

Análise de uso de tubos capilares em um sistema de refrigeração.

Guilherme Silva de Freitas

Jonathan Vieira Pessoa

Wellington do Santos Rodrigues

Guisenai2016@gmail.com

Jonvp21@gmail.com

wellingtondriques2008@hotmail.com

Luciene Vanessa Maia da Rocha Judice

Engenharia Mecânica

Resumo - Este estudo de comportamento de tubo capilar como dispositivo de expansão, tem como princípio analisar e demonstrar o funcionamento do mesmo em um sistema de refrigeração simples, visando um comportamento estável para que o circuito de refrigeração funcione corretamente, buscando sempre o melhor rendimento e funcionamento de cada componente que compõe o circuito, já que o dispositivo citado tem função semelhante a válvulas de expansão, porém um funcionamento diferente, já que sua vazão é contínua e não dispõe de aparatos de regulagem durante o processo como as válvulas eletrônicas ou termostáticas, dificultando assim sua precisão quando exposto a variações.

1. Introdução

Este trabalho se trata de um estudo de dimensionamento e simulação de tubos intercambiadores de calor, tubos esses que são usados como aparato de expansão em ciclos de refrigeração.

O ciclo de refrigeração mais utilizado no ramo industrial e comercial é o sistema de compressão a vapor. Basicamente esse ciclo é composto pelo compressor que é o responsável pela compressão de um fluido, que em alta pressão entra no condensador responsável pela troca de calor com o ambiente externo, assim condensando o fluido em alta pressão.

Após a condensação, o fluido segue até o aparato de expansão podendo ser tubos capilares, válvulas de expansão eletrônica ou mecânicas dependendo da aplicação, assim, após a expansão o fluido tem uma perda brusca de calor e pressão, e então o fluido passará no evaporador onde é retirada temperatura do ambiente interno antes de retornar em estado de vapor para o compressor.

Obtendo como base para este estudo, um resfriador de água, utilizado para resfriamento rápido. Este equipamento tem a capacidade de atingir a temperatura da água em 2 graus em tempo estimado de 20 minutos. Sendo assim, propõe-se como

objetivo principal desse trabalho, um estudo de comportamento do intercambiador de calor no sistema de refrigeração deste resfriador de água de grande volume, avaliando seu rendimento, de acordo com estudos de vazão mássica e necessidades térmicas.

Além dos objetivos específicos, como por exemplo definir seu comprimento e seu diâmetro, com estudos feitos através de um software e catálogos, analisando o rendimento em determinadas condições, que seriam testes de aferição do superaquecimento e sub-resfriamento em sala com temperatura controlada de 16°C à 40 °C, e em local aberto com temperatura ambiente.

Além do mais o trabalho, se justifica pelo fato do equipamento escolhido para dimensionamento do capilar, atualmente utilizar válvula de expansão eletrônica como aparato de expansão, por ser um componente que se adapta as variações do equipamento, porém deixando o custo de fabricação elevado, e por utilizar uma tecnologia acima do necessário. Sendo assim foi analisado a melhor combinação de um tubo capilar como mecanismo de expansão para atender as mesmas condições atuais do equipamento.

2. Referencial teórico

2.1 História da refrigeração

Refrigeração é conhecida como remoção artificial de temperatura de um ambiente ou produto, reduzindo sua temperatura e mantendo essa condição com utilização de meios mecânicos ou naturais. As aplicações da refrigeração são abrangentes tais como conservar alimentos ou condicionador de ar e climatização. (Jesué Graciliano, 2018).

Civilizações antigas já usavam neve e o gelo natural para resfriar suas bebidas há mais de dois mil anos, além de deixar enterrados animais pequenos para o consumo posterior de sua carne. (Jesué Graciliano, 2018).

Por volta do século XIX o homem começou a desenvolver interesse pela criogenia dos gases, que seria a particularidade de subtrair o calor de um sistema quando submetido a expansão. Ainda nessa mesma época era impossível armazenar carnes e outros alimentos em grande escala, portanto em 1804, iniciou-se o transporte desses alimentos com a utilização de gelo natural retirado das geleiras representado na Figura 1, mas em contrapartida havia um grande empecilho em adquirir gelo dessa

localidade, e somado a esse problema também havia o fator do derretimento natural do gelo. (Jesué Graciliano, 2018).



Figura 1: Corte de gelo natural (Fonte: JESUÉ GRACILIANO, 2018).

Cientistas começaram a buscar formas diferentes para produção de gelo. Pode-se afirmar que os pioneiros a obter uma patente de sistema de refrigeração foram, John Gorrie (1803 – 1855) que patenteou um formato de sistema de refrigeração em 1851 com intuito de baixar a febre dos seus pacientes, com um ciclo de circuito fechado de refrigeração que utilizava ar com fluido. A primeira descrição detalhada de um equipamento para produção de gelo foi patenteada em 1834 por Jacob Perkins (1766 – 1849) registrado na Figura 2. No entanto o primeiro maquinário real foi elaborado entre os anos de 1856 e 1857 por James Harrison. (Jesué Graciliano, 2018).

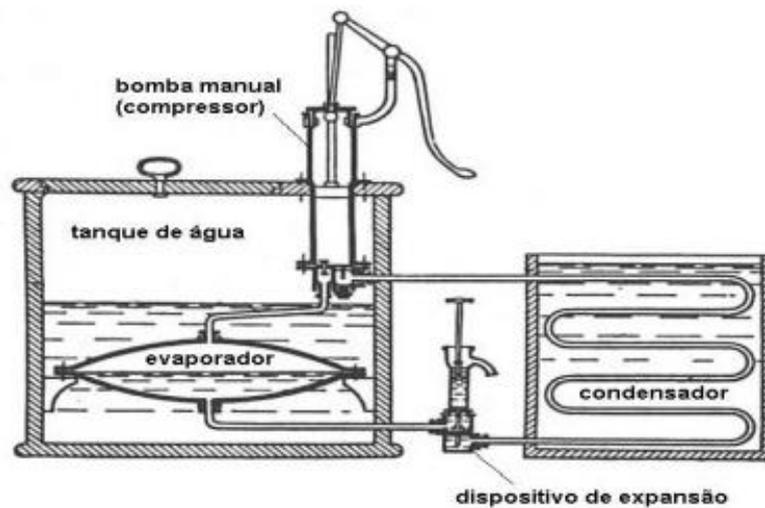


Figura 2: Máquina de gelo Jacob Perkins (1766 – 1849), (Fonte: JESUÉ GRACILIANO, 2018).

