



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

GILSON RICARDO TAVARES SILVA

CONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UMA CHOPEIRA ELÉTRICA

**TUCURUÍ – PA
2025**

GILSON RICARDO TAVARES SILVA

CONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UMA CHOPEIRA ELÉTRICA

Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Maciel da Costa Furtado

TUCURUÍ – PA
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- T231c Tavares Silva, Gilson Ricardo.
 CONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UMA
 CHOPEIRA ELÉTRICA / Gilson Ricardo Tavares Silva. — 2025.
 95 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Maciel da Costa Furtado
 Coorientador(a): Prof. Me. Rodimilson Coelho Rodrigues
 Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
 Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
 Mecânica, Tucuruí, 2025.
1. Chopeira elétrica. Refrigeração. Projeto. Transferência
 de calor.. I. Título.

CDD 620.1

GILSON RICARDO TAVARES SILVA

CONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UMA CHOPEIRA ELÉTRICA

Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data da aprovação: **18/12/2025**

Conceito: **Excelente**

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Maciel da Costa Furtado
FEM/CAMTUC/UFPA

Coorientador: Eng. Msc. Rodimilson Coelho Rodrigues
FEM/CAMTUC/UFPA

Prof. Dr. Jessé Luís Padilha
NDAE/CAMTUC/UFPA

Aos meus pais Gilvan Olinto e Maria do Socorro.

Aos meus irmãos Gerson Silva, Gislene Silva e Gicely Moraes.

Ao meu tio Benedito Tavares e a minha namorada Benedita Silva.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me deu incondicionalmente a vida, forças nos momentos difíceis, coragem e saúde para conquistar meus objetivos.

Aos meus irmãos, Gicely do Socorro Tavares Silva Moraes e Gerson Tavares da Silva, que nunca mediram esforços para me ajudar.

Ao meu querido tio, Benedito Tavares, pelo apoio primoroso a tudo que é importante na minha vida e por ser meu fiel orientador.

Aos meus pais, Gilvan Olinto e Maria do Socorro, que estiveram desde o início do curso ao meu lado, sendo prestativos, compreensivos e pacientes. Que muitas vezes em situações de puro desânimo pude contar com suas palavras motivacionais importantíssimas para minha vida.

A minha irmã Gislene Tavares da Silva e a minha namorada Benedita Silva, pelas palavras de incentivo e por todo o apoio nessa longa caminhada.

A minha família, que sempre deu suporte para meu crescimento e para que meus sonhos se tornem realidade.

Aos meus amigos que a Mecânica e a UFPA me deram, Mateus Moreira, Tyson Baia, Wendel Xavier e Wesley Barbosa, que contribuíram de forma significativa nesse longo período de vida acadêmica e nas trocas constantes de conhecimentos.

Ao meu amigo Gabriel Lima Ferreira que sempre foi referência na universidade, me incentivando muito com os estudos e também pela parceria nos longos dias de monitoria.

Ao prof. Dr. Bruno Wallacy Martins, pela oportunidade de atuar por dois anos como bolsista no Projeto Engenharia e Letramento Científico – Monitoria.

Ao prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita pela oportunidade de participar como bolsista do Projeto de Pesquisa Sistemas Híbridos de Geração e Armazenamento de Energias Renováveis na Amazônia, via CNPq.

Ao Projeto de Extensão Baja – Tucuruí, por todos os conhecimentos teóricos e práticos adquiridos, que certamente serão muito importantes para o meu desenvolvimento profissional.

Aos professores da Universidade Federal do Pará, em especial os da faculdade de Engenharia Mecânica – FEM, que me ensinaram e ajudaram a desenvolver meu conhecimento intelectual e pessoal.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Maciel da Costa Furtado e coorientador, Técnico Msc. Rodimilson Coelho Rodrigues, que se disponibilizaram em me ajudar e auxiliaram do início ao fim do meu trabalho, sanando minhas dúvidas.

“Quanto mais nos elevamos, menores parecemos aos olhos daqueles que não sabem voar.”
(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto e construção de uma chopeira elétrica com capacidade de resfriamento de 50 L/h. O sistema opera efetivamente com um ciclo real de refrigeração por compressão mecânica de vapor utilizando o fluido refrigerante R-22. Na revisão bibliográfica são abordados em detalhes os conceitos essenciais relacionados ao funcionamento de um sistema de refrigeração, incluindo os processos termodinâmicos, os mecanismos de transferência de calor e a descrição dos principais componentes, como compressor, evaporador, condensador, válvula de expansão e fluido refrigerante. A metodologia empregada segue as etapas clássicas de desenvolvimento de projetos de trocadores de calor, compreendendo a formulação do problema, a definição das condições de operação, o desenvolvimento do conceito, a seleção dos componentes, os cálculos de energia térmica do sistema, a modelagem CAD da chopeira. A construção física do equipamento envolveu a seleção criteriosa de materiais, a elaboração da estrutura, a montagem do sistema de refrigeração e a organização dos acessórios necessários ao funcionamento do dispositivo. Foram realizados testes de desempenho, incluindo refrigeração, estanqueidade, vazão e comportamento térmico, permitindo comparar os resultados experimentais com os valores teóricos encontrados na literatura. Esses resultados confirmaram a viabilidade do projeto, demonstrando que a chopeira elétrica é capaz de manter o chopp na temperatura desejada e atender à demanda estabelecida de forma eficiente. Conclui-se que o equipamento desenvolvido apresenta potencial para uso doméstico e também festivo, destacando-se pelo baixo custo de fabricação, pelo desempenho teoricamente satisfatório e pelas possibilidades de otimização em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Chopeira elétrica. Refrigeração. Projeto. Transferência de calor.

ABSTRACT

This work presents the design and construction of an electric beer cooler with a cooling capacity of 50 L/h. The system operates effectively with a real cycle of refrigeration by mechanical vapor compression using the refrigerant R-22. In the literature review, the essential concepts related to the operation of a refrigeration system are addressed, including thermodynamic processes, heat transfer mechanisms and the description of the main components, such as a compressor, evaporator, condenser, expansion valve and refrigerant. The methodology used follows the classic stages of development of heat exchanger projects, including the formulation of the problem, the definition of the operating conditions, the development of the concept, the dimensioning of the components and the calculations of the thermal energy of the system and the three-dimensional modeling of the beer cooler. The physical construction of the equipment involved the careful selection of materials, the elaboration of the structure, the assembly of the cooling system and the organization of the accessories necessary for the operation of the device. Performance tests were performed, including cooling, tightness, flow and thermal behavior, allowing the comparison of the experimental results with the theoretical values found in the literature. These results confirmed the feasibility of the project, demonstrating that the electric beer cooler is capable of keeping the beer at the desired temperature and meeting the established demand efficiently. It is concluded that the developed equipment has potential for domestic and also festive use, standing out for its low manufacturing cost, theoretically satisfactory performance and the possibilities of optimization in future works.

Keywords: Electric beer cooler; Refrigeration; Project; Heat transfer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Máquina de Refrigeração por compressão mecânica de vapor, idealizada por Jakob Perkins, conforme patente britânica número 6662 de 1834.....	16
Figura 2 - Máquina de refrigeração por compressão mecânica de vapor, usando éter como refrigerante, idealizada por James Harrison e fabricada por Daniel Siebe em 1857.....	17
Figura 3 - Representação esquemática das primeiras geladeiras produzindo gelo artificial.....	18
Figura 4 - Representação esquemática de uma câmara fria ou frigorífica.....	22
Figura 5 - Representação esquemática do diagrama operacional de uma chopeira elétrica.....	23
Figura 6 - Representação esquemática dos tipos de compressores industriais.....	25
Figura 7 - Representação de um evaporador inundado.....	27
Figura 8 - Representação de um evaporador a seco.....	27
Figura 9 - (a) Condensador resfriado a ar; (b) Condensador resfriado a água; (c) Condensador de placas; (d) Condensador evaporativo.....	28
Figura 10 - Representação esquemática de uma válvula de expansão termostática.....	29
Figura 11 - Representação esquemática de bujões de gás (fluido refrigerante).....	30
Figura 12 - Classificação dos fluidos refrigerantes.....	31
Figura 13 - Representação esquemática das formas de transferência de calor.....	37
Figura 14 - Transferência de calor unidimensional por condução (difusão de energia).....	38
Figura 15 - Representação esquemática da transferência de calor por convecção.....	39
Figura 16 - Representação esquemática de um refrigerador de Carnot (a) e seu diagrama T-s (b).....	41
Figura 17 - Representação esquemática do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor (a) e seu diagrama T-s (b).....	42
Figura 18 - Representação esquemática do ciclo real e ideal de refrigeração por compressão de vapor (a) e seu diagrama T-s (b).....	43
Figura 19 - Representação do diagrama T-s do ciclo real e ideal de refrigeração por compressão de vapor.....	44
Figura 20 - Representação do compressor rotativo do tipo Elgin.....	51
Figura 21 - Representação esquemática do condensado usado no projeto.....	52
Figura 22 - Diagrama T-s do ciclo ideal de refrigeração da chopeira.....	53
Figura 23 - Diagrama T-s do ciclo real de refrigeração da chopeira.....	56
Figura 24 - Representação do modelo CAD 3D da chopeira elétrica.....	58
Figura 25 - Representação estrutural da armação da chopeira elétrica.....	59

Figura 26 - Representação do compartimento de serpentinas totalmente isolado.....	60
Figura 27 - Representação esquemática da vista explodida da chopeira elétrica.....	62
Figura 28 - Apresentação visual do aplicativo Forane Refrigerants.....	67
Figura 29 - Face do aplicativo Forane Refrigerants exibindo os valores de pressão a partir da temperatura.....	68
Figura 30 - Decréscimo de temperatura do chopp ao longo do tempo.....	69
Figura 31 - Apresentação esquemática do teste do sistema de refrigeração.....	70
Figura 32 - Apresentação esquemática do teste de estanqueidade do sistema de refrigeração....	72
Figura 33 - Apresentação esquemática do momento do teste de vazão.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Processos termodinâmicos ocorrendo num ciclo de refrigeração.....	31
Tabela 2 - Apresentação dos dados fornecidos pelos sites de cada fabricante.....	48
Tabela 3 - Especificação técnica do compressor.....	50
Tabela 4 - Propriedades termodinâmicas do refrigerante R-22, para o ciclo real.....	54
Tabela 5 - Propriedades termodinâmicas do refrigerante R-22 para o ciclo ideal.....	56
Tabela 6 - Descrição dos principais componentes da chopeira mostrados na figura 27	62
Tabela 7 - Descrição dos principais componentes e materiais da chopeira elétrica.....	63
Tabela 8 - Descrição dos componentes do sistema de refrigeração.....	64
Tabela 9 - Descrição dos principais acessórios da chopeira.....	65
Tabela 10 - Representação da temperatura x pressão do fluido refrigerante R-22.....	67
Tabela 11 - Descrição dos testes de temperatura do líquido.....	74
Tabela 12 - Apresentação do orçamento do projeto.....	76
Tabela 13 - Apresentação dos resultados gerais dos testes.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔE	Variação de energia	kJ
E_{ent}	Energia que entra no sistema	kJ
E_{sai}	Energia que sai no sistema	kJ
Δm	Variação de massa	kg
m_{ent}	Massa que entra no sistema	kg
m_{sai}	Massa que sai no sistema	kg
U	Energia interna	kJ
EC	Energia cinética	kJ
EP	Energia potencial	kJ
u	Energia interna específica	kJ/kg
V	Velocidade	m/s
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
Z	Altura	m
e	Energia específica	kJ/kg
m	Massa	kg
$\dot{Q}$	Fluxo de calor	kW
$\dot{W}$	Potência	kW
P	Pressão	kPa
v	Volume	m ³ /kg
$\dot{m}$	Vazão mássica	kg/s
h	Entalpia específica	kJ/kg
Δh	Variação de entalpia	kJ/kg
dE	Variação de energia	kJ
dt	Variação de tempo	s
W	Trabalho	kJ
F	Força	N
s	Deslocamento	m
ds	Variação de deslocamento	m
$\dot{q}$	Taxa de transferência de calor	kW
c_p	Calor específico a pressão constante	kJ/kg·K
T_{sai}	Temperatura que sai do sistema ambiente	°C

T_{ent}	Temperatura que entra no sistema ambiente	$^{\circ}\text{C}$
q''_x	Fluxo térmico	W/m^2
k	Condutividade térmica	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
dT	Variação de temperatura	$^{\circ}\text{C}$
dx	Variação da distância	m
L	Comprimento	m
A	Área	m^2
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$
T_s	Temperatura do corpo	$^{\circ}\text{C}$
T_{∞}	Temperatura do fluido	$^{\circ}\text{C}$
η_c	Eficiência do compressor	$\%$
K	Escala Kelvin	K

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVO.....	19
1.1.1 Objetivo Geral.....	19
1.1.2 Objetivos Específicos	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 TIPOS DE EQUIPAMENTOS DE REFRIGERAÇÃO	21
2.1.1 Geladeira e Freezer.....	21
2.1.2 Câmara Fria ou Frigorífica	22
2.1.3 Chopeiras Elétricas.....	22
2.2 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	24
2.3 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR.....	24
2.3.1 Compressores.....	25
2.3.2 Evaporadores	26
2.3.3 Condensadores	28
2.3.4 Válvula de Expansão	29
2.3.5 Fluido refrigerante.....	30
2.4 CONCEITOS TERMODINÂMICOS	32
2.4.1 Processos e sistemas.....	32
2.4.2 Energia em um sistema.....	32
2.4.3 Trabalho desenvolvido por um sistema	36
2.4.4 Mecanismos de transferência de calor	36
2.4.4.1 Fluxo de calor	37
2.4.4.2 Condução.....	37
2.4.4.3 Convecção.....	39
2.4.5 Ciclos de refrigeração por compressão de vapor.....	40
2.4.6 Ciclo de refrigeração reverso de Sadi Carnot	40
2.4.7 Ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor	41
2.4.8 Ciclo real de refrigeração por compressão de vapor.....	43
2.5 BALANÇO DE ENERGIA NO CICLOS DE COMPRESSÃO A VAPOR.....	43
2.5.1 Trabalho de compressão	43
2.5.2 Calor rejeitado no condensador	45

2.5.3	Válvula de expansão	45
2.5.4	Absorção de calor no evaporador.....	45
2.5.5	Eficiência energética	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	47
3.1.1	Condições de operações.....	47
3.2	DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO	49
3.2.1	Características do sistema	49
3.3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	49
3.3.1	Seleção dos componentes do sistema	50
3.3.1.1	Seleção do compressor	50
3.3.1.2	Seleção do condensador	51
3.3.1.3	Seleção do evaporador	52
3.3.2	Cálculos termodinâmicos do sistema para o ciclo ideal	53
3.3.2.1	Cálculo de carga térmica na superfície externa do evaporador.....	53
3.3.2.2	Vazão mássica do refrigerante.....	53
3.3.2.3	Absorção de calor no evaporador.....	55
3.3.2.4	Calor rejeitado no condensador.....	55
3.3.2.5	Coeficiente de desempenho do sistema	55
3.3.3	Cálculos do sistema para o ciclo real	55
3.3.3.1	Potência isentrópica no compressor	57
3.3.3.2	Capacidade frigorífica do evaporador.....	57
3.3.3.3	Taxa de Transferência de calor no condensador	57
3.3.3.4	Coeficiente de performance.....	57
3.4	MONTAGEM E FABRICAÇÃO.....	58
3.4.1	Modelagem CAD (<i>Computer Aided Design</i>) 3D do Projeto.....	58
3.4.2	Concepção estrutural.....	59
3.4.3	Sistema de refrigeração	60
3.5	MATERIAIS UTILIZADOS NA MANUFATURA DA CHOPEIRA.....	63
3.5.1	Estrutura da chopeira	63
3.5.2	Elementos de um sistema de refrigeração	64
3.5.3	Acessórios, ferramentas e dispositivos utilizados na confecção da chopeira	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
4.1	FUNCIONAMENTO DA CHOPEIRA ELÉTRICA.....	66

4.2 TESTES E VALIDAÇÕES	70
4.2.1 Teste do sistema de refrigeração	70
4.2.2 Teste de estanqueidade do sistema	71
4.2.3 Teste de vazão do sistema.....	72
4.2.4 Teste de temperatura do líquido.....	73
4.2.5 Validação dos testes	74
4.2.6 Orçamento do projeto	75
4.2.7 Aspectos gerais dos testes.....	77
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICE A – DIMENSÕES ESTRUTURAIS DA CHOPEIRA	87
APÊNDICE B – COMPONENTES INTERNOS DA CHOPEIRA	88
APÊNDICE C – COMPONENTES EXTERNOS DA CHOPEIRA	91
ANEXO A – VISTA EXPLODIDA DA CHOPEIRA ELÉTRICA	95

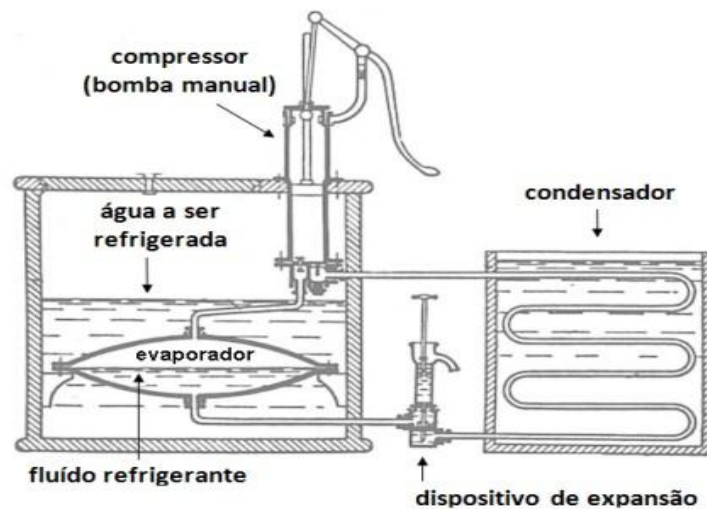
1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos antigos, a humanidade tem procurado formas de atender às suas necessidades diárias, como a conservação de alimentos e a climatização de ambientes. Há registros de que a civilização egípcia usava vasos de barro para resfriar a água. A porosidade dos vasos permitia que parte da água evaporasse, o que resultava na redução da temperatura do sistema (LOPES, 2018).

Os Persas, os Hebreus e os Romanos armazenavam gelo e neve solidificada em covas cobertas de capim. Ao racionarem essas reservas, conseguiam conservar alimentos durante o verão. As civilizações gregas e romanas dependiam diretamente da natureza para obter gelo, que se formava no inverno e em regiões de clima muito frio. Elas se beneficiavam do gelo colhido no alto das montanhas para preparar bebidas e gelar os alimentos. (SILVA, 2018).

No decorrer dos anos, pesquisadores e engenheiros desenvolveram métodos para produzir gelo artificial. Em 1834, o primeiro sistema mecânico para fabricação de gelo artificial foi criado nos Estados Unidos, conforme indica a Figura 1. No mesmo ano, o Brasil recebeu seu primeiro carregamento de gelo artificial, transportado pelo navio Madagascar (HEROLD, 2011).

Figura 1 - Máquina de Refrigeração por compressão mecânica de vapor, idealizada por Jakob Perkins, conforme patente britânica número 6662 de 1834



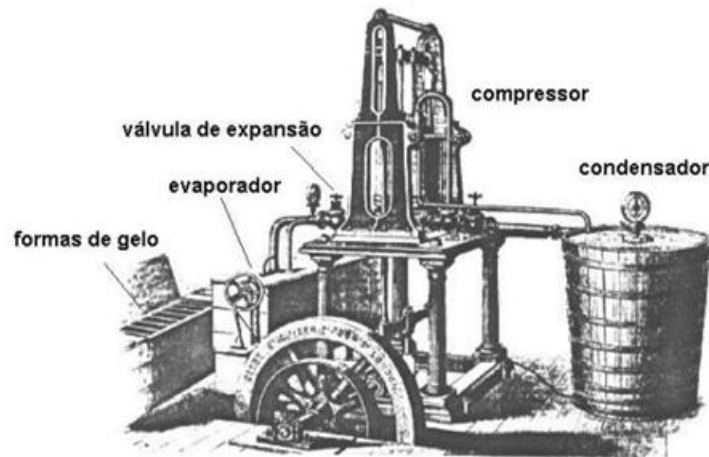
Fonte: Adaptado de SILVA, (2018).

Apesar deste mecanismo ter gerado grande repercussão, não há nenhum registro da invenção de Perkins na literatura da época, e apenas casualmente Bramwell fez-lhe uma referência 50 anos depois da sua invenção.

Em 1857 James Harrison e Daniel Siebe construíram a primeira máquina de compressão mecânica de vapor que funcionou efetivamente. O escocês, Harrison foi o pioneiro no uso de

máquinas de refrigeração. Observando o efeito de resfriamento do éter, inventou, por volta de 1850, uma máquina manual para produção de gelo. A Figura 2, mostra uma dessas máquinas de refrigeração, que foram usadas na Inglaterra e na Austrália para fabricação de gelo e cristalização de cera de parafina a partir do óleo de xisto (SILVA 2020).

Figura 2 - Máquina de refrigeração por compressão mecânica de vapor, usando éter como refrigerante, idealizada por James Harrison e fabricada por Daniel Siebe em 1857



Fonte: Adaptado de SILVA, (2020).

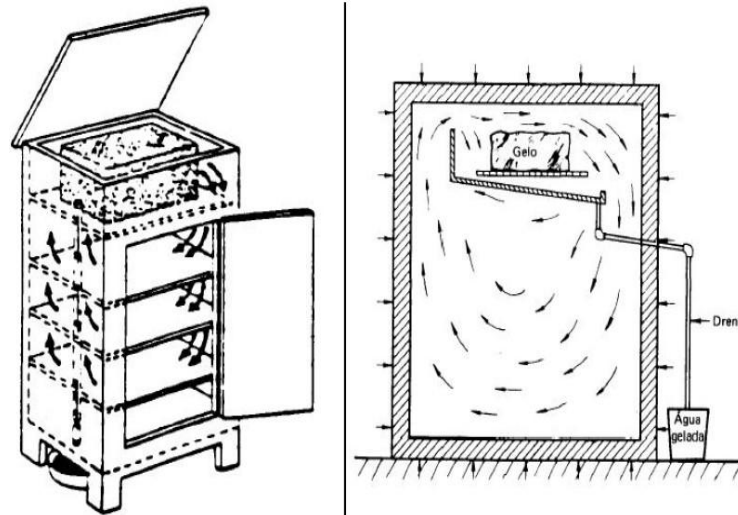
Essa máquina foi fabricada continuamente até o advento dos sistemas com Amônia e Dióxido de Carbono, chegando a se tornar muito popular na Índia.

Durante a metade do século XIX, houve um acúmulo de aperfeiçoamentos nos processos de fabricação de gelo artificial, com melhorias sistemáticas nos sistemas, resultando em maior eficiência e melhores condições de trabalho. No entanto, a produção de gelo em si fez poucos avanços nesse período devido à desconfiança do público em relação ao gelo artificial. Embora todos reconhecessem os benefícios da refrigeração, havia uma crença generalizada de que o gelo produzido artificialmente era prejudicial à saúde humana (RAKSHIT, 2023).

Em 1890, os Estados Unidos, um dos maiores produtores de gelo natural da época, enfrentaram um inverno muito fraco, resultando em quase nenhuma formação de gelo. A ausência de gelo natural forçou o uso do gelo artificial, quebrando o tabu existente contra ele. Isso demonstrou que o gelo artificial era melhor que o natural, pois era feito com água mais pura e podia ser produzido conforme a demanda (FERRAZ, 2008).

Depois desses acontecimentos ocorreu a criação das primeiras geladeiras, conforme indica a Figura 3, a seguir. Surgiu, dessa forma, o impulso que faltava à indústria de produção mecânica de gelo. Com a aceitação pelos consumidores, a demanda cresceu vertiginosamente e passaram a surgir com rapidez crescente as usinas de fabricação de gelo artificial por todas as partes do mundo.

Figura 3 - Representação esquemática das primeiras geladeiras produzindo gelo artificial



Fonte: MARTINELLI, (2003).

Esses aparelhos consistiam basicamente em um recipiente, geralmente isolado com placas de cortiça, onde se colocavam pedras de gelo junto com os alimentos a serem conservados. A fusão do gelo absorvia parte do calor dos alimentos e reduzia, de forma considerável, a temperatura no interior da geladeira. (FERRAZ, 2008).

Em 1918, a Kelvinator Company criou o primeiro refrigerador automático movido a eletricidade, o que deu início a uma evolução significativa nos sistemas de refrigeração. Diante das evoluções e das facilidades proporcionadas pelos refrigeradores modernos, torna-se evidente a importância de estudar esses sistemas para promover uma melhoria contínua na qualidade de vida humana (GUTOWSKI, 2024).

Segundo Morado (2017), a fermentação foi descoberta pelos monges, há milhares de anos. Acredita-se que essa descoberta ocorreu quando uma tentativa de fazer pão falhou, resultando em um líquido fermentado que era considerado sagrado pelos antigos. Essa teoria é plausível porque algumas matérias-primas usadas na fabricação da cerveja, como grãos de cereais e levedura, são as mesmas usadas na panificação.

A cerveja, como é conhecida hoje, fabricada com malte de cevada e lúpulo por grandes corporações, é fruto do século XIX, que assistiu ao renascimento da bebida por conta dos inúmeros avanços tecnológicos ocorridos à época (MORADO, 2017).

No Brasil, a cerveja chegou junto com a vinda da família real portuguesa em 1808 (MORADO, 2017) e, desde então, se popularizou, tornando-se uma das bebidas mais apreciadas no país. Devido à ampla popularidade e consumo de cerveja, o Brasil se destaca pela significativa produção desse produto e pelo grande número de cervejarias e microcervejarias, somando um total de 889 estabelecimentos. Esses negócios estão atualmente distribuídos em

479 municípios por todo o território nacional, o que representa cerca de 10% do país (BRASIL, 2019).

Nos últimos 20 anos, o número de choperias e cervejarias no país tem aumentado, com uma taxa de crescimento média de 19,9% ao ano. Nos últimos 10 anos, essa taxa subiu para 25,9%, e nos últimos 5 anos, para 16,7% (BRASIL, 2023). Paralelamente, também houve um aumento no consumo de bebidas alcoólicas fermentadas.

Diante desse contexto e do alto interesse dos consumidores, foi identificado um mercado promissor para a venda de chopeiras elétricas destinadas ao uso doméstico. Assim, nesta monografia apresentaremos o desenvolvimento do projeto e a construção de uma chopeira elétrica, operando em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor, utilizando os princípios da termodinâmica e de outras ciências da engenharia, tais como a mecânica dos fluidos e a transferência de calor e massa, para analisar e projetar sistemas com o objetivo de atender às necessidades humanas (MORAN et al., 2020).

O intuito do presente trabalho é desenvolver uma chopeira elétrica com capacidade para resfriar 50 litros de chopp por hora, desde a temperatura ambiente até a temperatura ideal de consumo, em torno de 0 °C. Além disso, o projeto incluirá todas as etapas essenciais para garantir sua viabilidade comercial, como a seleção dos componentes de refrigeração, cálculos de eficiência térmica e a avaliação do coeficiente de desempenho do sistema de compressão de vapor.

Será feita também a execução da modelagem CAD (*Computer Aided Design*) dos itens que compõem a chopeira, e seu detalhamento nas folhas padrão de desenhos técnicos. Essas etapas são importantes e necessárias para a fabricação e aquisição dos materiais para a montagem e funcionamento da chopeira, seguindo os parâmetros anteriormente planejados, finalizando com a coleta dos dados da chopeira em operação, para checar a necessidade de intervenções e até mesmos correções de parâmetros, possíveis melhorias e comparar dos resultados obtidos na prática com os dados disponíveis nas literaturas sobre o assunto.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

- Projetar e fabricar uma chopeira elétrica, com capacidade de refrigeração de 50 L/h e temperatura de saída 0 °C.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Selecionar os componentes da chopeira elétrica que fazem parte do sistema de refrigeração;
- Desenvolver uma lista dos componentes ou materiais utilizados no projeto;
- Realizar testes de refrigeração, vazão, estanqueidade e temperatura;
- Validar os resultados dos testes;
- Estimar os tempos e temperaturas de operação do equipamento.

