

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COM VARIAÇÃO DA ROTAÇÃO DO COMPRESSOR

Arthur Heleno Pontes Antunes

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
doom_femec@yahoo.com.br

Francisco Ernesto Moreno 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 Pedone 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 trata da avaliação experimental da eficiência de um resfriador de líquido, “Chiller”. Tal resfriador é, em sua essência, uma adaptação de um aparelho de ar condicionado comercial tipo Self-Contained, visando melhor controle dos parâmetros físicos. O objetivo foi analisar a eficiência deste resfriador frente à técnica da variação da vazão mássica de refrigerante do circuito frigorífico. Esta metodologia consiste em manipular a válvula de expansão termostática para toda a faixa de frequência de trabalho do compressor, com a finalidade de manter a temperatura de Evaporação constante na faixa de -5°C. O alcance desta temperatura, que é bastante utilizada em aplicações reais, aliado a um baixo consumo de potência e uma alta capacidade frigorífica, indica uma faixa de frequência ideal para o bom funcionamento do sistema de refrigeração. As vantagens de se trabalhar com a variação destes parâmetros sob o ponto de vista de redução de consumo de energia, foram comprovadas através dos resultados obtidos, que indicam a faixa de frequência ideal (maiores valores de COP) entre 40 e 50 Hz.*

Palavras-chave: *Sistema de refrigeração, eficiência, vazão mássica, refrigerante.*

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Moreno Garcia (2006) o ciclo de refrigeração por compressão pode ser estudado de acordo com as características termodinâmicas de seus equipamentos. Resumidamente, o ciclo inicia-se com o fluido refrigerante que é comprimido no compressor no estado de vapor superaquecido, onde sua pressão e sua temperatura são aumentadas seguindo, posteriormente, para o condensador. Neste, por sua vez, o calor ganho no processo de compressão mais aquele retirado do ambiente refrigerado é rejeitado para o meio exterior, ocasionando assim o resfriamento do fluido e a conseqüente 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. Este ciclo básico é ilustrado na Figura 1.

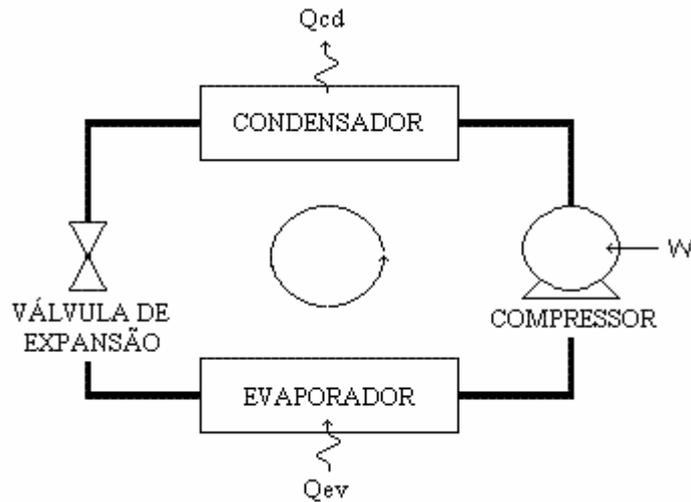


Figura 1: Representação do ciclo básico de refrigeração.

Um sistema de refrigeração necessita de certa quantidade de energia (em forma de trabalho) para que o ciclo frigorífico se inicie e consiga retirar energia (em forma de calor) do meio. Em condições de uso reais, a parcela de energia rejeitada para o meio ambiente é maior que a parcela de energia retirada do espaço refrigerado. A partir destes fatos, torna-se interessante alterar parâmetros do sistema, aumentando seu coeficiente de eficácia e conseqüentemente, diminuindo gastos com energia elétrica.

Sistemas de refrigeração com oito ou mais horas de uso diário contínuo, mostram-se ineficientes por falhas no projeto, execução, ou ainda, por falta de manutenção adequada. Tanto em um caso como em outro, a percepção do usuário é 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 (MORENO GARCIA, 2006).

