

AValiação DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR A VELOCIDADE VARIÁVEL

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

Oscar S. Hernandez Mendoza

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
oscarhm@mecanica.ufu.br

Resumo. *O presente trabalho se concentrou na avaliação inicial do desempenho de um sistema a compressão de vapor (SRCV), com capacidade de refrigeração de 5TR (17,5 kW) trabalhando com uma válvula de expansão termostática. O sistema de refrigeração (chiller) está composto de compressor semi-hermético a pistão, dois trocadores de calor de tubos concêntricos, a água operando como fluido secundário e válvula de expansão termostática. Este sistema de refrigeração, convencionalmente trabalha com rotação do compressor fixa. Neste trabalho, procurou-se desenvolver uma alternativa para avaliar o SRCV a diferentes velocidades de rotação do compressor, utilizando um variador de frequência. A vantagem do uso dos sistemas SRCV com rotação do compressor variável, representa a potencialidade de melhorar o desempenho energético. Também é mostrado neste trabalho o projeto eletrônico desenvolvido para o controle de uma válvula expansão eletrônica, com objetivo de avaliar futuramente este sistema atuando na válvula de expansão e na rotação do compressor.*

Palavras-chave: Sistema de refrigeração, compressor velocidade variável.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração tornam-se básicos no conforto humano e conservação de produtos no mundo moderno, que acordam interesses e iniciativas de estudos na eficiência e desempenho para este tipo de sistemas de refrigeração.

Entre os componentes do sistema de refrigeração, o compressor responde por aproximadamente 80% da energia consumida e um aumento da eficiência deste equipamento aumenta o desempenho de todo o sistema.

Um dos parâmetros que medem a eficiência do sistema de refrigeração é o Coeficiente de Eficácia (COP) que relaciona a capacidade frigorífica com a potência do compressor. A eficiência do compressor em sistemas operando em ciclos de compressão a vapor é função da temperatura de evaporação e condensação do sistema.

O uso correto do compressor é estabelecido em faixas de temperatura de evaporação e

condensação adequadas, pois fora desta faixa a eficiência deste equipamento torna-se muito baixa desperdiçando energia elétrica através do efeito Joule, ou seja, a energia elétrica é perdida para o ambiente como energia térmica. (Evelyn,1998; Willian,1997)

A importância ao atuar no compressor como elemento importante destes sistemas, tem sido utilizado para adaptar o compressor a mudanças na vazão mássica causadas pela válvula de expansão em resposta à operação em diversas cargas de refrigeração, diminuindo o consumo de energia quando comparado com o mesmo compressor com velocidade fixa. Comparações teóricas de vários métodos para atender a capacidade frigorífica, sob condições reais, tem mostrado que o ajuste da velocidade do compressor é o mais eficiente. Lenarduzzi e Yap (1998) estimam que a economia de energia pode chegar a 41%, mudando a velocidade, quando comparado com resultados obtidos num mesmo chiller, operando com velocidade fixa.

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, 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 baixas em comparação com o compressor recíprocante semi-hermético. O melhor desempenho foi obtido mudando a velocidade do compressor influenciando na 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 em uma avaliação inicial de um projeto, que esta em curso no laboratório de energia e sistemas térmicos, LEST, procurando o aprimoramento do desempenho dos sistemas de refrigeração de compressão a vapor. Este desempenho procura-se atuando em uma faixa de operação possível de velocidade para o compressor semi-hermético trifásico, através gerenciamento próximos de seu limite de eficiência termodinâmica.

2. CONCEITOS BÁSICOS

O ciclo de refrigeração por compressão pode ser estudado de acordo com as características termodinâmicas de seus equipamentos. Por intermédio dele, pode-se acompanhar o desempenho de um equipamento de refrigeração e o mesmo é ilustrado na Figura 1.

