

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR COM UM TROCADOR DE CALOR ENTRE AS LINHAS DE SUÇÃO E DE LÍQUIDO

Leonardo de Souza Santana, leonardosantana800@gmail.com¹

José de Castro Silva, castro.silva@univasf.edu.br¹

Luiz Mariano Pereira, luiz.mariano@univasf.edu.br¹

¹Universidade Federal do Vale do São Francisco, Colegiado de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos Magalhães, 510, CEP. 48902-300, Juazeiro, Bahia, Brasil.

Resumo: O sistema de refrigeração por compressão a vapor exige uma grande demanda de eletricidade. Diante disso, surge a necessidade de criar meios mais eficientes para o funcionamento destes equipamentos, reduzindo principalmente seu consumo de energia. A utilização de trocadores de calor entre a linha de sucção e de líquido pode produzir um melhor desempenho do ciclo termodinâmico. Baseado em estudos anteriores, o presente trabalho analisa experimentalmente estes componentes em um freezer, utilizando o fluido refrigerante R-134a. Para avaliar o desempenho termodinâmico do ciclo de refrigeração foram aplicados três cenários diferentes: um apresentando o funcionamento convencional e dois apresentando o funcionamento com a introdução de trocadores de calor entre a linha de sucção e a linha de líquido, sendo estes com comprimento de 20 cm e 40 cm. Após os experimentos observou-se que a troca de calor realizada, não afeta substancialmente o coeficiente de performance (COP) do equipamento. Conclui-se, ao final do trabalho, que a melhor opção dentre os 3 cenários foi o uso do trocador de calor de 20 cm, devido ao aumento da maioria dos parâmetros termodinâmicos do equipamento.

Palavras-chave: Freezer, R-134a, Trocador de calor, COP.

1. INTRODUÇÃO

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor é usado hoje em dia de forma multifuncional, sendo encontrados desde um pequeno refrigerador até em uma grande instalação de condicionamento de ar (Yadav *et al.*, 2015). Ainda no ano de 2004, Gonçalves já estimava que existiam mais de 45 milhões de refrigeradores em operação no Brasil, dos quais apenas uma mínima parcela não utiliza o princípio de compressão mecânica de vapor (Schurt, 2009 citando Gonçalves, 2004), trazendo uma grande demanda de energia elétrica para estes equipamentos.

Essa grande demanda faz com que o termo eficiência energética ou otimização do uso da energia seja muito presente nos estudos relacionados a ciência da Refrigeração. Desta forma, surge a necessidade de utilizar e desenvolver equipamentos com melhor desempenho para que se obtenha não só resultados em termos de economia energética, mas também ambientais.

Segundo Klein *et al.* (2000), um dos meios de aumentar a capacidade frigorífica desses equipamentos é através do resfriamento adicional do fluido refrigerante condensado no lado de alta pressão, que provocará também um aumento da velocidade de resfriamento do equipamento. Um dos métodos de sub-resfriar o refrigerante no estado líquido, é efetuar uma troca de calor entre o líquido na saída do condensador e o vapor de sucção que retorna ao compressor (Dossat, 2004). Para alcançar esse objetivo serão instalados trocadores de calor entre essas linhas, também conhecidos como LSHX (Liquid Suction Heat Exchanger) ou SLHX (Suction line heat exchanger), (Waykole e Dange, 2014).

A troca de calor entre as linhas de sucção e de líquido pode aumentar o efeito de refrigeração, já que a quantidade de vapor na entrada do evaporador será reduzida. Por outro lado, Mastrullo *et al.* (2007) deixam claro, que essa troca provocará um aumento da temperatura do vapor na entrada do compressor que será correspondido por um maior trabalho de compressão.

A utilização do SLHX tem sido estudada por outros autores. Domanski *et al.* (1994) propõem um modelo matemático para descrever o desempenho de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor com um trocador de calor entre a linha de sucção e linha de líquido. Obtendo resultados semelhantes ao dos autores anteriormente citados, Klein *et al.* (2000) analisaram os impactos no desempenho e nas quedas de pressão de um sistema de refrigeração utilizando o SLHX. Neto *et al.* (2006) realizaram simulações computacionais para um sistema de refrigeração com um único estágio de compressão e com o SLHX, através do software “Coll Pack”, para diversos fluidos refrigerantes. Tebchini (2011),

Waykole e Dange (2014), e Yadav *et al.* (2015) realizaram investigações experimentais com a utilização do SLHX em um condicionador de ar, um refrigerador de água e um refrigerador doméstico respectivamente.