Foram desenvolvidos refrigeradores para uso doméstico, logo após o desenvolvimento dos motores elétricos e de muitos anos de aperfeiçoamento de sistemas de refrigeração, e esses maquinários começaram a ser comercializados na segunda década do século XX. Apresentado na Figura 3 um refrigerador elétrico antigo. (Jesué Graciliano, 2018).



Figura 3: Refrigerador antigo (Fonte: JESUÉ GRACILIANO, 2018).

2.1.2 Sistema de Refrigeração

É dado como circuito de refrigeração o sistema fechado que utiliza como fonte de troca de temperatura um fluido, qual se evapora e se condensa dentro do circuito, montando um fluxo positivo por dispositivos quais serão responsáveis por sua mudança de estado físico e por sua queda ou aumento de temperatura. (Castro, 2008).

Basicamente, o circuito de refrigeração consiste na produção de calor, aporte de calor com entrada de trabalho. A entrada trabalho é responsável pelo salto de energia deste ciclo. (Castro, 2008).

Um circuito de refrigeração simples consiste em quatro componentes: Compressor, evaporador, condensador e aparato de expansão apresentado na Figura 4. Entre eles, há a circulação de um fluido, o fluido contém como característica a alta capacidade de absorção e dissipação de calor, ele é responsável pela troca de temperatura entre o produto ou ambiente a ser resfriado e o ambiente externo. (Jesué Graciliano, 2018).

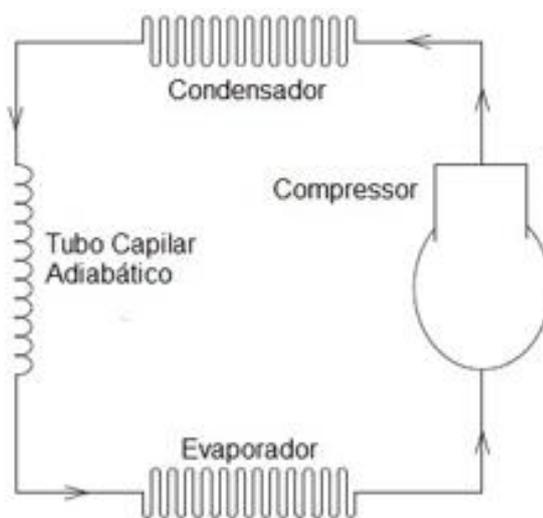


Figura 4: Esquema de um circuito de refrigeração (Fonte: DREAMSTIME, 2021).

2.1.3 Compressor

O compressor tem como função admitir o fluido em baixa pressão e temperatura e comprimi-lo fazendo com que atinja uma alta pressão e temperatura, e direcionando até condensador. (Carel Industries, 2021).

Mesmo sendo o principal componente do sistema o compressor não impõe a desigualdade de pressão entre linha de alta pressão (descarga) e linha de baixa pressão (sucção), ele impõe um fluxo positivo de um fluido. (Carel Industries, 2021).

O trabalho operado pelo compressor, resulta no aumento de temperatura no gás estimado em mais de 100%. (Carel Industries, 2021).

2.1.4 Condensador

Condensador é um trocador de calor, constituído por um circuito de tubos cobre com aletas de alumínio. Sendo o responsável por dissipar calor do circuito para o ambiente externo com auxílio de um ventilador, convertendo o fluído em forma de vapor para líquido a uma pressão e temperatura constante. (Carel Industries, 2021).

Entende-se de forma grosseira, que o fluido perde temperatura devido a passagem pelo circuito do condensador, e pela ação do ventilador ao puxar o ar externo para entre as aletas do condensador. (Carel Industries, 2021).

2.1.5 Mecanismo de expansão

Trata-se de dispositivo de expansão, a restrição imposta por um dispositivo que por meio de um orifício ou tubo de diâmetro calibrado, restringe a passagem do fluxo do fluido refrigerante proveniente do condensador, reduzindo a pressão do líquido refrigerante. O fluido sofre um aumento de velocidade, e queda de sua temperatura, para assegurar que o vapor ao voltar para compressor não esteja aquecido em excesso. (Raphael Garcia, 2008).

Logo com a saída do fluido pela restrição o mesmo estará pronto para ser evaporado. Esses dispositivos de expansão podem ser, válvulas de expansão mecânicas ou termostáticas, válvulas de expansão eletrônicas, ou tubos capilares. O mecanismo de expansão tem também como função gerenciar o fluxo do fluído imposto pelo compressor ao longo do circuito, e principalmente para entrada de acesso ao evaporador para que a vazão na saída seja a específica para que o fluido consiga ser evaporizado durante a passagem pelo evaporador. (Raphael Garcia, 2008).

2.1.5.1 Tubo intercambiador de calor

O tubo de cobre capilar ou tubo intercambiador de calor, é um aparato de expansão feito comumente de cobre utilizado em formas de espiras, tem como características, seu pequeno diâmetro que pode variar de 0,33 milímetros e 2 milímetros, e seu comprimento conforme a sua vazão mássica desejada. (Yang; Wang, 2008). Contém duas configurações, o tubo capilar adiabático e não adiabático.

O tubo de cobre capilar adiabático despreza a troca de temperatura com o meio externo, pois possui uma proteção térmica ao longo de seu corpo apresentado na Figura 5, de modo que a troca de calor com o ambiente seja nula. (Yang; Wang, 2008).



Figura 5: Tubo intercambiador de calor. (Fonte: FRIONLINE, 2021).

