

Novo Mini-Refrigerador Portátil III: Sistema Expansivo do Ciclo de Refrigeração

Lucas Pires de Lima¹, Douglas Elias Cortiço¹, Lucas José Blaskovski¹,
Carlos Leopoldo Ehrat Junior¹, Diego Alves de Miranda¹

¹Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE),
CEP 89.288-385 - São Bento do Sul, SC - Brasil.

lucas.pires@edu.sc.senai.br, douglascortico@gmail.com,
lucasblaskovski@gmail.com, Juninho307@yahoo.com.br,
diegoalves_klx@hotmail.com

Resumo. Desde 1856 após o surgimento da primeira máquina refrigeradora, que usava o princípio da compressão de vapor, vem se estudando outras formas de refrigeração, porém como fazer isso de forma inovadora e competitiva nos dias atuais, talvez essa seja a maior incógnita existente. Levando em consideração o tema refrigeração, este artigo tem a finalidade de criar um diferenciado sistema compacto de resfriamento, neste caso um mini refrigerador portátil. Para tal equipamento, precisam-se dimensionar os três principais itens que o compõe, como o condensador, a válvula expansora e o compressor. Como todo o projeto é algo que obtém certa complexidade, neste artigo será abordado somente o projeto e execução da válvula expansora, que tem a função de regular a passagem do fluido refrigerante até o evaporador, gerar uma perda de pressão para que possa ser evaporado e controlar o superaquecimento do sistema. Para dimensioná-la, é necessário combinar a capacidade de refrigeração com a capacidade do evaporador. O sucesso na construção do dispositivo válvula expansora, combinou perfeitamente no conjunto, uma vez que o mini refrigerador portátil ficou com a capacidade de refrigerar até a temperatura de 0 °C, com um design compacto e baixo custo de fabricação.

Palavras Chave: Refrigerador; Válvula de Expansão; Dimensionamento.

Introdução

A necessidade de manter a cadeia do frio intacta é essencial para a qualidade de produtos sendo compreendida desde o seu armazenamento até o cliente final. A perda de qualidade dos produtos por uma falha nesse sistema é extremamente crítica, uma vez que a temperatura influencia diretamente em reações químicas e microbiológicas nos produtos armazenados e/ou conservados. (PEREIRA, et al. 2010; ACKERLEY; SERTKAYA; LANGE, 2004). Além da necessidade de conservação de alimentos, o condicionamento de ar possui uma vasta gama de aplicações que vão desde residenciais até industriais, sendo essas para conforto e tratamento de ar, estão cada vez mais relevantes e necessários para a sociedade (LAGO, 2016). Com isso utilizou-se uma parcela dos conceitos de refrigeração para elaboração do projeto mini-refrigerador.

O intercambiador de calor utilizado, ficou localizado a frente do evaporador, e tendo a função de separar a linha de alta e baixa pressão no mini-refrigerador. Devido a sua alta resistência ao fluxo, ele restringe ou regula a passagem do refrigerante líquido, desde o condensador até o evaporador. Para a construção deste dispositivo foi utilizado o

material cobre, devido suas propriedades serem mais adequadas ao processo variando o seu diâmetro interno de 0,5mm a 2mm, levando em consideração que quanto maior for o comprimento ou menor o seu diâmetro, maior será a queda de pressão gerada por ele. O objetivo é manter a temperatura do conjunto à aproximadamente 0°C com uma capacidade de armazenamento de 32L.

Dispositivo de Expansão

O dispositivo de expansão é usado nos sistemas de refrigeração, e está localizado entre a saída do condensador e a entrada do evaporador, tendo como sua função principal reduzir a pressão do líquido refrigerante, conseqüentemente reduzindo também sua vazão, tornando possível que o refrigerante evapore no evaporador a uma temperatura mais baixa. Atualmente existem diversos tipos de dispositivos de expansão, como por exemplo: válvula de expansão automática, válvula de expansão termostática, válvula de expansão eletrônica, válvula e expansão manual e muitas outras.

Metodologia

Para a finalidade da construção do refrigerador, a metodologia foi a construção de um protótipo que segundo Frascati (2002) na visão do P&D, é o desenvolvimento de um produto original que possui todas as qualidades técnicas e características de funcionamento de um novo produto. Porém, contrastando a visão do autor, o intuito do trabalho se limita ao desenvolvimento de um refrigerador convencional e não de um novo produto, no qual foram dimensionados para o perfeito funcionamento do sistema, especificamente a válvula de expansão, componente abordado no trabalho.

