

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

FILIPPE FISCHER

PROJETO DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DE SISTEMAS DE  
CONDICIONAMENTO DE AR AUTOMOTIVO

Joinville  
2022

FILIFE FISCHER

PROJETO DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DE SISTEMAS DE  
CONDICIONAMENTO DE AR AUTOMOTIVO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Diogo Lôndero da Silva,  
Dr.Eng.

Joinville

2022

FILIFE FISCHER

PROJETO DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DE SISTEMAS DE  
CONDICIONAMENTO DE AR AUTOMOTIVO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 28 de julho de 2022.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Diogo Lôndero da Silva, Dr.Eng.  
Orientador/Presidente

---

Prof. Kleber Vieira de Paiva, Dr.Eng.  
1º Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Sérgio Junichi Idehara, Dr.Eng.  
2º Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

*Dedico este trabalho a todos os que me  
ajudaram ao longo desta caminhada.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde, sabedoria e força para enfrentar os desafios e conquistar mais este objetivo. Em especial minha mãe Vanderleia, o maior exemplo de garra, determinação e mulher, que como mãe solteira nunca me deixou faltar amor, carinho, afeto, fez de tudo para que eu tivesse as melhores oportunidades e nunca deixou de me apoiar nos momentos mais difíceis. Agradeço minha vó, que é minha base e me deu o suporte, amor, carinho e me ajudou a formar meu caráter em meus primeiros anos de vida; minha família que é meu alicerce para suportar as adversidades do dia a dia e também agradeço meu avô, que durante minha trajetória acadêmica sempre me apoiou e sentia orgulho das minhas conquistas.

A minha namorada Jeniffer, pelo carinho, amor, compreensão e companheirismo. Por me inspirar a buscar sempre a minha melhor versão e assim atingir conquistas que nunca imaginaria obter.

Aos amigos que me amparam durante os melhores e piores momentos durante a minha passagem pela UFSC. Em especial, o time de futebol do Zika que me abraçou logo na chegada à universidade; Chrystian, Eric, Matheus e Sergio por dividirem momentos e experiências durante o período de “casinha”; ao grupo da “Carona fixa” (Ana, Milena, Rafaela, Suzane, Thálita e Thayse) que me incentivaram, apoiaram, torceram pelo meu sucesso e vibram com minhas conquistas.

Ao Laboratório de Refrigeração Veicular (ReVe) e seus membros. Em especial o professor Diogo Lôndero da Silva, por me dar a oportunidade de fazer parte dessa equipe, por sempre estar disposto a compartilhar conhecimento em qualquer momento. Também agradeço o meu colega de pesquisa e amigo Mateus, por inúmeras horas no laboratório discutindo problemas e achando soluções, pela parceria e pelo companheirismo de poder contar a qualquer momento.

Agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina - FAPESC, pelo apoio financeiro para aquisição dos equipamentos necessários para construção do aparato experimental.

Agradecimentos à empresa Karville (Joinville Comércio de Acessórios para Veículos), em especial ao proprietário Sr. Jaime Fraga Freitas e ao técnico Sr. Alberto

Marques Hubener, que auxiliaram no processo de montagem do aparato experimental.

Agradecimentos à professora Aline Durrer Patelli Juliani da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo auxílio no projeto elétrico do aparato experimental.

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.”  
(ALBERT EINSTEIN, 1979).

## RESUMO

A necessidade de redução de consumo de combustíveis fósseis, juntamente com a difusão de novas tecnologias que empregam eletricidade como forma de energia, como carros elétricos, computadores, sistemas de refrigeração industriais, residenciais e automotivos, reflete na busca de sistemas energeticamente mais eficientes. Neste contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um aparato experimental para análise de eficiência energética de um sistema de condicionamento de ar automotivo. Como exemplo da aplicação proposta realizar-se a um estudo de caso envolvendo análise computacional em CAD para a modelagem dos componentes do modelo, juntamente de uma avaliação de diferentes configurações para o modelo proposto, a fim de identificar a configuração final mais eficiente para o projeto, levando em consideração as limitações geométricas dos componentes. A partir da seleção da melhor configuração, iniciar-se-á o processo de fabricação dos suportes e, finalmente, a montagem do aparato experimental. Ao final do trabalho os modelos CAD de todos os componentes foram desenvolvidos e utilizados para a construção da bancada experimental que permite reproduzir o funcionamento de um sistema de condicionamento de ar automotivo em uma bancada experimental.

**Palavras-chave:** CAD. Eficiência Energética. Sistema de Refrigeração.



## **ABSTRACT**

The need to decrease the consumption of fossil fuels, together with the spread of new technologies that use electricity, such as electric cars; computers; industrial, residential and automotive refrigeration systems, is reflected in the research for more energy-efficient systems. The present work proposes the development of an experimental apparatus for energy efficiency analysis of an automotive air conditioning system. As an application example, a case study will be carried out for which computational analysis in CAD will be used to design the model components, along with an analysis of different layouts for the proposed model, in order to identify the most efficient final layout selection, taking into account the geometric limitations of the components. From the layout, the process of manufacturing the supports will start and, finally, the assembly of the experimental apparatus. At the end of the work, the CAD models of all components were developed and used to construction of the experimental bench that allows to reproduce the functioning of an automotive air conditioning system in an experimental bench.

**Keywords:** CAD. Energy Efficiency. Refrigeration System.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo termodinâmico de um sistema de refrigeração .....	19
Figura 2 - Escoamento paralelo e escoamento contracorrente.....	24
Figura 3 - Trocador de calor com escoamento cruzado.....	24
Figura 4 - Válvula de expansão termostática de bulbo externo.....	26
Figura 5 - Válvula de expansão termostática tipo <i>Block</i> .....	27
Figura 6 - Componentes de um Sistema de condicionamento de ar automotivo .....	28
Figura 7 - Estrutura Metálica .....	29
Figura 8 - Compressor do aparato experimental .....	30
Figura 9 - Curvas de eficiências volumétricas (a) e isentrópicas (b) .....	31
Figura 10 - Suporte do compressor.....	32
Figura 11 - W22 IR3 Premium.....	33
Figura 12 - Condensador .....	36
Figura 13 - Hélice do condensador .....	36
Figura 14 - Conjunto sistema evaporador .....	38
Figura 15 - Posição do dispositivo de expansão .....	39
Figura 16 - Conexão do compressor .....	40
Figura 17 - Conexão das mangueiras sem válvulas.....	41
Figura 18 – Conexão entre mangueiras .....	41
Figura 19 - Conexão Condensador .....	42
Figura 20 – Elemento de Admissão de fluido refrigerante no sistema .....	43
Figura 21 - Conexões na Válvula de expansão .....	44
Figura 22 - Fonte 12 v .....	45
Figura 23 - Disjuntores do sistema.....	46
Figura 24 - Fusível do sistema elétrico.....	47
Figura 25 - Inversor de frequência .....	47
Figura 26 - Etapas da modelagem do compressor.....	49
Figura 27 - Elemento de Fixação do suporte do compressor - Configuração 1.....	50
Figura 28 - Elemento de Fixação do suporte do compressor - Configuração 2.....	50
Figura 29 - Elemento de Fixação do suporte do compressor – Configuração 3.....	51
Figura 30 - Modelagem da luva do motor elétrico .....	53
Figura 31 - Suporte do compressor escolhido.....	54