A elevação contínua dos custos da energia elétrica e a contínua ênfase na necessidade de conservação da energia estão direcionando os trabalhos de pesquisa para o desenvolvimento de novas tecnologias que sejam economicamente viáveis em novos sistemas de Refrigeração e Ar Condicionado (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. Já é, até então, utilizado em alguns sistemas de refrigeração a variação da rotação do compressor. Os resultados da variação deste parâmetro já foram confirmados experimentalmente por Moreno Garcia (2006). Neste estudo diz que o melhor desempenho energético foi obtido quando a velocidade do compressor *scroll* variou, o que ocorreu, basicamente, devido à eficiência global do sistema e também pela menor relação de compressão à medida que a velocidade do compressor diminuiu.

A partir deste contexto, teve-se a idéia de estudar um sistema de refrigeração que possuísse rotação do compressor variável para uma aplicação real. Entretanto, para poder realizar o estudo surge um desafio: como conseguir manter uma temperatura de evaporação constante para toda a faixa de frequência de trabalho do compressor? A forma adotada para alcançar tais condições foi a variação de um segundo parâmetro. Este método, que ainda não fora analisado, é a técnica da variação da vazão mássica de refrigerante do circuito frigorífico, que consiste em manipular a válvula de expansão termostática do sistema.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi analisar em qual faixa de frequência o sistema de refrigeração estudado é mais eficiente quando a rotação do compressor é alterada e, então, manipula-se a válvula de expansão termostática para manter uma temperatura de evaporação de -5°C .

2. METODOLOGIA

A metodologia empregada buscou variar dois parâmetros do resfriador. Um referente à variação da vazão mássica de refrigerante por meio da manipulação da válvula de expansão termostática de modo a manter a temperatura de evaporação em -5°C , e outro relacionado ao compressor, variando sua faixa de frequência de trabalho, utilizando um variador de frequência trifásico.

O estudo foi realizado no Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos (LEST) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

2.1. Bancada Experimental

O detalhamento do protótipo experimental de ensaios que foi desenvolvido neste trabalho é, primordialmente, composto por um compressor alternativo semi-hermético trifásico, um condensador e um evaporador de tubos concêntricos e válvula de expansão termostática. O fluido secundário, a água de alimentação do condensador, circula por uma torre de resfriamento, que é responsável pelo seu resfriamento. Por outro lado, a alimentação do evaporador é realizada por intermédio de um reservatório de armazenamento térmico que simula uma carga térmica e possui uma resistência elétrica, que tem como função manter a temperatura estável desejada na água de entrada do evaporador. A resistência elétrica possui uma potência de 15 kW e é comandada por um controlador PID, programado no Controlador Lógico Programável (CLP). Um variador de frequência também foi instalado e tem como função principal controlar a velocidade do compressor de acordo a lógica de controle implementada no sistema, com a finalidade de melhorar o desempenho sob diversas condições de ensaio, como pode ser observado na Figura 2.