A estrutura desta monografia, é composta pelo capítulo 1 que trata da introdução e dos objetivos geral e específicos. Em seguida, o capítulo 2 abordará as questões referentes a revisão bibliográfica que embasa o problema de pesquisa deste trabalho.

No capítulo 3 é apresentado a metodologia com as descrições das técnicas utilizadas e procedimentos utilizados para a elaboração deste trabalho. No capítulo 4 serão apresentados os resultados e as discussões acerca deste trabalho no que diz respeito à resultados positivos, segurança, praticidade e financeiro.

E por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento deste capítulo serão usados como base as obras clássicas da termodinâmica e das ciências térmicas, além de artigos científicos que tratam do tema em um contexto geral. Serão abordadas questões teóricas, equações e conceitos necessários para a elaboração desta monografia. A partir de agora serão apresentados os diferentes tipos de equipamentos usados para refrigeração, os cálculos térmicos envolvidos, os componentes do sistema de refrigeração, os ciclos térmicos e os tipos mais comuns de isolamento.

2.1 TIPOS DE EQUIPAMENTOS DE REFRIGERAÇÃO

A refrigeração envolve a redução e manutenção da temperatura de um corpo ou substância abaixo daquela existente em sua vizinhança, e pode ser obtida por meios naturais e artificiais (CORRÊA, 2018).

Para Santos (2022), o resfriamento consiste na diminuição da temperatura de um corpo, para isso é necessário a criação de resistências térmicas elevadas, a fim de reduzir o fluxo natural de calor, obtida por meio dos isolamentos térmicos.

2.1.1 Geladeira e Freezer

A invenção desses aparelhos transformou as maneiras com que os alimentos eram consumidos e comercializados, revolucionando o mercado de trabalho e, até mesmo, os processos da medicina. Por isso ela é considerada uma das mais importantes invenções da humanidade (SOUSA, 2022).

Os refrigeradores funcionam em ciclos, operando com um fluido refrigerante em um circuito fechado. Nos refrigeradores domésticos e industriais, o fluido utilizado é o fréon 12, ou também chamado de hidrofluorcarboneto (HFC – 134a) devido às suas propriedades: elevado calor latente de condensação, baixa temperatura de ebulição, miscível em óleos minerais; atóxico, não combustível, não explosivo e não corrosivo. Um motorcompressor é responsável diretamente pela realização do trabalho sobre o fluido refrigerante, comprimindo-o e impulsionando-o através da tubulação de cobre ou alumínio (GREF, 2017).

Os refrigeradores e freezers domésticos empregam em seus sistemas compressores conhecidos como herméticos. Nestes o motor e o compressor são diretamente acoplados e montados dentro do circuito do fluido refrigerante, desse modo não é necessário vedar o eixo e o vazamentos de fluido refrigerante para o ambiente são eliminados.

2.1.2 Câmara Fria ou Frigorífica

A câmara fria é projetada para facilitar o armazenamento de produtos que necessitam de uma temperatura controlada. Seja por meio da refrigeração, com temperatura entre 0°C e 18°C, ou através do congelamento, com temperatura abaixo de 0°. Esse processo é feito por meio da redução forçada da temperatura do produto com a transferência do seu calor. Isso acontece com a utilização de um fluido que refrigera o local passando por dentro de um circuito (CIVILFRIO, 2021).

Para este tipo de sistema, é importante conhecer a quantidade de calor que precisa ser removida, conhecida como carga térmica. A câmara fria para cerveja permite armazenar uma grande quantidade de chopp por longos períodos, oferecendo condições ideais de temperatura devido à possibilidade de ajuste.

Esses tipos que equipamentos de refrigeração são muito usados na indústria alimentícia, restaurantes e laboratório médico, já que normalmente armazenam vacinas, amostras de sangue e medicamentos, que precisam ser mantidos sob baixas temperaturas. Além desses locais fixos, as câmaras frias, como mostra a Figura 4, também são utilizadas no transporte de diversos produtos que não podem ser expostos às variações de temperaturas (PAROMED, 2022).

Figura 4 - Representação esquemática de uma câmara fria ou frigorífica



Fonte: REFRIGERAÇÃO REAL, (2024).

O que difere os sistemas considerados pequenos e os de grande porte é o número de unidades compressoras, evaporadoras, válvulas de expansão e condensadoras envolvidas, que nas câmaras frigoríficas podem ser múltiplos, o sistema de controle também pode alcançar elevada complexidade de acordo com a necessidade do projeto (VILAIN, 2018).

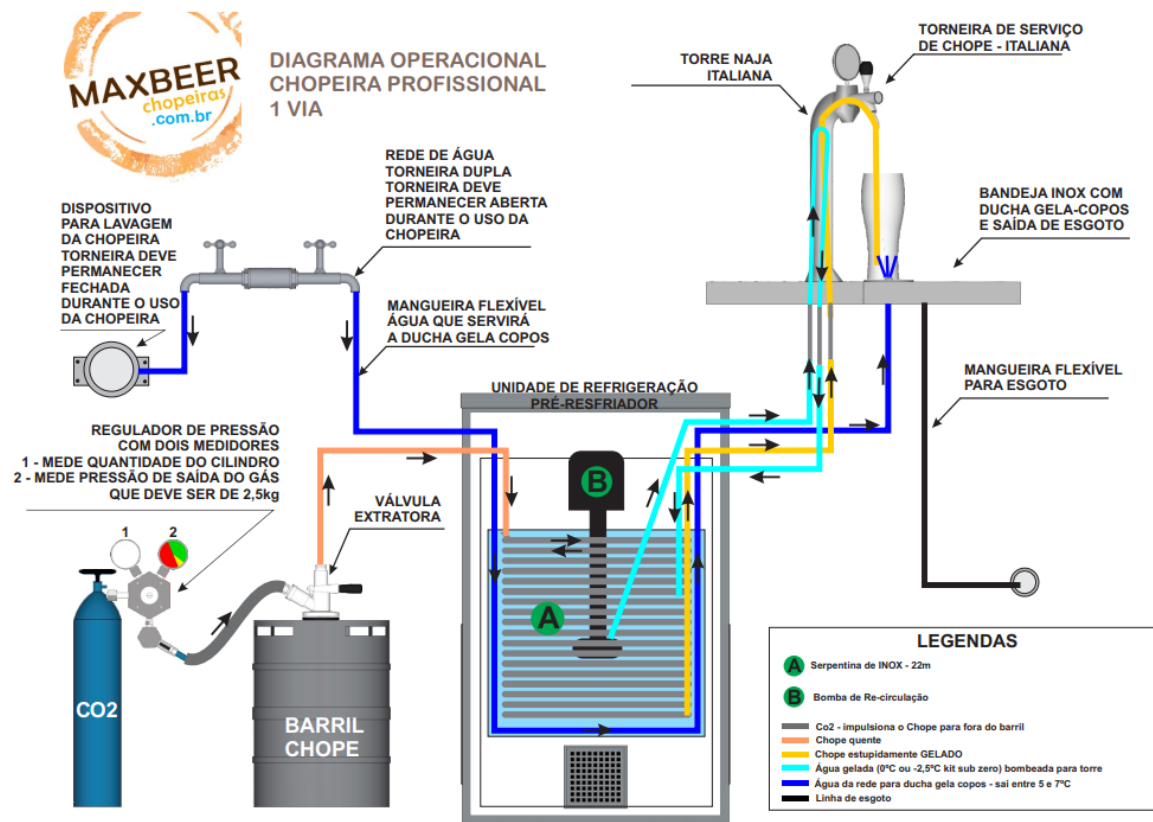
2.1.3 Chopeiras Elétricas

Segundo Maxbeer (2019), no mercado brasileiro, existem dois tipos de chopeiras: banco de gelo ou frio e expansão direta. O tipo selecionado para fabricação é o de expansão direta. Na

concepção de Rodrigues (2022), esse sistema de refrigeração corresponde a um mecanismo de arrefecimento no qual o fluido primário realiza diretamente a evaporação, destacando-se pela eficiência energética obtida na troca de calor entre o refrigerante e o ar a ser resfriado, uma vez que não há a presença de intermediários nesse processo.

De acordo com Maxbeer (2019), este sistema em questão deve contar com uma unidade de refrigeração, uma ou duas serpentinas e uma bomba de recirculação, responsáveis por assegurar a uniformidade da temperatura do chopp. A Figura 5 a seguir, mostra em detalhes o diagrama operacional de uma chopeira elétrica profissional de uma via, no qual é possível identificar a unidade de refrigeração e os demais componentes que integram o processo operacional.

Figura 5 - Representação esquemática do diagrama operacional de uma chopeira elétrica



Fonte: Maxbeer, (2019).

Uma chopeira elétrica é composta por três sistemas, cada um com uma função específica: o sistema de refrigeração, o sistema de extração e o sistema de serviço. O sistema de extração inclui o barril, o cilindro de ar e a válvula reguladora, e é responsável por retirar o chopp do barril e levá-lo para o sistema de refrigeração. Neste ponto, encontra-se a unidade condensadora, junto com o reservatório e as serpentinas, que resfriam o chopp até a temperatura

ideal. O último estágio, o sistema de serviço, consiste basicamente em mangueiras e uma torneira, que libera o líquido para os copos (MAXBEER, 2019).

Iwakura (2018), afirma que o chopp nada mais é do que um tipo de cerveja não pasteurizada, sai do barril empurrado pela pressão do gás carbônico proveniente de cilindros estocados no bar e controlada pelas torneiras da chopeira. Onde, mangueiras plásticas levam o chopp para o pré-resfriador. Esse aparelho contém uma solução aquosa a 2 graus negativos e uma serpentina – uma longa tubulação de aço inoxidável com 5 milímetros de diâmetro e toda enrolada.

A espessura da serpentina é reduzida para aumentar a área de contato da bebida com a parede metálica. Outras mangueiras conduzem de forma prática o chopp para uma segunda serpentina, localizada abaixo e no interior da chopeira propriamente dita. Essa serpentina é um pouco mais espessa que a anterior, e seus tubos são enrolados em espiral.

2.2 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Um sistema de refrigeração é composto por uma série de componentes e equipamentos conectados de maneira sequencial para gerar o efeito de resfriamento. De acordo com Flores et al. (2024), existem diferentes tecnologias de refrigeração, tais como compressão de vapor, absorção de vapor, efeito termoelétrico, ciclo ou expansão de ar e ejeção de vapor. Entre os sistemas mencionados, os sistemas de compressão de vapor e de absorção são os mais amplamente utilizados em contextos comerciais e industriais. O sistema de compressão de vapor, em particular, é o mais comumente empregado e, portanto, será analisado de forma detalhada.

Antes de descrever sucintamente o sistema de compressão mecânica de vapor e seu funcionamento, é importante mencionar os principais componentes do sistema e seus acessórios, tanto do ponto de vista técnico quanto operacional.

2.3 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

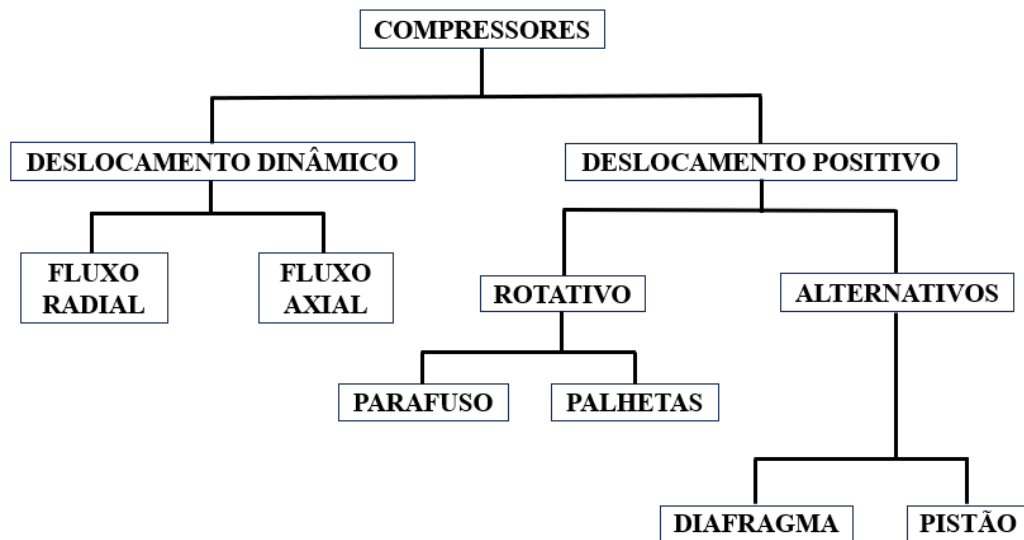
O objetivo de um sistema de refrigeração é manter uma região fria a uma temperatura inferior à de sua vizinhança (MORAN et al., 2020). Além disso, a refrigeração é um processo que reduz e mantém a temperatura de um corpo ou substância abaixo da temperatura ambiente, podendo ser alcançada por meios naturais e artificiais, como já foi mencionado anteriormente.

Esse sistema é composto por quatro componentes básicos: um compressor, um evaporador, um condensador e uma válvula de expansão termostática.

2.3.1 Compressores

Em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor, os compressores, têm a função de bombear o fluido refrigerante e aumentar sua pressão. Eles podem ser divididos em duas grandes categorias: deslocamento dinâmico e de deslocamento positivo, conforme indica a Figura 6, com os de deslocamento positivo sendo os mais amplamente utilizados.

Figura 6 - Representação esquemática dos tipos de compressores industriais



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, (2021).

Ainda segundo Flores et al. (2024), o compressor é considerado o coração do sistema de refrigeração; sua função é pressurizar o refrigerante que sai do evaporador como vapor em baixa temperatura e pressão, levando-o a um estado termodinâmico de vapor superaquecido em alta temperatura e pressão.

Os compressores de deslocamento positivo realizam a compressão de forma mecânica, introduzindo um volume de vapor no compressor, que é então comprimido por um atuador mecânico, reduzindo seu volume. Durante a compressão, a pressão do refrigerante aumenta até atingir o valor desejado, sendo então liberado para a linha de descarga. Por outro lado, os compressores de deslocamento dinâmico podem ser escoamento axial ou radial, sendo que a maioria dos utilizados em refrigeração é do tipo radial, conhecidos como compressores centrífugos.

O compressor alternativo opera com um pistão que se move dentro de um cilindro, utilizando válvulas automáticas para a sucção e descarga do fluido refrigerante. Durante a admissão, o pistão desce, sugando o gás refrigerante pela câmara de sucção, que se abre devido à diferença de pressão. Quando o pistão desce do ponto morto superior, o gás no volume morto

se reexpande, atrasando a abertura da válvula de sucção e reduzindo a eficiência volumétrica do compressor (GOMES, 2006).

Nos compressores rotativos, o rotor é montado em um cilindro com excentricidade. Embora esse tipo de compressor apresente perdas mecânicas devido ao atrito, elas são menores em comparação com os compressores alternativos. Os compressores rotativos são classificados em dois tipos principais: os de parafuso e os de palhetas (NUNES 2021).

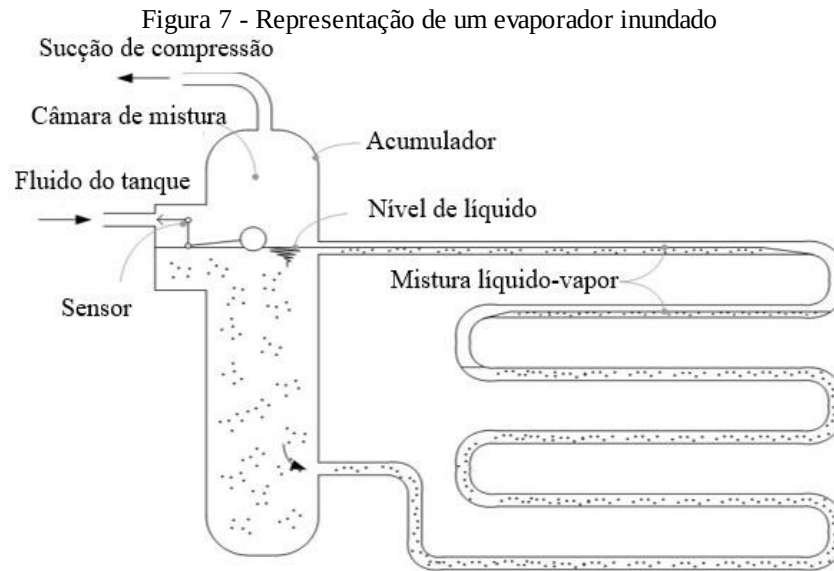
As perdas de energia útil no compressor podem ser classificadas em três grupos: elétricas, mecânicas e termodinâmicas. As perdas elétricas estão ligadas à eficiência do motor elétrico, as mecânicas ao atrito nos mancais e na folga pistão-cilindro, e as termodinâmicas às ineficiências nos processos de compressão, expansão, sucção e descarga, além da transferência de calor e vazamentos de fluido. Adicionalmente, no ciclo de compressão de vapor, há perdas devido à não utilização do trabalho de expansão do gás e à compressão isentrópica até a pressão de condensação, em vez da temperatura de condensação, como no ciclo ideal de Carnot (GOMES, 2006).

2.3.2 Evaporadores

O evaporador é o agente responsável direto pelo resfriamento e um dos quatro principais elementos do sistema de refrigeração. Nele ocorre a troca de calor entre o fluido refrigerante e o produto ou ambiente a ser refrigerado, resultando na evaporação do fluido refrigerante.

Para Ronquillo (2020), esses trocadores de calor recebem um fluido refrigerante em baixa pressão e baixa temperatura e proporcionam o contato térmico com o fluido externo. Assim, o fluido refrigerante absorve o calor latente e muda de fase, passando do estado líquido para o vapor.

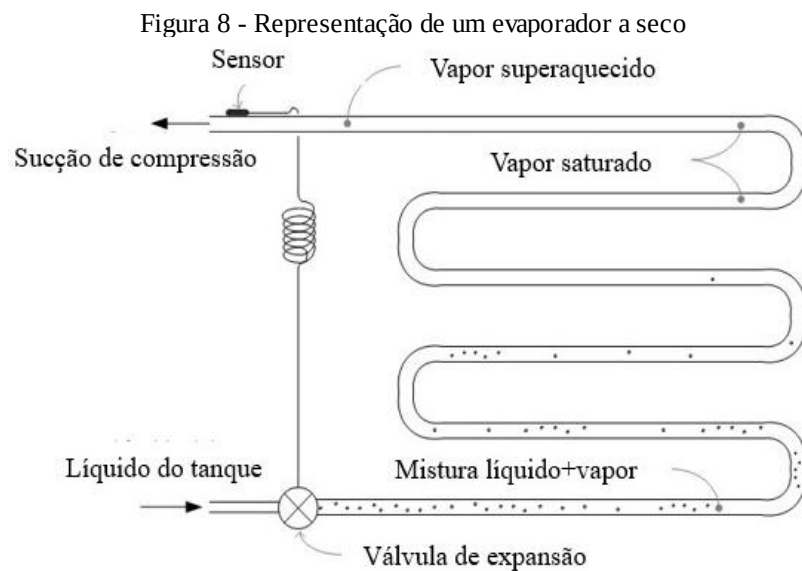
Segundo Nunes (2021), existem dois tipos de evaporadores: os inundados e os secos. Nos evaporadores inundados, a circulação do fluido pode ser natural ou forçada, operando com o auxílio de um tanque adicional. O fluxo retorna a esse tanque, que tem a função de separar as fases líquida e gasosa, conforme ilustrado na Figura 7.



Fonte: Adaptado de ANFUSO, (2020).

Os evaporadores inundados são geralmente utilizados em sistemas de refrigeração de maior potência, pois conseguem alcançar valores mais altos de coeficiente global de transferência de calor.

A Figura 8 ilustra o funcionamento de um evaporador seco, no qual o fluido refrigerante evapora completamente, sofrendo um leve superaquecimento, porque existe uma zona do evaporador onde a temperatura do fluido refrigerante é variável. Esse tipo de evaporador é geralmente utilizado em sistemas de menor potência.



Fonte: Adaptado de ANFUSO, (2020).

As características dos evaporadores são geralmente descritas com base na temperatura do meio a ser refrigerado e na temperatura de evaporação.

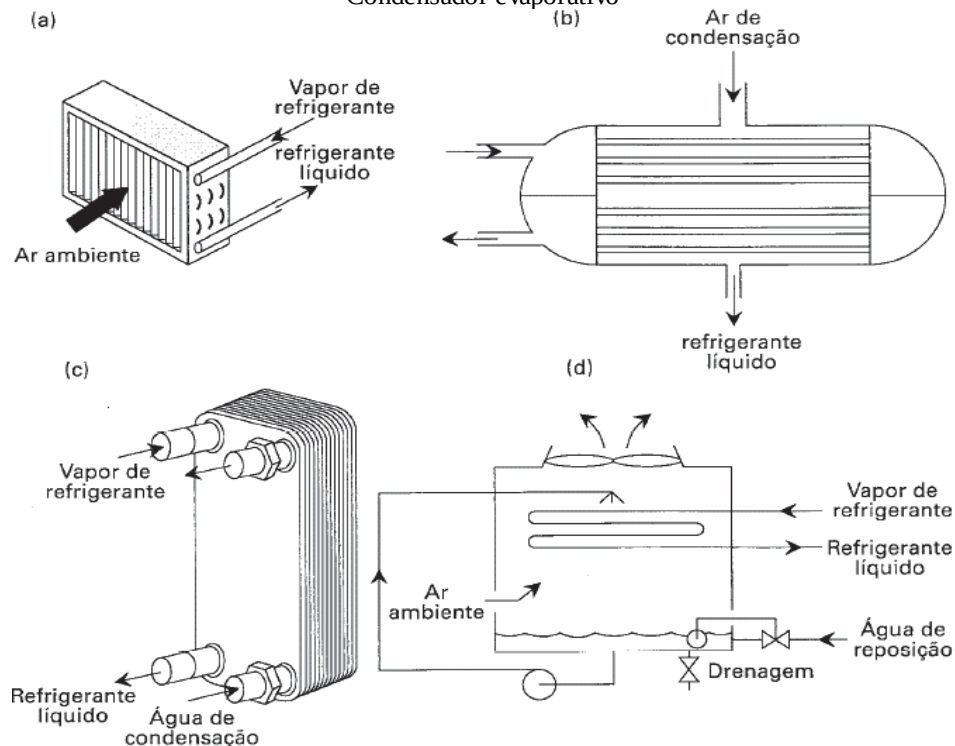
2.3.3 Condensadores

Condensadores são os elementos do sistema de refrigeração que têm como característica a transformação do gás quente a alta pressão, oriundo do compressor, em líquido, rejeitando o calor contido no fluido refrigerante para algum meio. A função deste sistema é liberar para o ambiente externo, através de suas aletas, todo o calor absorvido pelo fluido refrigerante no evaporador e durante o processo de compressão.

Segundo Paula (2017), existe três tipos de condensadores aplicados a refrigeração doméstica, comercial e industrial, conforme indica a Figura 9. Esses aparelhos podem ser resfriados a ar, resfriado a água, e evaporativo. Os condensadores resfriados a ar utilizam o ar como meio de condensação, enquanto os condensadores resfriados a água empregam a água para condensar o refrigerante. Em ambos os tipos de condensadores, o calor liberado pelo refrigerante durante a condensação aumenta a temperatura do ar ou da água usados como meio de condensação.

Os condensadores evaporativos utilizam tanto o ar quanto a água. Embora a temperatura do ar que passa pelo condensador possa aumentar um pouco, a condensação do refrigerante ocorre principalmente devido à evaporação da água pulverizada sobre o condensador. O papel do ar é aumentar a taxa de evaporação, removendo o vapor de água gerado durante o processo de evaporação (SANTOS, 2017).

Figura 9 - (a) Condensador resfriado a ar; (b) Condensador resfriado a água; (c) Condensador de placas; (d) Condensador evaporativo



Fonte: STOECKER, (2018).

O condensador resfriado a ar (a), utiliza uma superfície com aletas para transferir o calor do refrigerante para o ambiente até que ocorra a condensação. O condensador (b) é um sistema de condensação resfriado a água, do tipo carcaça-tubos, um modelo mais antigo. Nesse sistema, o vapor é condensado através da troca de calor com a água fria que circula por tubos dentro da carcaça. Os condensadores de placas resfriados a água (c) funcionam de maneira semelhante aos evaporadores de placa, onde a água flui pelas placas e o refrigerante é condensado nos tubos. No evaporador evaporativo (d), o resfriamento é altamente eficiente, pois o calor é removido tanto pela água quanto pelo fluxo de ar forçado por um ventilador (STOECKER, 2018).

2.3.4 Válvula de Expansão

Em um sistema de refrigeração, o dispositivo de expansão tem a função de reduzir a pressão do refrigerante da pressão de condensação até a pressão de vaporização. Além disso, a válvula de expansão deve regular a vazão do refrigerante que chega ao evaporador, para atender à carga térmica aplicada a ele.

As válvulas de expansão termostáticas controlam a injeção de líquido refrigerante nos evaporadores. Esse controle é baseado no superaquecimento do refrigerante. Assim, essas válvulas, conforme indica a Figura 10, são particularmente adequadas para a injeção de líquido em evaporadores "secos", onde o superaquecimento na saída do evaporador é proporcional à carga do evaporador (DANFOSS, 2024).

Figura 10 - Representação esquemática de uma válvula de expansão termostática



Fonte: DANFOSS, (2024).

A Figura 10 apresenta um exemplo típico de válvula de expansão. Essas válvulas devem ser altamente resistentes à pressão de trabalho, com alguns componentes fabricados em aço inoxidável e soldados a laser. Além disso, precisam ser resistentes à corrosão e facilmente ajustáveis ao superaquecimento. Devido à sua capacidade de operar em uma ampla faixa de temperaturas, essas válvulas são amplamente utilizadas em refrigeração industrial, sistemas de bombas de calor, ar-condicionado, transporte refrigerado, resfriadores de líquidos e máquinas de gelo (DANFOSS, 2024).

2.3.5 Fluido refrigerante

O fluido refrigerante é um líquido ou gás que absorve calor de uma substância ou ambiente que precisa ser resfriado. Vilain (2018), ainda explica que o fluido refrigerante é uma substância que circulando dentro de um circuito fechado é capaz de retirar calor de um meio enquanto vaporiza-se a baixa pressão.

As principais características de um bom refrigerante são: condensar-se a pressões moderadas, evaporar-se a pressões superiores à atmosférica, ser não corrosivo, não inflamável, não tóxico, inodoro, ter um baixo volume específico (o que reduz o trabalho do compressor), apresentar um alto calor latente de vaporização e ser quimicamente estável (não se altera durante as repetidas mudanças de estado no sistema de refrigeração). A seguir, na Figura 11, é possível ver uma ilustração de diferentes tipos de bujões para gases refrigerantes.

Figura 11 -Representação esquemática de bujões de gás (fluido refrigerante)



Fonte: GURGEL, (2017).

Como já foi mencionado, o fluido refrigerante é o responsável pela troca de calor em sistemas de climatização e refrigeração. Por isso, a procedência e a qualidade do produto são essenciais para o bom desempenho dos equipamentos e a segurança de profissionais e usuários.

A Tabela 1 mostra o comportamento do fluido refrigerante nos equipamentos de refrigeração já mencionados anteriormente.