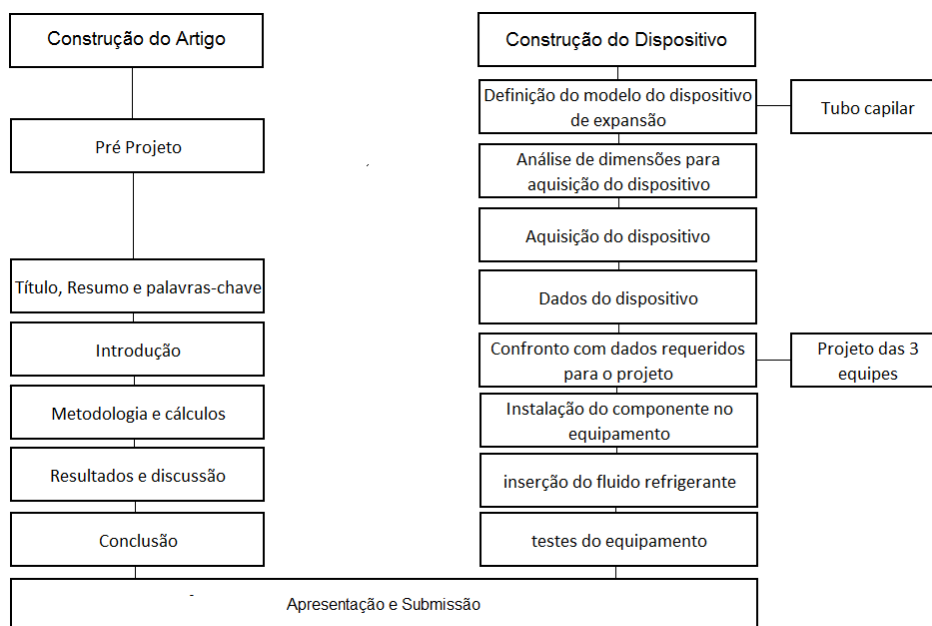


Figura 1. Fluxograma de construção. (Fonte Primária, 2019).

Conforme mostra a Figura 1 referente ao fluxograma de construção, o projeto foi dividido em dois pilares principais, sendo um deles a construção do artigo referente ao mini refrigerador com foco no dispositivo de expansão e o outro pilar a construção do próprio mini refrigerador.

Etapas de Construção

Para a construção do sistema de expansão, foi optado pela reutilização de um sistema de expansão de um aparelho de refrigeração descartado. O sistema consiste em um tubo capilar, sendo esse uma alternativa simples e de baixo custo, bem como o fácil manuseio. (COSTA, 2014). Além disso, adotou-se também que o regime de refrigeração fosse constante, onde o componente é mais apropriado e de regulação fixa (GUIMARÃES, 2011; COSTA, 2014).

Detalhamento do Projeto em CAD

Para o acondicionamento do dispositivo no mini-refrigerador, foi necessário o trabalho em conjunto com os outros componentes do sistema, para que as medidas de alojamento fiquem de acordo para cada dispositivo. O primeiro passo foi a definição da temperatura desejada e do tempo de resfriamento. A intenção do equipamento é de resfriar um produto qualquer (a temperatura ambiente) a zero graus Celsius em um período de uma hora. Chegou-se a um dimensionamento de 529mm de comprimento, 334mm de profundidade, 724mm de altura e uma capacidade volumétrica de armazenamento de $0,06\text{m}^3$. Após isso feito, construiu-se o projeto em CAD, conforme Figura 2.