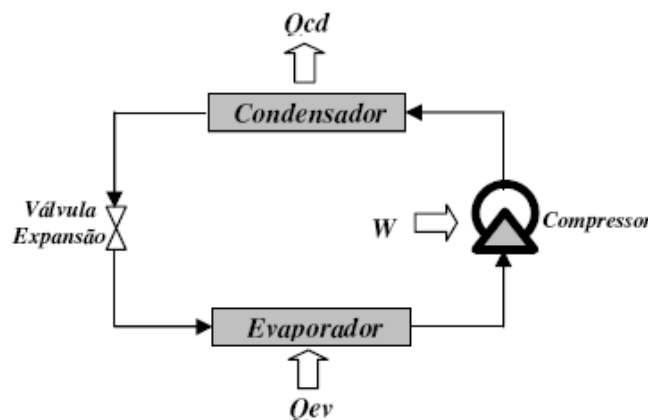


Figura 1. Ciclo padrão de refrigeração por compressão.

Iniciando com o fluido refrigerante que é comprimido no compressor no estado de vapor superaquecido, onde sua pressão e sua temperatura são aumentadas seguindo, posteriormente, diretamente para o condensador. Neste, por sua vez, o calor ganho no processo de compressão é rejeitado para o meio exterior, ocasionando assim o resfriamento do fluido e a mudança da fase vapor para líquida. Deixando o condensador, no estado de líquido sub-resfriado, o fluido segue para o dispositivo de expansão (no caso, a válvula de expansão termostática) que provoca uma queda de pressão, responsável também pela queda da temperatura, passando logo a seguir pelo evaporador

que absorve calor do meio a ser resfriado causando o efeito frigorífico. O fluido de trabalho, então, muda de fase (líquido-vapor) saindo deste como vapor superaquecido, para retornar ao compressor, iniciando novamente o ciclo.

2. BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental foi re-projetada neste trabalho é composta por dois circuitos: um principal de refrigerante e um secundário de água, sendo este responsável pelo resfriamento do refrigerante do circuito principal. Na figura 2 ilustra a bancada experimental que foi construída no início dos ensaios. A circulação do fluido refrigerante é gerada por um compressor semi-hermético, modelo Octagon da empresa nacional de compressores, Bitzer compressores. Antes do compressor, tem-se um trocador de calor de tubos concêntricos, denominado de evaporador com capacidade de 5 TR, o refrigerante escoia no interior do tubo central e a água escoia no espaço anular do tubo externo. Para segurança de nosso compressor, foi instalado o separador de líquido após do evaporador, para evitar possíveis riscos de entrada de refrigerante em fase líquida ao compressor, que provocarem quebra imediata do compressor. Um condensador de 5 TR, de tubos concêntricos, foi instalado após o compressor, com o objetivo de rejeitar o calor gerado no processo de compressão. Os dois trocadores de calor foram isolados termicamente, impedindo a perda de calor para o ambiente. 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 contém uma resistência elétrica, com potência de 15 kW, que opera de forma controlar mantendo a temperatura da água na entrada do evaporador constante.