Figura 32 - Gabarito dos cortes.....	55
Figura 33 - Resultado frontal do duto .....	55
Figura 34 - Lateral do Duto.....	56
Figura 35 - Início da montagem.....	57
Figura 36 - Modelagem final do aparato experimental .....	57
Figura 37 – Montagem do conjunto do compressor .....	58
Figura 38 - Montagem da luva do motor elétrico .....	59
Figura 39 - Fixação dos componentes elétricos.....	60
Figura 40 - Fixação do conjunto do evaporador .....	61
Figura 41 - Adaptação da conexão do compressor.....	61
Figura 42 - Resultado da montagem .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação de Preços Oficiais da OPEP (bbl/ U\$\$).....	16
Tabela 2 – Valores utilizados nos cálculos.....	31
Tabela 3 – Desempenho energético do compressor.....	32
Tabela 4 – Chavetas padronizadas.....	34
Tabela 5 – Conexões do Sistema .....	40
Tabela 6 – Dimensões das mangueiras.....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo

VET – Válvula de Expansão Termostática

CAD – Computer Aided Design / Drafting

COP – *Coefficient Of Performance*

MDF – Medium Density Fiberboard

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Q$	Capacidade de refrigeração
$W$	Potência no volume de controle
$\dot{m}_e$	Vazão mássica que entra no volume de controle
$\dot{m}_s$	Vazão mássica que sai no volume de controle
$h_e$	Entalpia na que entra no sistema
$h_s$	Entalpia que deixa o sistema
$e_e$	Energia que entra no sistema
$e_s$	Energia que sai do sistema
$\dot{W}_{fluxo}$	Trabalho de fluxo
$\dot{m}$	Vazão mássica
$h_4$	Entalpia na entrada do evaporador
$h_1$	Entalpia na saída do evaporador
$\eta_v$	Eficiência volumétrica para o compressor
$\eta_s$	Eficiência isentrópica para o compressor
$n$	Número de rotação por minuto
$r_m$	Fração de espaço morto
$V_m$	Volume morto
$V_3$	Volume total do cilindro do compressor
$v_{asp}$	Volume específico do vapor admitido no compressor
$v_{des}$	Volume específico do vapor após a compressão isentrópica
$\rho_{asp}$	Densidade do vapor admitido no compressor
$CC$	Deslocamento volumétrico
$RPM$	Número de rotações por minuto

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1. OBJETIVOS .....	18
1.1.1. <b>Objetivo Geral</b> .....	<b>18</b>
1.1.2. <b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>18</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
2.1. COMPRESSOR .....	20
2.1.1 <b>Desempenho do compressor</b> .....	<b>20</b>
2.1.2 <b>Vazão mássica do compressor</b> .....	<b>22</b>
2.2. CONDENSADOR E EVAPORADOR.....	23
2.3. DISPOSITIVOS DE EXPANSÃO .....	25
<b>3. MÉTODO</b> .....	<b>28</b>
3.1. COMPONENTES DO APARATO EXPERIMENTAL .....	28
3.1.1. <b>Compressor</b> .....	<b>29</b>
3.1.2. <b>Motor elétrico</b> .....	<b>33</b>
3.1.3. <b>Condensador e duto</b> .....	<b>35</b>
3.1.4. <b>Evaporador e Dispositivo de expansão</b> .....	<b>37</b>
3.1.5. <b>Conexões e Mangueiras</b> .....	<b>39</b>
3.1.6. <b>Fluido refrigerante</b> .....	<b>45</b>
3.1.7. <b>Dispositivos elétricos, componentes elétricos e cabos</b> .....	<b>45</b>
3.2. MODELAGEM EM CAD .....	48
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>53</b>
4.1. ACOPLAMENTO DO EIXO DO MOTOR ELÉTRICO.....	53
4.2. SUPORTE DO COMPRESSOR.....	53
4.3. DUTO DO CONDENSADOR.....	55
4.5. RESULTADO DA MONTAGEM EM CAD DOS COMPONENTES.....	56
4.6. RESULTADO DA MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL .....	58
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>65</b>
<b>APÊNDICE A – CÓDIGO DOS CÁLCULOS EM EES</b> .....	<b>67</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A refrigeração foi utilizada muito antes da criação dos refrigeradores mecânicos. Por exemplo, no passado utilizavam-se blocos de gelo natural para armazenar alimentos ou climatizar ambientes, o que permitia a redução da temperatura, assim aumentando a validade do produto. Durante esse período evidenciou-se o uso de alguns sais como o cloreto de sódio e o cloreto de cálcio, os quais permitiam uma maior redução da temperatura (DIVYA; KIRUBAKARAN, 2020).

Segundo Ronzoni (2020), as principais tentativas de desenvolvimento de um sistema de produção de frio artificialmente são atribuídas ao professor Willan Cullen, da Universidade de Edimburgo. Cullen no ano de 1755 conseguiu produzir gelo, realizando vácuo em um recipiente utilizando um líquido volátil. Porém, apenas em 1834, o engenheiro britânico Jacob Perkins, apresentou o sistema de refrigeração contendo os quatro processos básicos de refrigeração, sendo eles: compressão, condensação, expansão e evaporação (RONZONI, 2020).

Em meados de 1900 as indústrias gráficas dos Estados Unidos começaram a adquirir sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor para climatizar as suas instalações. Devido a propriedade higroscópica do papel, o sistema de condicionamento de ar ajudava na redução da temperatura e umidade do ar, consequentemente melhorando a qualidade da impressão devido a melhor adesão da tinta ao papel (MALHEIROS, 2020).