2.1.5.2 Válvula de expansão mecânica termostática

Tem a mesma função do tubo capilar, pois a maneira de atuar é diferente, pois ela é provida por um bulbo, diafragma e um parafuso de ajuste do superaquecimento. (Jesué Graciliano, 2020).

O bulbo controla a abertura ou fechamento do diafragma através das leituras de temperatura dadas pela saída do evaporador, posição onde o mesmo é acoplado. Dentro do bulbo há um fluido de características semelhantes ao fluido do circuito no qual é o responsável pela movimentação da agulha, quando o calor de seu fluido interno aumenta, aumenta também a pressão, baixando a agulha para o artifício da válvula, e quando há uma perda de temperatura e pressão dentro do bulbo, a agulha

do orifício da válvula é levantada, ajustando a agulha que faz a restrição do orifício da válvula, regulando sua vazão de ida da válvula e mantendo um superaquecimento constante pelo tubo que sai do evaporador, apresentado na Figura 6. (Jesué Graciliano, 2020).

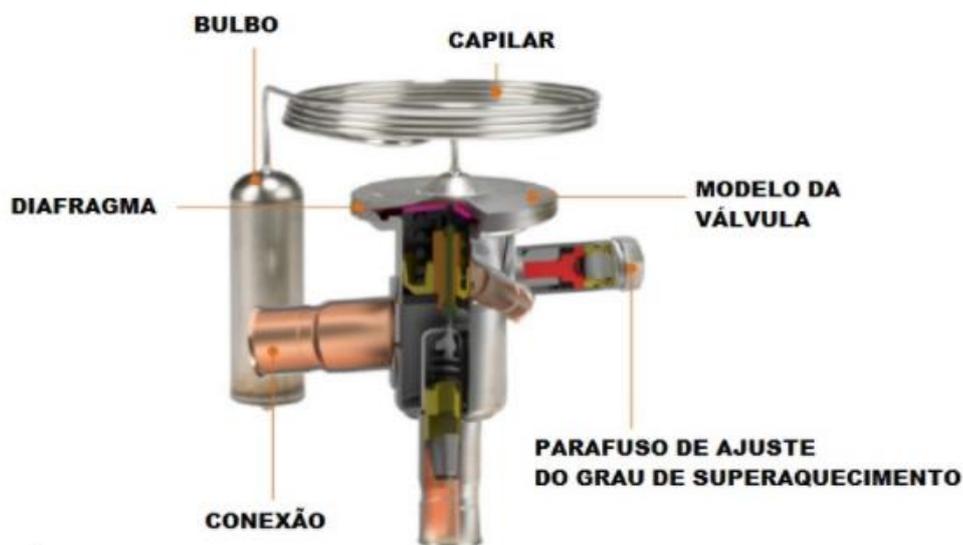


Figura 6: Válvula termostática. (Fonte: WORDPRESS, 2021).

2.1.5.3 Válvula de expansão eletrônica

É caracterizada pela bobina eletromagnética que faz o deslocamento da agulha entre o orifício de expansão da mesma, esse controle de movimentação de restrição ao fluxo é obtido pela presença de uma sonda de temperatura que lê a temperatura que sai do evaporador assim como o bulbo da válvula termostática. Através da leitura de sinal de temperatura, o controlador dá o comando a bobina da válvula magnetizando a mesma, dando sentido de baixar agulha ou subir para garantir a vazão e o superaquecimento constante no sistema, de acordo com a Figura 7. Desde a partida até o final do processo, assim não havendo desperdício de energia no sistema. (Carel Industries, 2021).

Atualmente é a mais visada para sistemas com médio a grande porte, pela sua capacidade de atuação, e auto ajuste durante o processo de refrigeração. (Carel Industries, 2021).



Figura 7: Válvula de expansão eletrônica Carel. (Fonte: COOLING POST, 2017).

2.1.6 Evaporador

É denominado como evaporador, um trocador de calor que é semelhante ao condensador, porém o mesmo trabalha em baixa temperatura com ajuda de ventiladores para retirar calor do produto ou ambiente, e resfria-lo. Vem localizado após o mecanismo de expansão, pois no evaporador logo como o nome diz, o fluido expandido evapora com a passagem dentro desse componente, e retorna ao compressor em estado de vapor. (Carel Industries, 2021).

2.1.7 Funcionamento do circuito de refrigeração

Sabe-se que existe um deslocamento de fluido dentro de um ciclo fechado de refrigeração, passando por todos os componentes básicos e havendo mudanças de pressão, temperatura e estado físico. Será apresentado como ocorre o deslocamento de um circuito de refrigeração:

A-B - Há uma admissão do fluido em baixa pressão e baixa temperatura após a evaporação pela sucção do compressor, após essa etapa o compressor ao comprimir o fluido convertido em vapor e promove um aumento significativo da sua temperatura e pressão, impondo o deslocamento desse fluido para escoar pelo sistema até alcançar o condensador, apresentado na Figura 8. (Edisciplinas, 2021).

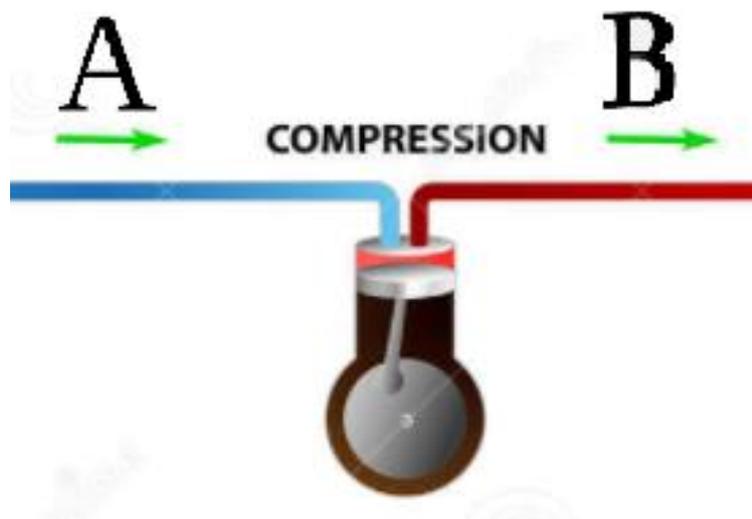


Figura 8: Passagem do fluido pelo compressor. (Fonte: SILVA, 2010).