Dessa forma, este trabalho propõe a utilização de técnicas de regeneração de calor, a fim de se obter um melhor desempenho de um equipamento de refrigeração por compressão a vapor, analisando de modo experimental três cenários distintos, utilizando trocadores de calor entre a linha de sucção e a linha de líquido do equipamento.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As atividades experimentais foram realizadas com um ciclo de refrigeração por compressão a vapor de único estágio, contido em um freezer, como mostra a Fig. 1. O freezer selecionado é do tipo horizontal com duas portas, de fabricação Consul, com capacidade para 404L.



Figura 1. Freezer utilizado nos ensaios.

Outros dados técnicos são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 - Dados técnicos do freezer.

Modelo	CHB42CBBNA
Série	JH3433665
Fluido	R-134a (110g)
Tensão	220 V~
Frequência	60 Hz
Corrente	1,3 A
Potência	120 W

A troca de calor no equipamento se dá por convecção natural e no condensador por convecção forçada por um pequeno motoventilador axial de acionamento direto. O compressor é do tipo alternativo, de fabricação Embraco, modelo EGAS 80HLR, com utilização para fluido R-134a, tensão elétrica 220-240V e frequência 50-60Hz; a redução de pressão é feita por um dispositivo de expansão do tipo tubo capilar.

Os estudos foram realizados no Laboratório de Refrigeração do Colegiado de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Vale do São Francisco. A realização dos experimentos se concentrou em três cenários diferentes:

- ✓ Cenário I: Método convencional do freezer, sem ocorrer troca de calor entre a linha de líquido e sucção.
- ✓ Cenário II: Método com a instalação do trocador de calor de 20 cm ao freezer, forçando uma troca de calor entre as linhas de líquido e sucção.
- ✓ Cenário III: Método com a instalação do trocador de calor de 40 cm ao freezer, forçando uma troca de calor entre as linhas de líquido e sucção.

Foram realizados 7 ensaios para cada tipo de cenário, a fim de assegurar uma qualidade comparativa de resultados, proporcionando uma redução nos erros provocados pelas condições ambientais e pelo procedimento experimental. Os ensaios foram feitos em dias diferentes, sempre ao mesmo horário (10:30h) com extração de dados (pressões, temperaturas e potência elétrica) a cada minuto e após sua finalização o freezer tinha suas portas abertas para que a temperatura interna do equipamento se equalizasse com a temperatura ambiente para o dia seguinte. O término do ensaio era determinado pela obtenção da temperatura interna igual a -18°C .

O trocador de calor foi confeccionado com tubulação de cobre rígido de bitolas de $\frac{1}{4}''$ e $1\frac{1}{8}''$. O isolante utilizado para isolar o trocador tinha espessura de parede igual a 10 mm e fabricado em polietileno. Foram confeccionados dois

trocadores com comprimentos de 20cm e 40 cm, com características semelhantes, variando somente o comprimento de troca de calor, conforme apresentado nas Fig. 2, Fig. 3 e Fig. 4.

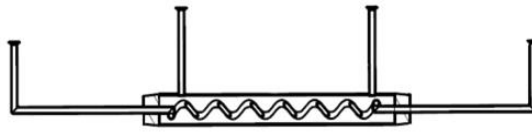


Figura 2. Vista interna do SLHX de 20cm (Inventor).

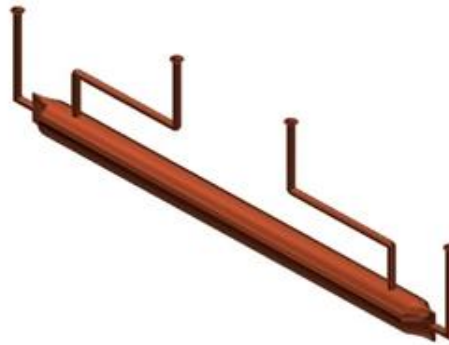


Figura 3. Perspectiva isométrica do SLHX de 40 cm (Inventor).