Tabela 1 - Processos termodinâmicos ocorrendo num ciclo de refrigeração

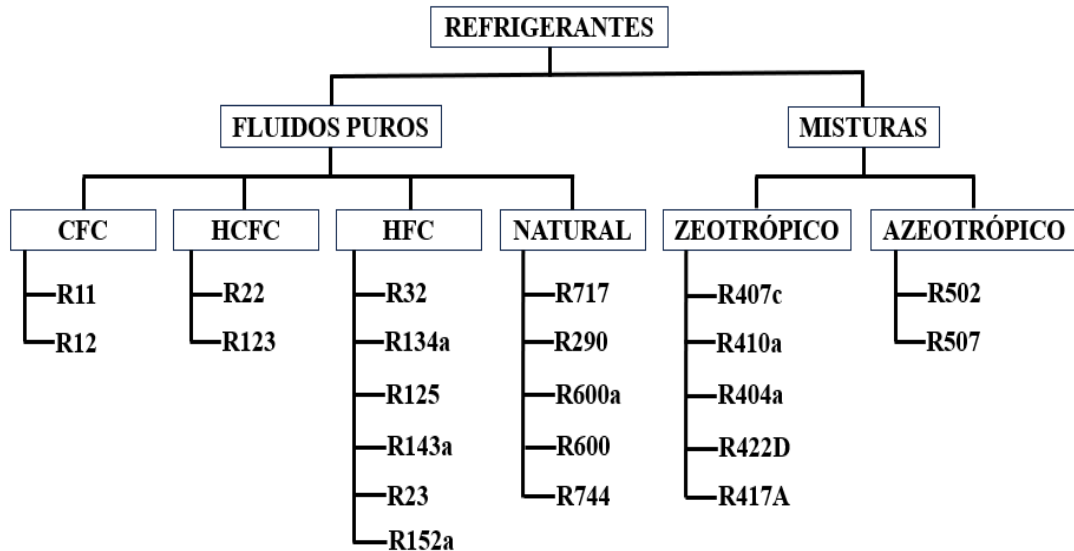
Componente	Características da transformação sofrida pelo fluido refrigerante
Evaporador	Vaporização do fluido refrigerante à baixa pressão
Compressor	Compressão do fluido refrigerante
Condensador	Condensação a uma pressão elevada
Dispositivo de Expansão	Expansão do fluido refrigerante

Fonte: VILAIN, (2018).

Na Tabela 1, é possível observar o processo de transformação do fluido refrigerante nos equipamentos de refrigeração, destacando seus componentes e as características de modificação ao longo do ciclo do fluido.

Segundo Stoecker (2018), os fluidos refrigerantes mais comuns são os hidrocarbonetos fluorados, mas muitas outras substâncias também atuam como refrigerantes, incluindo vários compostos inorgânicos e hidrocarbonetos. Além disso, Miller (2020), afirma que a classificação desses fluidos refrigerantes é dividida em fluido puros e a misturas de fluidos, conforme a indica a Figura 12 abaixo.

Figura 12 - Classificação dos fluidos refrigerantes



Fonte: Adaptado de BANDEY, (2020).

Os fluidos refrigerantes puros são utilizados em compressores padrão em sistemas de refrigeração. Já os fluidos refrigerantes desenvolvidos a partir de uma mistura, são empregados como agentes intermediários de resfriamento entre os puros e a substância a ser refrigerada (MILLER, 2020).

2.4 CONCEITOS TERMODINÂMICOS

Uma das principais áreas de aplicação da termodinâmica é a refrigeração, que envolve a transferência de calor de uma região de temperatura mais baixa para uma de temperatura mais alta. Os dispositivos que realizam essa transferência são chamados de refrigeradores, e os processos em que eles operam são conhecidos como ciclos de refrigeração (ÇENGEL et al., 2018).

2.4.1 Processos e sistemas

Os processos referem-se às mudanças de estado que ocorrem no sistema devido às variações nas suas propriedades, como massa, volume, energia, pressão e temperatura. Além disso, um processo é uma transformação de um estado a outro (MORAN et al., 2020).

Para Moran (2020), o sistema é tudo aquilo que se deseja estudar separado de sua vizinhança por uma fronteira fixa ou móvel. Ele pode ser tão simples como um corpo livre ou tão complexo como uma refinaria química inteira e, uma vez que este é definido e as interações relevantes com os outros sistemas são identificadas, uma ou mais leis ou relações físicas são aplicadas

Segundo Moran et al. (2020), um sistema pode ser dividido em três categorias:

- Sistema fechado, onde sempre contém mesma quantidade de matéria e não ocorrer fluxo de massa através de suas fronteiras, mas pode haver fluxo de energia;
- Sistema aberto ou volume de controle, onde ocorre fluxo de massa e energia através das fronteiras;
- Sistema isolado, tipo especial de sistema fechado que não interage de modo algum com suas vizinhanças, isto é, não há fluxo de massa e nem de energia.

Para equipamentos como compressores, evaporadores e condensadores, por exemplo, a análise é feita considerando o sistema como aberto.

2.4.2 Energia em um sistema

A primeira lei da termodinâmica, também chamada de princípio de conservação da energia, fornece uma base sólida para entender as relações entre as diferentes formas de energia e suas interações. Com base em observações experimentais, essa lei afirma que a energia não pode ser criada nem destruída durante um processo; ela apenas pode se transformar de uma forma para outra (ÇENGEL et al., 2019).

Portanto, podemos expressar a variação da energia total ou o balanço de energia em termos da diferença entre a energia que entra e a que sai de um sistema em análise, conforme indicado na Equação 1:

$$\Delta E_{\text{sistema}} = E_{\text{ent}} - E_{\text{sai}} \quad [\text{kJ}] \quad (1)$$

Onde:

$\Delta E_{\text{sistema}}$ = Variação de energia [kJ];

E_{ent} = Energia que entra no sistema [kJ];

E_{sai} = Energia que sai do sistema [kJ].

Esse postulado é válido até mesmo para energia condensada. Portanto, a conservação de massa no sistema pode ser expressa pela Equação 2:

$$\Delta m = m_{\text{ent}} - m_{\text{sai}} \quad [\text{kg}] \quad (2)$$

Onde:

Δm = Variação de massa [kg];

m_{ent} = Massa que entra no sistema [kg];

m_{sai} = Massa que sai do sistema [kg].

Para Çengel et al. (2019), a energia existe sob várias formas, e pode ser térmica, mecânica, elétrica, interna (sensível, latente, química e nuclear) e magnética. Além disso, estão inclusas aqui também a energia cinética, associada ao movimento de translação, rotação e vibração dos átomos e moléculas, e a energia potencial resultante das interações entre esses processos.

Em muitos casos, certos tipos de energia são mais importantes para a análise de um sistema termodinâmico. Assim, na ausência de efeitos de natureza magnética, elétrica e de tensão superficial, podemos definir a energia total do sistema como a soma das energias interna, cinética e potencial, conforme mostrado na Equação 3:

$$E = U + EC + EP \quad [\text{kJ}] \quad (3)$$

Onde:

E = Energia total [kJ];

U = Energia interna [kJ];

EC = Energia cinética [kJ];

EP = Energia potencial [kJ].

Ou ainda, considerando as expressões típicas de um sistema termodinâmico para as energias interna, cinética e potencial. Essa nova configuração é representada pela Equação 4:

$$E = mu + \frac{1}{2}mV^2 + mgZ \quad [\text{kJ}] \quad (4)$$

Onde:

m = Massa [kg];

u = Energia interna específica [kJ/kg];

V = Velocidade [m/s];

g = Aceleração da gravidade [m/s^2];

Z = Altura [m].

E em termos de unidade de massa a Equação (4), pode ser expressa por

$$e = u + \frac{V^2}{2} + gZ \quad [\text{kJ}] \quad (5)$$

Onde:

e = Energia específica [kJ].

Na concepção de Santos et al, (2020), em sistemas fechados, onde não ocorre fluxo de massa, as formas pelas quais a energia atravessa a fronteira são por calor e trabalho. Assim, a variação de energia pode ser descrita em termos dos fluxos de calor e trabalho, isto é, na forma temporal como mostrado na Equação 6:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad [\text{kJ/s}] \quad (6)$$

Onde:

dE/dt = Variação de energia em relação ao tempo [kJ/s];

$\dot{Q}$ = Fluxo de calor [kW];

$\dot{W}$ = Trabalho em forma de taxa [kW].

Diferentemente dos sistemas fechados, nos volumes de controle, onde há energia térmica e mecânica relacionadas ao fluxo de massa que passa através de suas fronteiras, a energia transportada pela massa pode ser expressa pela Equação 7:

$$E = \dot{m}(Pv + e) \quad [\text{kJ}] \quad (7)$$

Onde:

E = Energia total [kJ];

$\dot{m}$ = Vazão mássica [kg/s];

P = Pressão [kPa];

v = Volume específico [m³/kg];

e = Energia específica [kJ].

De acordo com Borgnakke (2020), sempre que o fluido entra no volume de controle, há um trabalho associado ao movimento da fronteira durante esse processo. Esse trabalho de fluxo na fronteira do volume de controle, por unidade de massa, representa a energia de escoamento do fluido, chamada de Pv . O termo (e) refere-se à quantidade de energia presente em uma unidade de massa do fluido. Agora, substituindo (e) da Equação 5 na Equação 7, tem-se a Equação 8:

$$E = \dot{m} \left(Pv + u + \frac{V^2}{2} + gZ \right) \quad [\text{kJ}] \quad (8)$$

Segundo Çengel et al. (2018), na análise desses processos de geração de energia e refrigeração, é comum encontrarmos a combinação das propriedades $u + Pv$. Para simplificar e facilitar o uso, essa combinação é definida como uma nova propriedade chamada entalpia, representada pelo símbolo h . Desse modo, podemos escrever a Equação 9, da seguinte forma.

$$E = \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gZ \right) \quad [\text{kJ}] \quad (9)$$

Onde:

E = Energia total [kJ];

$\dot{m}$ = Vazão mássica [kg/s];

h = Entalpia [kJ/kg]

O balanço de energia no sistema pode ser expresso, conforme a Equação (10), em função do tempo, considerando o fluxo de calor, o trabalho e a energia relacionada à massa.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} + \dot{m} \left(\Delta h + \Delta \frac{V^2}{2} + \Delta gZ \right) \quad [\text{kW}] \quad (10)$$

Onde:

Δh = Variação de entalpia [kJ/kg];

$\Delta V^2/2$ = Variação de energia cinética [kJ];

ΔgZ = Variação de energia potencial [kJ].

2.4.3 Trabalho desenvolvido por um sistema

O trabalho é uma interação de energia entre um sistema e sua vizinhança. A energia pode atravessar a fronteira de um sistema fechado na forma de calor ou de trabalho. Assim, se a energia que cruza a fronteira de um sistema fechado não é calor, logo ela é trabalho (ÇENGEL et al., 2019). Mais especificamente, o trabalho é a transferência de energia associada a uma força que age ao longo de uma distância (s), e é calculado pela Equação 11:

$$W = F \cdot s \quad [\text{kJ}] \quad (11)$$

Onde:

W = Trabalho realizado por um sistema [kJ];

F = Força [N];

s = Distância [m].

Quando a força F não é constante, o trabalho realizado é determinado pela soma (ou seja, pela integração) das quantidades diferenciais de trabalho, conforme indica a Equação 12:

$$W = \int_1^2 F \cdot ds \quad [\text{kJ}] \quad (12)$$

Onde:

ds = Variação da distância [m].

Muitas análises termodinâmicas se concentram na taxa com que a transferência de energia acontece. A taxa de transferência de energia por meio de trabalho é chamada de potência e é representada por $\dot{W}$, conforme indica a Equação 13. Quando o trabalho envolve uma força observável macroscopicamente, a taxa de transferência de energia sob forma de trabalho é equivalente ao produto da força pela velocidade no ponto onde a força é aplicada (MORAN et al., 2020).

$$\dot{W} = F \cdot V \quad [\text{kJ/s}] \text{ ou } [\text{kW}] \quad (13)$$

Onde:

$\dot{W}$ = Potência (taxa de transferência de energia por meio de trabalho) [kW];

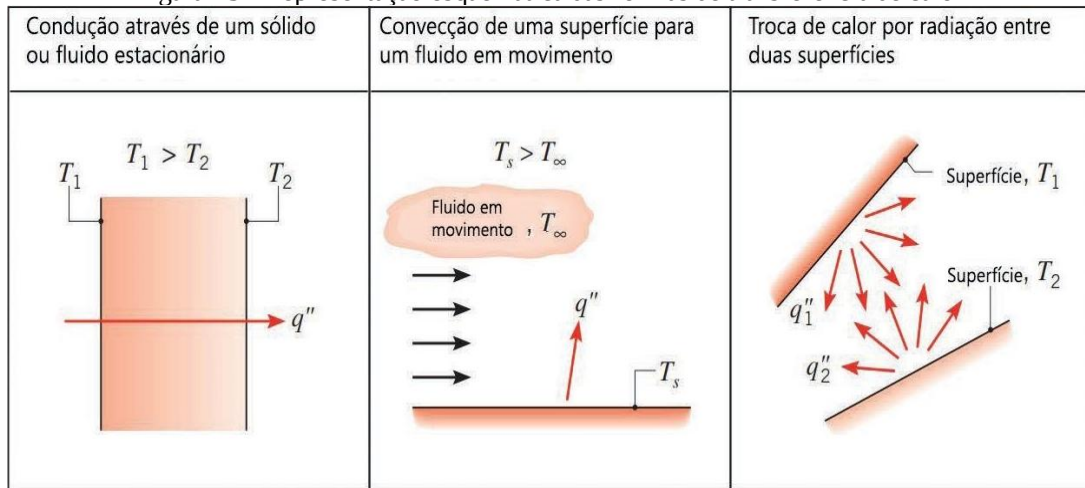
V = Velocidade no ponto de aplicação da força [m/s].

2.4.4 Mecanismos de transferência de calor

A transferência de calor é a energia térmica em trânsito impulsionada pela diferença de temperatura no espaço (INCROPERA et al., 2020). Essa transferência pode ocorrer por

condução, convecção e radiação. Na Figura 13, é possível observar um modelo esquemático dos três processos de transferência de calor.

Figura 13 - Representação esquemática das formas de transferência de calor



Fonte: Adaptado de INCROPERA et al., (2020).

Os modos de transferência de calor considerados relevantes para este trabalho são a condução e a convecção, que estão relacionados com a natureza dos materiais envolvidos e a presença de movimento de fluidos, entre outros fatores.

2.4.4.1 Fluxo de calor

O fluxo de calor, resultante da diferença de temperatura, pode ser descrito de duas formas, dependendo dos dados disponíveis e da aplicação pretendida (INCROPERA et al., 2020). Ainda, segundo Incropera et al. (2020), a equação simplificada da energia térmica para sistemas com escoamento em regime permanente é exemplificada pela Equação 14:

$$q = \dot{m} \cdot c_p (T_{\text{sai}} - T_{\text{ent}}) \quad [\text{W}] \quad (14)$$

Onde:

q = Fluxo de calor [W];

$\dot{m}$ = Vazão mássica do fluido [kg/s];

c_p = Calor específico do fluido [kJ/kg °C];

T_{sai} = Temperatura de saída do fluido [°C];

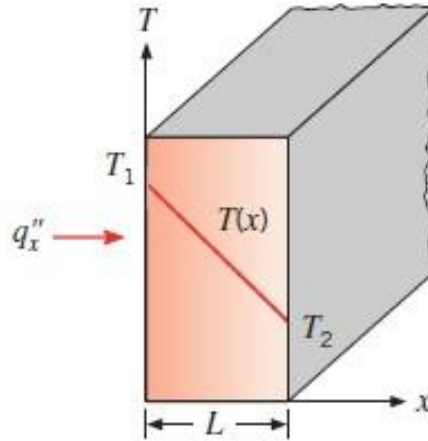
T_{ent} = Temperatura de entrada do fluido [°C].

2.4.4.2 Condução

A transferência de energia por condução pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases. Esse processo pode ser imaginado como a transferência de energia das partículas mais energéticas

de uma substância para as partículas adjacentes menos energéticas, resultante das interações entre elas (MORAN et al., 2020). A Figura 14 ilustra um esquema de transferência de calor por condução através de uma parede plana unidimensional.

Figura 14 - Transferência de calor unidimensional por condução (difusão de energia)



Fonte: INCROPERA et al., (2020).

Os processos de transferência de calor podem ser quantificados usando equações de taxa adequadas, que permitem calcular a quantidade de energia transferida por unidade de tempo. No caso da condução térmica, a equação de taxa é conhecida como a lei de Fourier, conforme indica a Equação 15:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad [\text{W/m}^2] \quad (15)$$

Onde:

q_x'' = Fluxo de calor (fluxo térmico) $[\text{W/m}^2]$;

k = Condutividade térmica $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$;

dT/dx = Variação da temperatura em relação ao comprimento da barra $[\text{m}]$.

A taxa de transferência de calor por unidade de área normal à direção da transferência de calor é denominada fluxo calor (fluxo térmico), dado pela Equação 15:

Nas condições de estado estacionário ilustradas na Figura 14, onde a distribuição de temperaturas é linear, o gradiente de temperatura pode ser representado pela Equação 16:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad [\text{K/m}] \quad (16)$$

Onde:

dT/dx = Variação da temperatura em relação ao comprimento da barra $[\text{K/m}]$.

T_2 = Temperatura final da barra ou bastão cilíndrico $[\text{°C}]$;

T_1 = Temperatura inicial da barra ou bastão cilíndrico [°C];

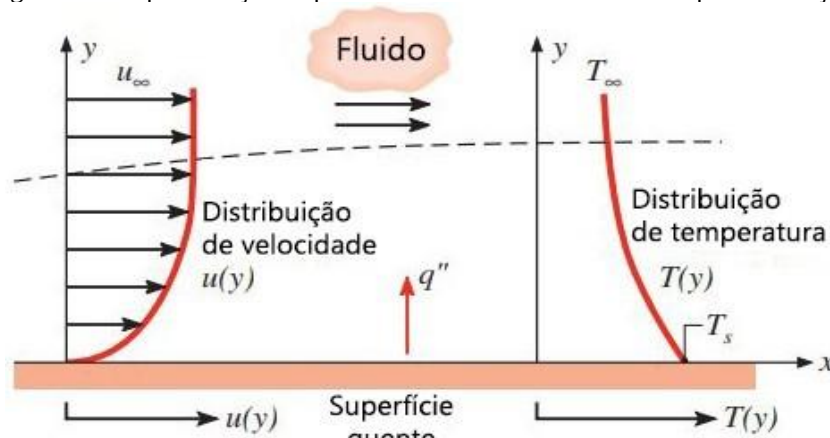
L = Comprimento do bastão cilíndrico [m].

2.4.4.3 Convecção

A convecção é o modo de transferência de calor que ocorre entre um corpo sólido e o fluido que o envolve, resultando de uma combinação entre condução e o movimento do fluido.

Segundo Incropera et al. (2020), o processo de convecção está relacionado à transferência de calor entre um fluido e uma superfície, ou no interior do próprio fluido, resultante tanto de movimentos aleatórios de difusão das partículas quanto do movimento global do fluido, que também é conhecido como advecção, como indica a Figura 15.

Figura 15 - Representação esquemática da transferência de calor por convecção



Fonte: Adaptado de INCROPERA et al., (2020).

De acordo com Çengel e Ghajar (2020), quanto maior a velocidade do fluido, maior será a transferência de calor por convecção. Esse tipo de transferência de calor pode ser descrito pela lei de resfriamento de Newton, como mostrado na Equação 17:

$$q'' = h A (T_s - T_\infty) \quad [\text{W/m}^2] \quad (17)$$

Onde:

q'' = Fluxo de calor por convecção [W/m^2];

h = Coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$];

A = Área superficial [m^2]

T_s = Temperatura do corpo [°C];

T_∞ = Temperatura do fluido [°C].

O coeficiente de transferência de calor não é uma propriedade termodinâmica, mas sim um parâmetro empírico. Ele incorpora um padrão de escoamento próximo à superfície, as

características do fluido e a geometria envolvida na transferência de calor. Quando ventiladores ou bombas geram o movimento do fluido, esse coeficiente é afetado (MORAN et al., 2020).

2.4.5 Ciclos de refrigeração por compressão de vapor

Os ciclos de refrigeração foram desenvolvidos por meio da inversão completa do ciclo de Carnot. Assim, o ciclo de compressão a vapor surge a partir de alterações no ciclo de Carnot Reverso. De acordo com Carvalho (2019), para tornar possível este processo termodinâmico, essas modificações incluem a vaporização total do fluido refrigerante antes de sua entrada no compressor e a substituição da turbina por um dispositivo de estrangulamento, como uma válvula de expansão ou um tubo capilar.

2.4.6 Ciclo de refrigeração reverso de Sadi Carnot

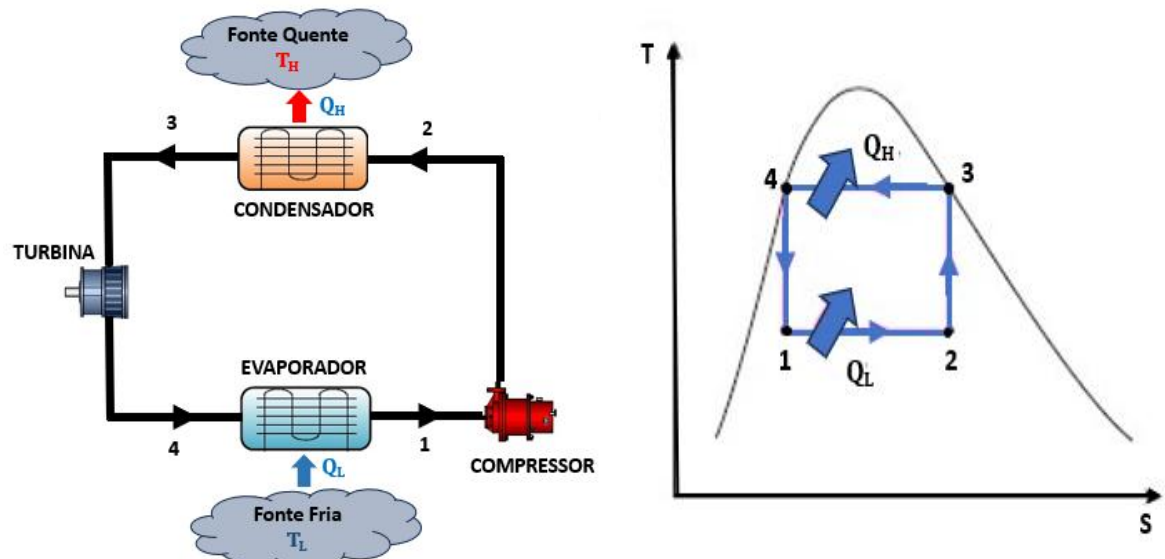
O ciclo de refrigeração de Carnot é derivado da inversão do ciclo de potência a vapor de Carnot. Ainda sob essa perspectiva, Çengel et al. (2019) explica que, a máquina teórica que opera, segundo o ciclo de Carnot, denomina-se máquina de Carnot. O ciclo de Carnot é composto por quatro processos reversíveis, dois isotérmicos e dois adiabáticos e pode ser executado por um sistema fechado ou por um sistema com escoamento em regime permanente.

Assim, Borgnakke (2020) afirma que o ciclo de Carnot pode ser descrito por quatro processos reversíveis, como:

- Expansão isotérmica;
- Expansão adiabática;
- Compressão isotérmica;
- Compressão adiabática.

Este ciclo conforme indica a Figura 16, é executado por meio da circulação contínua do gás refrigerante no sistema, com todos os processos sendo internamente reversíveis e sem a presença de irreversibilidades.

Figura 16 - Representação esquemática de um refrigerador de Carnot (a) e seu diagrama T-s (b)



(a) Esquema de um refrigerador de Carnot

(b) Diagrama T-s do ciclo de Carnot reverso

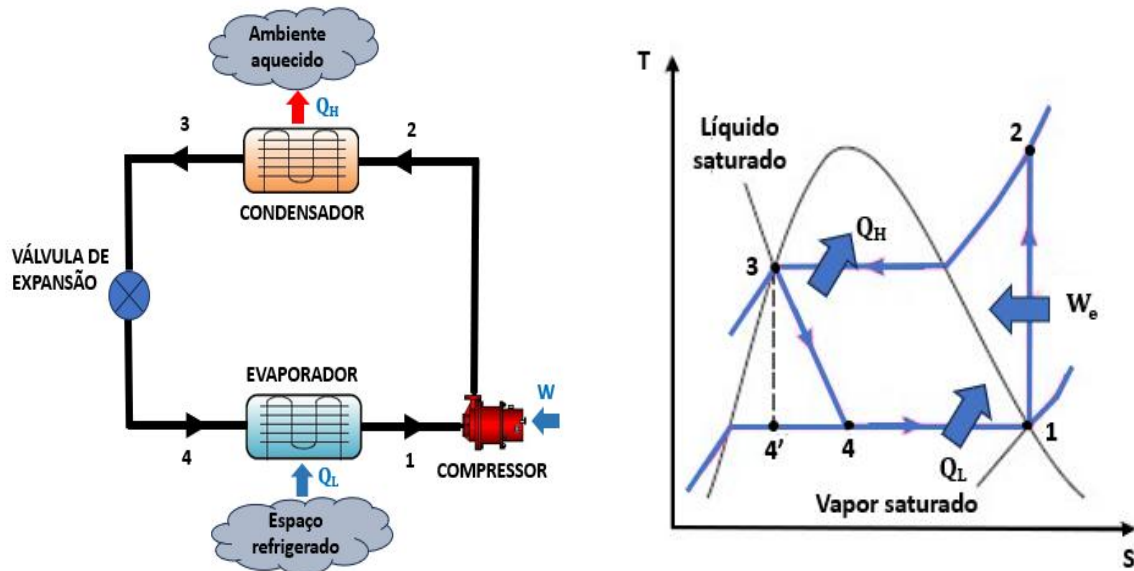
Fonte: Adaptado de ÇENGEL et al., (2019).

Nessas condições, o refrigerante absorve calor isotermicamente de uma fonte a uma baixa temperatura (processo 1-2), é comprimido de forma isentrópica até o estado 3 (onde ocorre a elevação da temperatura T_H), rejeita calor isotermicamente para um sumidouro a alta temperatura (processo 3-4) e se expande isentrópica até o estado 1 (onde a temperatura cai). Durante o processo 3-4, no condensador, o refrigerante passa de um estado de vapor saturado para um estado de líquido saturado.

2.4.7 Ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor

No ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor, assume-se que o refrigerante evapora completamente antes de entrar no compressor, e a turbina do ciclo de Carnot é substituída por uma válvula de expansão (ÇENGEL et al., 2019). Todos os processos do ciclo, ilustrado na Figura 17, são internamente reversíveis, com exceção de um processo chamado de estrangulamento, que embora seja irreversível, ainda sim este ciclo é considerado como ideal (MORAN et al., 2020).

Figura 17 - Representação esquemática do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor (a) e seu diagrama T-s (b)



(a) Esquema do ciclo ideal por compressão de vapor

(b) Diagrama T-s do ciclo ideal

Fonte: Adaptado de ÇENGEL et al., (2019).

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor é o mais usado para refrigeradores, sistemas de condicionamento de ar e bombas de calor (ÇENGEL et al., 2019). Ele consiste em quatro processos:

- 1-2 Compressão isentrópica em um compressor;
- 2-3 Rejeição de calor a pressão constante em um condensador;
- 3-4 Estrangulamento em um dispositivo de expansão;
- 4-1 Absorção de calor a pressão constante em um evaporador

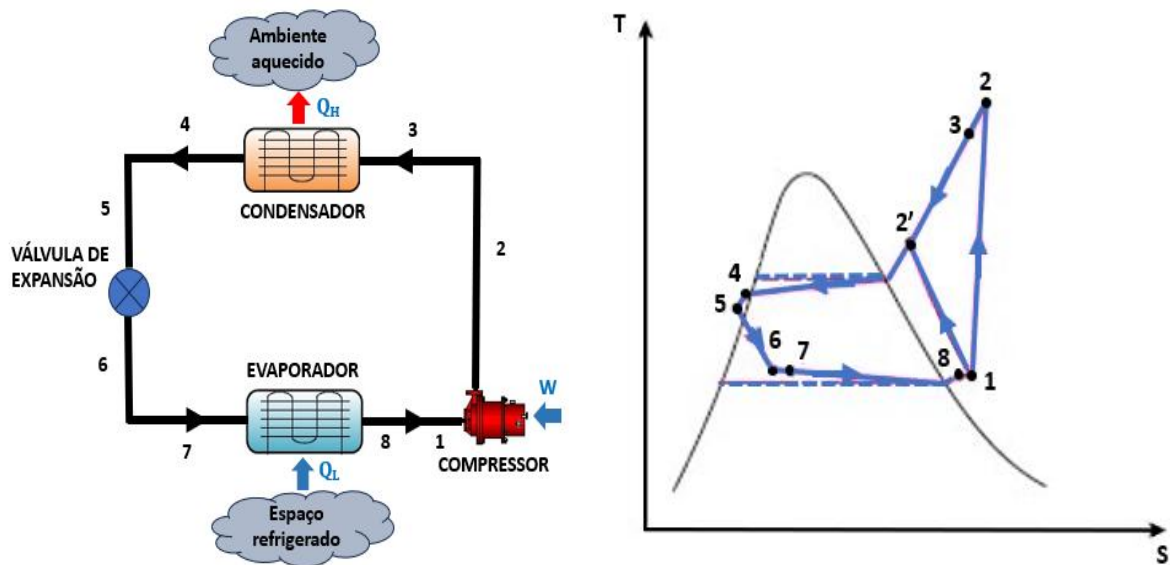
Em um ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor, o refrigerante, no estado de vapor saturado, o mesmo entra no compressor e é comprimido isoentropicamente até a pressão do condensador. Após a compressão, o fluido refrigerante passa de vapor saturado para vapor superaquecido (como mostra o processo 1-2) e, com a temperatura elevada, está preparado para rejeitar calor. No condensador, o refrigerante rejeita calor isobaricamente, saindo do estado de vapor superaquecido e passando para a fase de líquido saturado (processo 2-3). Em seguida, o refrigerante líquido é estrangulado isoentalpicamente, diminuindo sua pressão até a pressão do evaporador.