B-C – Com a entrada do fluido no condensador ainda em vapor, haverá rejeição de calor, assim havendo a condensação do fluido e retornando ao estado líquido novamente, perdendo temperatura, porém mantendo sua alta pressão até chegar à expansão, apresentado na figura 9. (Silva, 2010).

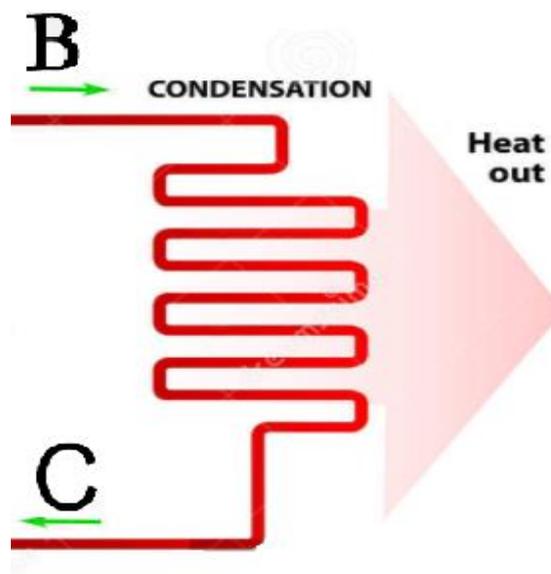


Figura 9: Passagem do fluido pelo condensador. (Fonte: SILVA, 2010).

C-D – O aparato de expansão, seja ele válvula de expansão ou tubo capilar, promove uma restrição ao fluxo do fluido, havendo perda de calor e pressão ao sair dessa restrição, o fluido se expande, pois passa de um orifício de diâmetro pequeno para um tubo com diâmetro bem maior, apresentado na Figura 10. (Silva, 2010).

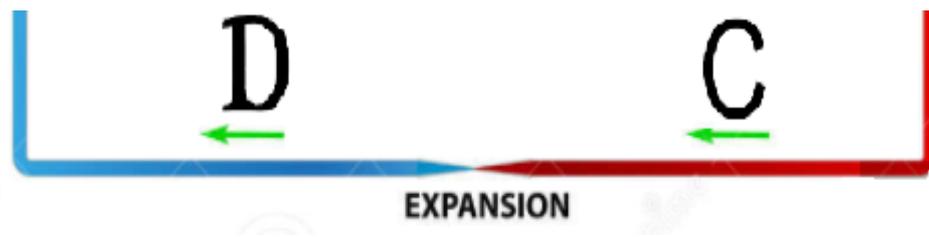


Figura 10: fluido passando pelo aparato de expansão. (Fonte: SILVA, 2010).

D-A – Ao passar pelo dispositivo e expansão, com a perda de calor e pressão, o fluido entra pelo evaporador com intuito de trocar temperatura com o ambiente externo, ou produto a ser refrigerado, havendo a evaporação do fluido por completo, já que ao sair da restrição, ele tem um estado combinado de líquido e vapor, assim que teoricamente evaporado por completo, o mesmo volta ao compressor, apresentado na Figura 11. (Silva, 2010).

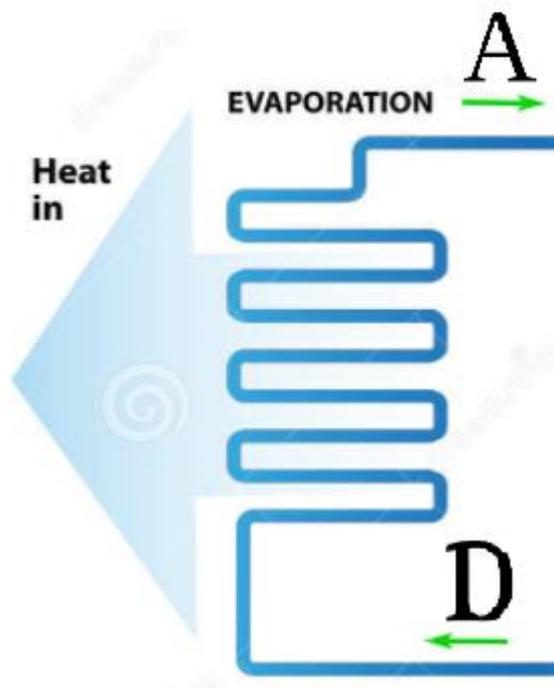


Figura 11: Fluido passando pelo evaporador. (Fonte: SILVA, 2010).

3. Metodologia

3.1 Propósito

O trabalho qual está sendo apresentado foi realizado a partir de pesquisas bibliográficas em artigos, livros, periódicos, catálogos, softwares e vídeos aulas com o intuito de demonstrar a adaptação de um tubo intercambiador de calor em um circuito de refrigeração, sistema esse que se utilizava válvula de expansão eletrônica para mesmo propósito. E partindo desses estudos abordar também testes práticos onde seja validado todas essas teorias e estudos.

Para esse estudo e testes práticos foi utilizado como base um resfriador de água, comumente presente em produções de panificação. O resfriador como já mencionado, tem como seu aparato de expansão a válvula de expansão eletrônica conforme demonstrado na Figura 12, ela se adapta automaticamente a diversas condições climáticas compensando variações presentes no sistema e dessa forma garante o maior rendimento do mesmo, porém para um simples resfriador de água a tecnologia é acima do necessário, por isso foi substituído pelo tubo intercambiador de calor conforme representa Figura 13, e assim realizado testes em condições climáticas distintas avaliando seu rendimento ideal mesmo com variações do sistema.

Como a geometria dos tubos intercambiadores são fixas (diâmetro e comprimento), buscamos uma vazão contínua tendo o equilíbrio do sistema em várias condições, visto que o tubo de expansão já é projetado para determinada condição de trabalho, o objetivo crucial foi ter o correto funcionamento do compressor e dos componentes responsáveis pela comutação de calor (evaporador e condensador) nessas variações.