No final de 1939 o sistema de condicionamento de ar chegava aos automóveis e o primeiro modelo contemplado com esse sistema, foi o Packard 180 (One-Eighty). Esse modelo possuía um compressor que ocupava uma parte significativa do espaço interno do automóvel, também contava com um ventilador que não permitia o controle do fluxo de ar. Em épocas de baixa demanda, para desligar o sistema o proprietário teria que retirar a correia do compressor. Devido a essa falta de praticidade e o transtorno que causava este sistema de refrigeração, o modelo não foi bem aceito no mercado automotivo (MALHEIROS, 2020).

O primeiro modelo nacional com sistema de condicionamento de ar foi o Itamaraty, o qual se apresentava com um item opcional no veículo. Entretanto, devido



ao alto custo adicional para obter tal recurso, foram produzidos poucos veículos com ar-condicionado (CARNEIRO, 2020).

O sistema de condicionamento de ar automotivo, por necessitar de energia para seu funcionamento, pode acarretar em um aumento de 10% no consumo de combustível dos veículos (DA SILVA E MELO, 2016; JULIANI ET AL., 2017). Entre os anos de 1970 e 1980, este sistema já tinha adquirido relevância no mercado. No entanto, neste período, o mundo enfrentava uma crise petrolífera, na qual os países árabes membros das organizações dos países exportadores de petróleo (OPEP) aumentaram o preço do barril de petróleo diversas vezes em um curto período de tempo; em um intervalo de três meses, o preço do barril passou por quatro alterações. A Tabela 1 mostra a alta dos preços do valor do barril de petróleo no período de 1973 a 1981.

Tabela 1 – Variação de Preços Oficiais da OPEP (bbl/ U\$\$)

Ano	Preço (bbl)	Reajuste do Preço (bbl)	Variação
1973	2,99	4,12	37,79 %
1973	4,12	11,65	182,77 %
1973	11,65	12,70	9,02 %
1977	12,70	13,30	4,72 %
1978	13,30	13,54	1,80 %
1979	13,54	14,55	7,46 %
1979	14,55	18,00	23,71 %
1980	18,00	30,00	66,66 %
1980	30,00	31,00	6,66 %
1981	31,00	34,00	9,67 %
1973 a 1981	2,99	34,00	1037,12 %

Fonte: Gomes (2013, p. 29).

Como observado na Tabela 1, em menos de dez anos, o barril de petróleo apresentou um aumento acumulado de mais de 1000%. A partir desse ponto, a busca da eficiência energética se tornou cada vez mais desejada, uma vez que, o petróleo se tratando de uma commodity, regula o preço de vários produtos. Sendo assim, houve a necessidade de avançar nas linhas de pesquisas e estudos na área de eficiência energética, o que ocorre até os dias atuais.

Apesar da termodinâmica ter sido difundida há muitos anos, o processo de análise de transferência de calor através de escoamento em evaporadores pode ser considerado um estudo recente. Isso acontece devido às complexidades para soluções das equações governantes. Entre os métodos mais conhecidos para solução de problemas de engenharia, contamos com três principais: analítico, numérico e empírico (ROSA,2015).

O método de solução analítica consiste em resoluções de equações matemáticas, mas exige algumas simplificações para que seja possível a resolução de maneira manual. O método de solução numérica consiste em soluções de equações por métodos numéricos e vem se desenvolvendo cada dia mais, pois à medida que os anos passam a evolução computacional faz com que os cálculos sejam obtidos de maneira mais rápida e eficiente. Por fim, o método empírico consiste em analisar experimentalmente uma série de sistemas e, através de modelos de tendência, desenvolver equações que predizem o comportamento do modelo (ROSA,2015).

O sistema de condicionamento de ar automotivo por compressão mecânica de vapor tem quatro principais componentes, que são fundamentais, sendo eles: evaporador, condensador, compressor e dispositivo de expansão. Além destes, é necessário: um motor elétrico, inversor de potência, ventiladores, computador, suportes do compressor, mangueiras e toda a parte de instrumentação e dispositivos de medições como por exemplo termopares e manômetros.

Devido às dificuldades técnicas associadas à aquisição de dados diretas em um sistema de condicionamento de ar de um veículo, observa-se que os estudos relacionados à avaliação do desempenho energético destes equipamentos são geralmente realizados com o auxílio de bancadas experimentais. Tais aparatos permitem não apenas a aquisição de dados em condições controladas, mas também viabilizam a reprodutibilidade dos resultados e a comparação de diferentes componentes. Adicionalmente, observa-se que bases de dados experimentais são necessárias para a validação de modelos matemáticos capazes de simular o funcionamento de sistemas de refrigeração (DA SILVA E CORDOVA, 2017).

## 1.1. OBJETIVOS

Por tais motivos, para resolver a problemática associada à análise experimental do desempenho energético em sistemas de condicionamento de ar automotivo, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

### 1.1.1. Objetivo Geral

Projetar e construir um aparato experimental para avaliação do desempenho energético de um sistema de condicionamento de ar automotivo.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

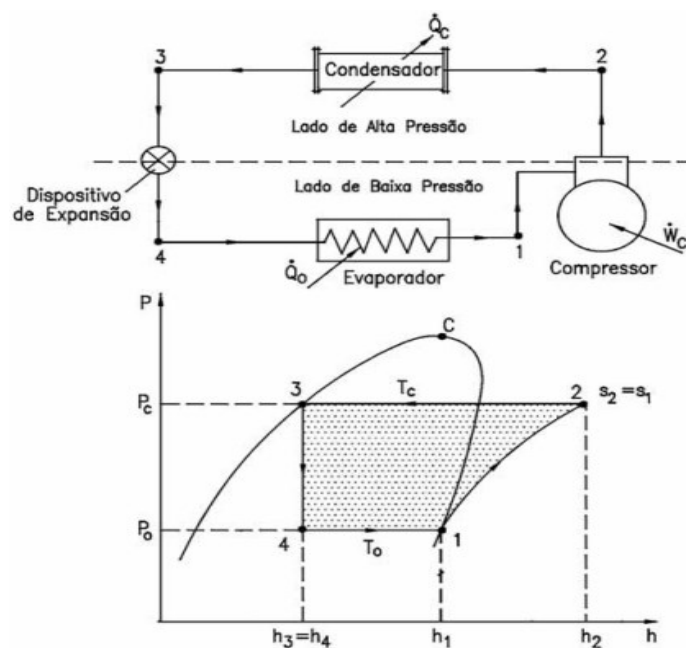
Para alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos propostos são:

- Apresentar a definição dos componentes de um sistema de condicionamento de ar automotivo;
- Modelar os componentes do sistema em CAD;
- Desenvolver possíveis configurações de acordo com as restrições dimensionais dos componentes;
- Construir o aparato experimental;

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A operação de sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor podem ser facilmente descritos por meio de um ciclo termodinâmico. A Figura 1 mostra os componentes e os processos termodinâmicos correspondentes em um diagrama *pressão x entalpia*.