Durante esse processo, a temperatura do refrigerante fica abaixo da temperatura do espaço refrigerado (processo 3-4); o fluido, agora em uma mistura saturada, absorve calor do ambiente a ser refrigerado até que todo o líquido se evapore, e o refrigerante atinja o estado de vapor saturado (processo 4-1). O vapor saturado então retorna ao compressor, reiniciando o ciclo.

2.4.8 Ciclo real de refrigeração por compressão de vapor

O ciclo de refrigeração real difere do ciclo ideal de várias maneiras, principalmente devido às irreversibilidades presentes nos componentes. As irreversibilidades mais comuns incluem o atrito no escoamento do refrigerante (que causa quedas de pressão) e a troca de calor entre o refrigerante e o ambiente em todos os componentes. A Figura 18, mostra de forma esquemática o ciclo real de refrigeração por compressão de vapor e seu diagrama T-s.

Figura 18 - Representação esquemática do ciclo real e ideal de refrigeração por compressão de vapor (a) e seu diagrama T-s (b)



(a) Esquema do ciclo real por compressão de vapor

(b) Diagrama T-s do ciclo real e ideal

Fonte: Adaptado de ÇENGEL et al., (2019).

No ciclo ideal, a compressão é um processo adiabático e internamente reversível, o que significa que é isentrópico. No entanto, na compressão real, o atrito aumenta a entropia e a transferência de calor também pode influenciá-la, dependendo da sua direção, podendo tanto aumentar quanto diminuir a entropia.

2.5 BALANÇO DE ENERGIA NO CICLOS DE COMPRESSÃO A VAPOR

Para realizar o balanço energético no ciclo de compressão de vapor, considera-se o funcionamento do sistema em regime permanente nas condições de projeto, ou seja, com temperaturas de evaporação e condensação constantes.

2.5.1 Trabalho de compressão

Em um ciclo de refrigeração ideal, ao desconsiderar as variações de energia potencial, cinética e transferências de calor, os balanços de massa e energia determinam o trabalho de compressão (ÇENGEL et al., 2019).

No processo 1-2 do diagrama T-s da Figura 18, a quantidade de trabalho fornecida pelo compressor ao fluido refrigerante por unidade de tempo pode ser calculada utilizando a Equação 18:

$$\dot{W}_e = \dot{m} (h_2 - h_1) \text{ [kW]} \quad (18)$$

Onde:

$\dot{W}_e$ = Trabalho de compressão [kW];

$\dot{m}$ = Vazão mássica [kg/s];

h_2 = Entalpia na saída do compressor [kJ/kg];

h_1 = Entalpia na entrada do compressor [kJ/kg].

A taxa de compressão por unidade de massa pode ser descrita pela Equação 19:

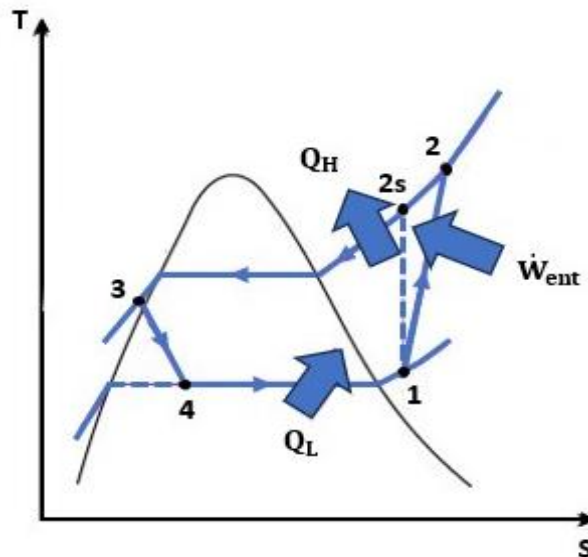
$$\frac{\dot{W}_e}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \text{ [kJ/kg]} \quad (19)$$

De acordo com Borgnakke (2020), em um ciclo real, os efeitos de fricção afetam a variação da entropia e a transferência de calor durante o processo de compressão. Dessa forma, a entalpia de saída real h_2 pode ser determinada com base no rendimento do compressor, conforme indicado na Equação 20:

$$h_2 = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_c} + h_1 \text{ [kJ/kg]} \quad (20)$$

Onde, h_{2s} é o equivalente a saída ideal [kJ/kg], conforme ilustrado na Figura 19, e η_c é eficiência isentrópica do compressor [%].

Figura 19 - Representação do diagrama T-s do ciclo real e ideal de refrigeração por compressão de vapor



Fonte: Adaptado de ÇENGEL et al., (2019).

2.5.2 Calor rejeitado no condensador

Çengel et al. (2019), explica que em um ciclo ideal, após passar pelo compressor, o fluido refrigerante entra no condensador como vapor superaquecido e, após liberar calor para o ambiente, sai do condensador no estado de líquido saturado. Não existe trabalho envolvido no processo e o fluxo de transferência de calor pode ser expresso pela Equação 21:

$$\dot{Q}_H = \dot{m} (h_2 - h_3) \quad [\text{kW}] \quad (21)$$

Onde:

$\dot{Q}_H$ = Calor rejeitado no condensador [kW];

$\dot{m}$ = Vazão mássica [kg/s];

h_2 = Entalpia na entrada do condensador [kJ/kg];

h_3 = Entalpia na saída do condensador [kJ/kg].

O fluxo de calor por unidade de massa pode ser descrito pela Equação 22:

$$\frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (22)$$

Em um ciclo real, ocorrem quedas de pressão durante o fluxo do fluido, o que afeta o estado do refrigerante na saída. Esse problema pode ser resolvido ao projetar o sistema de modo que o refrigerante seja subresfriado antes de entrar na válvula de expansão.

2.5.3 Válvula de expansão

Na válvula de expansão, o refrigerante em estado líquido é estrangulado e expandido de forma adiabática até atingir a pressão de evaporação, chegando ao evaporador em um estado de mistura líquido-vapor, conforme mostra a Equação 23. Esse processo é isoentálpico, ou seja, não envolve adição de trabalho, não há variação significativa de energia potencial e a variação de energia cinética é considerada desprezível (ÇENGEL et al., 2019).

$$h_3 = h_4 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (23)$$

2.5.4 Absorção de calor no evaporador

Em um ciclo real, ocorre uma redução progressiva da pressão à medida que o fluido refrigerante percorre as serpentinas do evaporador. Essa queda de pressão é devido ao atrito nas paredes das serpentinas e nos tubos de ligação entre os componentes do ciclo (POTTER, et al, 2025).

A absorção de calor no evaporador, representa a quantidade total de calor removida pelo fluido refrigerante no evaporador, por unidade de tempo, com o objetivo de manter uma temperatura constante desejada. A capacidade frigorífica pode ser calculada pela Equação 24:

$$\dot{Q}_L = \dot{m} (h_1 - h_4) \quad [\text{kW}] \quad (24)$$

Onde:

$\dot{Q}_L$ = Fluxo de calor absorvido pelo evaporador [kW];

$\dot{m}$ = Vazão mássica [kg/s];

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

h_4 = Entalpia na entrada do evaporador [kJ/kg].

O fluxo de calor por unidade de massa pode ser descrito pela Equação 25:

$$\frac{\dot{Q}_L}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (25)$$

2.5.5 Eficiência energética

No sistema de compressão de vapor, o fornecimento de potência líquida é igual à potência do compressor, já que a válvula de expansão não admite entrada ou saída de potência. (MORAN et al., 2020). Usando-se as expressões apresentadas anteriormente, o coeficiente de performance do sistema de refrigeração por compressão de vapor é definido pela Equação 26, a seguir:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_e} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (26)$$

Onde:

COP = Coeficiente de performance do sistema de refrigeração

Como essas equações foram desenvolvidas por simplificações dos balanços de massa e de energia, elas são igualmente aplicáveis tanto para o desempenho real, em que as irreversibilidades estão presentes no evaporador, no compressor e no condensador, quanto no desempenho idealizado na ausência de tais efeitos. Embora as irreversibilidades no evaporador, no compressor e no condensador possam ter um acentuado efeito no desempenho geral, é instrutivo considerar um ciclo idealizado no qual elas estejam supostamente ausentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos inicialmente, com relação ao projeto detalhado e desenvolvimento de uma chopeira elétrica, foi utilizada a Metodologia de Projetos de Trocadores de Calor descrita em “*Fundamentals of Heat Exchanger Design*” (SHAH, 2024). Essa metodologia foi escolhida por sua abrangência e riqueza de dados disponíveis na literatura.

Seguindo as etapas de formulação do problema, foram estabelecidas as condições de operação da chopeira. Em seguida, o desenvolvimento do conceito, definindo-se as características do sistema. Posteriormente, na fase de desenvolvimento do projeto, é realizado os cálculos de energia térmica dos equipamentos e elaborada a concepção estrutural e modelagem CAD do projeto. Após essa etapa, vem a fase de manufatura e, por fim, a execução e construção com base no modelo projetado.

Posteriormente, serão feitas as considerações finais sobre a operação do sistema e a coleta dos dados obtidos, a fim de confrontar os objetivos propostos e informações encontrada na literatura especializada em ciclos de refrigeração, com os dados reais apresentados pelo dispositivo em análise.

3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Segundo Sartori (2019), a refrigeração de bebidas, especialmente do chopp, exige um sistema capaz de manter temperaturas estáveis e suficientemente baixas para garantir qualidade, segurança e experiência adequada ao consumidor. Chopeiras tradicionais, baseadas em sistemas de resfriamento pouco eficientes, apresentam limitações operacionais, como grande variação de temperatura, alto consumo de energia, demora na estabilização térmica e baixa capacidade em atender demandas domésticas e até mesmo comerciais.

Diante disso, surgiu a necessidade de fabricar e desenvolver uma chopeira elétrica que seja capaz de realizar o resfriamento rápido e uniforme do chopp, mantendo-o dentro da faixa ideal de temperatura.

3.1.1 Condições de operações

Para a concepção do projeto, foi estabelecido que a chopeira deveria ter uma capacidade de refrigeração de 50L/h e fornecer chopp para consumo à temperatura de 0°C. Nessa etapa, também foram estabelecidas as devidas condições de operação do equipamento, que são explicadas ao longo deste capítulo.

Inicialmente, foi desenvolvida uma pesquisa em vários sites de comparas especializados na internet, e com isso verificou-se uma enorme variedade de chopeiras no mercado brasileiro

com capacidade de refrigeração, para atender uma grande demanda por consumo de chopp, sem que as últimas pessoas no final da fila possam tomá-lo quente. Então, diante desta realidade definiu-se em termos de volume por hora (L/h), que capacidade de refrigeração requerida da chopeira será de 50L/h. Com essa vazão volumétrica a chopeira poderá atender um evento com aproximadamente 40 pessoas, com cada uma consumindo em média, de 1L/h a 1,5L/h.

Após a definição da capacidade requerida, com base nos dados apresentados no Anuário Climatológico do Estado do Pará (2023), no Anuário da Cerveja divulgado pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (2024), e no trecho do artigo "Variabilidade do Clima", que aborda o clima e as temperaturas médias e máximas registradas no estado do Pará, estado este que segundo BRASIL (2024), apresentou o maior crescimento relativo de cervejarias registradas em todo o território nacional em 2023, foi definido que o equipamento deveria estar apto a funcionar numa temperatura de 30°C. Essa é, em média, a temperatura ambiente em que os barris ficam guardados, geralmente em locais frescos e protegidos do sol e intempéries.

Com relação a temperatura de saída do chopp, está foi determinada a partir de dados fornecidos pelo Blog do Chopp, que considera a temperatura ideal (tendo em vista o clima tropical típico do Brasil), que o chopp seja retirado da chopeira a uma temperatura entre 0° e -2°C e consumido a uma temperatura entre 6° e 8°C (BLOGDOCHOPP, 2024). Desse modo, definimos 0°C como padrão a ser seguido.

Os tipos de chopeiras mais comum disponíveis no mercado são as chopeira a gelo, elétrica, a gás e de autosserviço automatizado, onde o modelo selecionado para a construção e desenvolvimento foi a chopeira elétrica, por ser um dispositivo ideal para atender as necessidades dos consumidores, já que garante um bom fluxo de retirada de chopp à uma boa temperatura requerida (XAVIER, 2022). De acordo com a pesquisa de mercado apresentada na Tabela 2, foi determinada a geometria da chopeira como um prisma retangular. Além disso, identificou-se a necessidade de uma estrutura resistente à corrosão, capaz de suportar o peso dos componentes internos, incluindo a unidade de refrigeração e os acessórios periféricos.

Tabela 2 - Apresentação dos dados fornecidos pelos sites de cada fabricante

Característica	Chopeira Torre Naja	Chopeira Larken	Chopeira Aleman	Chopeira Stambeer
Altura (cm)	100	63	58	50
Largura (cm)	64	36	41	45
Profundidade (cm)	85	60	65	65
Capacidade (L/h)	110	90	70	50
Serviços (nº de pessoas)	90	70	50	40

Peso (kg)	80	62	60	56
Potência (W)	2800	3100	2950	2198
Voltagem (V)	220	220	220	220
Valor de mercado (R\$)	9.350,00	8.678,00	7.240,00	6.225,00

Fonte: Autoria própria, (2024).

3.2 DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO

Para desenvolver o trabalho e alcançar os resultados que serão apresentados a seguir, foi realizada, uma análise e uma compreensão detalhada dos ciclos de refrigeração reais e ideais. Com base nesses nisso, serão propostas soluções para minimizar as discrepâncias e otimizar o desempenho do sistema.

3.2.1 Características do sistema

Após estabelecer as condições de operação, procedeu-se à definição das características específicas do sistema, considerando a necessidade de garantir a estabilidade térmica durante o funcionamento.

O ciclo de refrigeração selecionado para o desenvolvimento da chopeira, foi o ciclo real de compressão a vapor. Nesse ciclo, o atrito durante o fluxo do refrigerante e a transferência de calor entre o fluido e o ambiente causam queda de pressão nas tubulações, tanto no condensador quanto no evaporador, devido às perdas de carga, além de superaquecimento na entrada do compressor e subresfriamento na saída do condensador (VILAS BÔAS, 2023).

Como foi visto no capítulo 2, um ciclo de refrigeração por compressão a vapor é composto por compressor, condensador, evaporador e válvula ou dispositivos de expansão, conforme indicam as Figuras 17 e 18, anteriormente. Esses são os equipamentos necessários para a construção e desenvolvimento da chopeira elétrica.

De acordo com os designs encontrados nas pesquisas e visando obter o menor custo-benefício, além de considerar a pesquisa de mercado apresentada na Tabela 2 e os fabricantes Maxbeer e Stambeer, serão definidos detalhadamente nos tópicos subsequentes os principais componentes do sistema de refrigeração da chopeira elétrica.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Nesta seção serão detalhados os dados específicos do projeto e também exemplificados os cálculos exatos referentes aos equipamentos que compõem a choperia como um todo, pois os resultados serviram de base para o desenvolvimento do dispositivo.

3.3.1 Seleção dos componentes do sistema

A seleção de um compressor envolve diversos fatores que garantem o desempenho e a eficiência do sistema de refrigeração.

3.3.1.1 Seleção do compressor

O compressor segundo dados dos fabricantes de Chopeiras Maxbeer (2019) e Stambeer (2024), para vazão de 50 L/h deve ter uma potência estimada de aproximadamente 1/3 de HP ou 8000 BTUs. Baseado nessas condições e informações, foi definido o compressor do tipo rotativo da marca Elgin, com as seguintes especificações exemplificadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificação técnica do compressor

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	DESCRIÇÃO
Capacidade de Refrigeração	7500 BTU/h
Temperatura de Evaporação	Entre -10 °C e 40 °C
Especificação do Óleo	Ester com carga de 230 ml
Fluido Refrigerante	R - 22
Vazão Mássica	3,87 kg/h
Voltagem	220V 60Hz
Peso	12 kg
Eficiência isentrópica	85%

Fonte: Autoria própria, (2024).

Com base na Figura 20 a seguir, é possível visualizar o compressor rotativo utilizado na fabricação da chopeira elétrica. Este componente é de fundamental importância no processo de refrigeração do chopp, sendo o responsável por dar vida ao ciclo termodinâmico. Ele succiona o fluido refrigerante em baixa pressão e baixa temperatura, proveniente do evaporador, e o comprime até uma condição de alta pressão e alta temperatura. Esse aumento de pressão permite que o fluido libere calor no condensador, onde se resfria e muda de fase, tornando-se pronto para retornar ao evaporador e absorver novamente o calor do chopp.

Figura 20 - Representação do compressor rotativo do tipo Elgin



Fonte: CAIRO, (2024).

3.3.1.2 Seleção do condensador

Os condensadores utilizados em sistemas de refrigeração de pequeno porte são equipados com ventilação forçada, proporcionada por um micro ventilador. Esse ventilador garante que o ar circule de maneira eficiente através do condensador, melhorando o processo de troca de calor. A maioria desses condensadores é do tipo tubos e arames ou aletas, onde o refrigerante circula pelo interior dos tubos enquanto o ar passa pelas aletas (ASHRAE, 2019).

Essa configuração permite uma dissipação eficiente do calor, mantendo o sistema de refrigeração funcionando de forma eficiente.

De acordo com a fabricante Maxbeer (2019), para atender uma máquina com vazão de 50L/h, o condensador precisar ter no mínimo uma potência de 1/4 HP. Assim o condensador escolhido foi o Hultel 3x8 Tubo com potência de 1/3 HP, conforme indica a Figura 21, pois esse trocador de calor garante ao sistema de refrigeração um ótimo desempenho e performance.

Esse componente é muito utilizado em bebedouros para resfriar a água de forma eficiente. Ele possui 3 saídas de 8 tubos cada, sendo capaz de resfriar uma grande quantidade de água (DUFRIIO, 2024). O condensador tem uma capacidade de rejeição de aproximadamente 213,73 kcal/h, atendendo as especificações do projeto.

Figura 21 - Representação esquemática do condensado usado no projeto



Fonte: DUFRIIO, (2024).

3.3.1.3 Seleção do evaporador

De acordo com os dados fornecidos pelo fabricante Maxbeer (2019) e Stambeer (2024), o dimensionamento do evaporador é baseado na vazão medida em litros por hora. Para a máquina em questão, o evaporador foi dimensionado para uma vazão de 50 L/h, e para atender essa capacidade são necessários aproximadamente 16 metros de tubo de cobre.

Para fins de teste, foram utilizados apenas 7 metros de tubo de cobre de 1/4" (6,35 mm) para desenvolver o arranjo da serpentina (evaporador), por onde circula o fluido refrigerante e ocorre o resfriamento do chopp. Já para a serpentina responsável pela circulação do chopp, foram empregados apenas 25 metros de tubo de inox com diâmetro de 3/8" (9,53 mm), embora o ideal fosse a utilização de 50 metros desse mesmo material.

Nesse evaporador, o fluido refrigerante com certo título proveniente do tubo capilar entra no reservatório de aço por meio do tubo de cobre. O tanque que abriga as serpentinas do fluido refrigerante e a do chopp possui uma capacidade de aproximadamente de 10 litros e, é preenchido com uma mistura de água e álcool (etanol) na proporção de 5 litros cada, a baixa pressão e temperatura até certo nível e, devido à troca de calor, a fase vapor formada nesse processo sai no estado de líquido saturado e retorna ao compressor. Já o chopp a ser resfriado circula pela tubulação de aço inox, entrando pela parte inferior do evaporador e saindo pela parte superior. Uma vez realizada a montagem do evaporador, esse é isolado completamente utilizando espuma de poliuretano.

3.3.2 Cálculos termodinâmicos do sistema para o ciclo ideal

Para realização desses cálculos serão utilizados os dados da tabela de propriedades termodinâmicas do refrigerante R-22, disponível em MORAN et al., (2020).

3.3.2.1 Cálculo de carga térmica na superfície externa do evaporador

Para o desenvolvimento deste cálculo utilizou-se a Equação (14), que é a equação simplificada da energia térmica para sistemas em regime permanente. Sabendo que a capacidade da chopeira é de 50 L/h, então esse valor equivale a uma vazão mássica de 0,014 kg/s, o valor do calor específico da cerveja em estado líquido a temperatura de 30°C e 1 atm, 4,27 kJ/kg °C e as temperaturas de entrada $T_{\text{ent}} = 30\text{ °C}$ e saída $T_{\text{sai}} = 0\text{ °C}$.

$$Q = \dot{m} \cdot c_p (T_{\text{sai}} - T_{\text{ent}}) = (0,014 \text{ kg/s}) \cdot (4,27 \text{ kJ/kg} \cdot \text{°C}) \cdot (0 - 30) \text{ °C} = -1,7934 \text{ kW}$$

$$\therefore Q = -1,7934 \text{ kW}$$

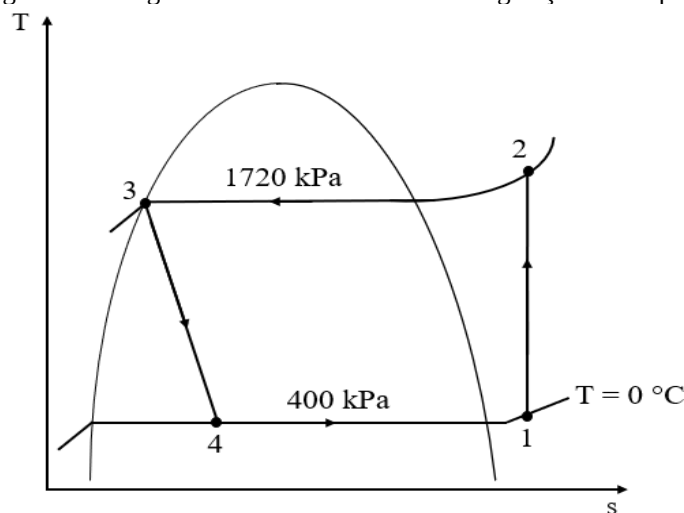
Adotado o sinal negativo para o calor que está entrando no sistema.

3.3.2.2 Vazão mássica do refrigerante

Os valores de temperatura, entalpia, entropia e pressão do refrigerante R-22, estão de acordo com o diagrama T-s, indicado pela Figura 22 seguir, que mostra o comportamento do ciclo real de refrigeração por compressão de vapor da choperia em estudo.

Com esses dados termodinâmicos definidos inicialmente, será possível calcular a vazão mássica do sistema, uma vez que, já é conhecida a potência do compressor, cujo valor é 1/3 HP, o que equivale a 0,2486 kW, conforme foi visto no item 3.3.1.1 desta seção.

Figura 22 - Diagrama T-s do ciclo ideal de refrigeração da chopeira



Fonte: Autoria própria, (2025).

No ciclo de compressão de vapor aplicado à chopeira, o fluido refrigerante R-22 deixa o evaporador no ponto 1 como vapor superaquecido a baixa pressão e entra no compressor a

400 kPa e 0°C, onde sofre aumento de pressão e temperatura até o ponto 2, em um processo totalmente adiabático, isto é, isentrópico e saindo a 1720 kPa. Em seguida, no trecho de 2 para 3, o refrigerante passa pelo condensador a pressão constante. Do ponto 3 ao ponto 4, o líquido atravessa o dispositivo de expansão, sofrendo uma queda abrupta de pressão em um processo isentalpico que reduz sua temperatura e produz uma mistura líquido-vapor. E por fim, entre os pontos 4 e 1, ocorre a evaporação a baixa pressão, na qual o fluido absorve calor, completando sua vaporização e retornando ao estado de vapor superaquecido, pronto para reiniciar o ciclo.

A partir do esboço do diagrama temperatura-entropia (T-s) da Figura 22, identifica-se todos os parâmetros termodinâmicos necessários para analisar detalhadamente o desempenho do sistema da chopeira, conforme indica a Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades termodinâmicas do refrigerante R-22, para o ciclo ideal

Vapor superaquecido	Vapor superaquecido
$T_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_2 = 75,20\text{ }^{\circ}\text{C}$
$h_1 = 252,14\text{ kJ/kg}$	$h_2 = 290,00\text{ kJ/kg}$
$s_1 = 0,9542\text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$	$s_2 = s_1 = 0,9542\text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
$P_1 = 400\text{ kPa}$	$P_2 = 1720\text{ kPa}$
Líquido saturado	Líquido mais vapor
$T_3 = 44,87\text{ }^{\circ}\text{C}$	-----
$h_3 = 100,93\text{ kJ/kg}$	$h_4 = h_3 = 100,93\text{ kJ/kg}$
$s_3 = 0,3626\text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$	-----
$P_3 = 1720\text{ kPa}$	$P_4 = 400\text{ kPa}$

Fonte: Adaptado de MORAN, et al., (2020).

As temperaturas T_1 e T_3 representam o equilíbrio térmico do fluido refrigerante com o ambiente. Enquanto a temperatura T_2 foi calculada através de interpolações para ajustar os valores necessários.

Para calcular a vazão mássica do fluido refrigerante, utilizou-se a Equação 18, referente à potência de compressão:

$$\dot{W}_e = \dot{m} (h_2 - h_1) \Rightarrow 0,2486\text{ kW} = \dot{m} \cdot (290,00 - 252,14)\text{ kJ/kg} = 0,0065\text{ kg/s}$$

$$\therefore \dot{m} = 0,0065\text{ kg/s}$$

Para efeito de demonstração, se quiséssemos calcular o valor da potência do compressor a partir da vazão mássica do fluido refrigerante, verificaríamos que o valor seria igual à potência definida inicialmente no item 3.3.1.1, de 0,2486 kW.

$$\dot{W}_e = \dot{m} (h_2 - h_1) = 0,0065\text{ kg/s} \cdot (290,00 - 252,14)\text{ kJ/kg} = 0,2476\text{ kW}$$

$$\therefore \dot{W}_e = 0,2476 \text{ kW}$$

3.3.2.3 Absorção de calor no evaporador

A absorção de calor no evaporador corresponde diretamente ao processo pelo qual o fluido refrigerante retira energia térmica do meio que está sendo resfriado. Quando o fluido entra no evaporador em baixa pressão e baixa temperatura, ele evapora ao receber calor, aproveitando a diferença de temperatura entre o fluido e o ambiente. Essa energia é calculada pela Equação 24, com base nos valores de entalpias da Tabela 4.

$$\dot{Q}_L = \dot{m} (h_1 - h_4) = 0,0065 \text{ kg/s} \cdot (252,14 - 100,93) \text{ kJ/kg} = 0,9828 \text{ kW}$$

$$\therefore \dot{Q}_L = 0,9828 \text{ kW}$$

3.3.2.4 Calor rejeitado no condensador

Para determinar a quantidade de calor rejeitada no condensador da chopeira, utilizou-se a Equação 23.

$$\dot{Q}_H = \dot{m} (h_2 - h_3) = 0,0056 \text{ kg/s} \cdot (296,70 - 100,93) \text{ kJ/kg} = 1,2289 \text{ kW}$$

$$\therefore \dot{Q}_H = 1,2289 \text{ kW}$$

3.3.2.5 Coeficiente de desempenho do sistema

Para calcular o coeficiente de desempenho (COP) do sistema, foi utilizada a Equação 29. Este coeficiente é a grandeza que mede a eficiência do sistema de refrigeração.