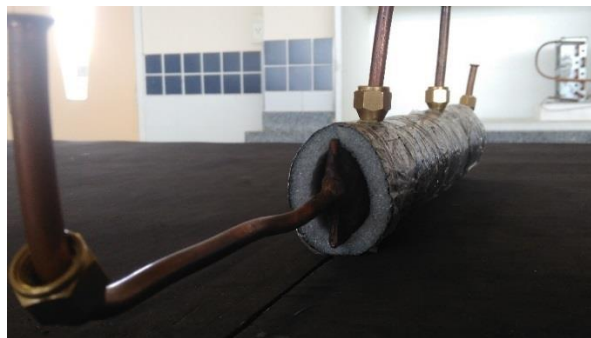


Figura 4. SLHX de 20 cm confeccionado.

Os pontos onde os dados de temperatura e pressão foram obtidos, são apresentados na Fig. 5.

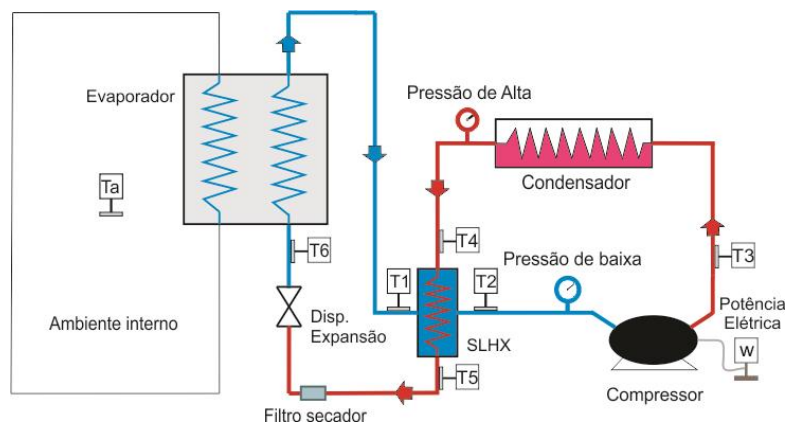


Figura 5. Representação dos pontos de coleta de dados no experimento.

Para os dados de temperatura assumiu-se que os valores referentes a superfície externa do tubo é aproximadamente a mesma do fluido refrigerante.

Os dados de potência foram obtidos através do medidor de potência em série ao cabo de alimentação do freezer, assumindo que a potência elétrica deste equipamento é aproximadamente a mesma potência de compressão.

3. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

Para análise dos dados obtidos foram criados códigos no software Engineering Equation Solver (EES), que contém uma biblioteca embutida com várias funções matemáticas e propriedades termo físicas para centenas de substâncias extremamente úteis para realização deste trabalho.

A partir de um banco de dados fornecido pelo fabricante do compressor do freezer foi encontrado através do *software* uma regressão linear que descrevesse a vazão mássica de refrigerante de acordo as temperaturas de evaporação e condensação do fluido refrigerante.

Com os dados de pressão e temperatura nos pontos mostrados na Fig. 5 e o código desenvolvido foi possível encontrar os dados de superaquecimento e sub-resfriamento. Além destes, foi possível encontrar também a capacidade frigorífica, ou seja, a quantidade de calor por unidade de tempo, que é retirada do meio que se quer resfriar através do evaporador. A capacidade frigorífica foi determinada aplicando a primeira lei da termodinâmica a um volume de controle em regime permanente, que envolve o evaporador desprezando as variações de energia cinética e potencial, resultando na Eq. 1.

$$\dot{Q}_o = \dot{m}(h_1 - h_6) \quad (1)$$

Onde:

$\dot{m}$ = vazão mássica ou fluxo de massa no volume de controle, [kg/s];

h_1 = Entalpia da saída do evaporador, [kJ/kg];

h_6 = Entalpia na entrada do evaporador, [kJ/kg].