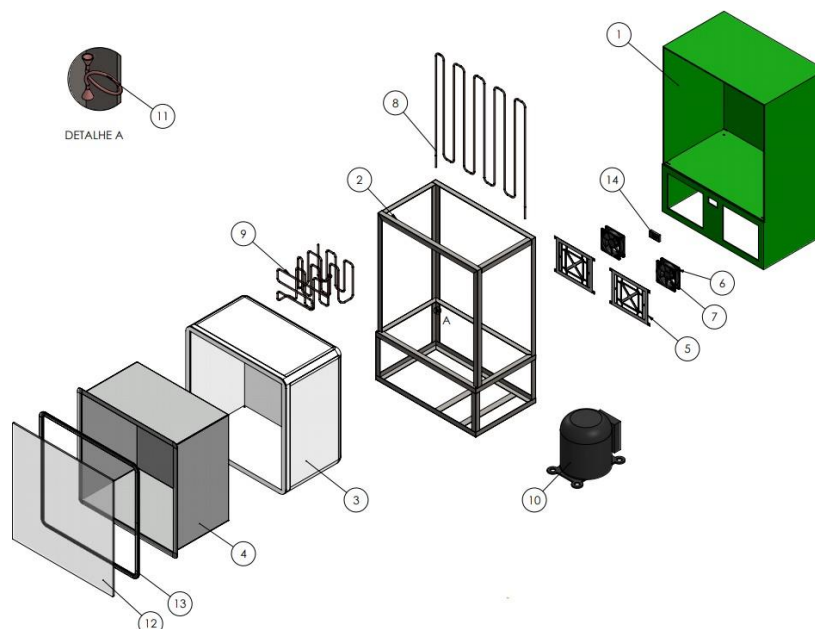


Figura 2. Vista explodida do projeto. (Fonte Primária, 2019).

Na Figura 2, fica mais claro aonde cada peça foi montada no mini refrigerador. Cada peça foi numerada de 1 a 14 para facilitar o entendimento entre a Figura 2 e a Tabela 1.

Tabela 1. Lista dos componentes do novo mini-refrigerador portátil

Número	Descrição	Número	Descrição
1	Revestimento Externo	8	Evaporador
2	Estrutura Metálica	9	Condensador
3	Isolante Térmico	10	Compressor
4	Revestimento Interno	11	Tubo Capilar
5	Grade de proteção	12	Porta de vidro temperado
6	Suporte da Ventoinha	13	Borracha de vedação
7	Ventoinha	14	Visor de Temperatura

(Fonte Primária, 2019)

Este trabalho baseia-se na construção e montagem da peça número 11. A representação do posicionamento do tubo capilar inserido no projeto é complementada na Figura 3.

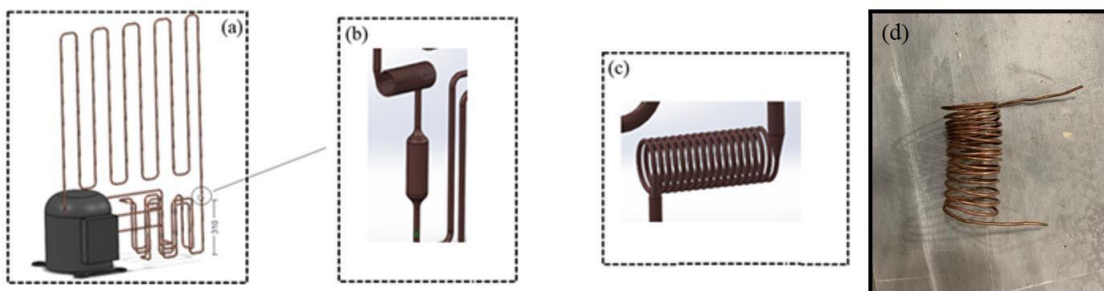


Figura 3. Representação do tubo capilar. a) Montagem do sistema de tubulação. b) Localização. c) Desenho do tubo capilar. d) Tubo capilar (Fonte Primária, 2019).

O sistema utilizado é fabricado de uma liga de cobre no qual há uma redução da passagem do fluxo do fluido refrigerante de um diâmetro para aproximadamente 0,8 mm com comprimento de aproximadamente 3m. O componente foi soldado na tubulação do evaporador e do condensador, de maneira que não houve vazamentos do fluido refrigerante (Figura 3).

Para a construção do artigo foi de extrema importância acompanhar a construção do projeto físico, para poder obter as evidências e resultados reais sobre o equipamento e como o dispositivo de expansão iria se comportar com todo o conjunto mostrado na Figura 3.a.