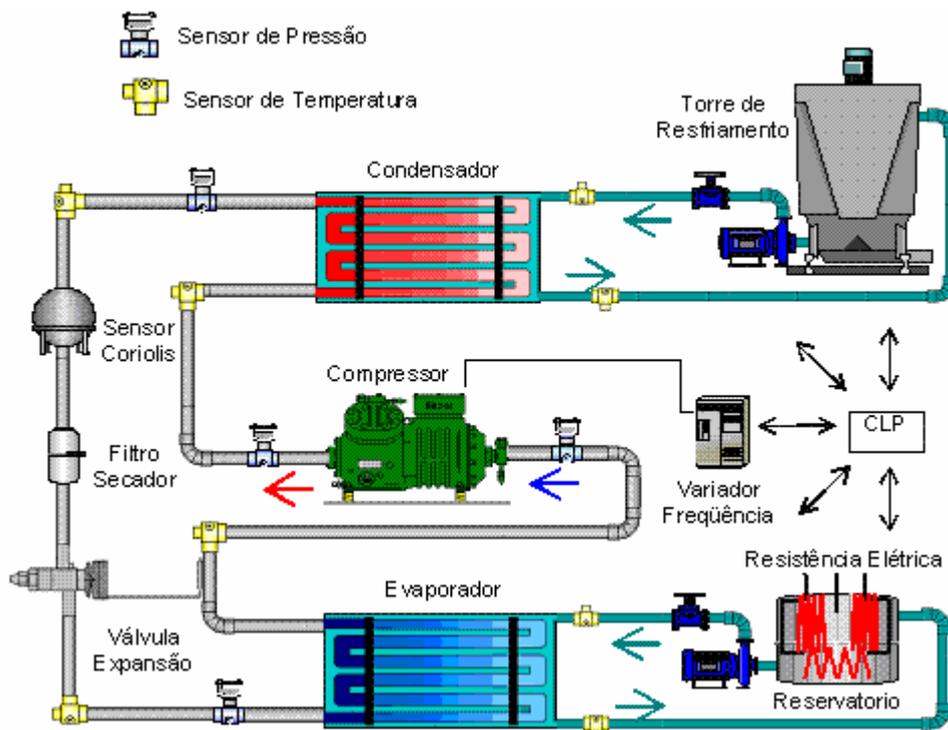


Figura 2: Representação esquemática da bancada experimental.

Para as medidas de temperatura e pressão foram utilizados sensores de temperatura e pressão, sendo a aquisição de dados, realizada a partir de uma placa eletrônica projetada no laboratório de Energia e Sistemas Térmicos, com sinal de saída analógico. Um medidor de vazão tipo Coriolis foi utilizado para avaliar a vazão do refrigerante R-22 do circuito principal. Os sinais analógicos de temperatura, pressão e vazão foram convertidos em digitais através do Controlador Lógico Programável (CLP). Os dados foram monitorados e gerenciados através de um software - LABVIEW. Uma Imagem da bancada experimental com detalhamento dos equipamentos e instrumentação é mostrada na Figura 3.



Figura 3: Vista geral da bancada experimental.

2.2. Identificação física dos parâmetros

Neste estudo foi utilizada a bancada experimental de refrigeração mencionada anteriormente. Nela, o sistema de refrigeração é um ciclo fechado, no qual as 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, ou seja, o efeito produzido pela mudança na frequência de rotação do compressor e os ajustes de abertura e fechamento da válvula de expansão termostática se relacionarão entre si.

As grandezas físicas, tais como: temperatura, pressão e vazão, são medidas pelos sensores instalados nos diferentes pontos da bancada experimental. Os valores destas grandezas são analisados por meio de um código computacional, “Engineering Equation Solver” (EES), obtendo desta maneira, as propriedades térmicas e os valores matemáticos necessários para a avaliação dos principais resultados, são eles: COP, \dot{Q}_{ev} , \dot{m}_{ref} , entre outros. Tal programa permite, ainda, acompanhar a evolução das grandezas mencionadas anteriormente durante os diferentes ensaios realizados. No caso do coeficiente de eficácia, COP, definido como sendo a relação entre o efeito útil desejado e o trabalho necessário para obter este efeito em um sistema de refrigeração. A Equação 1 formaliza tal relação:

$$COP = \frac{\text{Efeito útil}}{\text{Trabalho necessário}} = \frac{\text{Objetivo}}{\text{Aquilo que custa}} = \frac{\dot{Q}_{ev}}{\dot{W}} \quad (1)$$

A Figura 4 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. Os resultados desse balanço são apresenta dos pelas Equações 2 e 3.