Assim, com os dados da capacidade frigorífica e da potência de compressão encontrou-se o coeficiente de performance (COP), um parâmetro importante para análise da eficiência de um sistema de refrigeração. O COP é definido pela equação pela Eq. 2.

$$COP = \frac{\text{energia pretendida}}{\text{energia consumida}} = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{W}_c} \quad (2)$$

Onde:

$\dot{Q}_o$ = Capacidade Frigorífica, [kW];

$\dot{W}_c$ = Potência de compressão, [kW];

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados foram obtidos por meio de ensaio experimental. O objetivo do experimento foi investigar a influência da introdução do trocador de calor entre a linha de sucção e a linha de líquido no comportamento de alguns parâmetros de funcionamento do freezer. Os resultados foram expressos de forma comparativa entre os três cenários propostos a fim de ser feita uma análise minuciosa entre as vantagens e desvantagens encontradas nos experimentos.

Os valores médios de temperatura e pressão obtidos nos experimentos são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2. Valores médios de pressão e temperatura obtidos no experimento.

Parâmetros	Cenários		
	I	II	III
Temperatura após o evaporador (T1), [°C]	-	32,28	32,81
Temperatura na sucção do compressor (T2), [°C]	30,52	35,49	36,59
Temperatura após o condensador (T4), [°C]	-	41,13	41,04
Temperatura antes do Disp. Expansão(T5), [°C]	37,89	39,58	40,65
Pressão manométrica no evaporador, [kPa]	-6,86	6,02	-1,43
Pressão manométrica no condensador, [kPa]	1030,29	1153,71	1106,29

A partir das medições obtidas apresentadas na Tab. 2, foram calculados os parâmetros de performance do equipamento através do *software* EES para os três cenários propostos. A média dos valores obtidos são apresentadas a Tab. 3.

Tabela 3. Média dos parâmetros de performance obtidos.

Parâmetros	Cenários		
	I	II	III
COP	1,40	1,45	1,39
Capacidade frigorífica, [kW]	191,68	215,93	197,81
Potência de Compressão, [kW]	135,91	148,21	140,99
Vazão mássica, [kg/s]	0,0011	0,0012	0,0011
Superaquecimento no ponto T1, [K]	-	57,23	59,35
Superaquecimento no ponto T2, [K]	58,24	60,44	63,12
Sub-resfriamento no ponto T4, [K]	-	6,85	5,44
Sub-resfriamento no ponto T5, [K]	6,05	8,39	5,83

A partir da interpretação da Tab. 3, se tem uma análise detalhada da influência da introdução do SLHX sobre alguns dos parâmetros de performance do equipamento.

Efeito sobre o Sub-resfriamento – Linha de Líquido

Verifica-se um aumento sub-resfriamento após a utilização trocador de calor de 20 cm de 38,68% e uma redução no trocador de 40 cm de 3,64% quando comparado ao cenário sem o SLHX. Comparando os valores obtidos no ponto anterior (T4) e posterior (T5) ao SLHX percebe-se um aumento no sub-resfriamento provocado pelos trocadores de calor 20 cm e 40 cm, nos valores de 1,54K e 0,39K, respectivamente.

Efeito sobre o Superaquecimento – Linha de Sucção

Verifica-se um aumento gradual no superaquecimento com a troca de calor entre a linha de sucção e linha de líquido. A introdução do SLHX de 20 cm representou um aumento de 3,78% no superaquecimento em relação ao funcionamento convencional do freezer, enquanto o SLHX de 40 cm proporcionou um aumento de 8,38% neste mesmo ponto. Quando comparado os pontos anterior e posterior ao SLHX verifica-se que o aumento no superaquecimento provocado pelos trocadores de calor de 20 e 40 cm são valores bem próximos, 3,21K e 3,77K, respectivamente.

Efeito sobre a capacidade frigorífica

Verifica-se que o ciclo de refrigeração com a introdução do trocador de calor possui um aumento na sua capacidade frigorífica, provocado pelo o aumento no sub-resfriamento na entrada do dispositivo de expansão. Em termos percentuais, comparando as médias obtidas, o aumento da capacidade frigorífica provocada pela troca de calor entre a linha de sucção e a linha de líquido no SLHX de 20 cm foi de 12,65%, enquanto que no SLHX de 40 cm esse aumento foi de apenas 3,20%. A Fig. 6 apresenta valores da relação entre a capacidade frigorífica no ciclo de refrigeração com e sem a presença do SLHX para cada ensaio.