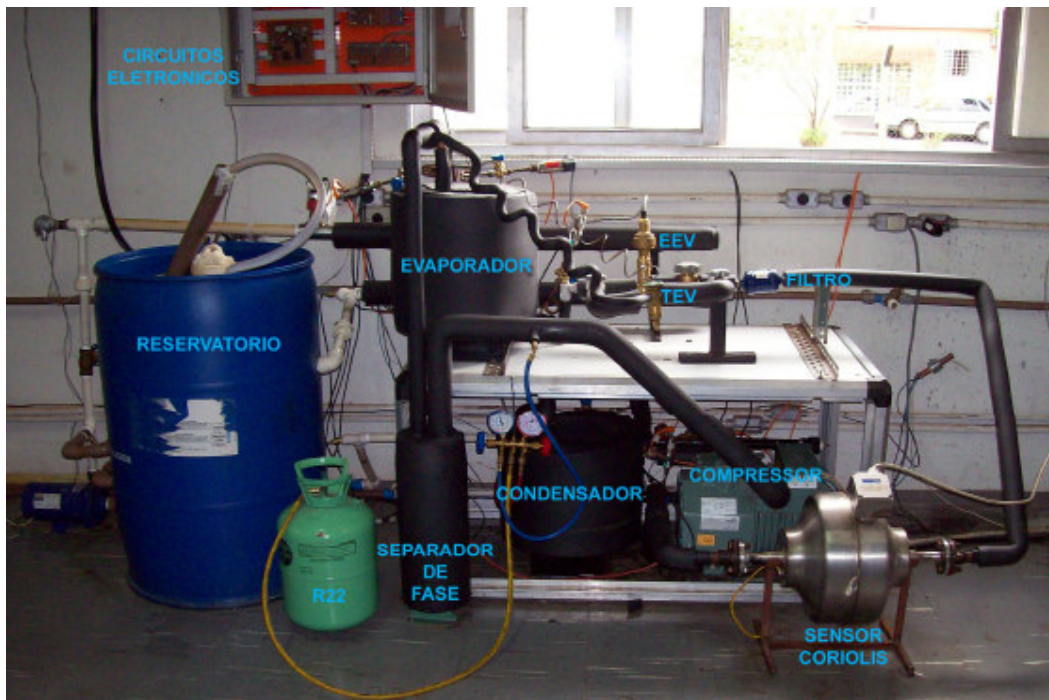


Figura 2. Foto do sistema de refrigeração de compressão a vapor.

O sistema conta, ainda, com uma válvula de expansão termostática de 5 TR, da empresa Emerson Controls, paralelamente foi instalado em bypass, como se mostra na figura 3, uma válvula de expansão eletrônica marca danfoss modelo ETS25, com motor de passo bipolar operado

eletronicamente, para futuras avaliações do sistema baixo controle da vazão do refrigerante no circuito principal. Os sensores de temperatura aplicados na bancada experimental foram os dispositivos RTD de 3 fios modelo PT100 com operação entre -30°C e 100°C . Foram utilizados transdutores de pressão tipo piezo-resistivo com operacionalidade de 0 até 35 MPa. Os módulos de condicionadores dos sinais foram projetados no Laboratório de energia e sistemas térmicos, LEST, para fornecer um formato adequado nos sinais que são adquiridos pelo controlador lógico programável (CLP). Para adquirir dados experimentais de vazão mássica, foi instalado um medidor de vazão, tipo “coriolis” na região de vapor, devidamente calibrado.



Figura 3. Foto da seção bypass entre a válvula de expansão eletrônica Danfoss ETS25 e válvula termostática no circuito principal de refrigeração.

O projeto eletrônico, para comandar a válvula de expansão eletrônica, como parte para futuras avaliações neste tipo de sistemas, foi projetado mantendo a seguinte estrutura entre os recursos eletrônicos aplicados, como se mostra a figura 4.

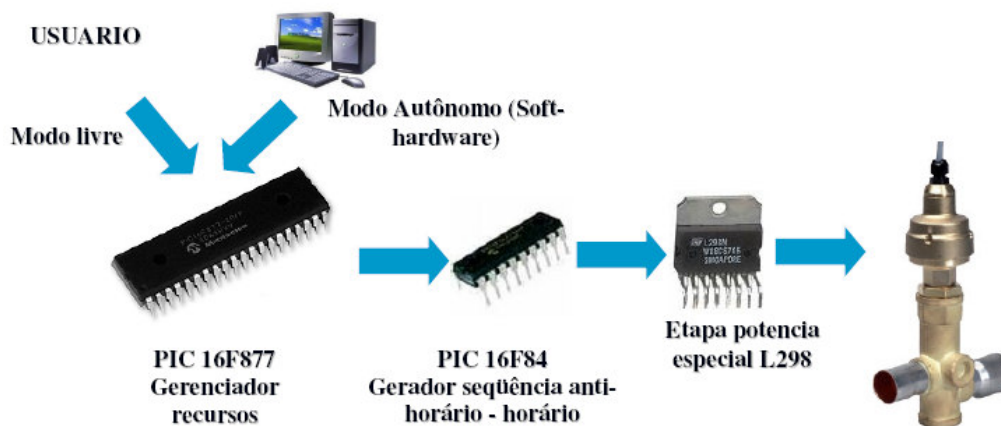


Figura 4. Etapas dos recursos eletrônicos para comandar a válvula de expansão ETS25.