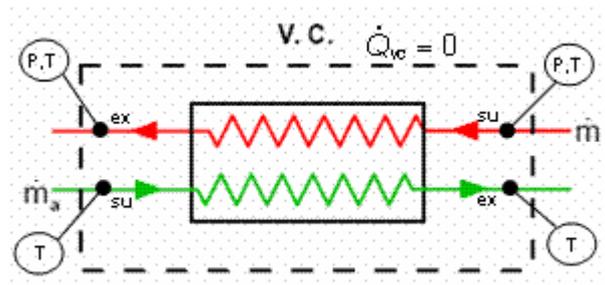


Figura 4: Volume de controle (V.C.) aplicado no trocador de calor.

Para a água:

$$\dot{Q} = \dot{m}_w (h_{w,ex} - h_{w,su}) = \dot{m}_w C p_w (T_{w,ex} - T_{w,su}) \quad (2)$$

Para o refrigerante:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ref} (h_{ref,ex} - h_{ref,su}) \quad (3)$$

2.3. Procedimento Experimental

Na realização dos ensaios, o conhecimento técnico sobre a bancada, permitiu, com segurança, variar os diversos parâmetros do sistema com o objetivo de se verificar os melhores pontos de operação.

O procedimento utilizado tem início com o acionamento do painel principal, onde se encontram os dispositivos de comando (CLP, condicionadores com suas respectivas fontes, entre outros). Paralelamente, inicia-se o programa de monitoramento e controle feito em LABVIEW, a partir daí é estabelecida a comunicação serial dos pacotes de dados entre o CLP e o computador. O passo seguinte é o acionamento da bomba de água e do ventilador da torre de resfriamento que alimentam o condensador, em seguida a bomba de água e a resistência elétrica do evaporador são ligadas, separadamente, através de seus relés de potência. Quando o fluxo da água nos trocadores apresenta estabilidade e a temperatura na entrada da água do evaporador, que simula a carga térmica, atinge o valor pré-estabelecido, procede-se o acionamento e arranque do compressor. Neste ponto, alguns cuidados devem ser considerados, já que se trabalha com voltagem trifásica e corrente elevada, o que representa risco de acidente para os operadores e pode ocasionar danos ao sistema. Dentre estes cuidados estão:

- Verificação das conexões e terminais elétricos ou qualquer tipo de umidade nos equipamentos que pode ocasionar curtos circuitos.
- Observar o nível de óleo no cárter do compressor (para o caso do compressor semi-hermético) antes da partida, levando-se em consideração que o óleo deverá estar no centro do visor, porém o limite de variação no visor pode ir desde $\frac{1}{4}$ até $\frac{3}{4}$ do visor de óleo (caso para o compressor semi-hermético - *Bitzer*).
- O suprimento de energia para o variador de frequência é cuidadosamente verificado e confrontado ao requerido no manual de operação e uma correta alimentação trifásica ao sistema deve ser garantida.
- Antes de acionar o compressor, uma resistência elétrica que se localiza no cárter do compressor deve estar ligada, o que permite aquecer seu óleo para evitar desgastes por atrito, como solicita o manual de operação do compressor.

Por intermédio do programa LABVIEW, procede-se o acionamento do compressor através de três interruptores programados na tela principal da interface digital. O primeiro, do tipo *toggle*, para ligar e desligar o compressor e outros dois, tipo *jog*, para variar a velocidade. Inicialmente, o compressor é levado a sua frequência nominal, 60 hertz (1750 rpm), para que o sistema entre em regime permanente.

Até este momento o procedimento foi igual ao realizado por Moreno Garcia (2006). A partir deste ponto as atenções se voltam à válvula de expansão termostática do sistema. Sua principal função é fornecer para o evaporador a quantidade correta de fluido refrigerante, de acordo com a solicitação de capacidade para cada momento de operação, esta solicitação varia com a temperatura do ambiente a ser resfriado, este fato se deve à vários motivos, dentre eles, a carga de produtos, a troca térmica com o ambientes pelas paredes, ou a qualquer outra variação de temperatura ocasionada pela solicitação de frio dentro do evaporador.