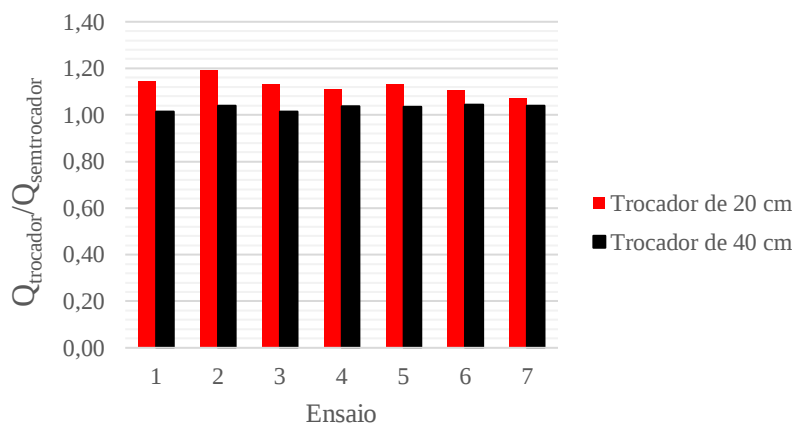


Figura 6. Resultado da relação entre as capacidades frigoríficas.

Efeito sobre a potência de compressão

Observa-se um aumento da potência elétrica provocado por uma elevação na potência de compressão para os cenários com a presença do trocador de calor no ciclo. Observa-se que o aumento no superaquecimento como afirma Dossat (2004) influenciou em um aumento da potência de compressão devido ao aumento do volume específico do fluido refrigerante na entrada do compressor. Apesar da elevação da temperatura na sucção do ciclo de refrigeração com o SLHX de 40 cm ter sido maior, este apresentou um aumento do consumo de potência elétrica quando comparado ao funcionamento convencional do freezer, no valor percentual de 3,74%, inferior ao aumento provocado pelo trocador de calor de 20 cm, que influenciou em uma elevação na potência de 9,05%. A Fig. 7 apresenta valores da relação entre a potência de compressão no ciclo de refrigeração com e sem a presença do trocador de calor entre a linha de sucção e a linha de líquido para cada ensaio.

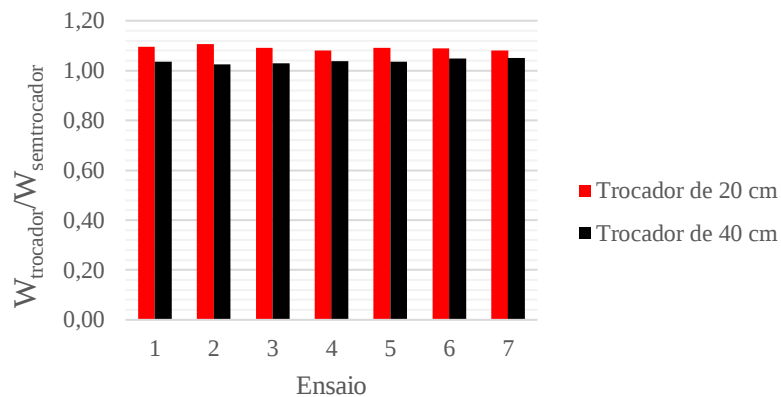


Figura 7. Resultado da relação entre as potências de compressão.

Efeito sobre a Coeficiente de Performance

É perceptível que o aumento da capacidade frigorífica é compensado pelo aumento da potência de compressão, tornando a variação do coeficiente de performance pequena. Apesar disso a proporção do aumento na compressão provocado pela presença do SLHX de 20 cm entre as linhas de sucção e líquido em 6 dos 7 ensaios é menor que a proporção do aumento na capacidade de refrigeração, desta forma tornando o coeficiente médio 3,57% maior que o modo de funcionamento convencional do freezer. Já a utilização do SLHX de 40 cm apresentou uma redução 0,71%. Para uma melhor visualização a Fig. 8 apresenta valores da relação entre os valores encontrados para o coeficiente de performance do ciclo de refrigeração com e sem a presença do trocador de calor entre a linha de sucção e a linha de líquido para cada ensaio.