Finalmente, na seguinte figura se mostra o cartão do circuito final, que foi projetado no laboratório de energia e sistemas térmicos, para comandar a válvula de expansão eletrônica.



Figura 5. Circuito de comando da válvula eletrônica da Danfoss ETS25.

3. RESULTADOS

3.1. Identificação física dos parâmetros

Este tipo de sistema de refrigeração é um ciclo fechado, cujas condições termodinâmicas do refrigerante em cada posição do circuito são dependentes entre si e das condições externas. As variáveis se adequarão a uma condição induzida, por exemplo, o efeito produzido pela mudança na frequência de rotação do compressor, e ajustes de abertura e fechamento da válvula de expansão termostática. A figura 6 ilustra, de maneira esquemática, o volume de controle aplicado a um trocador de calor, onde, por intermédio de um balanço de energia, conhecendo-se a vazão de refrigerante e os estados de entrada e saída, determina-se, por exemplo, a taxa de transferência de calor.

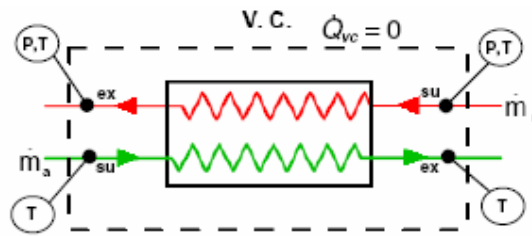


Figura 6. Volume de controle (V.C.) aplicado no trocador de calor.

Os resultados desse balanço são apresentados pelas equações 1 e 2

$$\text{Para a água: } \dot{Q} = \dot{m}_w (h_{w,ex} - h_{w,su}) = \dot{m}_w C p_w (T_{w,ex} - T_{w,su}) \quad (1)$$

$$\text{Para o refrigerante: } \dot{Q} = \dot{m}_{ref} (h_{ref,ex} - h_{ref,su}) \quad (2)$$

3.2. Procedimento Experimental

Para o desenvolvimento dos ensaios é necessário atingir o regime permanente, estável que permita determinar os parâmetros termodinâmicos do sistema de refrigeração. O sistema é carregado com uma massa inicial de refrigerante de R-22 de 2,72 Kg. A frequência de rotação do compressor é pré-estabelecida como a variável manipulada do sistema de refrigeração. Inicialmente são realizados ensaios com o sistema em malha aberta, mantendo a temperatura da água na entrada do evaporador (T8) em 20 °C com uma vazão de 0,18 kg/s. A faixa de operação na frequência de rotação do compressor é trabalhada entre 50 e 60 Hz, respeitando esta faixa, para evitar possíveis riscos de estragos no compressor. Na Figura 7a observa-se as mudanças no COP e vazão do refrigerante e na Figura 7b o consumo de potência e a capacidade frigorífica em função da frequência. O ensaio consistiu em ligar o sistema em modo rampa até a frequência nominal de 60 Hz (1750 rpm) e diminuir a frequência até atingir 50 Hz. É importante destacar que a 50 Hz o sistema possui o máximo COP, apesar de ter sua mínima capacidade frigorífica ($\dot{Q}_{ev}$) de 3,5 kW e mínima vazão de refrigerante de 0,019 Kg/s, já que a potência de compressão também é gradualmente baixa na ordem dos 3,6 kW. À medida que os sistema trabalhe a sua frequência nominal dos 60 Hz, encontra-se uma diminuição do COP no valor de 1,2 afetado pelo alto consumo de potencia no valor dos 4,4 kW sem importar o aumento da vazão do refrigerante na ordem dos 0.024 Kg/seg e sua elevada capacidade de refrigeração. É destacável, para este tipo de sistema, que a melhora de sua eficiência encontra-se para frequências de operação abaixo dos 60 Hz.