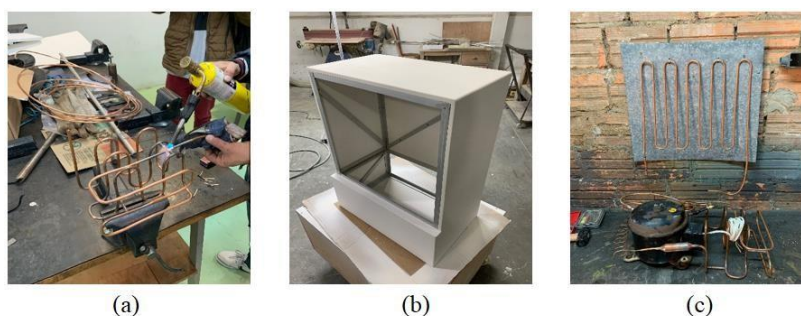


Figura 4. Montagem Mini Refrigerador a) Montagem do evaporador. b) Revestimento externo do mini refrigerador. c) Montagem do sistema de tubulação completa (Fonte Primária, 2019).

Já na construção do dispositivo de expansão, a primeira dificuldade foi definir o modelo do mesmo, que devido as circunstâncias do projeto escolhemos o tubo capilar. Logo após a definição do dispositivo, obtivemos o tubo capilar vindo de um refrigerador que não estava em funcionamento.

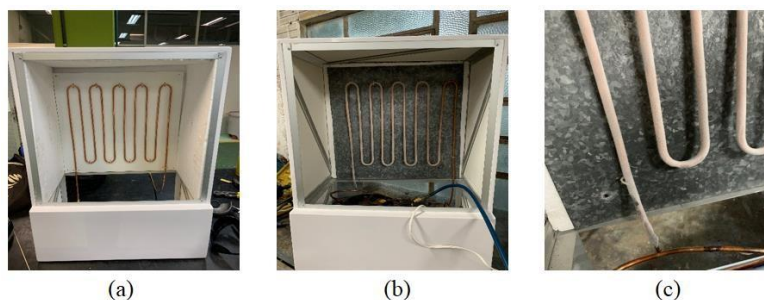


Figura 5. Montagem do Refrigerador. a) Posição do Evaporador no Projeto. b) Evaporador formando uma camada de gelo c) Saída do evaporador formando película de gelo. (Fonte Primária, 2019).

Logo em sequência foi a junção de ambas as partes do projeto para formar o mini refrigerador e coletar os dados finais. As etapas de construção do mini refrigerador se desencadearam no seguinte fluxo: o componente de expansão selecionado foi um tubo capilar, reutilizado de um refrigerador que não estava em funcionamento. Através de ferramentas manuais foi extraído tal dispositivo do equipamento para ser agregado no projeto do mini refrigerador.

Para a construção do Mini Refrigerador Portátil foi feita a separação em equipes, onde cada grupo foi responsável por construir ou obter uma parte do projeto, partes essas que estão retratadas na Figura 2. Durante o andamento do projeto foi feito a junção de cada parte do Mini Refrigerador para alcançar os resultados esperados do mesmo. Na Figura 6 é possível ver o Mini Refrigerador já em funcionamento, formando até mesmo uma pequena película de gelo sobre a serpentina do evaporador.

Equações e métodos de dimensionamento do tubo capilar

O ciclo de refrigeração por compressão se resume as seguintes equações:

- Trabalho do compressor (W_c)

$$W_c = m. (h_4 - h_3) \quad (1)$$

Onde (m) é a vazão mássica de refrigerante e (h_4, h_3) são respectivamente as entalpias específicas do refrigerante na sucção do compressor e saída do evaporador.

- Calor adicionado no Evaporador (Q_{entra}) (Capacidade Frigorífica)

$$Q_e = m. (h_3 - h_2) \quad (2)$$

Onde (m) é a vazão mássica de refrigerante e h_2, h_1 são respectivamente suas entalpias específicas do refrigerante na descarga do compressor e na entrada do evaporador.

- Calor Rejeitado no Condensador (Q_{sai})

$$Q_s = m. (h_4 - h_1) \quad (3)$$

Onde (m) é a vazão mássica de refrigerante e h_4, h_1 são respectivamente suas entalpias específicas do refrigerante na saída do condensador e na entrada do tubo capilar.