Considerando o sistema em regime permanente, o passo seguinte é a manipulação da válvula de expansão termostática. O ajuste ocorre manualmente, a válvula deve ser aberta ou fechada a partir da observação pelo operador do valor da temperatura de evaporação, localizado na interface de operação em LABVIEW (monitor), a temperatura alcançada deve ser de aproximadamente -5°C e toda manipulação deve ser feita de forma sutil, pois as respostas digitais são bastante sensíveis às entradas analógicas. Todos os ensaios são realizados com o sistema em malha aberta, mantendo uma temperatura da água na entrada do evaporador igual a 20°C e uma vazão mássica de água no evaporador de 0,38 kg/s.

Em seguida, a frequência que era de 60 Hz é reduzida de 5 em 5 Hz por meio do variador, paralelamente à redução, a válvula de expansão é fechada para manter sempre a temperatura de evaporação constante em regime permanente. O procedimento comportasse da mesma maneira para avaliar o sistema em cada frequência de trabalho até atingir o valor mínimo estipulado de 30 Hz (900 rpm). Finalmente, o procedimento seqüencial consistiu no aumento da frequência, variando de 30 Hz até o limite máximo de 70 Hz (2100 rpm). É importante destacar que para frequências maiores dos 60 Hz (frequência nominal) abriu-se consideravelmente a válvula de expansão.

Assim, os dados são colhidos e salvos para posterior análise.

3. RESULTADOS

A frequência de rotação do compressor e o ajuste na abertura ou fechamento da válvula de expansão termostática foram pré-estabelecidas como as variáveis manipuladas do sistema de refrigeração com o objetivo de manter sempre temperatura de evaporação igual a -5°C .

Os dados foram analisados com auxílio do EES e os principais resultados foram dispostos em gráficos.

Na Figura 5 observam-se as mudanças no COP e vazão do refrigerante, e para a Figura 6 o consumo de potência medido através do variador de frequência e a capacidade de refrigeração, ambos em função da frequência de rotação do compressor. Acima da frequência de 60 Hz, o sistema não apresentou o máximo COP mesmo possuindo ótima capacidade de refrigeração (\dot{Q}_{ev}), da ordem de 7,82 kW até os 9 kW, com vazões de refrigerante entre os 0,0416 e 0,05043 kg/s, pois a potência apresenta valores maiores. É interessante observar que abaixo dos 40 Hz, encontra-se o mínimo COP no valor de 1,608, este é afetado pelos valores reduzidos da vazão do fluido refrigerante, valores da ordem de 0,01073 kg/s. Já os máximos valores alcançados para o COP estão entre 2,49 e 2,66, onde se encontra a faixa das frequências de 40 e 55 Hz, isto se deve a uma boa capacidade de refrigeração com consumo de potência reduzido.