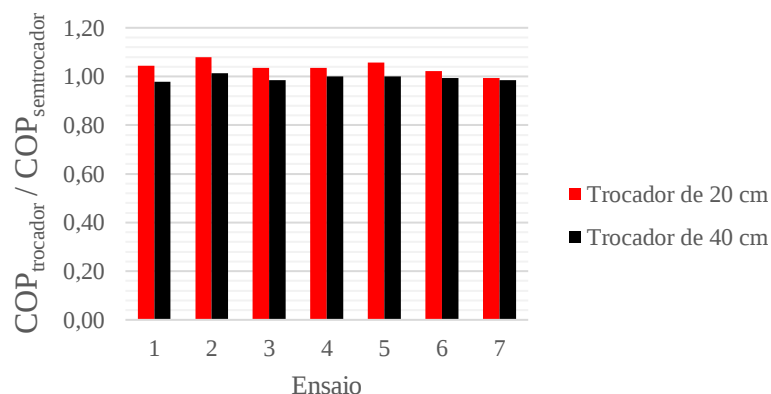


Figura 8. Resultado da relação entre os valores de COP.

O aumento da capacidade frigorífica provocou uma redução no tempo de resfriamento para atingir a temperatura de -18°C. A Figura 9 apresenta o comportamento da temperatura em função ao tempo, para três ensaios, um para cada tipo de cenário, com a mesma temperatura interna inicial, igual a 25,4°C.

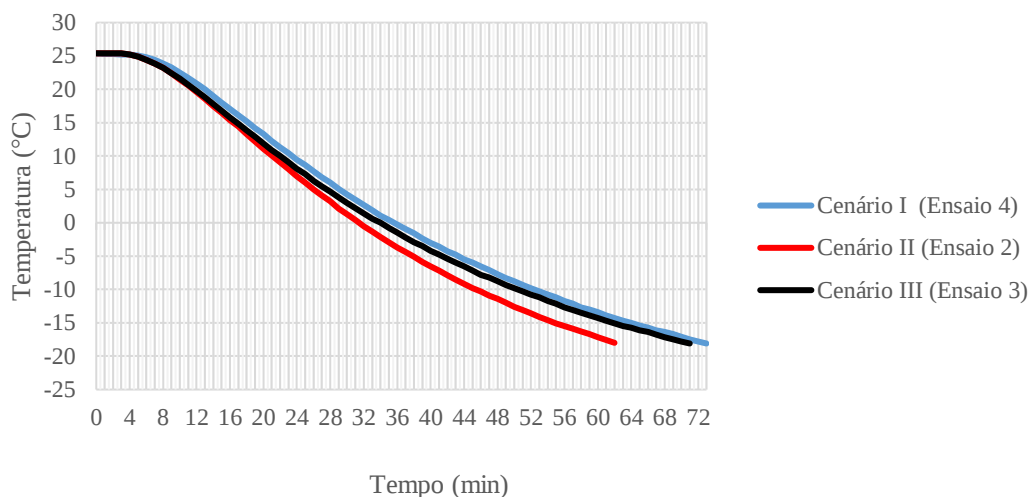


Figura 9. Comportamento da temperatura interna (°C) em função do tempo (minutos).

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o comportamento termodinâmico de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor (freezer) utilizando R-134a como fluido refrigerante, comparando um ciclo convencional do equipamento e ciclos utilizando trocadores de calor entre a linha de sucção e a linha de líquido. Os trocadores ensaiados tiveram 20 cm e 40 cm de comprimento.

Após a realização dos 7 ensaios para cada um dos cenários estabelecidos, foi possível comparar a velocidade de resfriamento e a eficiência termodinâmica dos ciclos de refrigeração experimentados.

A introdução dos trocadores de calor entre a linha de sucção e a linha de líquido de 20 cm e de 40 cm, apresentou um aumento de 3,78% e 8,38%, respectivamente, no superaquecimento total do ciclo. Para o componente de 20 cm, este aumento no superaquecimento foi de forma útil, já que a troca de calor provocada proporcionou um aumento de 38,68% no sub-resfriamento do ciclo. Este aumento no sub-resfriamento proporcionou também um aumento na capacidade frigorífica do equipamento para aproximadamente 216 W.