Figura 1 - Ciclo termodinâmico de um sistema de refrigeração



Fonte: Venturini e Pirani (2005, p. 39).

O ciclo de refrigeração inicia no ponto 1, onde o fluido é comprimido por meio dos pistões do compressor até atingir a pressão do ponto 2. Após isso, o fluido escoar por meio de mangueiras até chegar no condensador. Nesse ponto, há troca de calor entre a superfície externa do condensador e o ar que escoar sobre ela e, devido a essa troca de calor, o fluido que antes era vapor super aquecido, passa a condição de líquido saturado (VENTURINI; PIRANI, 2005).

Ao deixar o condensador e passar pelo dispositivo de expansão, ocorre a queda da temperatura do fluido através de um processo isentrópico irreversível. Isso ocorre devido ao atrito gerado entre as paredes do dispositivo de expansão e o fluido refrigerante. Por fim, o fluido escoar através de dutos até o evaporador e, neste ponto, há a troca de calor entre as paredes do evaporador e o ar que escoar sobre a superfície

externa do mesmo. Após a troca térmica, o fluido retorna ao compressor para assim dar início a um novo ciclo (VENTURINI; PIRANI, 2005)

## 2.1. COMPRESSOR

As principais funções de um compressor em um sistema de refrigeração são aumentar a pressão e realizar a movimentação do fluido refrigerante (VENTURINI; PIRANI, 2005). Segundo Stoecker e Jones (1985), os principais tipos de compressores frigoríficos são: alternativo, parafuso, centrífugo e palheta. Além dos quatro mencionados por Stoecker e Jones (1985), Venturini e Pirani (2005) destacam mais um tipo entre os principais, o compressor do tipo Scroll.

Os compressores empregados em sistemas de refrigeração podem ser classificados como máquinas de deslocamento positivo ou máquinas de fluxo, isso se dá devido às características do processo de compressão. Os compressores do tipo alternativo, parafuso, palheta e scroll, são considerados de deslocamento positivo, ou seja, aumentam a pressão do fluido refrigerante a partir da redução da câmara de compressão devido a aplicação de uma força (VENTURINI; PIRANI, 2005).

O compressor do tipo centrífugo é considerado como máquina de fluxo, pois o aumento da pressão ocorre com a conversão da pressão dinâmica em pressão estática (VENTURINI; PIRANI, 2005).

### 2.1.1 Desempenho do compressor

A capacidade de refrigeração de um sistema de refrigeração pode ser calculada aplicando a primeira lei da termodinâmica para um volume de controle que englobe o evaporador do sistema (BORGNAKKE; SONNTAG, 2018).

Aplicando a primeira lei para este volume de controle obtém-se

$$\frac{dE_{V.C}}{dt} = Q - W + \dot{m}_e e_e - \dot{m}_s e_s + \dot{W}_{fluxo} \quad (1)$$

onde, o trabalho de fluxo ( $\dot{W}_{fluxo}$ ) é calculado em função da pressão local, da velocidade local e da área da seção transversal

$$\dot{W}_{fluxo} = FV = \int PVdA = P\dot{V} = Pv\dot{m} \quad (2)$$

substituindo a Equação 1 na Equação 2, obtém-se

$$\frac{dE_{v.c}}{dt} = Q - W + \sum \dot{m}_e(h_e + \frac{1}{2}V_e^2 + gZ_e) - \sum \dot{m}_s(h_s + \frac{1}{2}V_s^2 + gZ_s) \quad (3)$$

Considerando o processo em regime permanente, sem variação de energia cinética e potencial, e sem realização de trabalho, reescreve-se a Equação 3 acima como

$$Q = \dot{m}(h_s - h_e) \quad (4)$$

onde,  $h_s$  = entalpia na saída do evaporador;

$h_e$  = entalpia na entrada do evaporador;

$\dot{m}$  = vazão mássica.

De forma semelhante a potência consumida pelo compressor é calculada por

$$W = \frac{\dot{m}(h_2 - h_1)}{\eta_s(n)} \quad (5)$$

onde,  $\dot{m}$  = Vazão mássica do compressor;

$h_1$  = Entalpia na sucção do compressor;

$h_2$  = Entalpia na descarga do compressor;

$h_4$  = Entalpia na entrada do evaporador;

$\eta_s$  = Eficiência isentrópica.

Com base na capacidade de refrigeração na potência consumida, calcula-se o *Coefficient Of Performance* (COP) do compressor por

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (6)$$

onde,  $COP$  = Coeficiente de performance;

- $Q$  = Capacidade de refrigeração do compressor;  
 $W$  = Potência consumida pelo compressor.

### 2.1.2 Vazão mássica do compressor

Segundo Venturini e Pirani (2005) a eficiência volumétrica efetiva pode ser definida pela equação abaixo

$$\eta_{v,ef} = \frac{\text{Vazão que entra no compressor (m}^3/\text{s)}}{\text{Taxa de deslocamento do compressor (m}^3/\text{s)}} \times 100 \quad (7)$$

onde, a taxa de deslocamento do compressor é o volume varrido pelo pistão.

Segundo Stoecker e Jones (1985), a definição fração de volume morto, pode ser obtida pela equação

$$r_m = \left( \frac{V_m}{V_3 - V_m} \right) \times 100 \quad (8)$$

onde,  $r_m$  = Fração de espaço morto;

$V_m$  = Volume morto;

$V_3$  = Volume total do cilindro do compressor.

Ainda segundo Stoecker e Jones (1985) a eficiência volumétrica pode ser escrita em função da fração de volumem morto da seguinte maneira

$$\eta_v = 100 - r_m \left( \frac{v_{asp}}{v_{des}} - 1 \right) \quad (9)$$

onde,  $\eta_v$  = Eficiência volumétrica;

$r_m$  = Fração de espaço morto;

$v_{asp}$  = Volume específico do vapor admitido no compressor;

$v_{des}$  = Volume específico do vapor após a compressão isentrópica.

Por fim Stoecker e Jones (1985) define que a equação da vazão mássica do compressor, é dada pela equação

$$\dot{m} = \dot{V} \times \frac{\eta_v}{100v_{asp}} \quad (10)$$

onde,  $\dot{m}$  = vazão mássica de fluido refrigerante;

$\dot{V}$  = vazão volumétrica do compressor;

$\eta_v$  = Eficiência volumétrica;

$v_{asp}$  = Volume específico do vapor admitido no compressor.