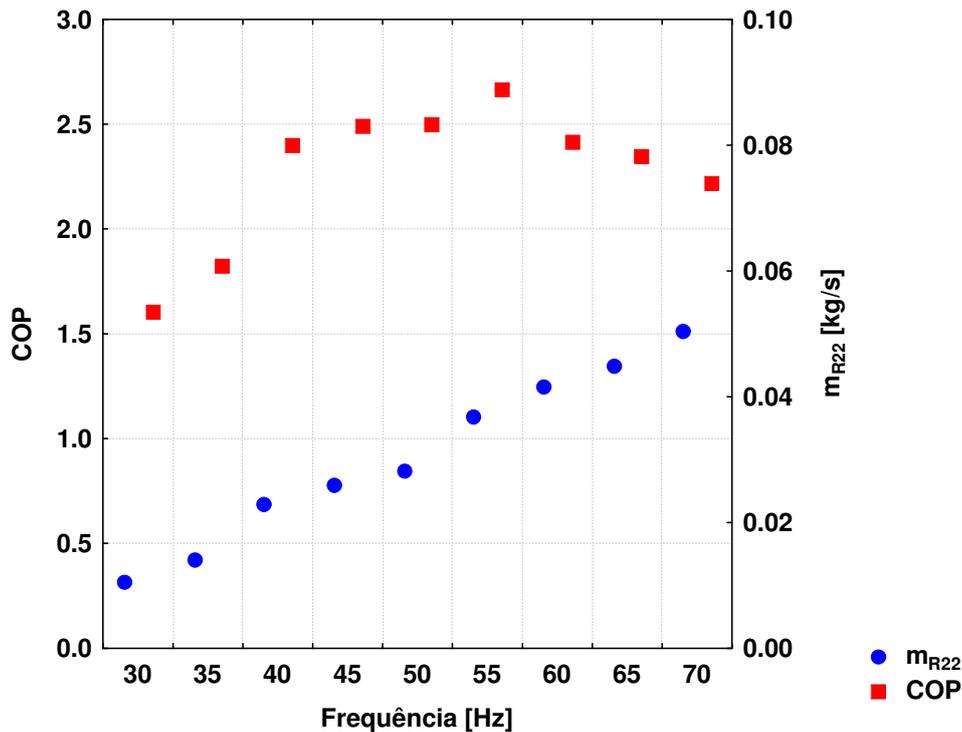


Figura 5: Variações do COP e vazão mássica (m_{R22}) em função da frequência de operação do compressor.

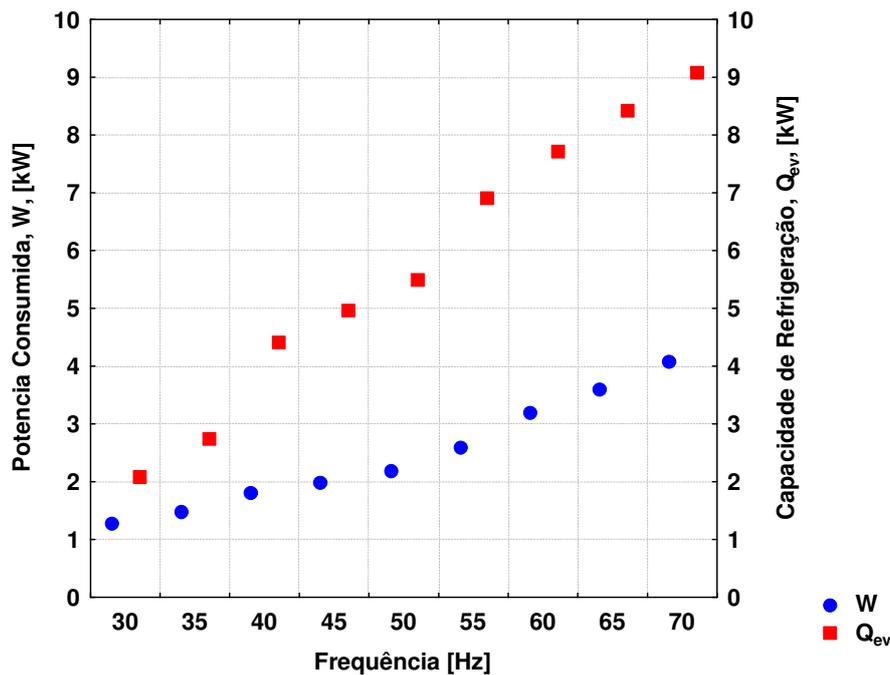


Figura 6: Variações na capacidade de evaporação (Q_{ev}) e potência consumida (W) em função da frequência de operação do compressor.

Nas Figuras 7 e 8, são apresentados os graus de superaquecimento e sub-resfriamento (T_{sq} , T_{sb}) 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 4°C e o grau de superaquecimento maior que 15°C . Detalhadamente, à medida que o sistema foi diminuindo a frequência, a temperatura de superaquecimento foi aumentando consideravelmente, devido a que a válvula de expansão foi sendo fechada como ajuste para sempre manter aquela temperatura de evaporação igual a -5°C , a temperatura de condensação variou em maior amplitude

na faixa de frequências acima dos 40 Hz. A fig. 8 ilustra um comportamento interessante da temperatura de condensação, pois se manteve praticamente constante até a faixa de frequência de 50 Hz, incrementando praticamente 5°C para frequências maiores. Isso evidencia que o sistema se ajustou a nova faixa de pressões.