- Coeficiente de desempenho (COP)

$$COP = \frac{Q_{entra}}{W_c} \quad (4)$$

O estrangulamento gerado no tubo capilar, gera um processo de expansão considerado isentálpico, onde a entalpia permanece a mesma no sistema:

- Válvula de Expansão

$$h_2 = h_1 \quad (5)$$

Um dos métodos mais utilizados para o dimensionamento é recomendado pela ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating And A-C Engineers*, que traduzido do Inglês significa Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado, que fornece gráficos e tabelas para diversos fluidos refrigerantes com seus dados experimentais. Para o sistema de refrigeração, foi utilizado o R134a como gás refrigerante que, segundo Quintero, Mahecha e Aristizábal (2018) esse gás possui as seguintes características no que diz respeito a temperatura: 45° C na temperatura de condensação, 3°C na temperatura de evaporação e 18°C na mudança de estado para gasoso. Já o compressor utilizado possui a potência de 1/8 cv,

aproximadamente 93 watts. Com esses dados foi possível calcular o tamanho do componente capilar em seu comprimento e diâmetro interno, com o auxílio de um software para cálculos desse sistema específico, conforme mostra a figura a seguir.

Auxílio de Software

O método através de software consiste na utilização do programa de cálculo de tubos capilares da DANFOSS, chamado “DANCAP”. Nele é possível inserir os dados técnicos que já possuímos, como a capacidade frigorífica (potência do compressor), e as três temperaturas fornecidas através da tabela técnica do R134a, de evaporação, condensação e de retorno.

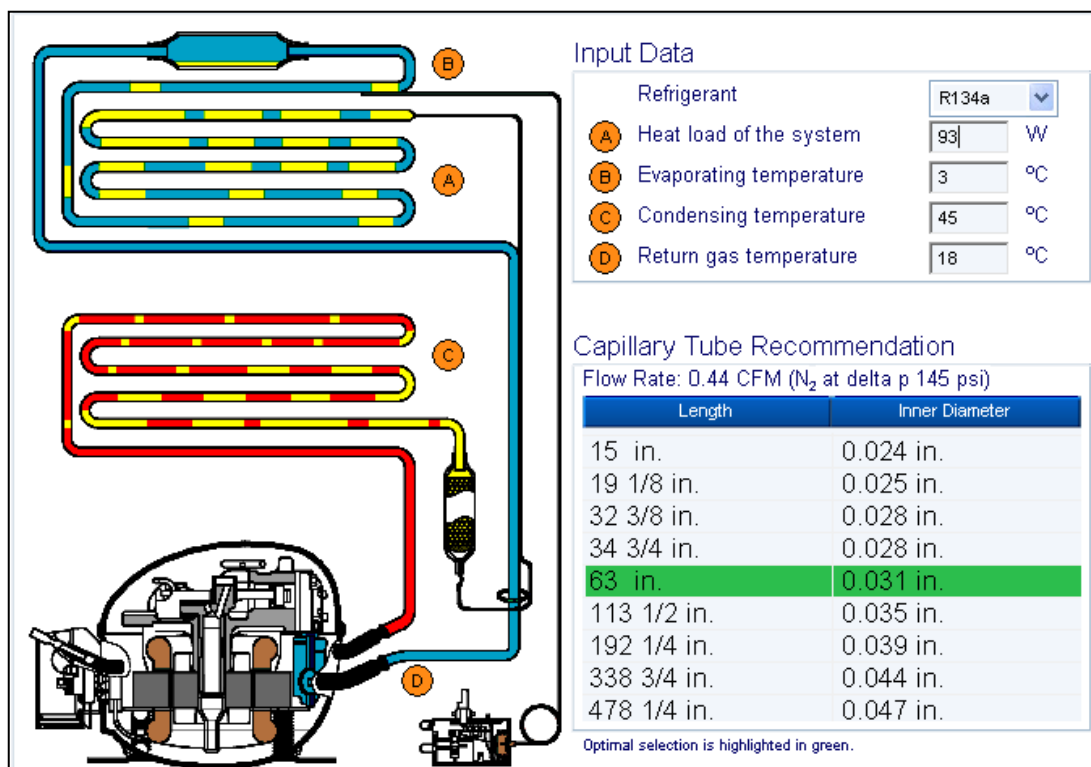


Figura 6. Dimensionamento através do software (Fonte Primária, 2019)

O dimensionamento conforme mostra a Figura 6, estabelece destacado em verde a opção mais adequada ao sistema. Dessa forma o capilar deve ter 58.¼” polegadas de comprimento, aproximadamente 1,48 metros, e 0,031 polegadas milésimas de diâmetro, 0,8 milímetros aproximadamente.