A vazão volumétrica, apresentada na Equação 10, pode ser escrita em função do número de rotações por minutos (rpm), resultando em

$$\dot{m} = CC \times \frac{n}{60} \times \eta_v \times \rho_{asp} \quad (11)$$

onde,  $n$  = Número de rotações por minuto;

$\eta_v$  = Eficiência volumétrica;

$\rho_{asp}$  = Densidade do vapor admitido no compressor;

$CC$  = Deslocamento volumétrico.

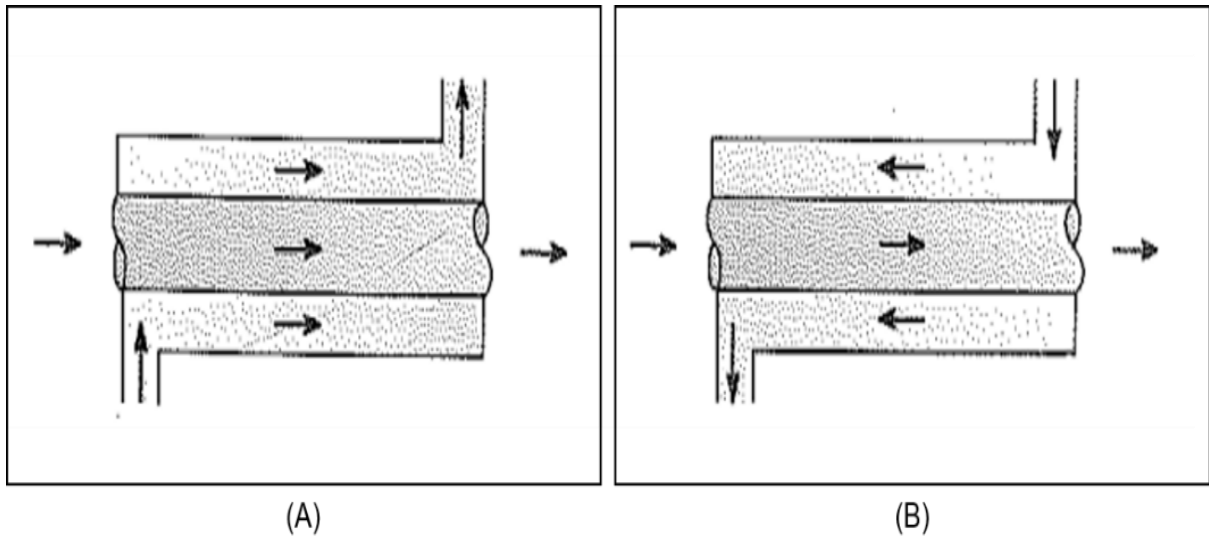
## 2.2. CONDENSADOR E EVAPORADOR

O condensador e o evaporador têm características e comportamentos similares, uma vez que, os dois dispositivos são trocadores de calor (INCROPERA et al., 2008). Segundo Stoecker e Jones (1985), os condensadores e evaporadores mais utilizados são do tipo multitubulares em carcaça e os compactos. Estes trocadores de calor tem um papel fundamental no desempenho do sistema de condicionamento de ar, uma vez que estabelecem as pressões de operação do compressor (DA SILVA ET AL., 2019).

Em geral, os trocadores de calor são classificados em função da configuração do escoamento e da forma de construção. Na configuração paralela, os fluidos frio e quente escoam no mesmo sentido como mostra (INCROPERA et al., 2008) Figura 2 (A), já no escoamento contracorrente os fluidos escoam em sentidos opostos como evidenciado na Figura 2 (B).



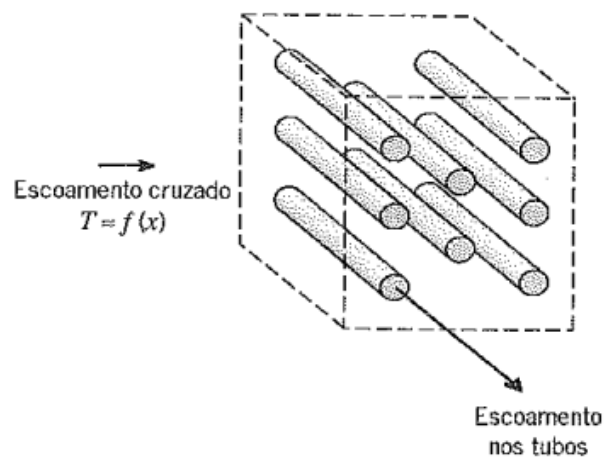
Figura 2 - Escoamento paralelo e escoamento contracorrente.



Fonte: Incropera *et al* (2008, p. 425).

Os trocadores de calor automotivos mais utilizados são do tipo de escoamento cruzado, onde, em geral, utiliza-se o ar como fluido que escoam perpendicularmente aos tubos. Os tubos do trocador de calor podem ter aletas, que auxiliam na troca de calor devido ao aumento da área superficial (INCROPERA *et al.*, 2008). A Figura 3 exemplifica um modelo de trocador de calor com escoamento cruzado.

Figura 3 - Trocador de calor com escoamento cruzado.



Fonte: Incropera *et al* (2008, p. 425).

Em geral, o ar é forçado a atravessar o condensador e evaporador com auxílio de ventiladores e, neste caso, a troca de calor entre a corrente de ar e a superfície do trocador de calor acontece por convecção forçada (INCROPERA et al., 2008).

### 2.3. DISPOSITIVOS DE EXPANSÃO

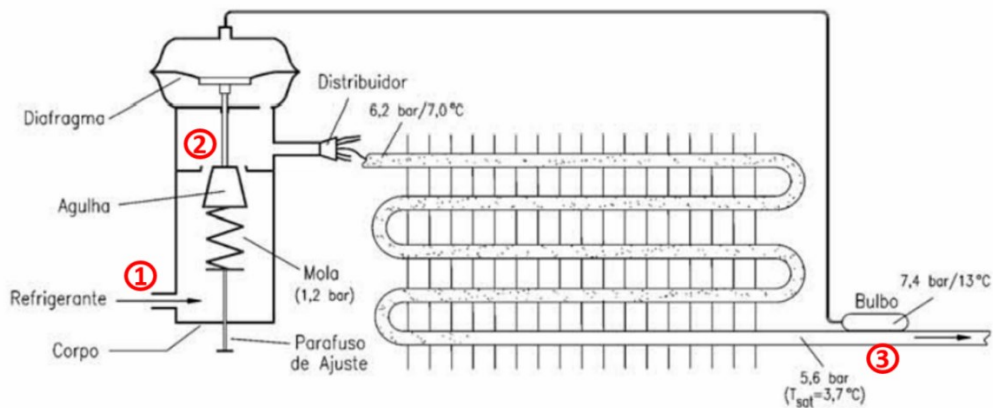
Os dispositivos de expansão têm por objetivo reduzir a pressão entre o condensador e o evaporador e, ainda, devem regular a vazão do fluxo de fluido refrigerante no sistema. Segundo Stoecker e Jones (1985), os quatro principais dispositivos são: tubo capilar, válvula de expansão termostática, válvula de bóia e válvula de expansão de pressão constante.