Figura 12: Resfriador de água com válvula eletrônica. (Fonte: O AUTOR, 2021).



Figura 13: Resfriador de água com tubo capilar. (Fonte: O AUTOR, 2021).

3.2 Abordagem

O dimensionamento do tubo capilar foi definido através de uma planilha automatizada de Excel e catálogos de fornecedores, sendo utilizados dados de todos os componentes do sistema de refrigeração como a pressão do fluido refrigerante R134a e a vazão mássica do compressor de 1HP, obteve-se ao diâmetro do tubo capilar de 0,064" variando seu comprimento e quantidade de fluido no sistema, buscando encontrar o melhor conjunto.

O catálogo usado foi o da Tecumseh mesmo fornecedor do compressor de 1HP utilizado, nele tem indicado o diâmetro e comprimento recomendado para cada compressor como demonstrado na Tabela 1, foi escolhido o compressor TYA4489YES de fluido R134 para ser usado no equipamento de testes.

Tabela 1: Tabela de referência de aplicação tubos capilares Tecumseh.

Fluido Refrigerante	Referência Comercial (HP)	Modelo Compressor	Modelo Unidade Condensadora	LM	Aplicação	Diâmetro (polegada)	Comprimento (metros)
R-134a	1/6	AZ0387YS	UAZ0387YS	UAZ430	MBP	0,032	2,5
	1/5	AZ0411YS	UAZ0411YS	UAZ440	MBP	0,036	2,7
	1/4	AZ0413YS	UAZ0413YS	UAZ445	HBP	0,042	1,8
					MBP	0,042	2,0
	1/3 +	TP1413YS	UTP1413YS	UTP103	LBP	0,036	2,5
	1/2	TP1415YS	UTP1415YS	TP105	LBP	0,036	2,5
	1/3	AE4430YS	UAE4430YS	UAE540	HBP	0,050	2,0
					MBP	0,042	3,0
	1/3 +	AE4440YS	UAE4440YS	UAE630	HBP	0,050	1,5
					MBP	0,042	1,5
	1/2	AE4448YS	UAE4448YS	UAE660	HBP	0,064	3,0
					MBP	0,050	3,0
	1/2 +	TYA4466YES	UTYA4466YES	UTY301	HBP	0,064	1,8
					MBP	0,050	2,0
3/4	TYA4475YES	-	TY302	HBP	0,064	1,5	
				MBP	0,050	1,5	
1	TYA4489YES	UTYA4489YES	UTY303	HBP	0,064	1,0	
				MBP	0,064	3,0	

(Fonte: CATÁLOGO TECUMSEH, 2017).

A planilha utilizada demonstrada abaixo na tabela 2, não pode ser divulgada a fundo seus fundamentos de cálculo por ser de uma empresa privada, porém através dela foi calculado a vazão dos tubos utilizados como aparato de expansão de acordo com a combinação de diâmetro e comprimento, buscando encontrar o comprimento ideal, vale lembrar que em condições de equilíbrio o sistema proporciona uma vazão mássica contínua por todo sistema, com isso a taxa de fluxo mássico imposto pelo compressor deverá ser semelhante ao fluxo ao longo do tubo capilar.

Tabela 2: Planilha automatizada de cálculo de vazão.

Diâmetro do tubo capilar	D	1,63000	Vazão mássica	0,013276897	kg/s
Comprimento do tubo capilar	L	1,000		47,797	kg/h
Viscosidade dinâmica	η_f	0,000183	Capilar Duplo	95,594	kg/h
Pressão na condensação	P_c	10,200			
Pressão no flash-point	P_f	10,200			
Volume específico	v_f	0,000842			
Pressão de evaporação	P_e	2,92			

(Fonte: O AUTOR, 2021).

Foi utilizado dois capilares de diâmetro de 0,064” do mesmo comprimento variando esse comprimento de 0,9m até 1,5m, onde mostrado pelo software, são os comprimentos que chegou mais próximo da vazão necessária. Os métodos de dimensionamento dos tubos capilares ainda estão em desenvolvimento e enfrentam alguns problemas devido ao escamento bifásico, compressível e bloqueado, tornando sua modelagem analítica relativamente complicado e imprevisível, dessa forma a melhor maneira é testar e definir o melhor dimensional para o equipamento, com o conhecimento necessário foi possível definir o modelo que apresentou as melhores previsões, garantindo o funcionamento ideal para todos os componentes do circuito.

3.3 Técnicas

As ferramentas utilizadas para monitoramento deste equipamento foram o termômetro penta e o manômetro de pressão. Foi realizado todos os testes e coletando os dados de superaquecimento e sub resfriamento em condições climáticas extremas no interior de uma sala climatizada variando de 18°C à 40°C a temperatura ambiente. Com os dados obtidos, foi possível definir a melhor configuração do aparato de expansão (capilar) para o equipamento.

Conforme fornecedores os manômetros são utilizados para averiguação das pressões internas do sistema de refrigeração, ele é composto de dois leitores de pressão, indicados nas cores azul e vermelho, tais quais suas mangueiras de engate ao sistema sendo azul para pressões baixas (sucção), e vermelho para pressões altas (descarga e linha de líquido), também é provido de uma terceira mangueira de cor amarelo, para função de injetar ou retirar o fluido de forma correta do sistema, apresentado na Figura 14. (Salvi Casagrande, 2021).