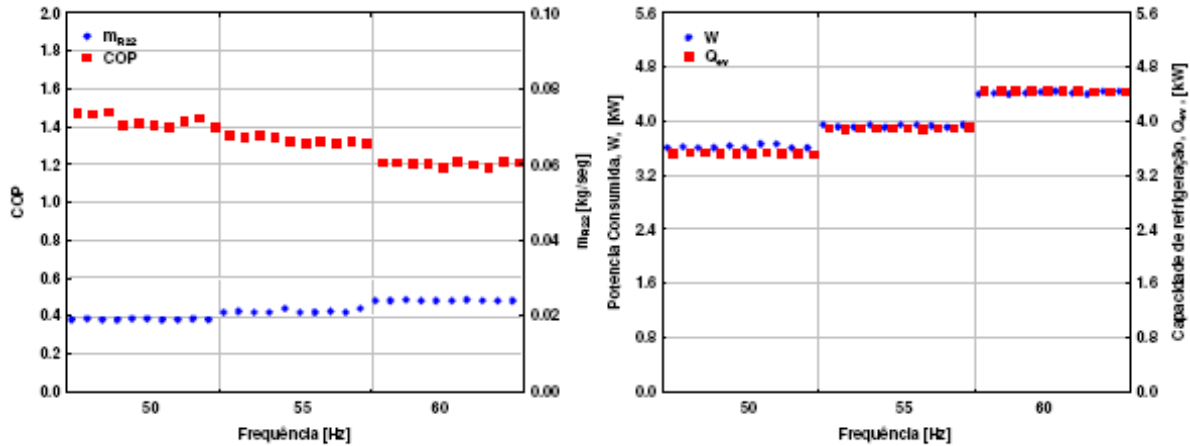


Figura 7. (a) Variações do COP e vazão mássica ($\dot{m}_{R22}$) em função da faixa frequência de operação do compressor. (b) Variações capacidade de evaporação ($\dot{Q}_{ev}$) e potência consumida ($\dot{W}$) ensaios com uma massa inicial de refrigerante R-22 de 2,7 kg.

Nas figuras 8a e 8b, são apresentados os graus de superaquecimento e sub-resfriamento (Tsq, Tsb) e temperatura de condensação e de evaporação, respectivamente. Como pode ser observado, em toda a faixa de frequência ensaiada, o grau de sub-resfriamento foi mantido acima dos 25°C e o grau de superaquecimento entre os 6 e 11 °C, faixa de operação aceitável para este tipo de sistemas. Detalhadamente à medida que o sistema foi diminuindo a frequência, o grau de superaquecimento foi diminuindo, devido à diminuição da vazão do R-22, evitando inundar o evaporador de refrigerante, por outro lado, a temperatura de condensação ficou na faixa dos 45 e 52 °C, como seria de esperar, valores limites estabelecidos pelos manuais de funcionamento do compressor bitzer modelo 2DC-3.2.