Método pelo Diagrama de Mollier

Para assegurar a integridade dos cálculos obtidos através do software, utilizou-se de mais uma ferramenta para cálculo do comprimento do tubo, através da diferença de pressão ΔP , ou seja, a diferença entre as pressões de entrada e saída no tubo capilar. Para obtenção dessas pressões, utilizou-se do DIAGRAMA DE MOLLIER, do refrigerante R-134a. Essa tabela nos mostra a relação entre pressão e temperatura do fluido. Com as temperaturas de evaporação e condensação, 3°C e 45°C respectivamente.

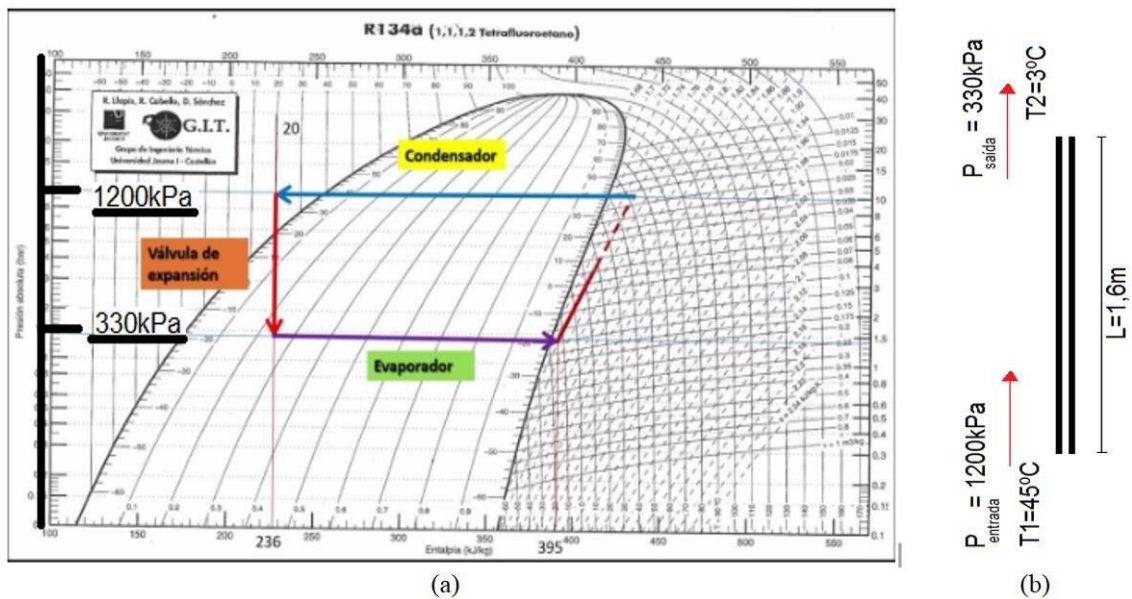


Figura 7. Diagrama de Mollier. a) Coleta de informações. b) Temperaturas de Entrada e Saída (Fonte Web, 2019).

Como o gráfico de MOLLIER não nos trás uma precisão na definição das pressões de entrada e saída do tubo capilar, utilizamos dos dados da tabela de algoritmos numéricos, que nada mais é do que os dados retirados através do MOLLIER mas com precisão de 2 a 3 casas decimais.

Vantagens e Desvantagens do Mini Refrigerador

A primeira vantagem a ser observada neste equipamento, é em relação as suas dimensões, por ser menor e mais leve do que os existentes no mercado, facilita no seu deslocamento de um local para outro e também se adequa em comodos de pouco espaço. Outra vantagem do mesmo, seria em relação a fácil manutenção do equipamento, devido ao fácil acesso aos componentes.

Porém temos algumas desvantagens deste refrigerador, talvez como principal delas devido a sua dimensão reduzida, ele tem um volume de armazenamento menor que os demais refrigeradores.

Resultados

Através do teste realizado após o circuito montado e devidamente soldado, a temperatura média coletada no evaporador através da utilização de um termômetro ficou em torno de $-3,0^\circ\text{C}$, lembrando que a temperatura através de cálculo era de 3°C positivo. Já a temperatura no condensador medida ficou em torno de 55°C – temperatura de cálculo de 45°C .