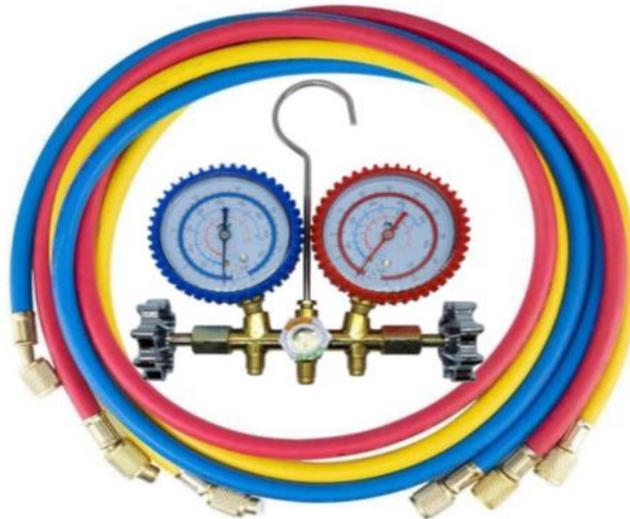


Figura 14: Manômetro. (Fonte: ELETROFRIGOR, 2021).

Também é usual conferir as temperaturas das linhas, em determinados pontos de leitura com um termômetro de cinco sensores. Três desses sensores serão direcionados para esses pontos de leituras que serão em linha de sucção o mais próximo possível do compressor, linha de descarga, e linha de líquido da unidade condensadora Tecumseh utilizada no resfriador de água, como demonstrado abaixo na Figura 15.

Também é de extrema importância a temperatura do ambiente onde está situado o refrigerador, para obter leitura da temperatura do ar que passará pelo condensador, para controlar e monitorar o que na refrigeração se chama superaquecimento e sub-resfriamento. Tais parâmetros são especificados pelos fornecedores de compressores e unidades condensadoras, que seus valores respectivos tendem a ser o mais próximo ou exatamente 8k a 15k para superaquecimento e de 3k a 5k para sub-resfriamento. (Bitzer, 2021).

Determina-se como superaquecimento, o delta de temperatura da sucção com a temperatura da evaporação do fluido. E sub-resfriamento é o delta entre as temperaturas de linha de líquido e de condensação do fluido, dados esses que são retirados os ferramentais especificados, apresentado na Figura 16.

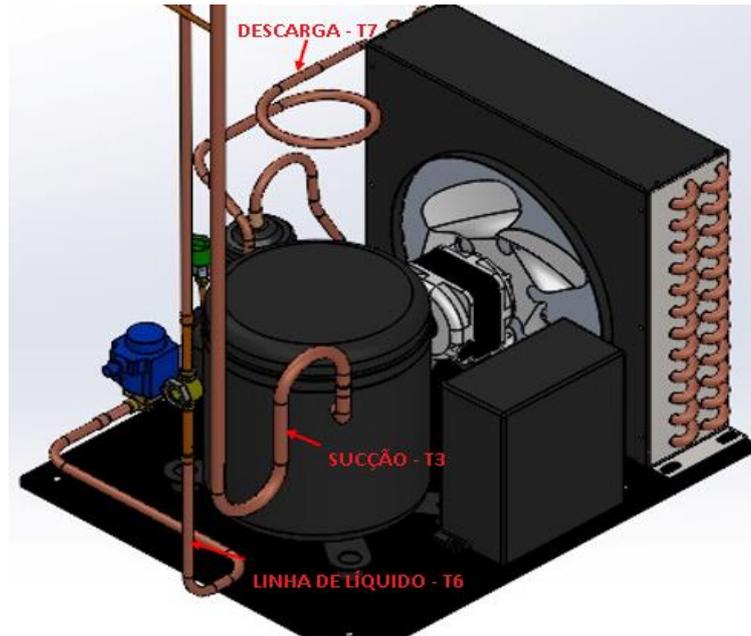


Figura 15: Unidade condensadora tecumseh. (Fonte: O AUTOR, 2021).



Figura 16: Termômetro Full Gauge com 5 sensores. (Fonte: VIRTUALTOOLS, 2021).

4. Resultados e Discussão

Os projetistas de um sistema de refrigeração, quando utilizam o tubo capilar como aparato de expansão, deve escolher o diâmetro e o comprimento do tubo de

modo que o rendimento ideal do sistema corresponda à temperatura de evaporação desejada. Entretanto, as determinações dos parâmetros são obtidas na maioria dos casos por meio de testes empíricos.

Assim que definido as dimensões do tubo capilar, foi analisado o efeito que o mesmo teve no sistema de refrigeração, onde variando seu comprimento obteve momentos que afetaram de forma negativa e outros que melhoraram a operação e o rendimento do resfriador.

No teste realizado no resfriador de água de capacidade de 100 litros, foi definido como padrão para avaliação, três dosagens por variação de capilar. Eram realizadas dosagens de 15 litros assim que a água atingisse set point de 2°C. O compressor durante a dosagem desliga e volta a ligar minutos depois, é a partir desse momento de repartida do compressor, que começou a coleta dos dados até o equipamento atingir novamente a temperatura de 2°C. Os dados para o rendimento ideal do equipamento é um superaquecimento entre 8k e 15k e um sub-resfriamento entre 2K e 5K, e ter uma retomada de temperatura após a dosagem de 20 minutos até o set point. Esse tempo de 20 minutos, leva-se em consideração o tempo que uma amassadeira industrial tem de intervalo para bater entre uma massa e outra.

Assim, variou-se a temperatura ambiente em uma sala climatizada buscando garantir que o equipamento funcione em qualquer ambiente de trabalho e o diâmetro escolhido foi de 0,064" indicado pelo fornecedor do compressor, e o comprimento foi variado, com a metragem próxima do que indica pelo software como a vazão mássica ideal.

A Tabela 3, 4 e 5 mostram os dados dos testes realizados no equipamento nas variações de temperatura:

T1 – Temperatura ambiente externo (°C)

T2 – Temperatura Interna da água (°C)

T3 – Temperatura de sucção (°C)

T4 – Temperatura de evaporação (°C)

T5 – Temperatura de condensação (°C)

T6 – Temperatura de linha de líquido (°C)

T7 – Temperatura descarga do compressor (°C)

Os dados de Superaquecimento foram retirados do ΔP de T3 - T4 e sub-resfriamento do ΔP de T5-T6. O primeiro teste mostrado na Tabela 3 foi realizado em temperatura ambiente, com tubo capilar de 1 metro com diâmetro de 0,064".