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_e} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \Rightarrow \text{COP} = \frac{(252,14 - 100,93) \text{ kJ/kg}}{(290,00 - 252,14) \text{ kJ/kg}} \Rightarrow \text{COP} = 3,9984$$

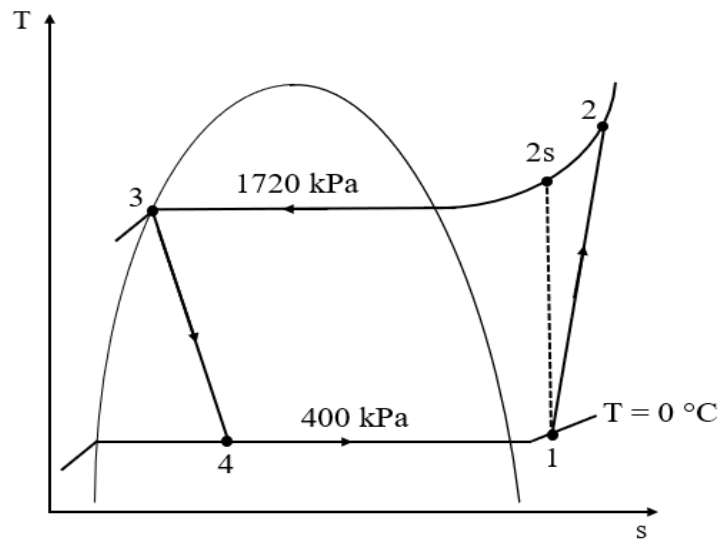
$$\therefore \text{COP} = 3,9984$$

3.3.3 Cálculos do sistema para o ciclo real

No item 3.3.2, foi calculado a vazão mássica do fluido refrigerante, cujo, valor é de $\dot{m} = 0,0065 \text{ kg/s}$. De posse dessa informação e sabendo que o ciclo ideal difere bastante do real devido, principalmente, às irreversibilidades que ocorrem nos diversos componentes deste último (ÇENGEL et al., 2019).

Para realizar os cálculos das energias térmicas para este ciclo termodinâmicos, será feita uma análise baseada na mesma literatura que foi usada no item 3.3.2, O diagrama temperatura - entropia (T-s) da Figura 23 seguir, mostra como definir os valores de pressão, temperatura e entropia em cada estado, através das tabelas termodinâmicas do R-22.

Figura 23 - Diagrama T-s do ciclo real de refrigeração da chopeira



Fonte: Autoria própria, (2025).

Com base no diagrama da Figura 23 e na tabela do R-22, é possível encontrar os valores de pressão, temperatura e entropia em cada estado, como indica a Tabela 5, abaixo.

Tabela 5 - Propriedades termodinâmicas do refrigerante R-22 para o ciclo real

Vapor superaquecido	Vapor superaquecido
$T_1 = 0\text{ °C}$	$T_2 = 76,15\text{ °C}$
$h_1 = 252,14\text{ kJ/kg}$	$h_{2s} = 290,00\text{ kJ/kg}$
$s_1 = 0,9542\text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$	$s_{2s} = s_1 = 0,9542\text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
$P_1 = 400\text{ kPa}$	$P_2 = 1720\text{ kPa}$
Líquido saturado	Líquido mais vapor
$T_3 = 44,87\text{ °C}$	-----
$h_3 = 100,93\text{ kJ/kg}$	$h_4 = h_3 = 100,93\text{ kJ/kg}$
$s_3 = 0,3626\text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$	-----
$P_3 = 1720\text{ kPa}$	$P_4 = 400\text{ kPa}$

Fonte: Adaptado de MORAN, et al., (2020).

Nessas condições, é preciso saber o valor real da entalpia (h_2) na saída do compressor, que é simplesmente calculada pela Equação 20, a qual depende diretamente da eficiência do mesmo. Atualmente são encontrados no mercado, compressores que quando bem projetados, possuem eficiência isentrópica em torno de 80 a 90% (ÇENGEL, et al., 2019).

Como foi visto no item 3.3.1.1, a eficiência do compressor é de 85%, e, considerando os dados de entalpia obtidos na Tabela 5, que indica as propriedades termodinâmicas do R-22, tem-se que:

$$h_2 = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_c} + h_1 = \frac{(290,00 - 252,14)\text{kJ/kg}}{85\%} + 252,14 \text{ kJ/kg} = h_2 = 296,70 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore h_2 = 296,70 \text{ kJ/kg}$$

3.3.3.1 Potência isentrópica no compressor

A potência isentrópica no compressor representa o trabalho ideal necessário para comprimir o fluido refrigerante em um processo sem perdas e sem variação de entropia, calculada diretamente pela Equação 18. Ela serve como referência teórica para comparar com a potência real do compressor e avaliar sua eficiência.

$$\dot{W}_e = \dot{m} (h_2 - h_1) = 0,0065 \text{ kg/s} \cdot (296,70 - 252,14) \text{ kJ/kg} = 0,2496 \text{ kW}$$

$$\therefore \dot{W}_e = 0,2496 \text{ kW}$$

3.3.3.2 Capacidade frigorífica do evaporador

A capacidade frigorífica do evaporador é a quantidade de calor que ele consegue remover por unidade de tempo, determinada pela vazão mássica do refrigerante e pela variação de entalpia no processo de evaporação. Esse efeito refrigerante indica o quanto o evaporador consegue resfriar efetivamente o sistema.

Como os valores de entalpia no ciclo ideal são os mesmos do ciclo real, então o valor da capacidade frigorífica também não muda, continua sendo de $\dot{Q}_L = 0,9828 \text{ kW}$.

3.3.3.3 Taxa de Transferência de calor no condensador

Essa taxa de transferência representa a quantidade de calor rejeitada pelo condensador por unidade de tempo durante a condensação, e é calculada pela Equação 23:

$$\dot{Q}_H = \dot{m} (h_2 - h_3) = 0,0065 \text{ kg/s} \cdot (296,70 - 100,93) \text{ kJ/kg} = 1,2725 \text{ kW}$$

$$\therefore \dot{Q}_H = 1,2725 \text{ kW}$$

3.3.3.4 Coeficiente de performance

O coeficiente de performance (COP) expressa a eficiência do sistema de refrigeração, relacionando a capacidade frigorífica com a potência fornecida pelo compressor. Para calcular essa grandeza usa-se Equação 29:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_e} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \Rightarrow \text{COP} = \frac{(252,14 - 100,93)\text{kJ/kg}}{(296,70 - 252,14)\text{kJ/kg}} \Rightarrow \text{COP} = 3,4091$$

$$\therefore \text{COP} = 3,4091$$

3.4 MONTAGEM E FABRICAÇÃO

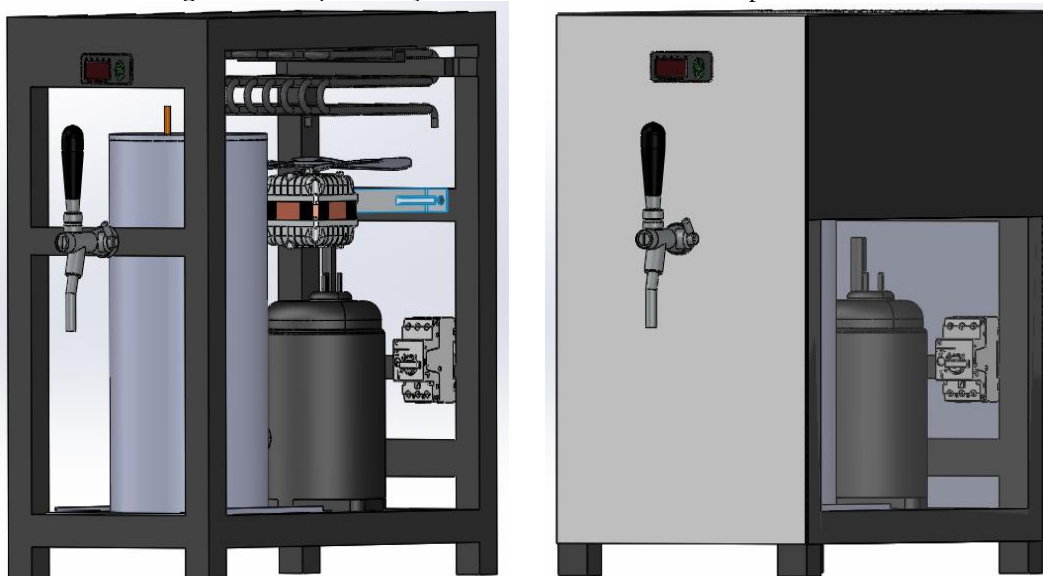
O objetivo deste projeto inclui o desenvolvimento e a fabricação de uma chopeira elétrica. Nesta seção, serão fornecidas informações essenciais, incluindo as especificações técnicas do produto, desenhos detalhados e a descrição do funcionamento dos componentes.

3.4.1 Modelagem CAD (*Computer Aided Design*) 3D do Projeto

A modelagem do projeto foi desenvolvida utilizando um software CAD (*Computer Aided Design*) 3D. Este software de design assistido por computador foi escolhido por sua robustez e também pela capacidade avançada em modelagem e montagem de componentes, conforme indica a Figura 24.

Para o desenvolvimento desse projeto, foram utilizadas bibliotecas de componentes de fornecedores, que incluem uma vasta gama de peças padronizadas e específicas, facilitando a integração de componentes reais ao projeto. Essas bibliotecas fornecem dados precisos de dimensões, materiais e características dos componentes, garantindo a compatibilidade e a viabilidade de fabricação do produto.

Figura 24 - Representação do modelo CAD 3D da chopeira elétrica



Fonte: Autoria própria, (2024).

Este modelo CAD (*Computer Aided Design*) 3D representa a chopeira elétrica a ser construída. Como é possível observar, a estrutura apresenta uma certa robustez, tudo isso para suportar todos os componentes que fazem parte do corpo da chopeira e em especial os do sistema de refrigeração. Um pouco ao centro, há um cilindro vertical que atua como reservatório ou tanque de resfriamento. Na parte inferior, encontra-se um compressor responsável pelo ciclo de refrigeração, uma chave controladora, um micro ventilador e o condensador na parte superior. A

torneira frontal permite servir o chopp resfriado, enquanto um termostato digital no topo controla a temperatura do sistema.

3.4.2 Concepção estrutural

O material da estrutura do projeto foi selecionado de acordo com a sua resistência e melhor custo-benefício. Com isso o metalon foi o material escolhido para a construção porque é mais resistente e possui maior durabilidade que o alumínio. Além disso, pode ser pintado, conforme mostra a Figura 25, o que o torna um material adequado para aplicação.

Um ponto importante a ser destacado é vantagem do metalon ser capaz de resistir à corrosão causada pela exposição ao ar, água e outros elementos, sendo adequado para uso em ambientes externos. Outro fator relevante a ser analisado é a questão do peso, pois segundo o catálogo Maxbeer (2019), o peso de uma chopeira elétrica com vazão de 50L/h é de aproximadamente 50 kg.

Figura 25 - Representação estrutural da armação da chopeira elétrica



Fonte: Autoria própria, (2024).

Tanto as paredes laterais, frontais, superior como traseira foram fixadas com parafusos para facilitar manutenções futuras. Não houve fechamento do fundo e nem da metade de uma das partes laterais da chopeira.

A chapa frontal foi reforçada na área destinada à instalação da torneira e do termostato, devido à maior pressão manual exercida durante o uso da chopeira. A chapa superior possui aberturas para auxiliar na dissipação do calor gerado pelo condensador. A dissipação de calor também ocorre através da chapa traseira, que possui um reforço na parte inferior, na região de conexão do engate rápido, onde a mangueira de chopp é acoplada.

O compartimento das serpentinas ou reservatório foi fabricado utilizando ferro inox - chapa 18 cm x 14 cm, conforme ilustrado na Figura 26. Inicialmente, uma chapa foi cortada com dimensões correspondentes à largura da estrutura da chopeira, servindo como fundo do cilindro e suporte para o componente. Este fundo foi então soldado ao cilindro para garantir a estabilidade estrutural. A tampa foi confeccionada com precisão para se adequar perfeitamente ao diâmetro do compartimento. Este compartimento contém orifícios para os seguintes componentes:

- Entrada e saída para a serpentina do chopp;
- Entrada e saída para a serpentina do evaporador;
- Orifício para o termopar e fios da bomba submersa;
- Dois orifícios para os tubos de silicone onde ocorrerá a circulação do álcool.

Figura 26 - Representação do compartimento de serpentinas totalmente isolado



Fonte: Autoria própria, (2024).

O compressor, o condensador, o ventilador e a chave contadora foram fixados através de parafusos nos suportes, que foram fixados na estrutura da chopeira por meio de solda e parafusos, similar ao restante da estrutura. Os suportes foram fabricados com perfil não tubular, porém quadrado, com o mesmo comprimento e material utilizado na largura da chopeira. Enquanto a controlador de temperatura digital bivolt com termostato digital foi fixado com o próprio clip de fixação que o acompanha desde o processo de fabricação.

3.4.3 Sistema de refrigeração

O compressor foi devidamente instalado na parte central traseira da chopeira, garantindo uma distribuição equilibrada do peso e facilitando o acesso para manutenção. No compressor,

foram conectadas a entrada do evaporador e a saída do condensador. A conexão da entrada do evaporador ao compressor assegura que o refrigerante, após absorver calor do ambiente interno da chopeira, seja direcionado para o compressor. Por outro lado, a saída do condensador foi conectada ao compressor para permitir a adequada transferência do refrigerante, que já teve o calor dissipado, completando assim o ciclo de refrigeração.

A entrada do condensador foi conectada à saída do evaporador, estabelecendo um fluxo contínuo no ciclo de refrigeração. Na saída do condensador, um filtro secador e um tubo capilar foram soldados para garantir a remoção de umidade e a regulação do fluxo de refrigerante antes de sua conexão ao compressor. O conjunto condensador e ventoinha foi instalado na parte traseira superior da chopeira, assegurando uma eficiente dissipação de calor.

Com relação ao evaporador, por onde circula o fluido refrigerante foi dobrado para se encaixar na espiral da serpentina de chopp. A entrada do evaporador foi conectada ao compressor, assegurando que o refrigerante absorva o calor da serpentina, enquanto a saída foi interligada ao condensador, onde o refrigerante dissipa o calor absorvido.

A espiral da serpentina, projetada para resfriar o chopp, tem o diâmetro menor que o compartimento de resfriamento ou barril, isso tudo para facilitar sua acomodação e maximizar a eficiência térmica. A entrada da serpentina foi conectada ao sistema utilizando um tubo de PVC que se encaixa em uma conexão de engate rápido posicionada na parte traseira da chopeira, enquanto a saída da serpentina foi conectada diretamente à torneira, localizada na parte frontal da chopeira, permitindo a distribuição eficiente do chopp resfriado ao servir.

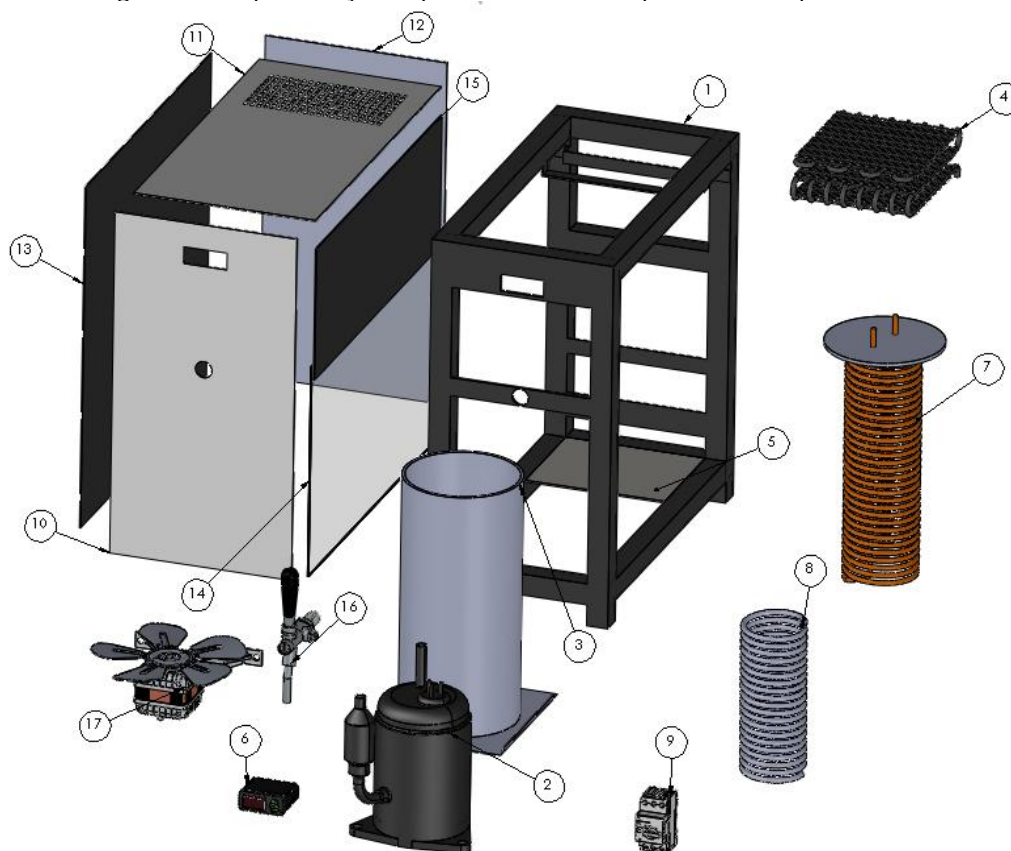
O circuito elétrico da chopeira é responsável por alimentar vários componentes necessários para seu funcionamento. Ele fornece energia ao compressor, alimenta a ventoinha do condensador, que dissipa o calor gerado durante o funcionamento do sistema. A bomba de aquário submersa que faz a recirculação da água e do álcool, também é alimentada por este circuito. E por fim, o termostato, que regula a temperatura interna da chopeira, depende da alimentação elétrica adequada para manter a bebida na temperatura ideal.

Logo após a interligação do sistema com a bomba de vácuo foi possível pressurizar o sistema com ar, com o auxílio de um manifold de pressão. Não havendo vazamentos, a bomba foi invertida para criar vácuo, removendo a umidade do sistema. Então, com o sistema seco, o refrigerante foi introduzido no circuito de refrigeração e o compartimento de refrigeração foi preenchido com etanol.

Com a conclusão de todos os testes, o barril de chopp deve ser conectado ao sistema de ar e ao engate rápido da chopeira. Isso assegura que a bebida seja corretamente pressurizada e

refrigerada, garantindo a qualidade do chopp ao ser servido. A Figura 27 mostra em detalhes o esquema de montagem da chopeira elétrica, incluindo os componentes de refrigeração.

Figura 27 - Representação esquemática da vista explodida da chopeira elétrica



Fonte: Autoria própria, (2024).

A Tabela 6 apresenta a descrição de cada um dos principais componentes da chopeira elétrica que estão evidenciados na vista explodida da Figura 27.

Tabela 6 - Descrição dos principais componentes da chopeira mostrados na figura 27

Nº DO ITEM	NOME DA PEÇA	QUANTIDADE	DESCRIÇÃO
1	Estrutura de Sustentação	6 Metros	Base Estrutural da Chopeira
2	Compressor	1 Unidade	Compressor Rotativo de 1/3 HP
3	Cilindro/Barril	1 Unidade	Recipientes das Serpentinhas de Chopp
4	Condensador	1 Unidade	Condensador de 1/3 HP
5	Chapa de Fundo	1 Unidade	Suporte do Compressor
6	Termostato	1 Unidade	Digital Bivolt STC 1000
7	Serpentina de Bebida	25 Metros	Serpentina do Chopp
8	Serpentina de Gás	16 Metros	Evaporador
9	Chave Elétrica	1 Unidade	Chave Contadora
10	Chapa Frontal	1 Unidade	Chapa Protetora Frontal

11	Chapa Superior	1 Unidade	Chapa Protetora Superior
12	Chapa Traseira	1 Unidade	Chapa Protetora Traseira
13	Chapa Lateral	1 Unidade	Chapa Protetora Lateral
14	Chapa Lateral	1 Unidade	Chapa Protetora Transparente
15	Chapa Lateral	1 Unidade	Chapa Protetora Normal
16	Torneira	1 Unidade	Torneira Italiana para Chopp
17	Ventilador	1 Unidade	Micromotor Bivolt 1/25

Fonte: Autoria própria, (2024).

Na Tabela 6 é possível identificar e descrever o nome dos principais componentes da chopeira elétrica, conforme sua enumeração da Figura 27.

3.5 MATERIAIS UTILIZADOS NA MANUFATURA DA CHOPEIRA

Para o desenvolvimento e fabricação da chopeira, foi necessário considerar uma lista detalhada de materiais e ferramentas, os quais foram divididos em três categorias principais: estrutura da chopeira, sistema de refrigeração e acessórios, além de uma análise do custo do projeto.

3.5.1 Estrutura da chopeira

A estrutura da chopeira deve ser obrigatoriamente fabricada com materiais resistentes, capazes de suportar o peso dos componentes internos e externos. Nesta estrutura de tubos quadrados de metalon soldada, com componentes internos fixados por solda e outros por parafusos. É recomendável que o material utilizado na estrutura seja resistente à corrosão, devido à possibilidade de condensação de água causada pela temperatura de operação.

Para a construção e desenvolvimento da estrutura, foram utilizados tubos quadrados de metalon galvanizado com medidas de 20mm x 20mm x 1,2mm. A Tabela 7 a seguir apresenta a lista de materiais necessários, considerando uma chopeira com dimensões de 300mm x 580mm x 605mm.

Tabela 7 - Descrição dos principais componentes e materiais da chopeira elétrica

COMPONENTES	MATERIAIS	TIPO	OBSERVAÇÃO
Armação (Corpo)	Metalon galvanizado	Cantoneira L	Necessita resistência estrutural
Chapas laterais da chopeira	Ferro inox	Chapa 18 (1,5 mm)	Não necessita resistência estrutural. Somente para barreira visual.
Suportes Internos	Aço inox e Alumínio	Perfil Quadrado (1 mm)	Necessita resistência para fixação dos componentes

Tanque de serpentinas	Aço inox	Chapa (2 mm)	Local onde ocorrerá a refrigeração. Não necessita resistência estrutural.
Componentes de Fixação	Aço inox	Parafusos Philips	Fixação das chapas laterais e suportes internos
Vareta de Solda	Aço inox	Eletrodo Revestido	Para soldagem da armação e confecção do compartimento das serpentinas
Tinta Spray	Alumínio	Teck Bonde	Realizar acabamento superficial da estrutura

Fonte: Autoria própria, (2024).

3.5.2 Elementos de um sistema de refrigeração

A unidade de refrigeração é composta por três componentes principais: o compressor, o evaporador e o condensador. O compressor é o agente responsável por aumentar a pressão do gás refrigerante, o evaporador é onde o refrigerante absorve o calor do ambiente resfriado, já no condensador o calor é dissipado para o ambiente externo. Esses componentes trabalham em conjunto para permitir a circulação eficiente do gás refrigerante, garantindo o funcionamento adequado do sistema de refrigeração.

Com base nos manuais e na capacidade da chopeira, foram selecionados os componentes conforme indica a Tabela 8. O compressor e o condensador são unidades de refrigeração comerciais prontamente disponíveis. O condensador é um sistema tubular resfriado a ar, através de uma ventoinha para dissipar o calor. O evaporador, por sua vez, é feito de um tubo de cobre fabricado especificamente de acordo com os requisitos do projeto.

Tabela 8 - Descrição dos componentes do sistema de refrigeração

COMPONENTES	MATERIAIS	TIPO	FUNÇÃO
Condensador (1/3 HP, R-22)	Arame 3 x 8	Bebedouro	Trocar calor e converter o vapor refrigerante de volta ao estado líquido
Evaporador	Tubo de cobre	Tubo com Diâmetro 1/4"	Serpentina onde passará o gás refrigerante
Compressor (1/3 HP, R-22a, 220V)	Ligas de Aço	Rotativo	Motor para refrigeração
Ventilador	Ferro Sinterizado	Dugold	Recirculação o ar ambiente
Filtro Secador	Cobre	Tubo com Diâmetro 3/4"	Remover partículas sólidas e umidade do sistema
Tubo Capilar	Tubo de Cobre	Capilar com 0,31"	Reduz a pressão do fluido refrigerante

Serpentina de chopp	Tubo Aço inox	Tubo com Diâmetro 3/8"	Serpentina onde passará o chopp
Bomba Submersa de Aquário	Resina Epóxi	Tipo Aquário	Para circulação do álcool etílico
Termostato - Controlador STC - 1000	Alumínio, Cobre, Plástico	Bivolt 12 V (10 A)	Controlador de temperatura
Gás de Refrigeração	R-22	R-22	Gás utilizado para realizar a refrigeração do chopp
Manta Isolante	Polietileno	Folha	Deverá ser instalada para isolar o compartimento das serpentinas

Fonte: Autoria própria, (2024).

3.5.3 Acessórios, ferramentas e dispositivos utilizados na confecção da chopeira

Os acessórios da chopeira são materiais periféricos que desempenham a função de interligar o reservatório ou tanque à torneira de retirada. Esses acessórios garantem a eficiência e a funcionalidade do sistema, permitindo um fluxo adequado e mantendo a qualidade do chopp servido. A Tabela 9 detalha todos os componentes necessários para essa interligação.

Tabela 9 - Descrição dos principais acessórios da chopeira

COMPONENTES	QUANTIDADE	FUNÇÃO
Torneira de Chopp	1 Unidade	Extração do chopp
Engate Rápido e Conectores	1 Unidade	Para conexão do barril de chopp
Mangueira de PVC ou Silicone	2 Metros	Conexão do engate rápido com a serpentina de chopp e da serpentina com a torneira
Conector de 1” com Rosca	1 Unidade	Drenagem do compartimento de álcool
Tomada 3 Pinos (10A– 250V)	1 Unidade	Alimentar a chopeira com energia elétrica
Capacitor Eletrolítico	1 Unidade	Armazenamento de energia elétrica
Tubo Isolante 3/8"	1 Metro	Protege a tubulação contra corrosão
Fio Elétrico	4,5 Metros	Instalação elétrica da chopeira
Manifold	1 Unidade	Regulador de pressão até 500 Psi para regulação do gás

Fonte: Autoria própria, (2024).

Para a fabricação da chopeira, foram necessários diversos equipamentos. Entre eles, podemos destacar o uso de uma máquina de solda para a estrutura metálica, uma furadeira para a realização de furos precisos, e uma serra para o corte de materiais, uma solda com eletrodo. Também foram utilizados dispositivos de medição para garantir a precisão dos componentes, uma bomba de vácuo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no trabalho, referentes a construção e desenvolvimento da chopeira elétrica. Os resultados e as discussões serão baseados no funcionamento detalhado da chopeira, em testes do sistema de refrigeração, estanqueidade, de vazão e de temperatura do líquido, validação dos testes, aspectos gerais dos testes e orçamento do projeto.

A realização desses testes é de fundamental importância para a validação do projeto em questão, uma vez que os testes fornecem resultados confiáveis através das análises, e com isso garantido uma excelente qualidade na fabricação e confeccionamento da chopeira.