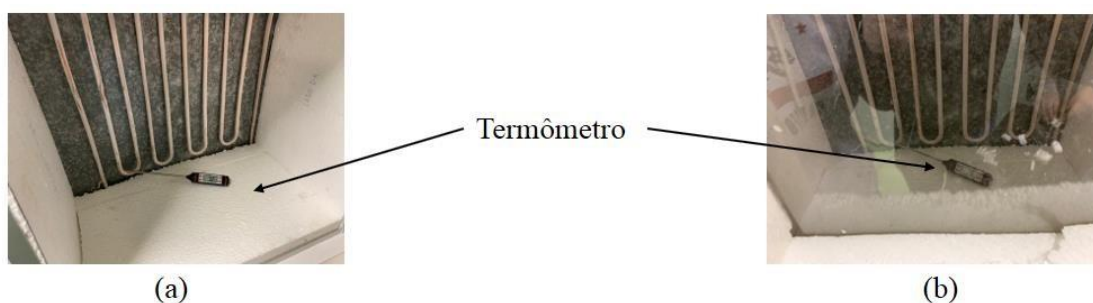


Figura 8. Coleta de Dados Experimentais Mini Refrigerador. a) e b) Posicionamento do

Termômetro. (Fonte Primária, 2019).

Com estes resultados, foi possível comparar os resultados experimentais e os valores coletados através do software bem como os cálculos (Tabela 2).

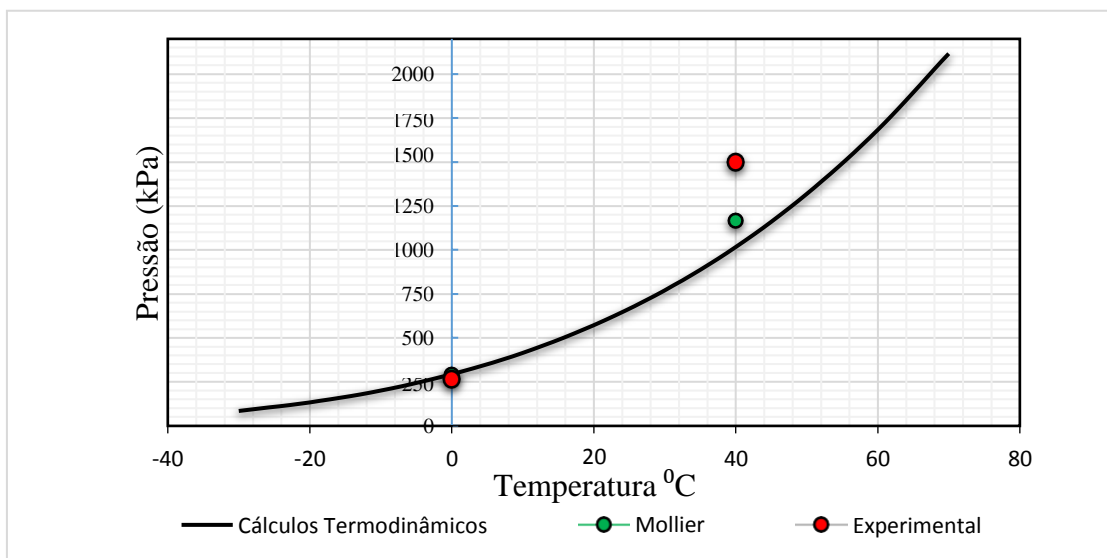
Tabela 2. Comparativo dados teóricos e experimentais.

Número	Descrição	Software	Dados Experimentais	Diagrama de MOLLIER
A	Potência do Compressor	93W	93W	93W
B	Temperatura no Evaporador	3°C	-3°C	-1°C
C	Temperatura no Condensador	45°C	55°C	52°C
D	Temperatura de retorno p/ Compressor	18°C	7°C	12°C

(Fonte Primária, 2019).

Os resultados experimentais trouxeram dúvidas quanto ao dimensionamento do dispositivo. Jogando os valores experimentais novamente no software, descobrimos que houve uma diferença na questão dos dados dimensionais. (Figura 6). Se fosse para dimensionar o dispositivo com os valores encontrados experimentalmente, notamos que o diâmetro interno do tubo capilar calculado através do software seria de 0,026 polegadas, ou seja aproximadamente 0,66 mm, ao invés dos 0,78 mm calculados inicialmente. Isso nos remete que a diferença de pressão experimental foi maior do que a diferença de pressão calculada, portanto teríamos um tubo capilar de menor diâmetro.