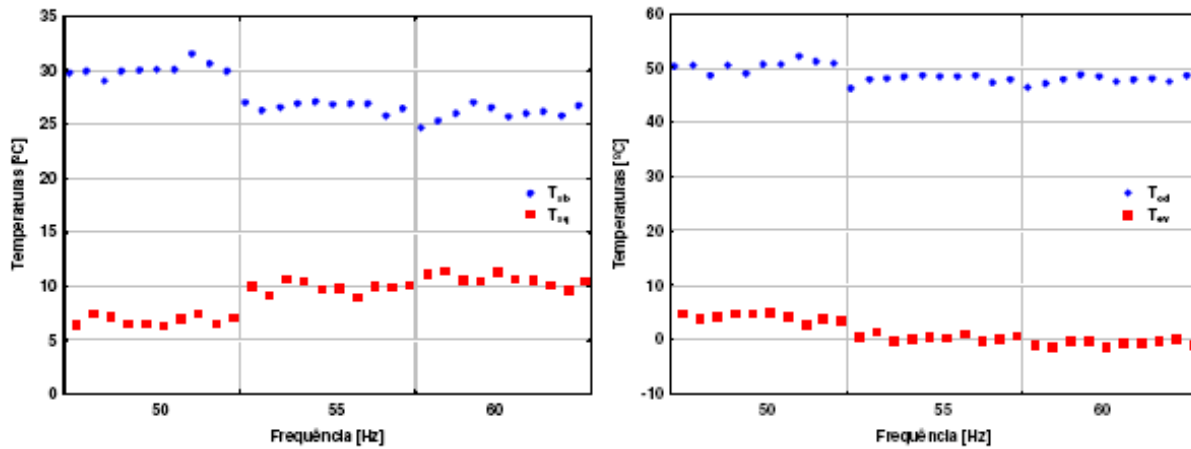


Figura 8. (a) Perfil das Temperaturas ($T_{sq} - T_{sb}$) (b) Perfil das Temperaturas ($T_{cd} - T_{ev}$) em função da faixa frequência de operação do compressor.

4. CONCLUSÕES

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

O inversor de frequência foi a ferramenta importante no desempenho do sistema para este tipo de aplicação, permitindo a mudança na vazão do refrigerante.

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

Com a carga de refrigerante fixa, pode-se melhorar o COP mudando a velocidade do compressor. Além de permitir trabalhar e ajustar graus de superaquecimento normais para este tipo de sistema, como parâmetros de avaliação para o ótimo funcionamento.

No projeto e montagem dos condicionadores de sinais, foi levada em consideração a escolha apropriada dos amplificadores operacionais de instrumentação (INA125 e INA111), que apresentou um comportamento linear com a grandeza física medida. Além disso, garantiu, ainda, uma proteção aos sensores regulando a corrente de alimentação, a partir de uma voltagem fixa proporcionado pelo integrado e também permitiu a eliminação de ruídos que afetavam a aquisição de dados.

Visando os mais variados objetivos, como busca de máximo COP, para certas circunstâncias solicitadas, em futuros trabalhos pretende-se testar diferentes estratégias de controle, atuando simultaneamente na válvula de expansão eletrônica e na velocidade do compressor, selecionando aquela estratégia que seja a mais adequada ao protótipo.

Finalmente, um desdobramento natural e evidente deste trabalho coloca a disposição à aprendizagem e treinamento das diferentes aplicações da termodinâmica, projeto eletrônico, objetivamente em qualquer plano educacional e industrial.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seu agradecimento às empresas ACP Termotécnica, pela doação dos trocadores de calor, EMERSON, pela válvula de expansão, BITZER Compressores pelo compressor do sistema e DANFOSS pela doação da válvula de expansão eletrônica. Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

6. REFERENCIAS

- Apréa 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.
- Evelyn B. 1998; "Synopsis of Residential Refrigerator/Freezer Alternative Refrigerants Evaluation"; ASHRAE Transactions, pp. 266-273.
- Lenarduzzi, F. J.; Yap, S. S. Measuring the Performance of a Variable-Speed Drive Retrofit on a Fixed-Speed Centrifugal Chiller, 1998.
- William, H. C. at all 1997; "An Experimental Analysis of Cycling Losses in Domestic Refrigerator Freezers", ASHRAE Transactions, Vol. 6, No. 1, pp. 587-596.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

PERFORMANCE EVALUATION OF A VARIABLE SPEED IN STEAM COMPRESSION SYSTEM

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

Oscar S. Hernandez Mendoza

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 initial evaluation of the energy performance of steam compression system (SRCV) with refrigeration capacity of 5TR (17.5 kW) working with expansion thermostatic valve. The refrigeration system (chiller) works with a semi-hermetic compressor, two heat exchangers type tube in tube, thermostatic expansion valve and water is used as a secondary fluid. In these refrigeration systems, the conventional mode is to work with fixed speed. In this research, it was looked to develop an alternative to evaluate SRCV the different compressor speed, using a three-phase frequency inverter. The advantages of use of these systems SRCV the variable represent the potentiality of energy performance. In this work the electronic project for the control of an expansion valve with objective to evaluate future this system acting in the expansion valve and the speed of the compressor.*

Keywords: *System of refrigeration, performance.*