4.1 FUNCIONAMENTO DA CHOPEIRA ELÉTRICA

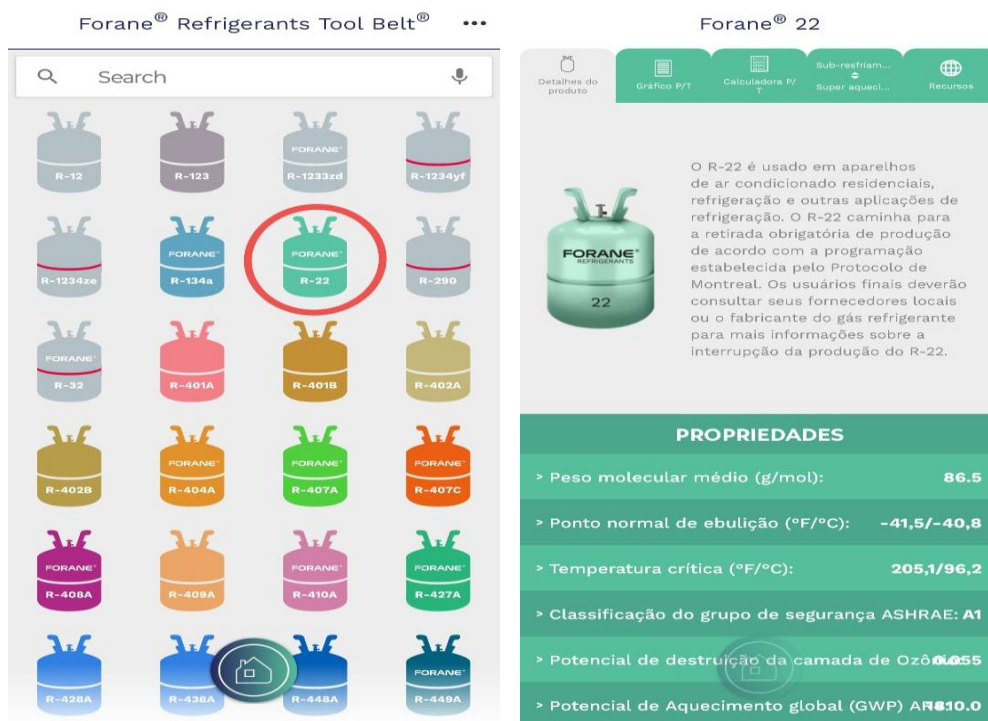
A chopeira elétrica em estudo tem seu funcionamento por um sistema de termostato digital e expansão direta. Nesse sistema, a serpentina está submersa em um tanque contendo água e álcool. O termostato é responsável por ajustar ou regular a temperatura de saída do chopp. No processo de expansão direta, a refrigeração ocorre em um sistema hermético, onde é instalada uma serpentina (evaporador) dentro de um tanque fechado, sendo esse o local onde todo o processo de refrigeração é realizado.

O controle de temperatura do sistema é feito pela pressão do fluido refrigerante no estado líquido, cujo refrigerante utilizado é o R-22. A Tabela 10 indica que o fluido R-22 possui uma relação específica entre temperatura e pressão. Por exemplo, a uma temperatura de -2°C , a pressão correspondente é de 364,7 kPa. O funcionamento da chopeira em condições normais de operação ocorre da seguinte maneira:

Quando o fluido no estado líquido estiver a uma temperatura de $-1,8^{\circ}\text{C}$, a pressão no tanque chega a 368,1 kPa, com isso o sistema se desliga automaticamente, e rearma com uma pressão de 429,5 kPa e a temperatura chega a 2°C . Nesse ponto, o motor se liga, gerando pressão no sistema e reduzindo-a novamente para 368,1 kPa. Durante o processo, quando o líquido gelado é liberado e o quente entra, ocorre um choque térmico no tanque, o que provoca a expansão do fluido refrigerante. Isso faz a pressão subir para 429,5 kPa e rearma/liga o motor novamente para refrigerar e reduzir a pressão de volta para 368,1 kPa.

A Tabela 10 a seguir, foi desenvolvida com base no aplicativo Forane Refrigerants. Um app que funciona como um acervo técnico completo de refrigeração. Ele permite ao usuário setar diretamente o refrigerante a ser usado, conforme mostra a Figura 28 a seguir.

Figura 28 - Apresentação visual do aplicativo Forane Refrigerants



Fonte: Autoria própria, (2025).

Além disso, o aplicativo também fornece gráficos eletrônicos de P-t para cada tipo de refrigerante, cálculos rápidos de sub-resfriamento e superaquecimento, bem como descrições úteis e propriedades químicas dos refrigerantes, conforme indica a Figura anterior.

Tabela 10 - Representação da temperatura x pressão do fluido refrigerante R-22

TEMPERATURA		PRESSÃO	
Kelvin (K)	Celsius (°C)	Vapor (kPa)	Vapor (Bar)
269	-4	335,1	3,3
271	-2	364,7	3,6
271,2	-1,8	368,1	3,7
273	0	396,5	4,0
275	2	429,5	4,3
277	4	464,7	4,6
279	6	501,2	5,0

Fonte: Autoria própria, 2024.

Conforme os dados apresentados na Tabela 9, é possível observar a relação direta entre temperatura e pressão para o fluido refrigerante R-22. Essa relação reflete as propriedades termodinâmicas do fluido, que são importantes para o funcionamento eficiente da chopeira elétrica. Cada valor de temperatura corresponde a uma pressão específica, permitindo prever e controlar o comportamento do gás em diferentes condições operacionais.

De acordo com Sartori (2019), acredita-se que esse é o sistema mais eficiente para controlar a pressão por meio da temperatura ou vice-versa em chopeiras elétricas, devido ao fato de sua resposta ser praticamente instantânea. Diferentemente de um termômetro, por exemplo, que leva alguns segundos para medir a temperatura, embora, exista no mercado atual termômetros que fazem medição em tempo real, a leitura baseada na pressão ou temperatura ocorre de forma imediata. O pressostato, componente responsável por essa medição, realiza o processo com grande rapidez.

Conforme indica a Figura 29, foi empregado o aplicativo Forane Refrigerants para simular o funcionamento do sistema baseado na temperatura e com isso determinar a pressão alcançada conforme o valor de temperatura informado para o refrigerante R-22. O aplicativo possui uma interface bastante simples e intuitiva, onde o usuário precisa setar a P/T calculadora, a altitude a nível do mar e a unidade de temperatura e pressão, em seguida inserir o valor da temperatura ou pressão, e o aplicativo exibirá na tela o valor correspondente de uma das grandezas.

Figura 29 – Face do aplicativo Forane Refrigerants exibindo os valores de pressão a partir da temperatura



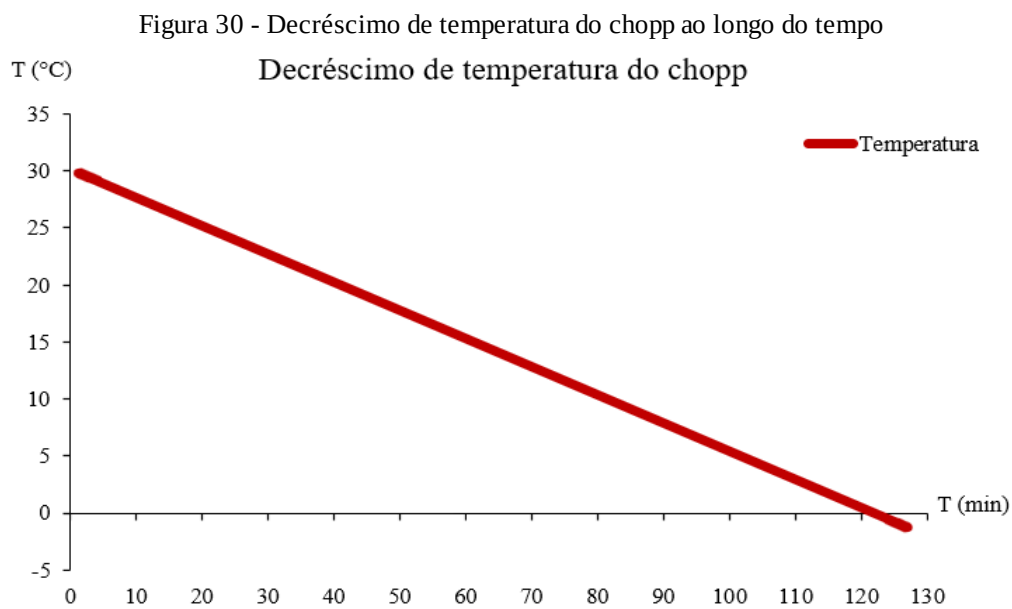
Fonte: Autoria própria, (2025).

A Figura 29, ilustra a interface do aplicativo Forane Refrigerants, permitindo visualizar a pressão correspondente à temperatura inserida.

A relação entre temperatura e pressão demonstrou a conformidade do sistema com os parâmetros técnicos esperados, reforçando sua capacidade de alcançar as condições ideais para o resfriamento do chopp. A correlação existente entre essas duas grandezas, feita pelo aplicativo

fornece subsídios importantes para validar o desempenho do equipamento e identificar possíveis melhorias futuras.

Com relação ao resfriamento do chopp, a Figura 30, mostra a redução da temperatura do chopp ao longo do tempo, em minutos. Inicialmente, a temperatura ambiente é de 30°C, e à medida que o sistema de refrigeração da chopeira opera, a temperatura do chopp vai reduzindo de forma progressiva até atingir a faixa ideal, que geralmente está próxima de 0°C ou um pouco abaixo.



Essa medição foi obtida a partir dos valores de temperatura registrados no termostato digital, que registrou a queda gradual de temperatura do chopp de 30 °C até -1 °C. Os valores medidos seguiram uma sequência contínua e ordenada, diminuindo em passos de 0,5°C em um determinado intervalo de tempo cronometrado

Pela análise da Figura anterior, é possível perceber que o decréscimo de temperatura ocorre de forma linear. Isso significa que, em intervalos regulares de tempo, a temperatura diminui em valores iguais.

O desempenho da chopeira está muito abaixo das condições ideais de operação, pois o tempo de funcionamento da máquina para resfriar o chopp, até ele atingir a temperatura ideal de consumo foi de aproximadamente 125 minutos, o que contrasta com as especificações técnicas dos manuais de chopeira com capacidade de 50L/h, que é de 15 a 20 minutos para resfriar completamente o chopp a ponto de ser consumido.

No sistema de expansão direta, a chopeira é projetada de forma que o processo de resfriamento seja rápido e eficiente, eliminando a necessidade de se ligar o equipamento com

antecedência. Isso significa que, assim que a chopeira é ligada à fonte de energia elétrica, ela começa a funcionar imediatamente. Nesse tipo de mecanismo, em apenas 15 minutos, o sistema é capaz de resfriar o chopp, e como foi visto na Figura 30, isso não acontece com máquina em estudo, pois ela demora um tempo muito superior a esse para resfriar o chopp por completo.

4.2 TESTES E VALIDAÇÕES

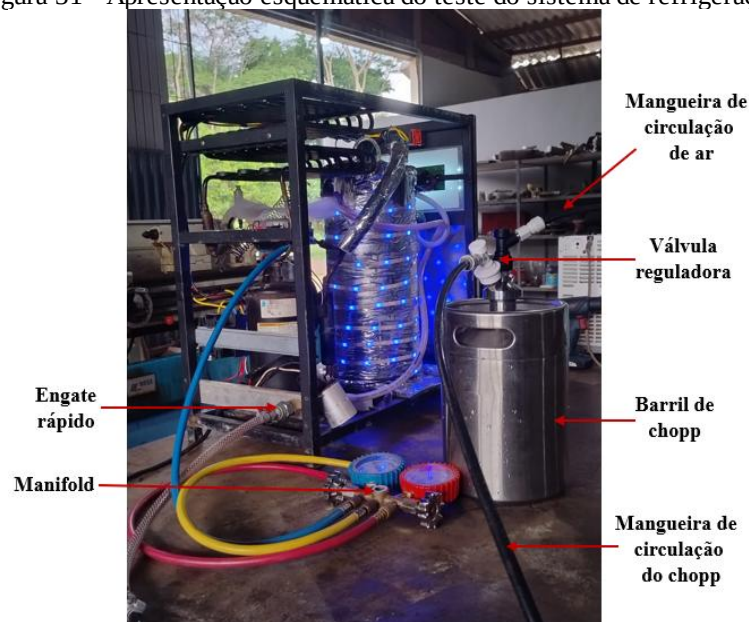
A realização desses testes é de suma importância para validação do projeto, pois eles fornecem resultados confiáveis por meio de análises detalhadas, permitindo identificar possíveis ajustes necessários para aprimorar o processo de confecção do produto. Com isso, é possível garantir uma boa qualidade na fabricação e desenvolvimento da chopeira, além de assegurar eficiência, durabilidade e alinhamento com os padrões de mercado.

Esta etapa complementa a fase de avaliação e ocorre após o fechamento do ciclo de otimização. Caso ocorra alguma limitação após esse momento, um novo ciclo precisará ser realizado.

4.2.1 Teste do sistema de refrigeração

Para a realização dos testes na chopeira, foram utilizados um barril de chopp contendo cerveja e cuja capacidade é de 5,0 litros e um compressor de ar com uma potência de 3,0 HP, ambos conectados a uma válvula reguladora de pressão e vazão, conforme indica a Figura 31, a seguir.

Figura 31 - Apresentação esquemática do teste do sistema de refrigeração



Fonte: Autoria Própria, (2025).

Para avaliação do sistema, regula-se a pressão do gás a mais ou menos 206,8 ou 275,8 kPa, esta pressão é um fator determinante para o resfriamento do chopp.

Após a chopeira elétrica ser ligada, não é necessário realizar nenhum ajuste manual de temperatura, pois o sistema, de forma autônoma, inicia-se o processo de resfriamento. Durante esse processo, a temperatura do chopp diminuiu simultaneamente ao longo do tempo. O sistema foi projetado para controlar essa variável automaticamente, ajustando-se às condições necessárias para garantir a qualidade do produto.

A diminuição da temperatura tem por objetivo resfriar o chopp dentro da faixa ideal de 0°C a -2°C, que é a temperatura mais apropriada para o consumo. Esse controle automático assegurou que cerveja fosse servida a uma temperatura ótima, sem a necessidade de intervenções manuais. Além disso, o processo de ajuste de temperatura acontece de forma eficiente e contínua, mantendo a qualidade do produto sem que haja variações indesejadas. O sistema garante que o chopp seja extraído de maneira otimizada, ou seja, e em condições ideais de temperatura.

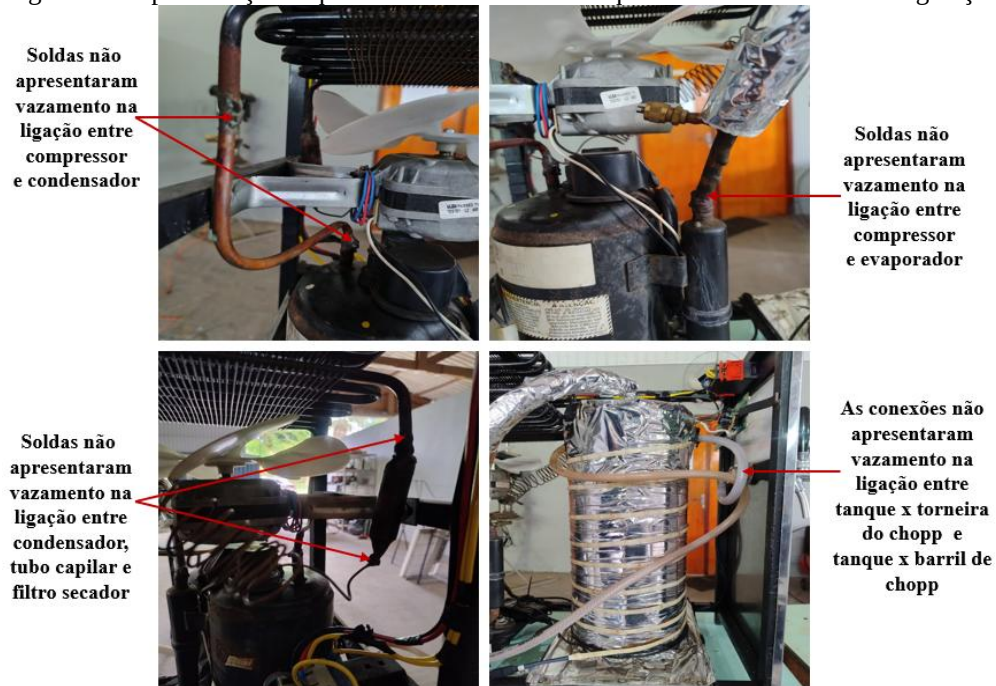
Por outro lado, um problema de superaquecimento no compressor da chopeira fez com que o tempo de resfriamento do chopp durasse aproximadamente 125 minutos. Quando o chopp atingiu a temperatura de -1°C o compressor estava a uma temperatura entre 130 a 150 °C. Essa não conformidade no funcionamento deste equipamento precisa ser corrigida para que o sistema opere em condições normais.

4.2.2 Teste de estanqueidade do sistema

Esse teste em um sistema de refrigeração visa garantir que todas as soldas estejam sem vazamentos, que todas as conexões apresentem uma boa vedação e que resistam a pressão de trabalho da chopeira que gira em torno de 206,8 ou 275,8 kPa. O teste de estanqueidade do sistema de refrigeração foi realizado com o auxílio de um manifold com ajuste de 3447,3 kPa durante um período de 1 hora.

Passado o tempo determinado foi verificado que o manifold havia mantido a mesma pressão inicial, caracterizando assim a ausência de nenhum tipo de vazamento, conforme indica a Figura 32.

Figura 32 - Apresentação esquemática do teste de estanqueidade do sistema de refrigeração



Fonte: Autoria Própria, (2025).

O teste de estanqueidade do sistema de extração foi realizado com o objetivo de garantir que não houvesse vazamentos e que o sistema fosse capaz de suportar a pressão necessária durante o processo de operação. Para a execução do teste, foi utilizado um compressor de ar com uma potência de 3,0 HP, um barril de chopp e cerveja.

O barril foi conectado ao sistema, e a cerveja foi forçada a circular por todo o sistema de refrigeração, simulando as condições de funcionamento. Durante o processo, foi monitorado cuidadosamente o comportamento do sistema, verificando possíveis vazamentos nas soldas, conexões e componentes, como por exemplo, na vedação da torneira do chopp. Ao final do teste, concluiu-se que a cerveja percorreu todo o sistema sem apresentar nenhum tipo de vazamento, demonstrando que o sistema estava hermeticamente fechado. Além disso, o sistema foi capaz de resistir à pressão delimitada, sem qualquer falha ou comprometimento de sua integridade.

Esse resultado positivo confirma que o sistema de refrigeração possui a estanqueidade necessária para operar de maneira eficiente e segura, garantindo a qualidade do processo de extração sem riscos de perda ou contaminação do produto.

4.2.3 Teste de vazão do sistema

A verificação da vazão é determinante para assegurar o funcionamento correto de todo o sistema. O teste de vazão consiste em avaliar detalhadamente o desempenho do sistema de extração e de serviço, garantindo que o chopp seja transportado do barril até a torneira de forma

contínua e sem falhas. Durante o teste, verifica-se se a vazão está uniforme e se não há interrupções no fluxo, o que poderia comprometer a eficiência do sistema. Esse teste, conforme a Figura 33, foi conduzido utilizando os mesmos parâmetros do teste de estanqueidade, com a cerveja percorrendo todo o sistema.

Figura 33 - Apresentação esquemática do momento do teste de vazão



Fonte: Autoria Própria, (2025).

O volume de chopp que sai pela torneira é influenciado por dois fatores, a pressão ajustada na válvula do barril de chopp e a configuração da vazão na própria torneira. Essa regulagem da vazão é responsável por definir a quantidade de líquido que será liberada pela torneira.

Após a realização dos testes e da verificação da vazão, foi constatado que a cerveja circulou por todo o sistema da chopeira de forma eficiente e sem apresentar falhas. O percurso teve início no barril de chopp, passando pela serpentina, onde ocorre o processo de resfriamento, até alcançar a torneira extratora. Durante todo o trajeto, o sistema manteve sua integridade, sem qualquer tipo de vazamento, obstrução ou inconsistência.

Este resultado demonstra que o sistema está operando de maneira correta, garantindo a continuidade do fluxo e o desempenho adequado em cada etapa do processo. Assim, conclui-se que o sistema da chopeira está apto a realizar a extração do líquido com qualidade e confiabilidade.

4.2.4 Teste de temperatura do líquido

Para medirmos a temperatura de saída do chopp, foram realizados alguns testes comparativos utilizando sete valores de temperaturas indicados no controlador digital e sete valores medidos diretamente no chopp.

O primeiro teste foi realizado com o controlador de temperatura e o barril de chopp a temperatura ambiente de 30°C e após 15 minutos da chopeira ser ligada, foi possível retirar a chopp com uma temperatura entre 21,3 °C na saída da torneira.

No sexto teste, quando o controlador alcançou a marca de 0°C, obteve-se como resultado uma temperatura de 2°C, o que já caracteriza uma temperatura ideal de consumo de cerveja. Os resultados de todos os testes são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Descrição dos testes de temperatura do líquido

TEMPERATURA NO CONTROLADOR	TEMPO DE RETIRADA DO LÍQUIDO	TEMPERATURA DE SAÍDA DO LÍQUIDO
30 °C	15 Minutos	21,3 °C
20 °C	30 Minutos	18,4 °C
15 °C	50 Minutos	10,6 °C
10 °C	75 Minutos	6,2 °C
5 °C	100 minutos	3 °C
0 °C	115 minutos	2 °C
-1 °C	125 minutos	1,3 °C

Fonte: Autoria Própria, (2025).

Com base nos testes realizados, foi possível observar que, quando o barril de chopp estiver a temperatura ambiente de 30°C, o sistema leva, em média, 125 minutos para resfriar o chopp até a temperatura ideal e isso fica mais evidente pela análise da Figura 30. Esse tempo foi determinado considerando o desempenho do sistema de refrigeração e sua eficiência na transferência de calor. Nessas circunstâncias, este tempo é suficiente para que o chopp atinja a faixa ideal de temperatura, o que garante que ele seja servido com qualidade e no ponto adequado. Esses resultados não confirmam a eficiência total do sistema em atender as expectativas de consumo em condições normais de uso, porque a máquina não está operando como deveria.

4.2.5 Validação dos testes

Como etapa final de validação, foram utilizados os três sistemas presentes na chopeira: refrigeração, extração e serviço. A pressão de trabalho foi configurada em 241,4 kPa, conforme os resultados de testes anteriores e o controlador de temperatura foi observado atentamente até atingir -1°C. O sistema levou aproximadamente 125 minutos para alcançar essa temperatura. Para avaliar a eficiência do sistema de refrigeração, a chopeira funcionou por um período de duas horas, com retiradas de chopp acontecendo a partir de 15 minutos do equipamento ser ligado.

Durante esse período, o sistema se auto acionava sempre que se extraia o chopp da serpentina, e sua temperatura variava entre 0 °C e 2 °C. Apesar do sistema não funcionar em perfeitas condições de operação, a chopeira conseguiu performar até fazer o chopp atingir a temperatura ideal.

Os testes no sistema de vazão foram realizados para validar e verificar o funcionamento adequado de todo o sistema. Durante a validação, verificou-se se todas as conexões estavam devidamente fixadas e se as soldas não apresentavam defeitos, como falhas ou trincas, que poderiam causar vazamentos de líquido ou do fluido refrigerante. Além disso, foi confirmado que tanto o líquido quanto o fluido fluíram por todo o sistema sem interrupções. Concluída essa validação, constatou-se que o sistema não apresentava nenhum tipo de vazamento ou falhas.

Para estabelecer um parâmetro de comparação e validar os testes de temperatura do chopp, buscou-se determinar qual seria a faixa ideal para o consumo do mesmo. De acordo com Maxbeer (2019), a temperatura ideal para consumo varia entre 6°C e 8°C. Durante os testes de temperatura do chopp, as medições realizadas no momento da extração registraram valores entre 2°C e 7°C. Considerando que, entre a extração e o consumo, a temperatura do chopp pode aumentar de 2°C a 8°C, então pode-se concluir que apesar da demora para resfriar o chopp, o dispositivo conseguiu garantir uma temperatura ideal para consumo.

As causas que impediram a chopeira de performar em perfeitas condições de operação, cujo tempo adequado e suficiente para resfriar completamente o chopp é de 15 a 25 minutos, estão relacionadas a falhas na bomba de recirculação, ao uso de etanol em vez de glicol (álcool recomendado pelos fabricantes), ao superaquecimento do compressor e ao dimensionamento inadequado tanto das serpentinas do evaporador quanto da serpentina por onde circula o chopp.

Segundo Maxbeer (2019), para maior eficiência do evaporador em chopeiras elétricas, esse equipamento precisa ser confeccionado em forma espiral ou circular, e não em arranjos horizontais como é atualmente a da máquina em estudo.

4.2.6 Orçamento do projeto

A Tabela 12 apresenta em detalhe o orçamento estimado do projeto, especificando a quantidade necessária de cada componente e o custo total correspondente. É importante ressaltar que esses valores podem variar no momento da fabricação, pois estão sujeitos a fatores como a localização onde os componentes são adquiridos, as condições de mercado e os custos dos serviços envolvidos no processo.

Essas possíveis alterações devem ser consideradas no planejamento, de modo a ajustar o orçamento de acordo com as circunstâncias reais.

Tabela 12 - Apresentação do orçamento do projeto

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	CUSTO TOTAL
Condensador de Bebedouro com 1/3 HP	1 Unidade	R\$ 129,00
Compressor Elgin 1/3 HP	1 Unidade	R\$ 680,00
Micro Ventilador	1 Unidade	R\$ 110,00
Filtro Secador	1 Unidade	R\$ 15,00
Tubo Capilar de Cobre	1 Unidade	R\$ 18,00
Evaporador	7 Metros	R\$ 155,00
Bomba de Aquário	1 Unidade	R\$ 25,00
Termostato Digital STC - 1000	1 Unidade	R\$ 35,00
Manta Isolante	2 Metros	R\$ 30,00
Tubo Serpentina inox 3/8"	25 Metros	R\$ 320,00
Torneira Italiana (Rosca 5/8)	1 Unidade	R\$ 150,00
Tomada 3 Pinos (10A– 250V)	1 Unidade	R\$ 60,00
Chapas Laterais e superior	5 Unidades	R\$ 350,00
Tanque ou Barril de Serpentina	1 Unidade	R\$ 40,00
Capacitor Eletrolítico	1 Unidade	R\$ 54,00
Conexões Engate Rápido 5/8" x 3/8"	1 Unidade	R\$ 14,00
Tubo Isolante 3/8"	1 Metro	R\$ 3,00
Conector de 1" com Rosca	1 Unidade	R\$ 4,00
Fio Elétrico 3 mm - Amarelo	1,5 Metros	R\$ 3,50
Fio Elétrico 3 mm - Vermelho	1,5 Metros	R\$ 3,50
Fio Elétrico 3 mm - Preto	1,5 Metros	R\$ 3,50
Mangueira Atóxica PVC 5/8"	2 Metros	R\$ 8,00
Parafuso Philips de Ponta Agulha 4,2 mm x 13 mm	40 Unidades	R\$ 5,00
Parafuso Philips M6x25	8 Unidades	R\$ 2,50
Porca Sextavada M6	8 Unidades	R\$ 2,00
Arruela lisa M6	4 Unidades	R\$ 1,00
Chave Contatora	1 Unidade	R\$ 50,00
Tubo Metalon Galvanizado 20x20	6 Metros	R\$ 62,00
Quantidade de Álcool	5 Litros	R\$ 35,00
Números de Abraçadeiras	8 Unidades	R\$ 40,00
TOTAL		R\$ 2.401,00

Fonte: Autoria Própria, (2024).

De acordo com a Tabela 12, é possível observar detalhadamente o custo total e a quantidade de cada componente utilizado no projeto. Além disso, a tabela apresenta o valor total gasto na execução do projeto, que é de R\$ 2.401,00. Esse valor pode ser considerado bastante acessível quando comparado com os preços de chopeiras disponíveis no mercado, conforme apresentado no Capítulo 3, na Tabela 2. Por exemplo, uma chopeira do modelo Torre Naja, com capacidade de 100 L/h, tem um preço médio de R\$ 9.350,00. Já uma Larken, com capacidade de 90 L/h, tem o preço médio de R\$ 8.678,00, enquanto uma Aleman, com capacidade de 70 L/h, está avaliada em R\$ 7.240,00. Por fim, a Stambeer, com capacidade de 50 L/h, custa cerca de R\$ 6.225,00.

Essa disparidade de valores das chopeiras demonstra que construir uma chopeira própria é uma alternativa muito mais viável economicamente do que adquirir uma diretamente de fornecedores. Além de reduzir significativamente os custos do equipamento, a construção permite personalizar a máquina de acordo com as necessidades específicas do projeto. Essa abordagem, portanto, se destaca como uma solução eficiente e acessível, especialmente para quem busca otimizar recursos sem comprometer a princípio a funcionalidade e a qualidade do equipamento.