Os tubos capilares também são conhecidos como tubo de expansão ou ainda tubos de orifícios e apresentam diâmetro entre 0.5 mm a 2 mm. À medida que o fluido refrigerante escoar pelo tubo capilar, ocorre uma perda de carga devido à ação da força de atrito nas paredes do tubo, resultando na evaporação de parte do fluido refrigerante e ocasionando a queda da temperatura. Esse tipo de dispositivo ainda é utilizado em veículos, mas está mais presente na refrigeração doméstica, uma vez que os tubos de orifício são dimensionados e, por isso, não são capazes de se ajustar a grandes variações de carga térmica (STOECKER; JONES, 1985).

Outro dispositivo utilizado na expansão de fluido refrigerante é a válvula de expansão termostática (VET). Esse dispositivo é o mais utilizado nos sistemas de refrigeração devido à alta eficiência e a sua adaptação às diversas condições de operação. As válvulas de expansão termostáticas regulam a vazão de fluido refrigerante que entra no evaporador, baseando-se no superaquecimento do vapor que deixa o evaporador (VENTURINI; PIRANI, 2005).

Existem dois tipos de válvula de expansão termostática: a do tipo bulbo externo e a do tipo *Block*, também é conhecida como válvula H. A Figura 4 mostra a válvula termostática de bulbo externo, os principais componentes e seu posicionamento no sistema de refrigeração.

Figura 4 - Válvula de expansão termostática de bulbo externo.



Fonte: Venturini e Pirani (2005, p. 130).

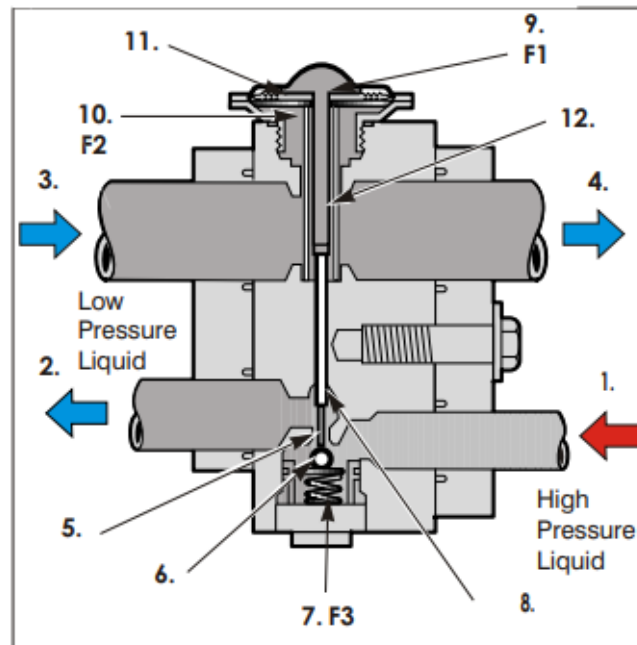
A Figura 4 ilustra os principais componentes da válvula: parafuso de ajuste, mola, agulha, diafragma e bulbo. Devido à força gerada pela mola, a válvula no primeiro momento está fechada, ou seja, a agulha no ponto 2 está em contato com corpo da válvula, impedindo a vazão de fluido refrigerante que entra no ponto 1. A força da mola pode ser regulada pelo parafuso de ajuste, localizado na parte inferior da válvula.

À medida que o ar troca calor no evaporador, ocorre o aumento da temperatura do fluido refrigerante, fazendo com que ocorra o superaquecimento do mesmo. No ponto 3, há a fixação do bulbo da VET com o final do evaporador, nesse ponto há a troca de calor por condução entre o tubo do evaporador e as paredes do bulbo.

Dentro do bulbo há o fluido refrigerante que, como mencionado anteriormente, têm sua temperatura aumentada durante o processo e, conseqüentemente, provoca o aumento da pressão dentro do bulbo. Devido a isso, o diafragma efetua uma força contrária à da mola e, assim que essa força for maior que as forças aplicadas no outro lado da agulha, a válvula é aberta permitindo a passagem de fluido refrigerante no ponto 2. Nesse ponto, ocorre uma brusca queda de pressão e temperatura devido ao fenômeno de estrangulamento (VENTURINI; PIRANI, 2005)

As válvulas de expansão termostática do tipo *Block*, possuem funcionamento similar à válvula de bulbo externo. A Figura 5 mostra uma válvula do tipo *Block*.

Figura 5 - Válvula de expansão termostática tipo *Block*



Fonte: Ariazone (2020, p. 28).

Neste caso, o fluido refrigerante em alta pressão entra pelo ponto 1 demonstrado na Figura 5. No entanto, neste modelo de válvula o estrangulamento acontece devido ao espaço entre as paredes da válvula e uma esfera (6).

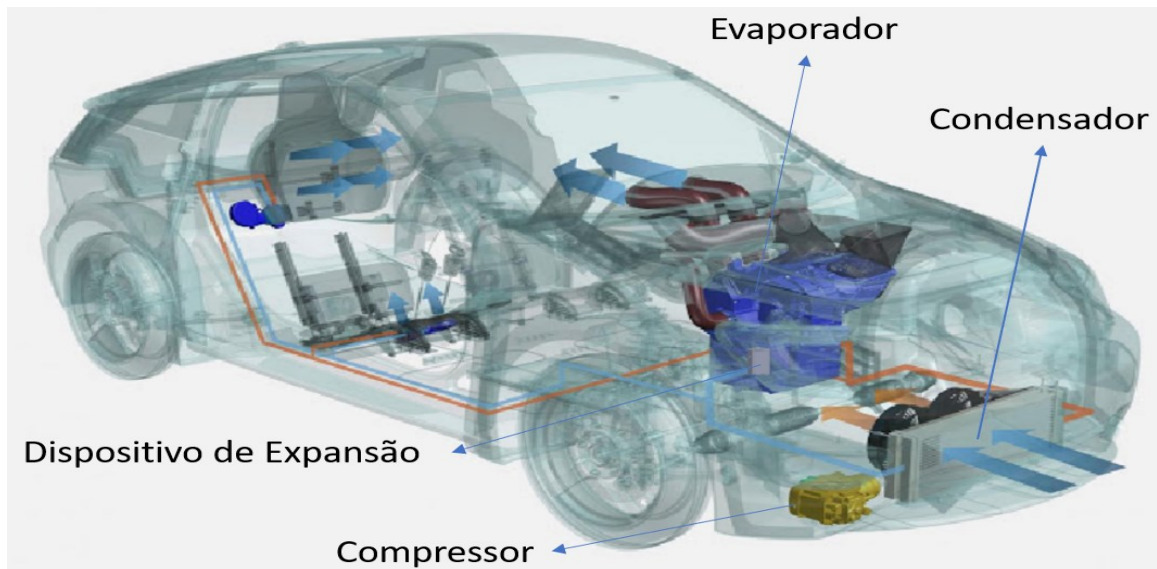
Após o fluido trocar calor no evaporador, ele retorna para a válvula *Block* através da entrada (3). Nesse ponto, o bulbo interno (12), trocará calor com o fluido e, dependendo da temperatura, irá movimentar a haste (8), podendo abrir ou fechar a válvula.