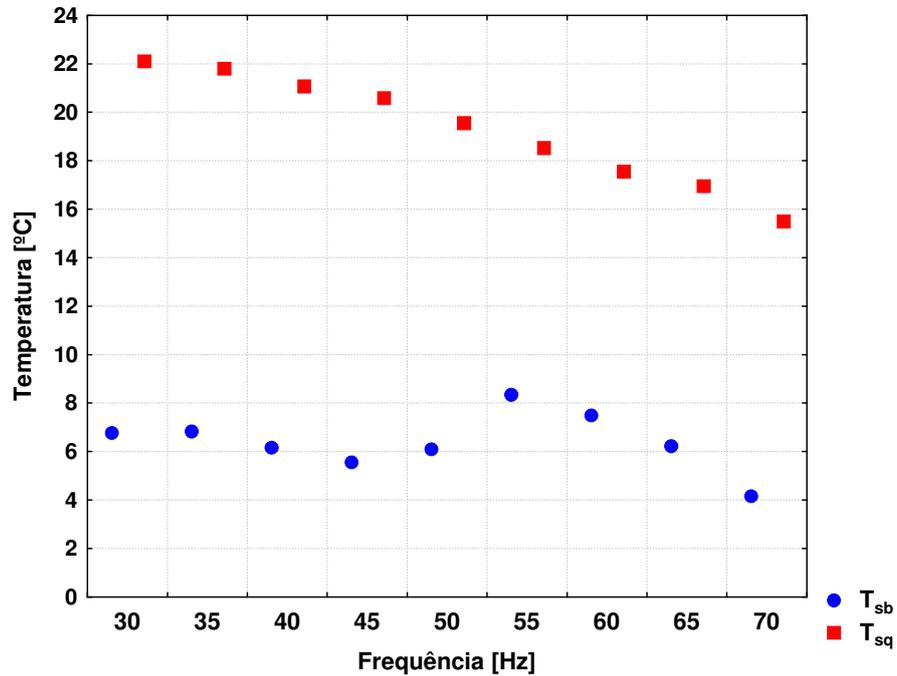


Figura 7: Perfil das Temperaturas (T_{sq} - T_{sb}) em relação às mudanças na frequência de trabalho do compressor