4.2.7 Aspectos gerais dos testes

Os testes realizados na chopeira avaliaram a funcionalidade e a qualidade do sistema de refrigeração, assegurando a manutenção da temperatura ideal do chopp a ser consumido. Os resultados obtidos perante os requisitos encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Apresentação dos resultados gerais dos testes

REQUISITOS DE PROJETO	RESULTADO FINAL
Capacidade de refrigeração	Atende totalmente
Capacidade de extração do líquido	Atende totalmente
Baixo peso	Atende totalmente
Fácil manuseio	Atende totalmente
Médio porte	Atende totalmente
Não ultrapassa o orçamento máximo de R\$ 2500,00	Atende totalmente
Usa peças de baixo valor comercial	Atende parcialmente
Utiliza peças de boa resistência	Atende totalmente
Estrutura livre de rebarbas e contos vivos	Atende totalmente
Cabos e fios bem isolados	Atende totalmente
Parte elétrica funcionando em perfeitas condições	Atende totalmente

Utiliza gás adequado	Atende totalmente
Utiliza material adequado para a fabricação	Atende totalmente
Utiliza material resistente	Atende totalmente
De fácil construção	Atende parcialmente
De acordo com o desenho técnico	Atende totalmente
Dispositivo de controle de temperatura da chopeira	Atende totalmente
A chopeira deve foi fabricada em material metálico	Atende totalmente
A chopeira tem peças soldadas e parafusadas	Atende totalmente
Utiliza recursos adequados	Atende totalmente
Utiliza motor compressor disponível no mercado	Atende parcialmente
Utiliza torneira adequada para a extração de chopp	Atende totalmente
Seguiu um padrão de parafusos e porcas	Atende parcialmente
Extração de líquidos	Atende totalmente
Largura máxima 300 mm	Atende totalmente
Altura máxima 605 mm	Atende totalmente
Comprimento máximo 580 mm	Atende totalmente
Chopeira 220 V	Atende totalmente
Peso máximo 50 kg	Atende totalmente
Cores preto e prata	Atende parcialmente
Metal, plástico, borracha, espuma isolante e gás R-22	Atende totalmente
As peças e medidas devem seguir as especificações do projeto	Atende totalmente
Testes de desempenho do sistema de refrigeração	Atende parcialmente
Teste de fluxo de saída do líquido	Atende totalmente

Fonte: Autoria Própria, (2024).

Conforme apresentado na Tabela 13, é possível identificar os requisitos do projeto que atenderam plenamente às expectativas, assim como aqueles que atenderam parcialmente os requisitos estabelecidos. Entre os itens analisados, destaca-se a capacidade de refrigeração e a de extração do líquido, que atenderam completamente às exigências propostas. Por outro lado, os itens que atenderam parcialmente podem representar oportunidades de melhoria para ajustes futuros, contribuindo para o aprimoramento do sistema como um todo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste presente estudo possibilitou fazer uma análise detalhada sobre o funcionamento dos sistemas de refrigeração, proporcionando uma oportunidade única de aprofundar o conhecimento a respeito dos processos físicos e termodinâmicos que envolvem a refrigeração. Durante a pesquisa, foi possível explorar a literatura existente relacionada ao tema, o que contribuiu para ampliar a base teórica e compreender as melhores práticas na área. Além disso, o trabalho envolveu a aplicação de ferramentas adequadas para a concepção e execução do projeto da chopeira elétrica, visando obter resultados que fossem os mais assertivos e eficientes possível.

Todo o processo foi orientado para garantir um equilíbrio entre inovação, viabilidade técnica e qualidade do produto. Com isso, foi possível não apenas explorar aspectos técnicos, mas também alinhar o projeto às demandas do mercado, atendendo às expectativas de desempenho e sustentabilidade. Essa experiência prática, aliada ao embasamento teórico, forneceu uma visão ampla sobre os desafios e oportunidades no desenvolvimento de sistemas de refrigeração.

Em relação ao objetivo específico, que envolve o projeto e a fabricação de uma chopeira elétrica com capacidade de 50 L/h, o mesmo foi completamente atendido, seguindo as diretrizes da literatura consultada e a metodologia estabelecida. Isso permitiu o uso das ferramentas mais adequadas em cada fase do desenvolvimento, garantindo a aplicação precisa e oportuna de acordo com as necessidades de cada etapa do processo.

No que se refere à seleção dos componentes do sistema de refrigeração, esta foi atendida e confirmada por meio da realização dos testes de refrigeração, embora esse teste tenha atendido parcialmente os requisitos propostos, estanqueidade, vazão e temperatura. Além disso, os cálculos térmicos tiveram grande importância nessa etapa, pois permitiram concluir que o ciclo real se aproxima do ciclo ideal descrito na literatura. Essa conclusão foi alcançada com base nos resultados do COP, evidenciando que o objetivo de remoção de calor do ambiente a ser refrigerado foi alcançado.

Também foi elaborada detalhadamente uma listagem dos componentes utilizados no projeto, incluindo uma para materiais relacionados à estrutura, os componentes da unidade de refrigeração e os acessórios necessários para o funcionamento adequado do sistema. Essa listagem teve como finalidade organizar e documentar todos os elementos essenciais para a execução do projeto. Além disso, foi realizada a modelagem CAD (*Computer Aided Design*) 3D, que incluiu a apresentação da estrutura completa do corpo, o compartimento das serpentinas

e, por fim, uma vista explodida, permitindo uma visualização mais detalhada e compreensiva do conjunto. Esse processo foi essencial para facilitar a análise estrutural, a montagem e a validação do projeto, garantindo a precisão e a clareza necessárias para futuras implementações.

Os testes de refrigeração, vazão, estanqueidade e temperatura permitiram compreender claramente a importância dessas práticas para garantir um produto de qualidade que atenda às expectativas definidas inicialmente. Os resultados dos testes confirmaram que a refrigeração ocorreu de forma “adequada”, permitindo a extração da chopp na temperatura ideal. Além disso, pôde-se concluir que o sistema de vazão está funcionando corretamente, sem apresentar vazamentos ou falhas. Quanto à temperatura do líquido, verificou-se que esta não apenas atendeu aos padrões estabelecidos, como também manteve o chopp dentro da faixa ideal para consumo.

Sobre a validação dos resultados e dos testes realizados, tornou-se clara a importância de assegurar que todas as etapas do desenvolvimento e da fabricação do produto em si estivessem devidamente interligadas. Essa interligação entre as fases do processo foi importante para garantir o funcionamento correto e eficiente de todos os componentes e todas as funções da chopeira elétrica. Durante a validação, foram analisados os parâmetros de desempenho, como a eficiência do sistema de refrigeração, a vazão e a estabilidade da temperatura. Esses testes confirmaram que o produto atende plenamente às expectativas de qualidade e funcionalidade, demonstrando que o planejamento e a execução adequados em cada etapa foram determinantes para o sucesso do projeto.

Dessa forma, o presente trabalho permite concluir que, para a boa execução de um projeto, é fundamental que ele seja desenvolvido de acordo com uma metodologia bem estruturada, clara e coerente. Essa abordagem garante que todas as etapas existentes dos processos envolvidos sejam realizadas de maneira mais assertiva e eficiente, além de assegurar a qualidade do produto, fazendo com que o mesmo atenda plenamente às especificações e aos padrões de qualidade definidos, garantindo o sucesso do projeto.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O autor sugere, como possibilidade para pesquisas futuras e melhorias do modelo desenvolvido:

- Inclusão dos cálculos de perda de carga no trocador de calor e nas tubulações;
- Otimização a chopeira (trocar a bomba de recirculação, aumentar em tamanho as serpentinas do evaporador e a do chopp e usar em vez de etanol, o glicol que é o álcool específico utilizado em chopeiras) para melhorar o desempenho do sistema;

- Dimensionamento do dispositivo de expansão a partir de componentes disponíveis no mercado, já dimensionados pelos fabricantes;
- Adicionar ao sistema de expansão da chokeira 2 ou 3 tubos capilares para uma melhor expansão térmica do fluido refrigerante;
- Seleção de materiais mais leve para reduzir o peso da máquina, por exemplo usar o alumínio como material da base estrutural;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE HANDBOOK. **Refrigeration**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2019.

ANFUSO, R. C. **Evaporadores y condensadores de refrigeracion. tipo y selección**. Universidad Tecnológica Nacional. Faculdade Regional de Mendoza. Mendoza, 2020.

BRASIL. **Anuário da Cerveja 2019**. Ministério da Agricultura e Pecuária – MAPA. Secretaria de Defesa Agropecuária. Ano de referência 2018. Brasília – DF. 2020.

BRASIL. **Anuário Climatológico do Estado do Pará**. Secretaria do Meio Ambiente e Sustentabilidade. Núcleo de Monitoramento Hidrometeorológico. Ano de referência 2022. Pará – Brasil, 2023.

BRASIL. **Anuário da Cerveja 2024**. Ministério da Agricultura e Pecuária – MAPA. Secretaria de Defesa Agropecuária. Ano de referência 2023. Brasília – DF. 2024.

BANDEY, S. K. **A study on refrigerants**. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). M. Tech. Thermal Engineering, SSGI, C.G. Califórnia, 2018.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. **Fundamentals of Thermodynamics**. University of Michigan. Editora: Wiley. 10ª Ed. Michigan, 2020.

BLOGDOCHOPP. **Qual a Temperatura Ideal Para Tomar o Chopp?** São Paulo – SP. 2024. Disponível em: <https://choppexpress.com.br/qual-a-temperatura-ideal-para-tomar-o-chopp/>. Acesso em: 06/11/2023.

CARVALHO, F. N. de. **Simulação termoeconômica de sistemas de refrigeração em cascata e integrado absorção-compressão de vapor**. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de educação Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia. Belo Horizonte – MG, 2019.

CAIRO, A. **Compressor do tipo rotativo**. Santo André – SP. 2024. Disponível em: <https://www.cairoabc.com.br/produto/compressor-rotativo/>. Acesso em: 07/12/2024.

CIVIL, F. **Câmara fria: como funciona e quais as suas vantagens**. Santos – SP. 2021. Disponível em: <https://www.civilfrio.com.br/blog/camara-fria>. Acesso em: 31/07/2024.

CORRÊA, J. E. **Apostila de refrigeração e Climatização**. Instituto de Tecnologia. Universidade Federal do Pará – UFPA. Faculdade de Engenharia Mecânica. Belém – PA. 2018.

ÇENGEL, A. Y.; BOLES, A. M.; KANOGLU, M. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. Publisher: McGrawHill. 9th Edition. New York – NY, 2018.

ÇENGEL, A. Y.; GHAJAR. A. J. **Heat and mass transfer: Fundamentals and applications**. Publisher: McGrawHill. 6th Edition. New York – NY, 2020.

DANFOSS. **Válvulas de expansão termostáticas T2/TE3, orifício intercambiável**. São Paulo – SP, 2024. Disponível em: <https://www.danfoss.com/pt-br/products/dcs/valves/thermostatic-expansion-valves/thermostatic-expansion-valves/t2-te2/#tab-overview>. Acesso em: 03/

11/2024.

DUFRIO. **Condensador Hermético Para Bebedouro Hultor**. São Geraldo Porto Alegre – RS. 2024. Disponível: <https://www.dufrio.com.br/condensador-hermetico-para-bebedouro-hulter-3x8-tubo-1-4-hp.html?srsId=AfmBOorVLy7do05fgnrnNmryI45kmEFOMvLsh7YF6lfiQ8t-4MHgeLvcT>. Acesso em: 07/12/2024.

FERRAZ, F. **Apostila de Refrigeração** - CFETB - Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia, Santo Amaro - BA, Brasil, 2008;

FLORES, B. M. J; ROMERO, S. C. J; ACEVES, M. S. **A Review of Small-Scale Vapor Compression Refrigeration Technologies**. IRSE Research Group. Department of Mechanical Engineering. National Technological Institute of Mexico University of Guanajuato. Campus Irapuato-Salamanca. México, 2024.

GREF. **Física 2: Física Térmica/ Óptica**. Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. Universidade de São Paulo – USP. Editora: EDUSP. 7ª Ed. São Paulo – SP, 2017.

GOMES, A. R. **Análise comparativa de mecanismos de compressão para aplicação em refrigeração doméstica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Santa Catarina -SC. Florianópolis, 2006.

GUTOWSKI, E. **The history of refrigeration: refrigeration and air conditioning**. Clermont – Florida. EUA. Disponível em: <https://www.kalosflorida.com/air-conditioning/the-history-of-refrigeration/>. Acesso em: 10/09/2024.

GURGEL, A. **Palestra Técnica gratuita sobre Tecnologia em Fluidos Refrigerantes em Porto Alegre**. Porto Alegre. Rio Grande do Sul – RS. Disponível em: <https://www.webarcondicionado.com.br/palestra-tecnica-gratuita-sobre-tecnologia-em-fluidos-refrigerantes-em-porto-alegre>. Acesso em: 08/08/2024.

HEROLD, M. W. **Gelo nos trópicos: a exportação de “blocos de cristais da frieza ianque” para índia e brasil**. Tradução: Mario E. González. Revista Espaço Acadêmico. 2011.

IWAKURA, M. **Como funciona a chopeira: entenda como funciona o processo de produção da bebida que nada mais é do que uma cerveja não pasteurizada**. Rio de Janeiro – RJ. Disponível em: <https://super.abril.com.br/comportamento/como-funciona-a-chopeira>. Acesso em: 01/08/2024.

INCROPERA, F. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; DEWITT, D.P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. Publisher: Wiley. 8th Edition. New York – NY, 2020.

LOPES, F. F; RODRIGUES, J. V. O; NASCIMENTO, L. S. **Refrigerador de cerveja**. Instituto Federal de Ciências e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Avançados Arcos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Arcos – MG, 2018.

MAXBEER. **Manual de chopeiras Maxbeer**. Campinas – SP. 2019.

MARTINELLI, L. C. **Refrigeração**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS. Departamento de Tecnologia – DETEC. Panambi – RS. 2003.

MANDÚ, T. B.; SILVA, S. N. **Climatologia das Ondas de Calor Registradas no Estado do Pará, Brasil**. Revista Brasileira de Geografia Física. Rio de Janeiro – RJ, 2022.

MILLER, R; MARK, R. **Ar - Condicionado e Refrigeração**. Editora: LTC. 2ª Ed. Rio de Janeiro – RJ, 2020.

MORADO, R. **Larousse da Cerveja: a história e as curiosidades de uma das bebidas mais populares do mundo**. Editora: Alaúde. 1ª Ed. São Paulo – SP. 2017.

MOREIRA, J. R. S. **Processos de Transferência de Calor**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. Departamento de Engenharia Mecânica. Notas de aula. São Paulo – SP, 2018.

MORAN, M. J. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Tradução: Robson Pacheco Pereira. Editora: LTC. 10ª Ed. Rio de Janeiro. 2020.

NUNES, H. M. **Algoritmo do modelo teórico para o compressor ideal de refrigeração**. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Departamento de Engenharia Mecânica. Lisboa, 2021.

OLIVEIRA, P. V. **Tipos e Características de Compressores: Conheça as vantagens do ar comprimido e as características dos principais compressores**. São Paulo – SP. Disponível em: <https://hidraulicaepneumatica.com/tipos-e-caracteristicas-de-compressores/>. Acesso em: 03/11/2024.

PAULA, F. F. **Refrigeração e Ar-Condicionado: condensadores**. Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica. Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF. Juiz de Fora – MG. 2017.

PAUKA, F. S. **Análise de Desempenho de um Ciclo Real de Refrigeração por Compressão de vapor**. Universidade de Rio Verde – UNIRV. Rio Verde – GO, Brasil. 2019.

PAROMED, S. **Segurança no trabalho para câmara fria e locais com muito frio**. São Paulo – SP. 2022. Disponível em: [https://www.paromed.com.br/seguranca-no-trabalho-para-camara-fria-e-locais-commuitofrio/#:~:text=As%20c%C3%A2maras%20frias%20podem%20ser,ser%20mantidos%20sob%20baixas%20temperaturas](https://www.paromed.com.br/seguranca-no-trabalho-para-camara-fria-e-locais-com-muitofrio/#:~:text=As%20c%C3%A2maras%20frias%20podem%20ser,ser%20mantidos%20sob%20baixas%20temperaturas). Acesso em: 31/07/2024.

RAKSHIT, A. **História da Refrigeração: Respostas de Leitura**. Calcutá – Índia. Disponível em: <https://ieltsit.com/news/e-482-history-of-refrigeration-reading-answers>. Acesso em: 10/08/2024.

POTTER, C. M.; ALLEN, S. J.; KROOS, A. K. **Thermodynamics for Engineers**. Publisher: Springer. 2 th Edition. New York – NY, 2025.

REFRIGERAÇÃO REAL. **Montagens de câmaras frigoríficas ou frias**. São Paulo – SP. 2024. Disponível em: <https://www.refrigeracaoareal.com.br/montagem-de-camaras-frigorificas>. Acesso em: 31/07/2024.

RONQUILLO, R. **Understanding Heat Exchangers - Types, Designs, Applications and Selection Guide**. Califórnia. Disponível em: <https://www.thomasnet.com/articles/process-equipment/understanding-heat-exchangers/>. Acesso em: 03/11/2024.

RODRIGUES, M. R. **Processos industriais: Sistema por expansão direta ou indireta?** São Paulo – SP. 2022. Disponível em: <https://www.engenhariaearquitectura.com.br/2022/09/expansao-direta-ou-indireta>. Acesso em: 15/02/2025.

SANTOS, P. S. dos; PORTO, B. S. **Análise Comparativa Teórico e Experimental da Efetividade dos Trocadores de Calor de um Sistema de Refrigeração Automotiva por Ciclo de Compressão de Vapor**. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET – RJ. Rio de Janeiro – RJ, 2017.

SANTOS, M. G. **Operações Unitárias na Indústria de alimentos**. São Paulo – SP. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/1980311/9-refrigeracao>. Acesso em 29/07/2024.

SANTOS, F. A.; GONÇALVES, C. N.; SIQUEIRA, V. V. **Estudo de caso sobre o processo de desenvolvimento de uma chopeira elétrica: cálculo da carga térmica e projeto detalhado**. Monografia de Conclusão de Curso. Universidade de Americana. Americana - SP. 2020.

SARTORI, D.; MOCELIN, L. G. **Desenvolvimento do projeto para fabricação de uma chopeira elétrica**. Horizontina – RS. TCC apresentado a Faculdade de Engenharia Mecânica de Horizontina – FAEMHO. Horizontina - RS. 2019.

SILVA, J. G. **A bela história da refrigeração**. Florianópolis. Santa Catarina – SC. 2018. Disponível em: <https://jesuegraciliano.wordpress.com/2018/05/05/a-bela-historia-da-refrigeracao/>. Acesso em 03/09/2024.

SOUSA, P. **Geladeira: O que é, história, importância e características**. Rio de Janeiro – RJ. 2022. Disponível em: <https://conceito.de/geladeira>. Acesso em: 15/10/2023.

SILVA, J. G. **Projeto de Câmaras frias de pequeno porte**. Apostila adaptada de José Vilain. Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC. São José – SC, 2020.

STAMBEER. **Chopeiras elétricas**. São Paulo – SP. 2024. Disponível em: <https://stambeer.com.br/categoria-produto/chopeiras-eletricas/>. Acesso em: 07/12/2024.

SHAH, R. K.; SEKULIC, D. P. **Fundamentals of Heat Exchanger Design**. Publisher: Yiley. 2th Edition. New York – NY, 2024.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. **Refrigeração Industrial**. Editora: Edgard Blucher. 2ª Ed. São Paulo – SP, 2018.

VILLAS BÔAS, V. A. P. **Bancada didática de refrigeração por compressão de vapor**. Universidade Federal do Paraná – UFPR. TCC. Palotina – PR, 2023.

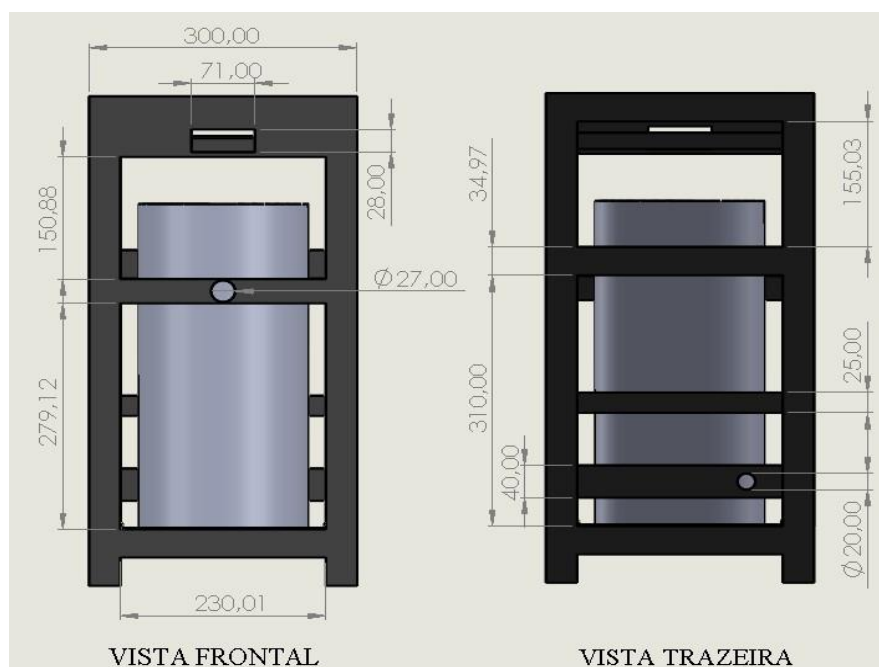
VILAIN, R. **Projeto de Câmaras frias de pequeno porte**. Curso técnico subsequente integrado de refrigeração e climatização. Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC. São José – SC, 2018.

XAVIER, R. **Tipos de chopeiras: descubra como escolher a perfeita para você**. Florianópolis – SC. 2022. Disponível em: <https://www.mytapp.com.br/blog/tipos-de-chopeirastipos-de-chopeiras/>. Acesso em: 06/11/2024.

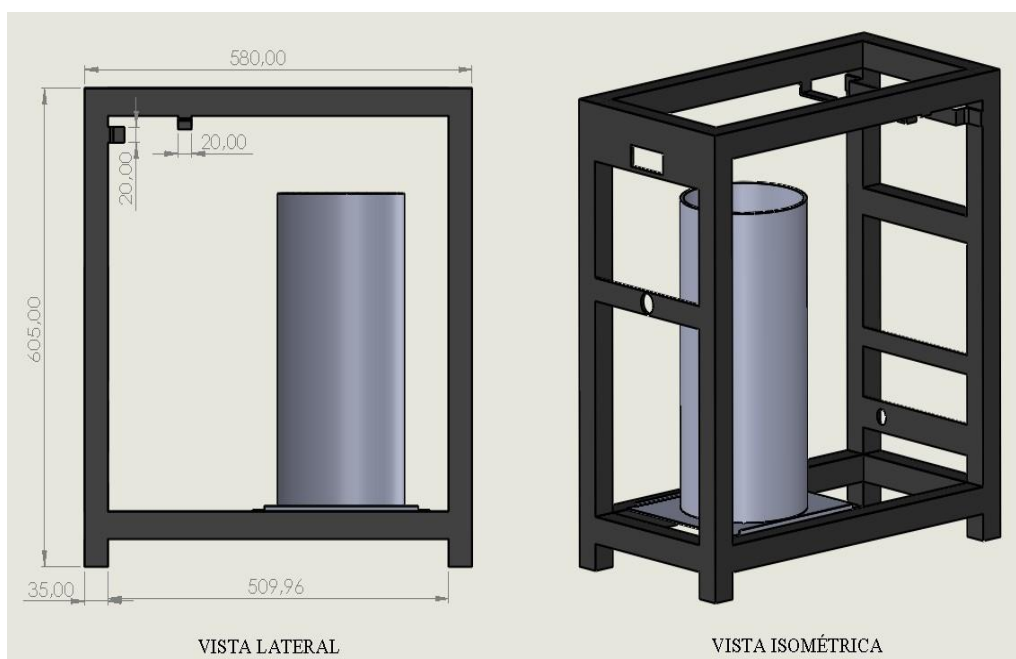
APÊNDICES

APÊNDICE A – DIMENSÕES ESTRUTURAIS DA CHOPEIRA

A.1 Grade estrutural da chopeira em vistas frontal e trazeira

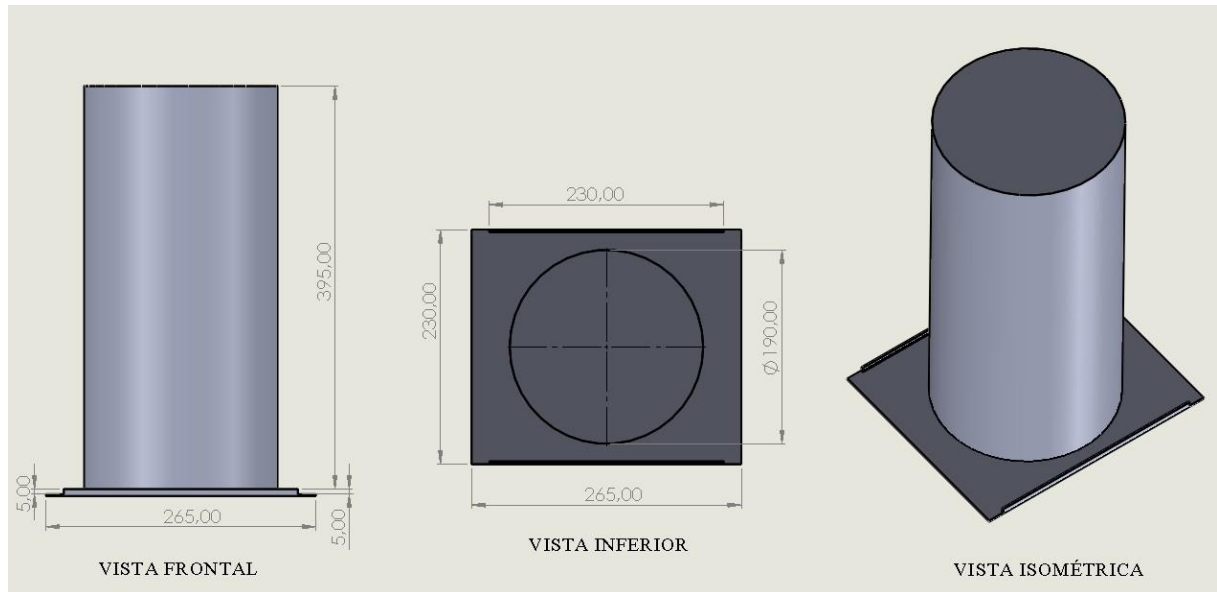


A.2 Grade estrutural em vistas lateral e isométrica

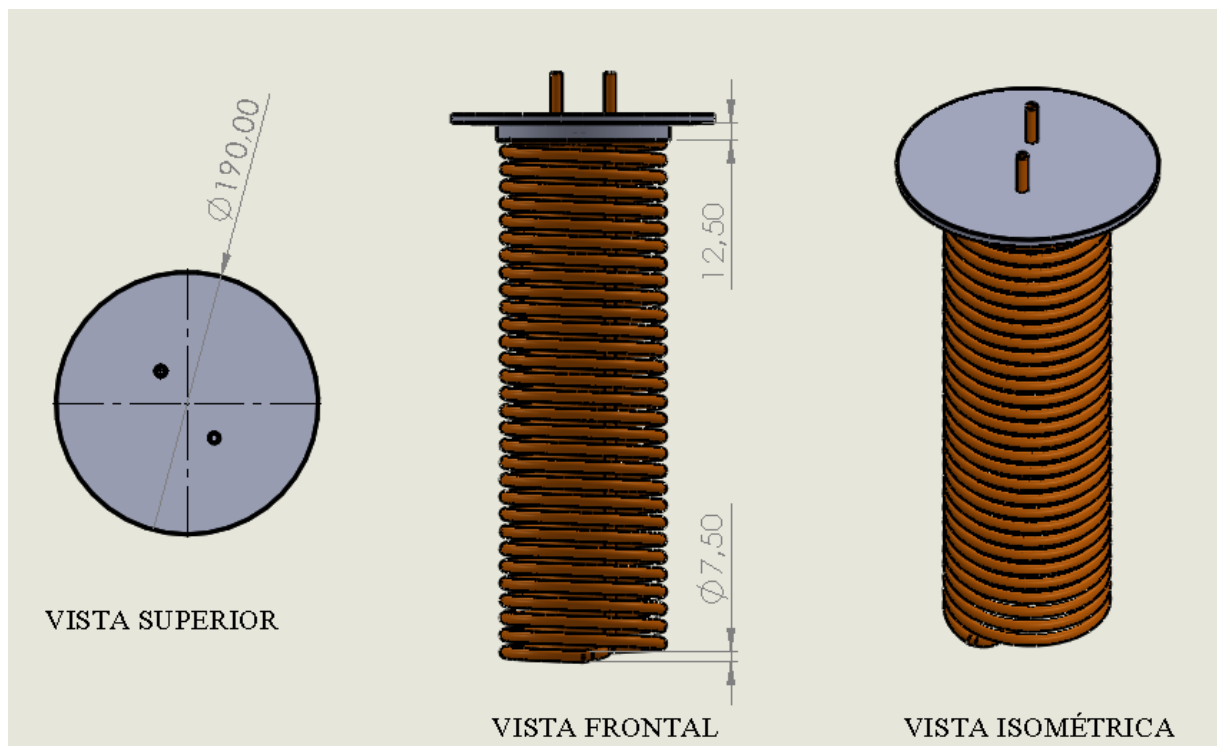


APÊNDICE B – COMPONENTES INTERNOS DA CHOPEIRA

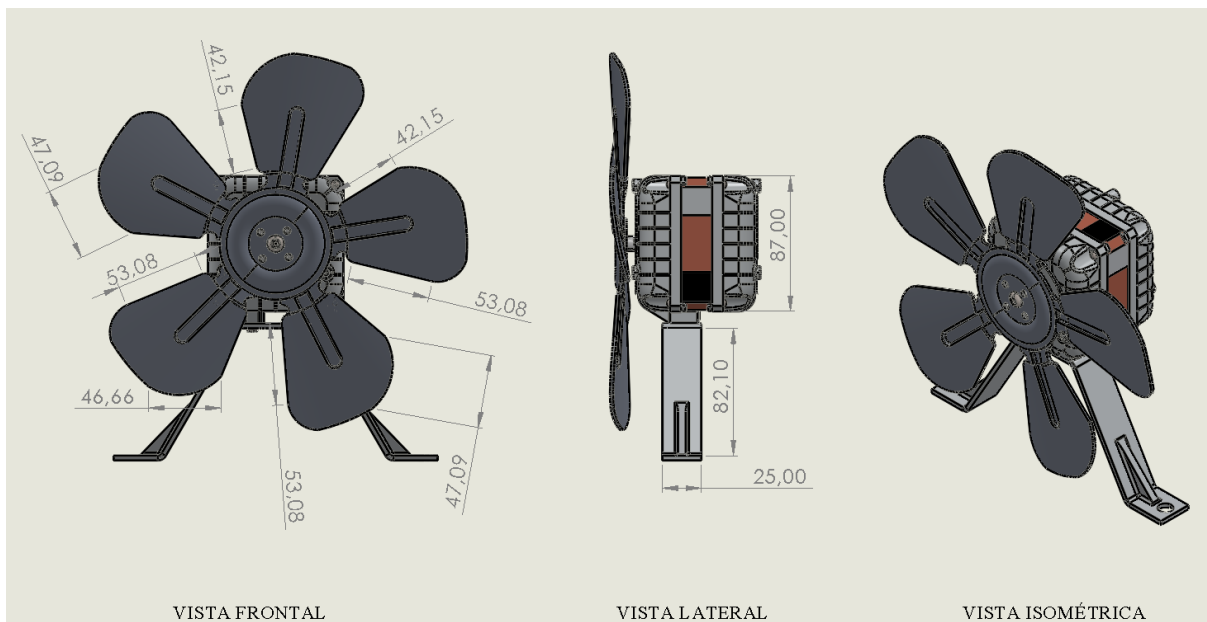
B.1 Descrição das dimensões do tanque ou reservatório de serpentinhas em vistas frontal, inferior e isométrica