### 3. MÉTODO

Neste capítulo é apresentada e discutida a metodologia utilizada no desenvolvimento proposto.

Como previamente discutido, o sistema de refrigeração automotivo é composto basicamente por quatro principais componentes sendo eles: compressor, condensador, evaporador e dispositivo de expansão. A Figura 6 mostra a localização dos principais componentes do sistema de condicionamento de ar automotivo. Observa-se que o condensador e o compressor estão localizados próximo ao motor na parte frontal do veículo, enquanto o evaporador e o dispositivo de expansão estão localizados dentro da cabine do automóvel, no interior do painel.

Figura 6 - Componentes de um Sistema de condicionamento de ar automotivo

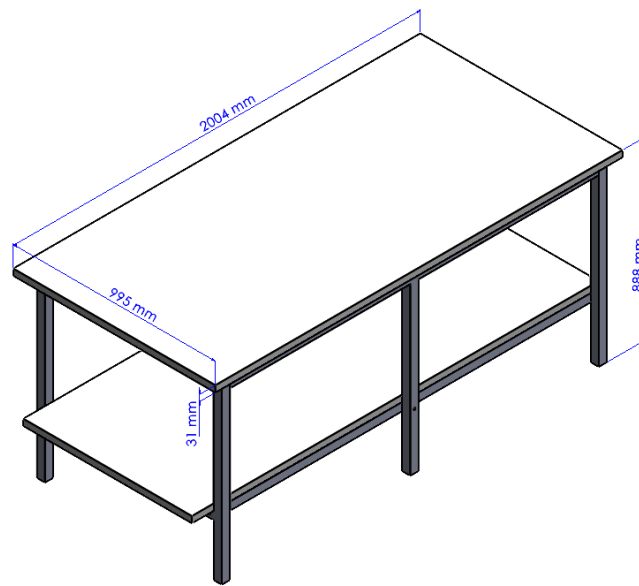


Fonte: Moriar (2017)

#### 3.1. COMPONENTES DO APARATO EXPERIMENTAL

Além de contar com os 4 principais componentes do sistema de refrigeração, o aparato experimental terá que ser adaptado em uma estrutura metálica (evidenciada na Figura 7) e ainda ser equipado com sistemas de medições. A adaptação de componentes faz com que seja necessário utilizar componentes extras.

Figura 7 - Estrutura Metálica



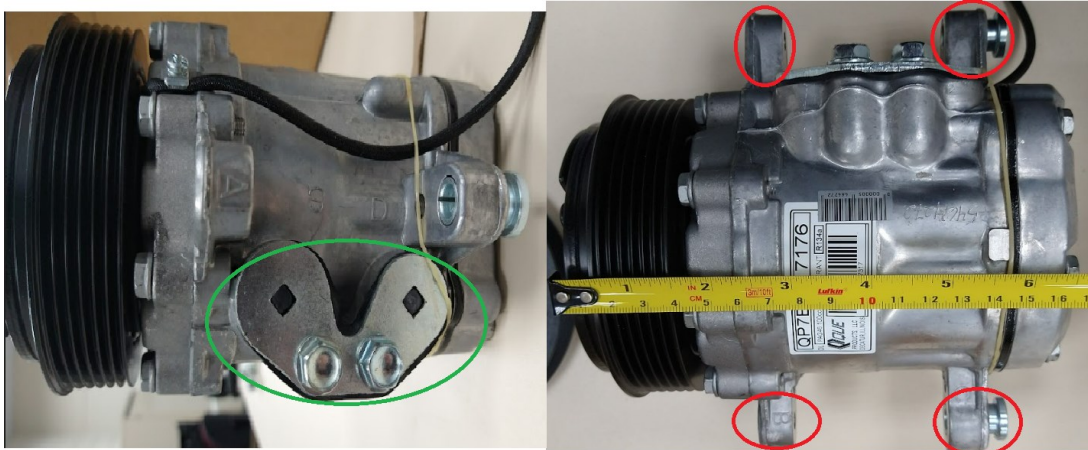
Fonte: Autor (2022)

A Figura 7 mostra as principais dimensões da estrutura metálica, base para o aparato experimental.

### 3.1.1. Compressor

O compressor é um dos principais componentes do sistema de refrigeração, pois ele é responsável por comprimir e movimentar o fluido refrigerante, o mesmo succiona o fluido da zona de baixa pressão e comprime o gás, assim movimentando o fluido através de um ciclo termodinâmico. A Figura 8 mostra o compressor utilizado no aparato experimental, que é do tipo recíproco, da marca QUE, modelo QP7B10V e apresenta um deslocamento volumétrico nominal de  $100 \text{ cm}^3$ . Na região destacada em verde observa-se a tampa das conexões de sucção e descarga que protege o compressor de possíveis contaminações por umidade ou qualquer outra substância indesejada durante o transporte e armazenamento. Essa tampa deve ser retirada somente no momento da conexão das mangueiras do sistema, pois uma vez que o sistema está aberto a umidade pode entrar em contato com o óleo fazendo com que as propriedades do óleo se alterem, e com isso podendo causar danos ao compressor.