Portanto, conclui-se que, a utilização do SLHX com um comprimento de 20 cm, foi a melhor opção entre as estudadas, devido ao aumento da capacidade frigorífica em 12,65%. Consequentemente obteve-se uma variação pequena, mas significativa do coeficiente de performance, assim como uma redução de 11 minutos no tempo de operação gasto para atingir a temperatura de -18°C.

6. REFERÊNCIAS

- Domanski, P. A., Didion, D. A. and Doyle, J. P., 1994, "Evaluation of suction-line/liquid-line heat exchange in the refrigeration cycle". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 17, No. 7, pp. 487-493.
- Dossat, R. J., 2004, "Princípios de refrigeração", Ed. Hemus, São Paulo, Brasil, 884 p.
- Klein, S. A., Reindl, D. T. and Brownell, K., 2000, "Refrigeration system performance using liquid-suction heat exchangers". *International Journal of Refrigeration*, Vol. 23, No. 8, pp. 588-596.
- Schurt, L. C., 2009, "Modelagem matemática e controle multivariável de sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor", Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC.
- Mastrullo, R., Mauro, S. T., and Vanoli, G.P., 2007, "A chart for predicting the possible advantage of adopting a suction/liquid heat exchanger in refrigerating system". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 14, p. 2443-2448.
- Neto, J. H. M.; Veloso, A. H. B. e Fernandes, A. F. C., 2006, "Simulação Computacional simplificada de sistemas de Refrigeração por compressão a vapor". *Simpósio de pós-graduação em Engenharia Mecânica*, Uberlândia - MG. Anais do XVI. Uberlândia: UFU, 2006.
- Tebchirani, T. L., 2011, "Análise termodinâmica experimental de um sistema de ar condicionado split utilizando um trocador de calor linha de sucção/linha de líquido", Dissertação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR.
- Yadav, G. M. P., Prasad, P. R. and Veeresh, G., 2015, "Experimental Analysis of Vapour Compression Refrigeration System with Liquid Line Suction Line Heat Exchanger by Using R134A and R404A". *International Journal of Scientific Research and Management Studies (IJSRMS)*, Vol. 1, No. 12, pp. 382-395.
- Waykole, C. P.; Dange, H. M., 2014, "Performance Evaluation of Water Cooler with Modification of Liquid Suction Heat Exchanger". *International Journal of Current Engineering and Technology*, Special Issue - 3, p. 226-229.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A REFRIGERATION CYCLE OF VAPOR COMPRESSION WITH A HEAT EXCHANGER BETWEEN THE SUCTION AND LIQUID LINES

Leonardo de Souza Santana, leonardosantana800@gmail.com¹

José de Castro Silva, castro.silva@univasf.edu.br¹

Luiz Mariano Pereira, luiz.mariano@univasf.edu.br¹

¹Universidade Federal do Vale do São Francisco, Mechanical Engineering Department, Antônio Carlos Magalhães Ave, 510, CEP. 48902-300, Juazeiro, Bahia, Brasil.

Abstract: Vapor-compression refrigeration systems require a significant amount of electrical energy. Therefore, there is a need for finding efficient ways of operating these equipment, reducing their energy consumption. The use of heat exchangers between the suction line and the liquid line can produce a better performance of the thermodynamic cycle, as well as reduce it. The present work aims at an experimental analysis of the suction/liquid heat exchanger present in a freezer running with refrigerant fluid R-134a. Three different scenarios were used in order to evaluate the thermal performance of the refrigeration cycle. The first scenario was the conventional freezer set up to collect the required data for further comparison. Moreover, the second and third scenarios were introduced with a 20 cm and 40 cm suction/liquid heat exchanger, respectively, into the system. From the experiments, it was observed that the heat exchange does not significantly affect the coefficient of performance (COP) of the freezer. It was concluded from this work that the best scenario analyzed was the 20 cm suction/liquid heat exchanger where most of the thermodynamic properties were improved.

Keywords: Freezer, R-134a, Heat exchanger, COP.