Figura 10. Pressão x Temperatura. (Fonte Primária, 2019).



A Figura 9 demonstra os resultados calculados empiricamente bem como os resultados encontrados no diagrama de Mollier comparados com os resultados experimentais. A diferença de pressão demonstrada experimentalmente, reflete ao tamanho diferenciado do diâmetro interno, pois o estrangulamento influencia diretamente na pressão do fluido termodinâmico.

Outro dado importante a ser observado, foi em relação ao custo de fabricação deste mini refrigerador, que ficou em torno de R\$800,00. Porém tem-se que considerar que este valor foi para a fabricação do prototipo deste refrigerador, ou seja, se o mesmo for fabricado em série, esse custo será reduzido.

Conclusões

Neste artigo foi possível desenvolver um estudo em relação a criação de um mini refrigerador, focando no dispositivo de expansão, o qual é responsável por expandir o fluido refrigerante, reduzindo sua pressão, desde a linha de líquido até uma pressão de

condensação. Foi analisado os tipos de dispositivos de expansão e de acordo com a aplicação do equipamento, o mais viável para o projeto veio a ser o tubo capilar, por ser simples e de fácil aquisição e possibilitar o uso de um compressor com motor de baixa potência, ou seja, compressor de baixa capacidade. Por outro lado, tem-se como desvantagem a capacidade limitada de regular o fluxo do refrigerante por ser apenas um tubo.

Para a escolha do tubo capilar coerente para o equipamento, foi necessário definir algumas dimensões específicas do dispositivo, tal como diâmetro interno e comprimento. Com o auxílio de um software para dimensionamento de capilares e cálculos específicos foi possível obter tais medidas, e também valores de temperatura de condensação e evaporação aproximadas que o mini refrigerador iria gerar, comparando assim os resultados de ambos os métodos. Tanto para os dados experimentais quanto no software foi considerado utilizando o refrigerante R-134a.

Com base nos cálculos realizados e dados obtidos experimentalmente, conclui-se que é possível um dimensionamento teórico para um dispositivo de expansão, pois tanto os dados teóricos e experimentais chegaram bem próximos do esperado para o mini refrigerador.

Para um projeto futuro sugere-se a utilização de outros tipos de refrigerantes, para com isso poder fazer mais comparações e obter um desempenho ainda melhor nesse processo de refrigeração.

Referências

ACKERLEY, N.; SERTKAYA A.; LANGE R.; Food transportation safety: characterizing risks and controls by use of expert opinion, *Food Protection Trends*, v. 30, n. 4, 212-222, 2010.

CASTRO, S. J. Apostila de refrigeração. Universidade Federal do Vale do São Francisco. Petrolina, Pernambuco, 2014.

ELGIN, Boletim técnico, Calculando superaquecimento e subresfriamento, Trimestral, edição, 08/08.

FERZOLA, J. F.; Análise global de um sistema de refrigeração industrial. Porto Alegre, 2010. Trabalho de conclusão do curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

IORELLI, F. A. S. Análise do escoamento de fluidos refrigerantes alternativos ao HCFC22 em tubos capilares adiabáticos. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

GUIMARÃES, L. G. M.; Modelagem e construção de protótipo de refrigerador por absorção de vapor de baixa potência operando com o par água-brometo de lítio e utilizando fontes térmicas de baixa temperatura, Dissertação de Pós-graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de São João Del-Rei, 2011.

LAGO, T. G. S. do; Estudo experimental e controle de um sistema de refrigeração com compressor de velocidade variável e válvula de expansão, Dissertação de mestrado em mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2016.

LAUAND, C. A, Manual prático de geladeiras, Refrigeração Industrial e Residencial, São Paulo, SP, 2004.

OECD, Manual de frascati, Tipo de metodologia porposta para levantamento sobre pesquisa e desenvolvimento experimental, 2002.

MARCHI, D. Uma análise experimental do desempenho de trocadores de calor tubo capilar-linha de sucção aplicados em refrigeradores domésticos, Florianópolis, SC, 2018, Trabalho de conclusão do curso, Universidade Federal de Santa Catarina.