a curtos circuitos, devido ao comportamento do motor no compressor como um transformador com pouca resistividade, induzindo a correntes de partida sensivelmente elevadas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seu agradecimento às empresas ACP Termotécnica, pela doação dos trocadores de calor, EMERSON, pela válvula de expansão e BITZER Compressores pelo compressor do sistema. À CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

7. REFERENCIAS

- Aprea C, Mastrullo R, Renno C. Experimental analysis of the scroll compressor performances varying its speed. University of Naples Federico II, P.le Tecchio 80, 80125 Naples, Italy, 2005.
- Borja, T. J. A. Automatização e controle inteligente on-line de sistemas de refrigeração utilizando redes neurais artificiais. 2006. 124 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

- Cardenas, N.I., 2002, O Uso de Controladores Fuzzy Adaptativos, implementados em microcontroladores, no controle de vibrações de sistemas mecânicos. 2002. 250 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia.
- WEG Equipamentos Elétricos S/A. Catálogo geral de motores elétricos: Características, especificação, instalação e manutenção. Jaraguá do Sul, SC, 2004, 130p.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ENERGETIC PERFORMANCE OF REFRIGERATION SYSTEM APPLYING ADAPTATIVE FUZZY CONTROL

Francisco M. Garcia.

Thermal System and Energy Laboratory

School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M - Uberlândia/MG

femgarcia@mecanica.ufu.br

Enio P. Bandarra Filho

Thermal System and Energy Laboratory

School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M - Uberlândia/MG

bandarra@mecanica.ufu.br

Abstract: *The present work is concentrated in the evaluation of the energy performance of “Self-Contained” air conditioning system with refrigeration capacity of 5TR (17,5 kW). However, due to difficulty in controlling the surrounding conditions, air heat exchangers was substituted by heat exchangers where the secondary fluid was the water and in these conditions the system is called “Chiller”. For these refrigeration systems, the conventional control applied is on-off (fixed speed) and is a main cause of the lost efficiency energy. Among these more promising alternatives, the refrigeration systems with the adaptative controller varying the speed of the compressor, using a three-phase frequency variable, are the best proposals. The advantages of use of these systems the variable speed under the point of view of reduction of energy consumption, represent shown an energy and economic improvement in the results, that benefit the users in general.*

Keywords: *System of refrigeration, performance, control.*