Tabela 3: Dados de testes temperatura ambiente

Tempo	T1	T2	T3	T4	Super- aquecime nto Total	T5	T6	Sub- resfriame nto	T7
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
<i>Dosagem de 15 litros</i>									
00:05	23	3,8	7,2	-1	8,2	48	43,6	4,4	87
00:10	23	2,7	5,4	-2	7,4	47	43,4	3,6	87,7
00:15		2							
<i>Dosagem de 15 litros</i>									
00:05	23	3,9	7,3	-1	8,3	48	44	4	88,4
00:10	23,4	2,8	5,9	-2	7,9	48	43,6	4,4	88,7
00:15		2							
<i>Dosagem de 15 litros</i>									
00:05	23,8	3,9	7,3	-1	8,3	49	44,5	4,5	89,3
00:10	23,8	2,8	5,9	-2	7,9	48	44,2	3,8	89,6
00:15		2							

(Fonte: O AUTOR, 2021)

Como mostrado na Tabela 3, obteve-se um bom rendimento do equipamento, sendo regulado a carga de fluido refrigerante deixando o superaquecimento e o sub-resfriamento dentro do padrão. O equipamento respeitou o tempo determinado e não teve congelamento da serpentina dentro da água, que é um problema que pode ocorrer com um mal dimensionamento do capilar, pois essa camada de gelo que se forma envolta da serpentina evaporadora, impede a troca de calor entre a água e o fluido refrigerante. Com esse bom rendimento, decidiu-se então variar a temperatura ambiente, buscando o mesmo resultado.

Foi aquecida a sala próximo a 38°C e foram realizados os testes conforme listado na Tabela 4.

Tabela 4: Dados de testes temperatura ambiente quente

Tempo	T1	T2	T3	T4	Super- aquecimento Total	T5	T6	Sub- resfriamento	T7
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
<i>Dosagem de 15 litros</i>									
00:05	36	4,5	8,4	-1	9,4	53	49,6	3,4	93,3
00:10	36	3,7	6,8	-1	7,8	53	49,9	3,1	94,9
00:15	36	2,8	5,1	-1	6,1	53	50,2	2,8	95,4
00:20	35	2							
<i>Dosagem de 15 litros</i>									
00:05	36	4,6	8,2	-1	9,2	53	51,1	1,9	96,1
00:10	36	3,7	6,8	-1	7,8	54	51,1	2,9	96,8
00:15	36	2,8	4,4	-1	5,4	53	50,7	2,3	96,6
00:20	37	2							
<i>Dosagem de 15 litros</i>									
00:05	36	4,7	8,1	-1	9,1	54	51,5	2,5	96,9
00:10	36	3,7	6,2	-1	7,2	55	52,1	2,9	97,4
00:15	37	2,9	4,6	-1	5,6	55	52	3	97,5
00:20	37	2							

(Fonte: O AUTOR, 2021).

Com o aumento da temperatura do ambiente externo o equipamento manteve o rendimento esperado, não excedendo o limite de temperatura de descarga, porém teve uma pequena diminuição no superaquecimento e no sub-resfriamento nos finais do processo, já esperado pelos aumentos das temperaturas de condensação e de evaporação, devido à alta temperatura externa do local, entretanto tudo está dentro do envelope de funcionamento do compressor.

Após os testes em ambiente quente, foi reduzido a temperatura para 16°C, conforme dados da Tabela 5.

Tabela 5: Dados de testes temperatura ambiente frio

Tempo	T1	T2	T3	T4	Super- aquecimento Total	T5	T6	Sub- resfriamento	T7
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
<i>Dosagem de 15 litros</i>									
00:05	18	2,8	5,5	-3	8,5	42	37,2	4,8	78
00:10	18	2							
00:15									
<i>Dosagem de 15 litros</i>									
00:05	16	3	5,9	-4	9,9	41	35,6	5,4	86,2
00:10	16	2							
00:15									
<i>Dosagem de 15 litros</i>									
00:05	15,8	3,4	6,3	-4	10,3	40	35	5	80,4
00:10	15,8	2,4	5,3	-4	9,3	40	34,4	5,6	80,7
00:15		2							

(Fonte: O AUTOR, 2021)

Dados de teste mostram um rendimento excelente, já que em temperaturas com ambiente frio o equipamento chega ao set point muito mais rápido. A avaliação principal era o congelamento da serpentina evaporadora já que havia uma baixa temperatura de evaporação, e foi encontrado pequenas camadas de gelo que se soltavam facilmente durante o processo, graças a recirculação da água que existe no equipamento, assim não afetando em nada seu rendimento.

Outros testes também foram realizados, porém nenhum foi satisfatório como o dimensionamento de 1 metro e diâmetro de 0,064" (1,63mm). Foi realizado o aumento do comprimento, e com os resultados obtidos, foi observado que ao aumentar o comprimento do tubo capilar o sistema teve uma diminuição da pressão de evaporação, e diminuindo evaporação, foi encontrado problemas com congelamento da serpentina, não possibilitando a troca de temperatura do fluido com a água, e também uma alta temperatura de descarga, pois o aumento de comprimento diminui também a vazão mássica do sistema conforme gráfico representado na Figura 17, onde ocasionou um baixa alimentação no evaporador, acumulando muito fluido no

condensador, gerando assim a alta temperatura de descarga. Esse aumento da região de escoamento de dentro do capilar diminui a capacidade frigorífica no evaporador.