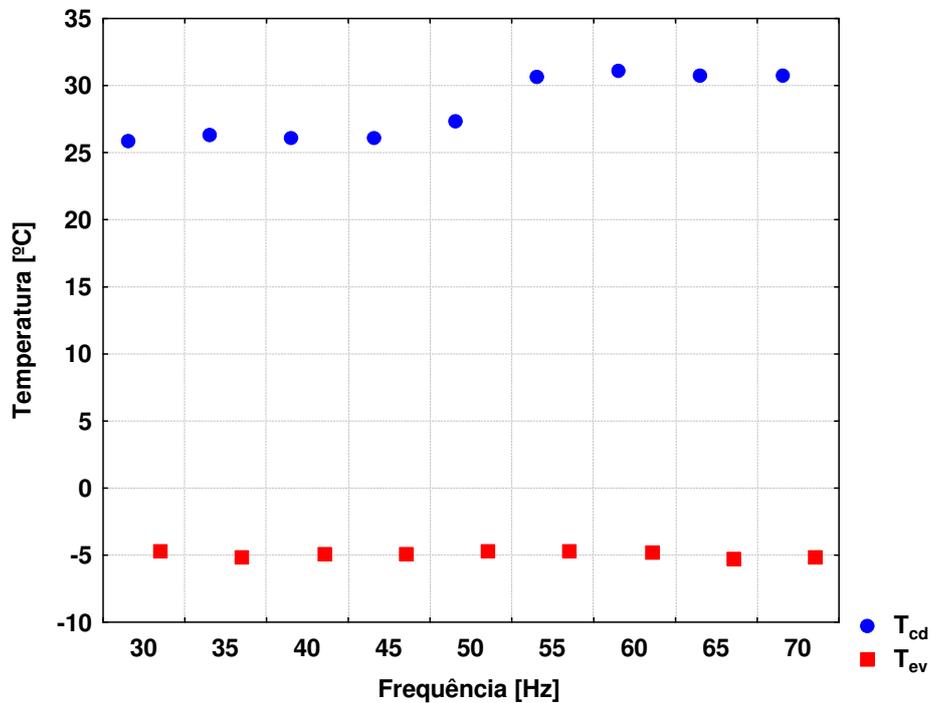


Figura 8: Perfil das Temperaturas (T_{cd} - T_{ev}) em relação às mudanças na frequência de trabalho do compressor.

4. CONCLUSÕES

A realização deste estudo foi importante por apresentar resultados que podem contribuir com o aprimoramento dos sistemas de refrigeração, de forma a conseguir um melhor rendimento, buscando a redução nos gastos com energia elétrica. Assim, em relação aos resultados podem-se extrair as seguintes conclusões:

- O aumento na velocidade de rotação do compressor proporcionou um aumento da vazão em massa de refrigerante como seria de esperar.
- Mudanças na velocidade do compressor permitem que o sistema opere mais confortavelmente e adequadamente para altas e baixas cargas frigoríficas.
- Como esperado o grau de superaquecimento diminuiu com o aumento da rotação, já que para manter a temperatura de evaporação constante a válvula de expansão foi aberta, aumentando a área molhada do evaporador.
- Os máximos valores alcançados para o COP estão entre 2,49 e 2,66, onde se encontra a faixa das frequências de 40 e 55 Hz, isto se deve a uma boa capacidade de refrigeração com consumo de potência reduzido.

5. 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 CNPq pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Aprea, C., Mastrullo, R. and Renno, C., 2005, “Experimental analysis of the scroll compressor performances varying its speed”, University of Naples Federico II, P.le Tecchio 80, 80125 Naples, Italy.
- Borja, T.J.A., 2006, “Automatização e controle inteligente on-line de sistemas de refrigeração utilizando redes neurais artificiais”.
- Cardenas, N.I., 2002, “O Uso de Controladores Fuzzy Adaptativos, implementados em microcontroladores, no controle de vibrações de sistemas mecânicos”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia.
- Garcia, F.E.M., 2006, “Estudo experimental de um controle adaptativo para um sistema de refrigeração”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia.
- .

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material incluído neste trabalho completo.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF REFRIGERATION SYSTEM WITH VARIABLE SPEED COMPRESSOR

Arthur Heleno Pontes Antunes

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

doom_femec@yahoo.com.br

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 based on the experimental evaluation of the efficiency of a cooler of liquid "Chiller". Such cooler is, in its essence, an adaptation of air conditioning system, Self-Contained type, aiming at better control of the surrounding conditions. The objective was to analyze the efficiency of this cooler front to the technique of the variation of the mass outflow of cooling of the refrigerating circuit, this methodology consists of manipulating the valve of thermostatic expansion for all the band of frequency of work of the compressor, with the purpose to keep constant the evaporation temperature, -5°C . The reach of this temperature, that sufficiently is used in real applications, ally to a low consumption of power and one high refrigerating capacity, indicates an ideal band of frequency for the good functioning of the refrigeration system. The advantages of working with the variation of these parameters under the point of view of reduction of energy consumption had been proven through the gotten results, which indicate the ideal band of frequency between 40 and 50 Hz.*

Keywords: *Refrigeration System, efficiency, Mass flow rate Refrigerant.*