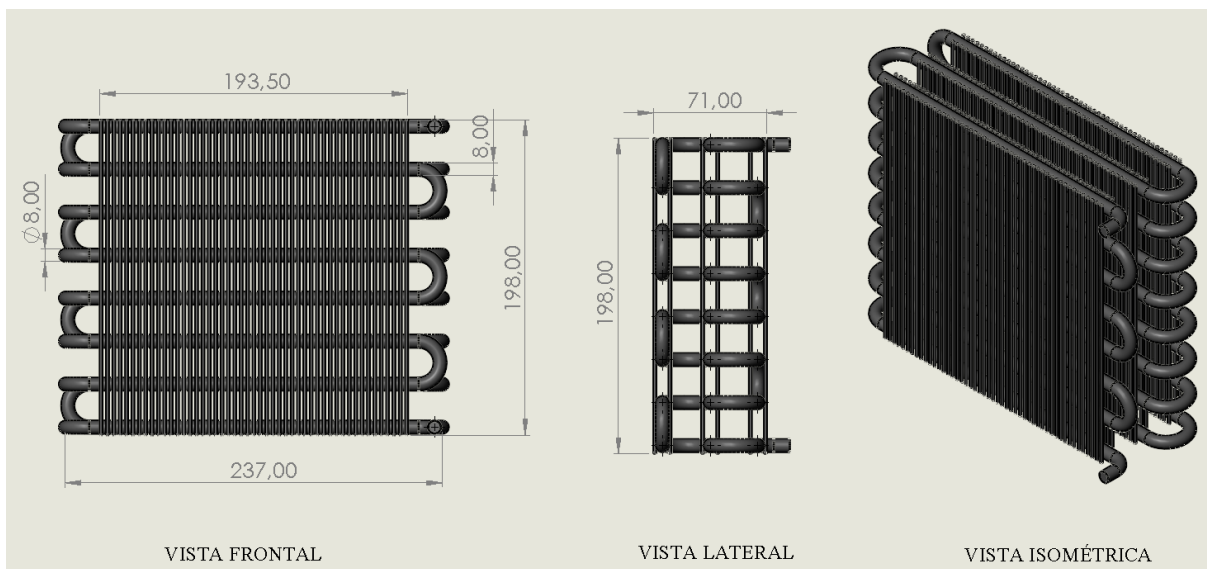
B.2 Descrição das dimensões da serpentina de chopp em vistas superior, frontal e isométrica



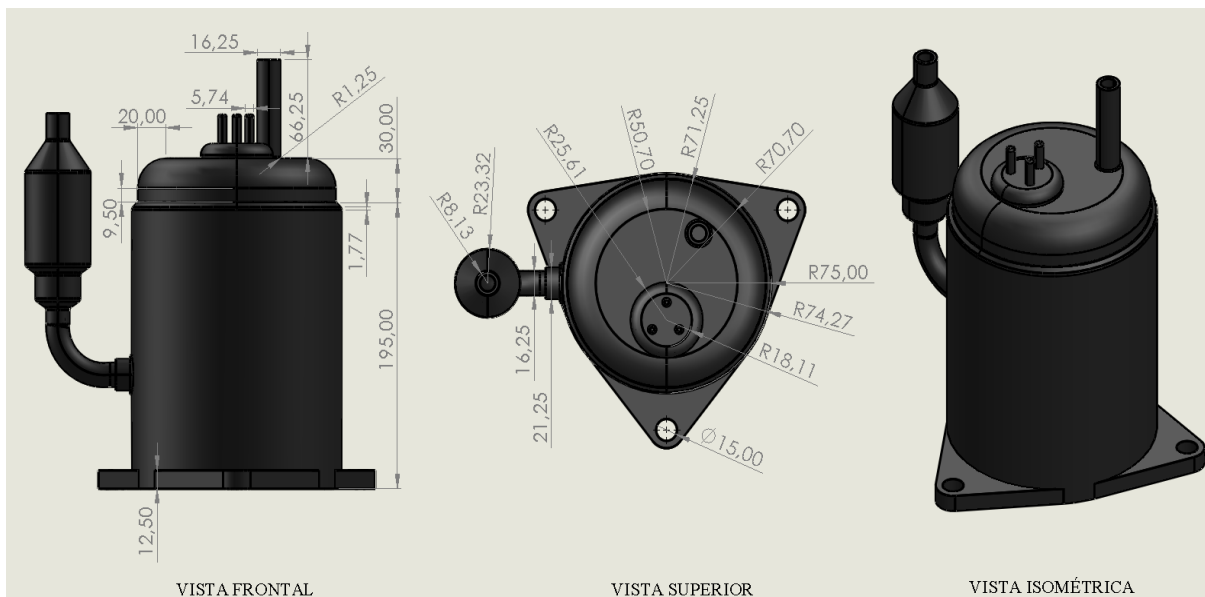
B.3 Descrição das dimensões do motor ventilador bivolt em vistas frontal, lateral e isométrica



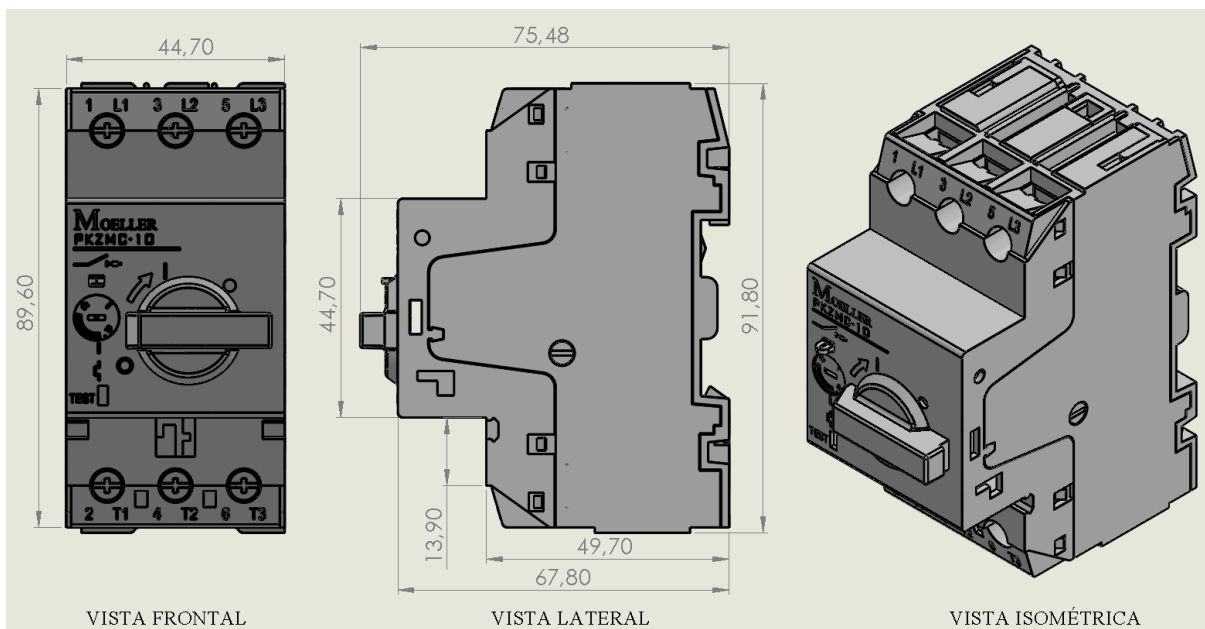
B.4 Descrição das dimensões do condensador em vistas frontal, lateral e isométrica



B.5 Descrição das dimensões do compressor rotativo em vistas frontal, superior e isométrica

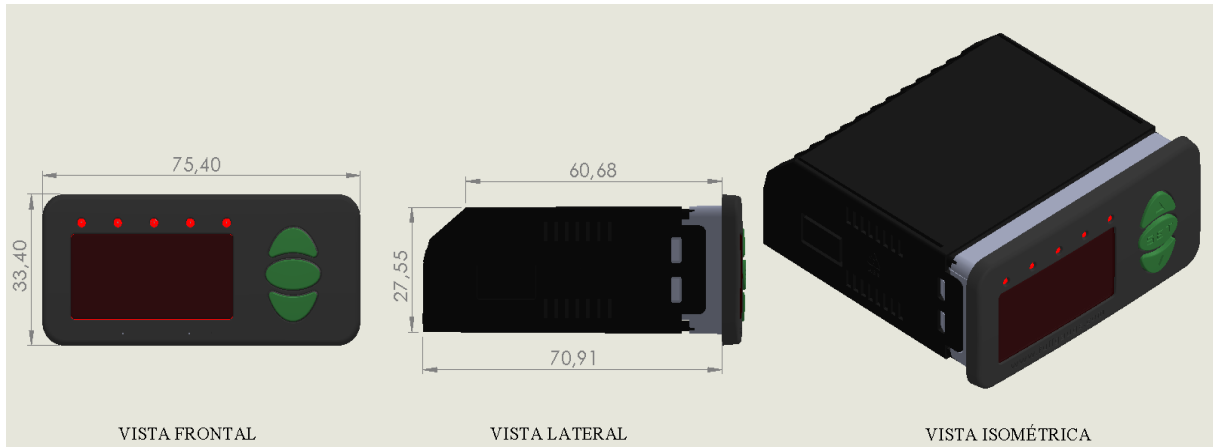


B.6 Descrição das dimensões da chave contatora em vistas frontal, lateral e isométrica

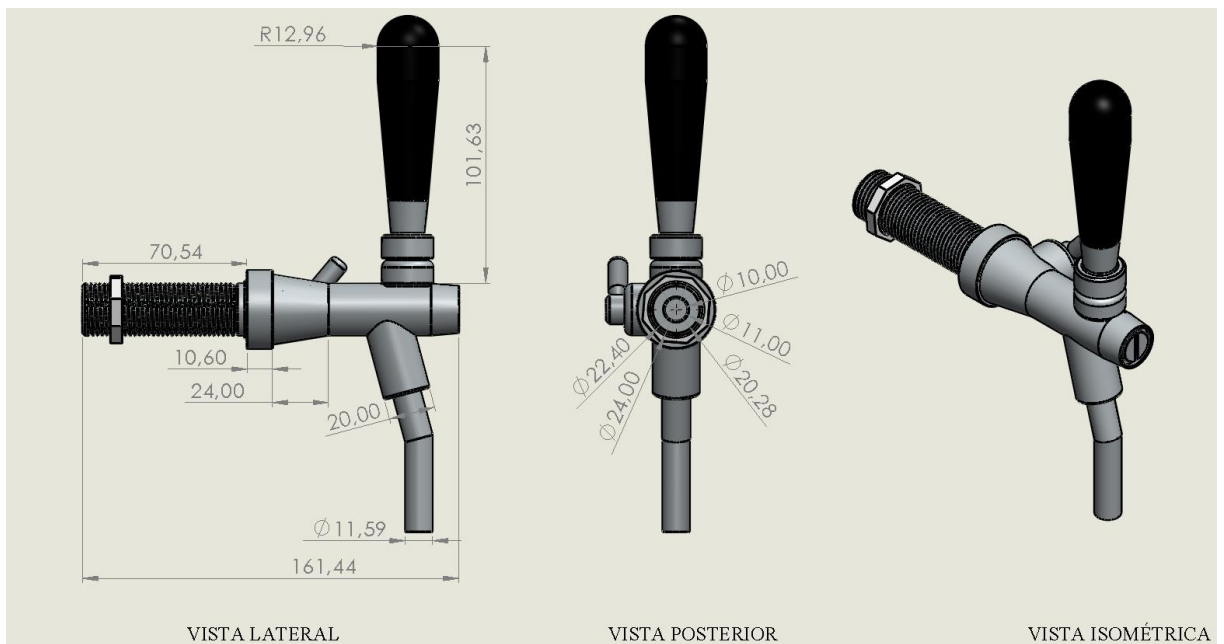


APÊNDICE C- COMPONENTES EXTERNOS DA CHOPEIRA

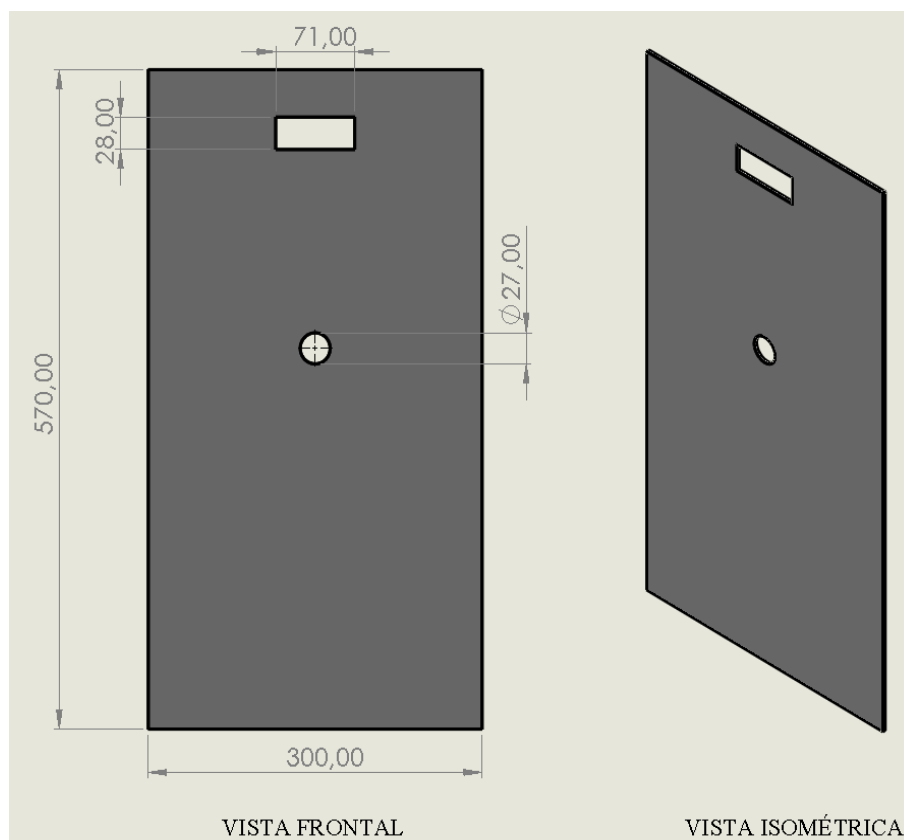
C.1 Descrição das dimensões do termostato digital bivolt STC - 1000



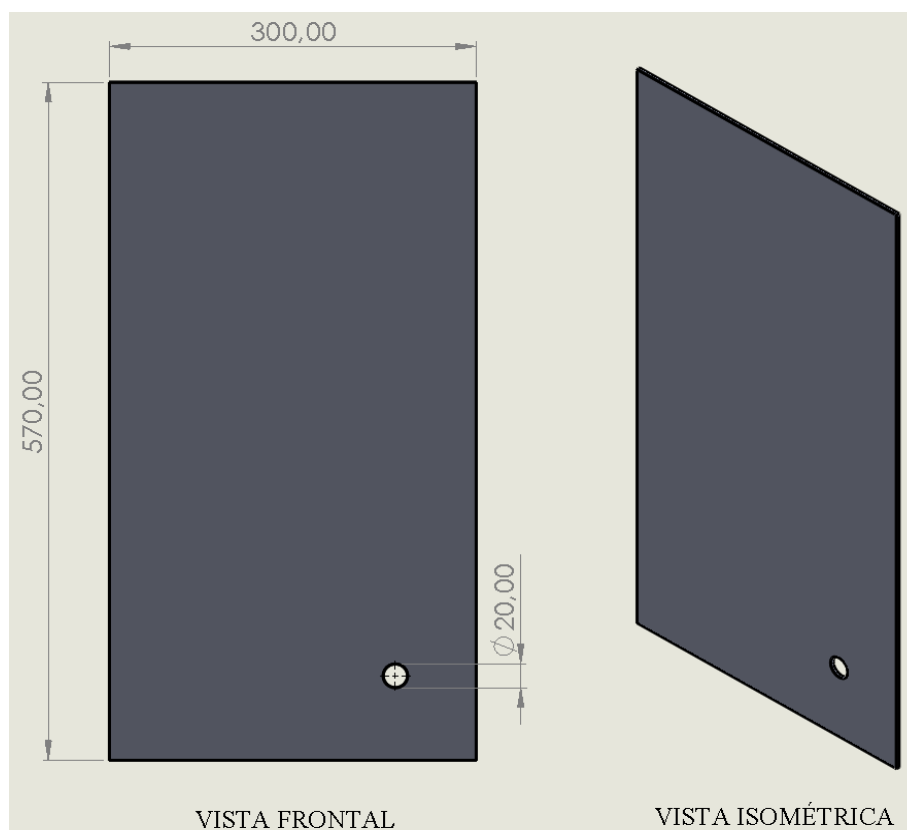
C.2 Descrição das dimensões da torneira italiana para a retirada de chopp

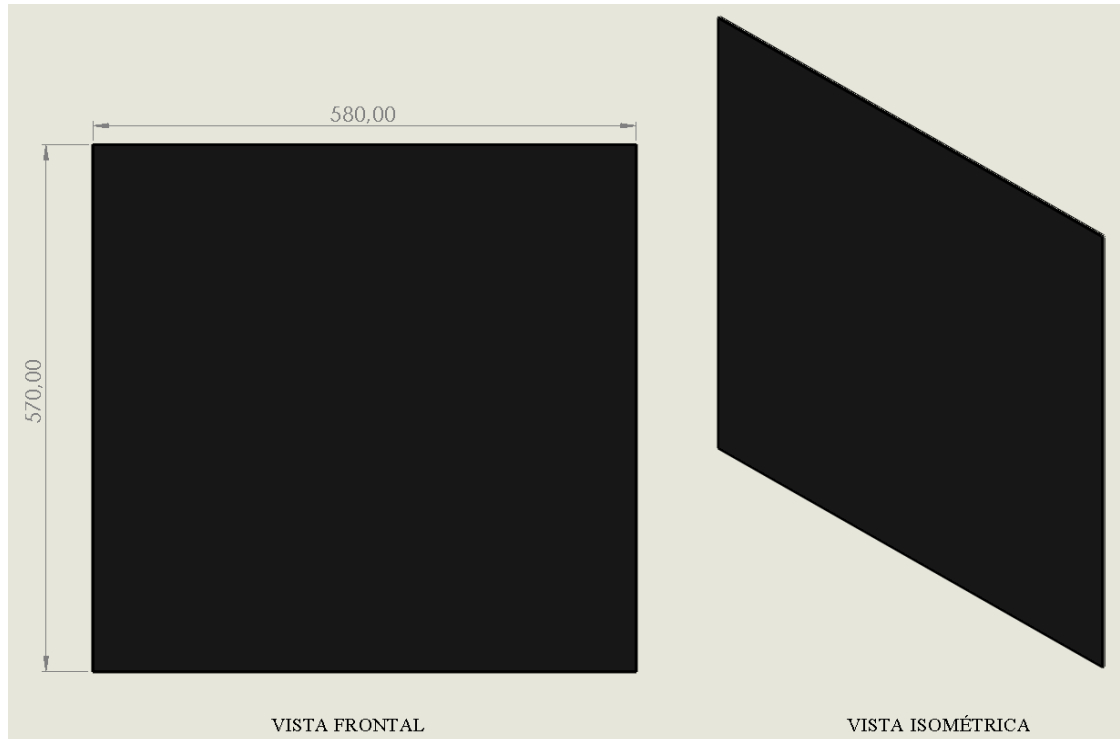
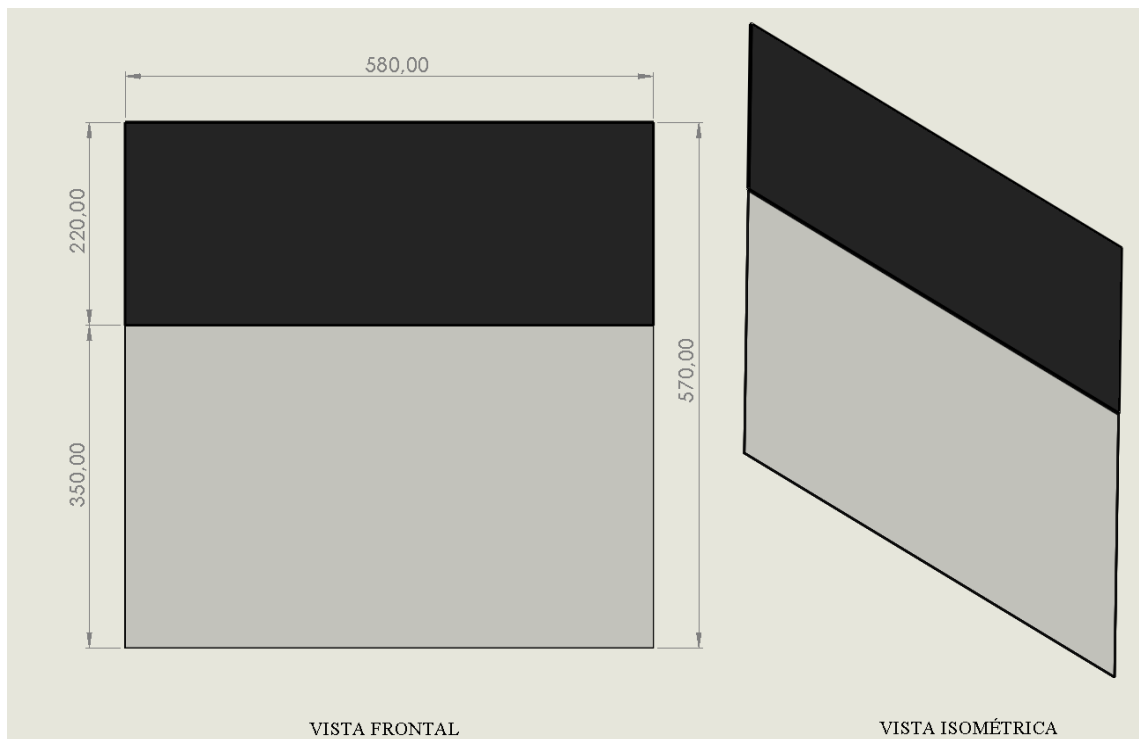


C.3 Descrição das dimensões do revestimento frontal da chopeira

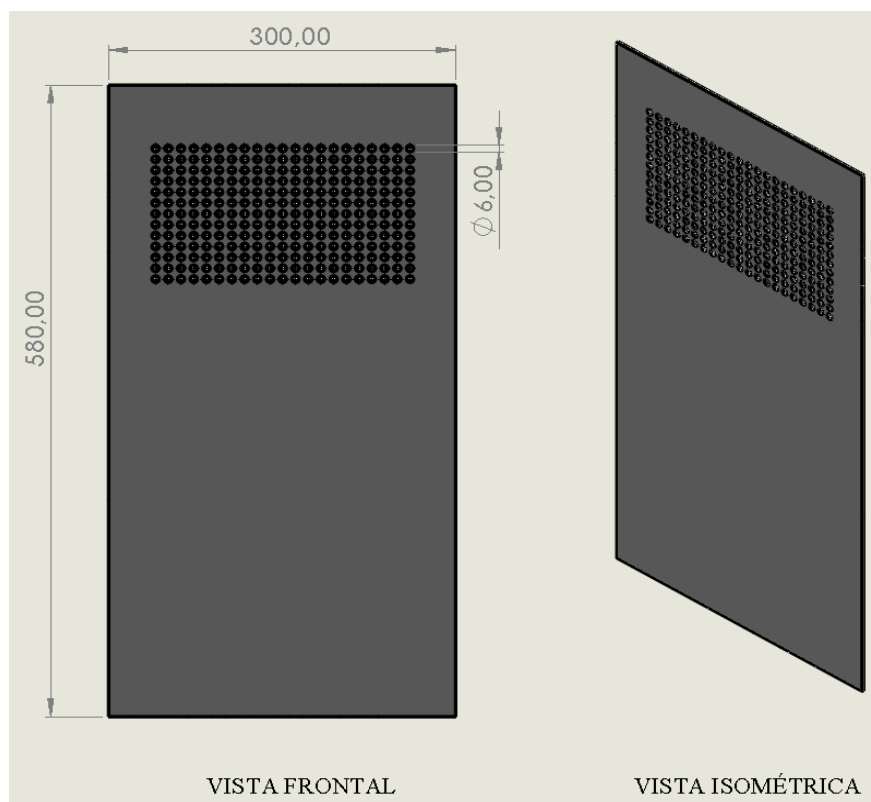


C.3 Descrição das dimensões do revestimento traseiro da chopeira



C.4 Descrição das dimensões do revestimento lateral esquerdo da chopeira**C.5 Descrição das dimensões do revestimento lateral direito da chopeira**

C.6 Descrição das dimensões do revestimento superior da chopeira



ANEXO A – VISTA EXPLODIDA DA CHOPEIRA ELÉTRICA