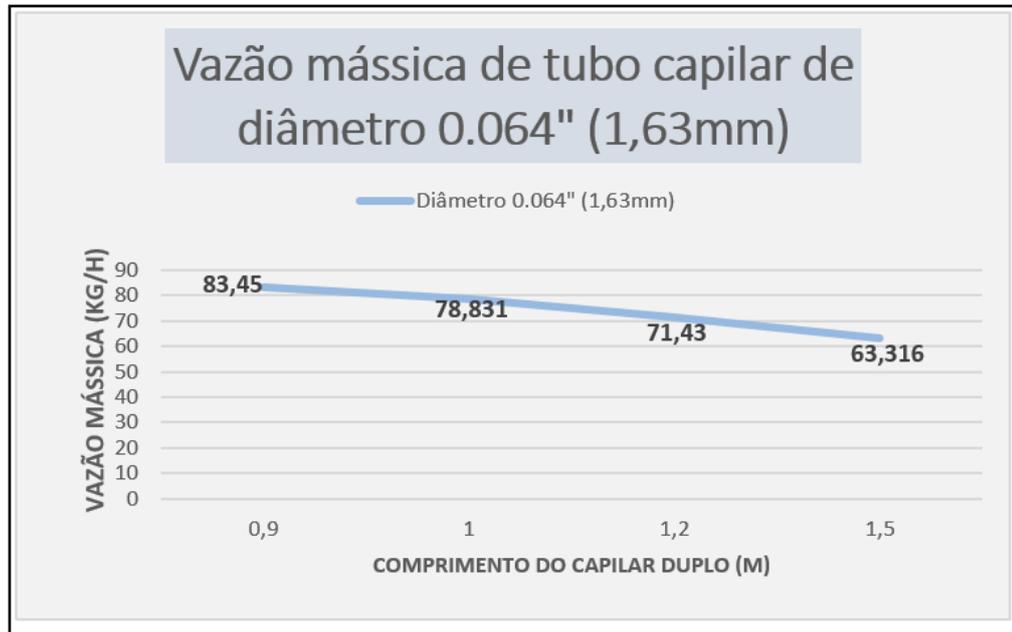


Figura 17: Dados de vazão mássica (Fonte: CRIADO PELO AUTOR, 2021).

5. Conclusões

O estudo realizado apresenta melhor a história da refrigeração e a importância que a mesma representa para a sociedade atualmente. Com a evolução dos equipamentos, proporcionou o mantimento e congelamento rápido dos alimentos, dando qualidade de sabor e permitindo que grandes quantidades sejam armazenadas por um tempo maior e distribuídos a grandes distâncias.

Possibilitou o estudo a fundo dos principais componentes que compõe um sistema de refrigeração, e como se comporta o fluido no sistema, assim dando conhecimento suficiente para definir o aparato de expansão que seria usado no equipamento de testes.

Foi apresentado, que é possível dimensionar um sistema para o uso de tubos capilares como aparato de expansão, mesmo sem ter o mesmo controle que tem a válvula de expansão eletrônica.

Com testes de variação de temperatura ambiente, forçando o equipamento a trabalhar nos extremos, e seguindo todo estudo relacionado ao dimensionamento do

capilar, definiu-se o comprimento e o diâmetro ideal, onde o equipamento teve seu melhor desempenho e com segurança.

A válvula de expansão eletrônica oferecia a esse mesmo sistema um controle maior e mais preciso da variação de superaquecimento, porém com muitos testes de rendimento e seguindo os cálculos de vazão mássica, encontrou-se a conjugação ideal do capilar para esse sistema, mostrando o mesmo rendimento do equipamento com uma válvula eletrônica.

E assim, como todas vantagens e desvantagens foi definido, o capilar como melhor opção para esse sistema, tendo maior facilidade em montagem na linha de produção e um custo absurdamente menor, onde seria por volta de R\$ 500,00 um kit de válvula de expansão, contendo além da válvula, uma placa de controle, sondas de temperaturas e transdutores de pressão, já os tubos capilares saem por volta de R\$ 15,00 o rolo com 3 metros de tubo, podendo variar o preço de acordo com seu diâmetro interno.

Mas em todos os testes físicos feitos com precisão encontramos a mesma qualidade de rendimento, mesmo havendo dispositivos de expansão diferentes.

6. Referências Bibliográficas

BITZER, 2021. Bitzer Compressores Ltda. Disponível em: <http://www.bausch.eng.br/baixar/boletins_de_engenharia/be20-definicao-do-superaquecimento-e-sub-resfriamento.pdf> Acesso em: 30 set. 2021.

Castro, 2008. Disponível em: <<https://www.carel.com.br/refrigerant-circuit-components>>. Acesso em: 10 out. 2021.

Catalogo Tecumseh, 2017. Disponível em:<<https://pt.scribd.com/document/433810895/como-dimensionar-um-tubo-capilar>> Acesso em: 18 set. 2021.

Jesué Graciliano, 2020. Disponível em: <<https://pt.dreamstime.com/ilustra%C3%A7%C3%A3o-stock-ciclo-de-refrigera%C3%A7%C3%A3o-image42808207>>. Acesso em: 12 set. 2021.

Edisciplinas, 2021. Funcionamento do Sistema de Refrigeração. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4653625/mod_resource/content/1/SEL0437_Aula06_Refrigeracao_parte02.pdf>. Acesso em: 1 out. 2021.

ELETROFRIGOR, 2021. Disponível em: <<https://velki.com.br/es/blog/aprenda-com-a-velki/o-seu-manometro-esta-indicando-a-pressao-corretamente->

?gclid=EAlaIqobChMI75Hs88318wIVBgWRCh33pw8rEAAYAAEgL2y_D_BwE>. Acesso em: 18 set. 2021.

Jesué Greciliano, 2020. Disponível em: <<https://jesuegraciliano.wordpress.com/rac-capacitacao/5-dimensionamento-de-tubo-capilar-e-valvula-de-expansao/>>. Acesso em: 14 out. 2021.

Raphael Garcia, 2008. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/64078735-1-evolucao-da-refrigeracao-e-daclimatizacao.html>>. Acesso em: 12 set 2021.

Refrigeração e climatização na prática, Seattle: Amazon,2014. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/Refrigeracao-Climatizacao-Pratica-questoes-resolvidas-ebook/dp/B00KFSCUKK>>. Acesso em: 1 out. 2021.

Silva (2010). Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3550292/mod_resource/content/1/sel0437_aula10_refrigeracao.pdf>. Acesso em 10 out. 2021.

VIRTUALTOOLS, 2021 Termômetro Full Gauge com 5 sensores. Disponível em: <<https://www.virtualtools.com.br/loja/izi>>. Acesso em: 14 out. 2021.