Figura 8 - Compressor do aparato experimental



Fonte: Autor (2021)

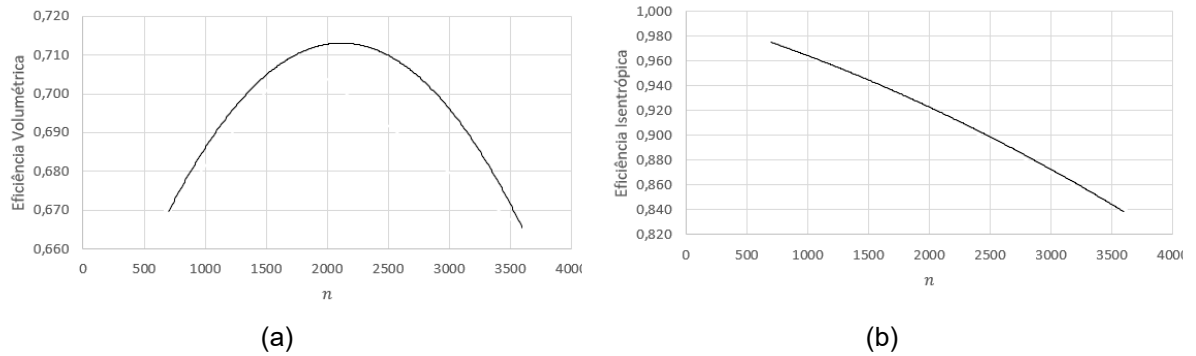
Para estimar as eficiências volumétrica e isentrópica do compressor utilizado no aparato experimental regrediu-se equações destas variáveis empregando-se a ferramenta de simulação de desempenho de compressores do fabricante Valeo (Valeo, 2020). As condições de operação adotadas para realizar as estimativas foram as seguintes: temperatura de evaporação 4°C, temperatura de condensação 55°C, superaquecimento de 10° e subresfriamento de 5°C. Como base nesses dados e no descolamento volumétrico de 100 cm<sup>3</sup> do compressor obtiveram-se, respectivamente, as eficiências volumétricas ( $\eta_v$ ) e isentrópicas ( $\eta_s$ ) em função da rotação ( $n$ ) do compressor como

$$\eta_v(n) = -2,170 \times 10^{-8}n^2 + 9,188 \times 10^{-5}n + 6,159 \times 10^{-1} \quad (12)$$

$$\eta_s(n) = -4,310 \times 10^{-9}n^2 - 2,863 \times 10^{-5}n + 9,975 \times 10^{-1} \quad (13)$$

Destaca-se que essas equações são válidas apenas para as condições de operações descritas anteriormente e para a faixa de rotações entre 700 e 3600 rpm. Utilizando as equações 12 e 13, variando a rotação do compressor obteve-se a Figura 9, que ilustra as curvas de eficiência volumétrica (a) e eficiência isentrópica (b) em função da rotação do compressor.

Figura 9 - Curvas de eficiências volumétricas (a) e isentrópicas (b)



Fonte: Autor (2022).

A Figura 9a mostra que a eficiência volumétrica apresenta um valor máximo por volta de 2200 rotações por minuto, enquanto que a Figura 9b mostra que a eficiência isentrópica decai à medida que aumenta-se a rotação. Um possível motivo para a existência deste ponto de máximo na curva de eficiência volumétrica, se deve ao projeto das válvulas e do cabeçote do compressor, por outro lado a queda observada na curva de eficiência isentrópica possivelmente é explicada pelas perdas mecânicas devido ao atrito presente nos mancais e elementos do compressor, que aumentam com a rotação do compressor.

Os valores de densidade e entalpia do R-134a e deslocamento utilizados para o cálculo de capacidade de refrigeração, potência consumida e COP, estão presentes na tabela

Tabela 2 – Valores utilizados nos cálculos

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Entalpia na sucção	$h_1$	261,848	kJ/kg
Entalpia na descarga	$h_2$	294,465	kJ/kg
Entalpia após o processo de expansão	$h_4$	123,405	kJ/kg
Densidade na sucção	$\rho_{suc}$	15,76	Kg/m <sup>3</sup>
Deslocamento Volumétrico	CC	100	cm <sup>3</sup>

Fonte: Autor (2022).

Utilizando os dados da Tabela 2 com as equações 4, 5, 6, 11, 12, e 13 para as rotações de 700, 1745 e 3600 RPM, obteve-se os dados apresentados na Tabela 3.



Observa-se que dentro da faixa analisada o aumento da rotação do compressor, provoca elevação da capacidade de refrigeração e da potência consumida, entretanto há uma redução no COP à medida que aumenta a rotação do compressor. Estes resultados mostram que dentro da faixa analisada, o aumento na potência consumida não é compensado pelo aumento da capacidade de refrigeração, uma vez que o COP diminui com o aumento da rotação. O código dos cálculos está disponível no APÊNDICE A – CÓDIGO DOS CÁLCULOS EM EES.

Tabela 3 – Desempenho energético do compressor

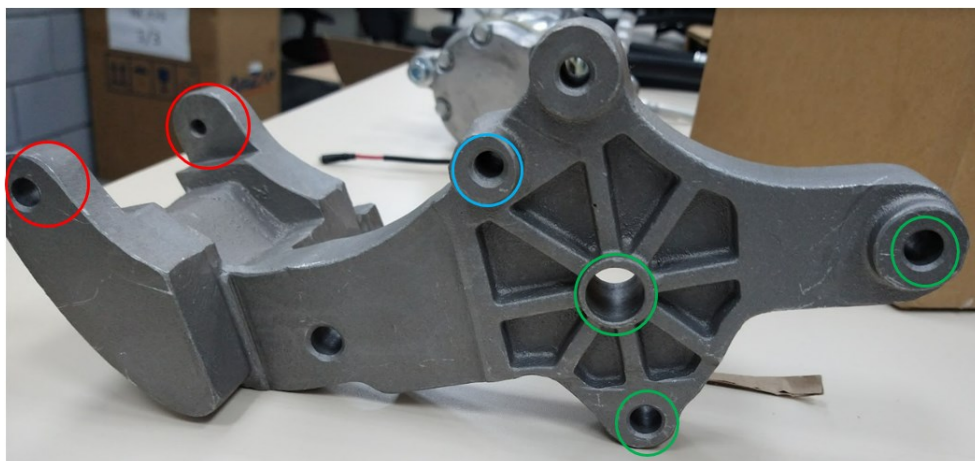
RMP	Capacidade de refrigeração [kW]	Potência [kW]	COP
700	1,704	0,412	4,14
1745	4,505	1,136	3,97
3600	8709	2,447	3,56

Fonte: Autor (2022).

Segundo Prabakaran, Lal e Devotta (2020) a norma SAE J2765, pode ser utilizada para procedimentos de medições de coeficiente de desempenho (COP) de um sistema de ar condicionado móvel em bancadas de ensaios, ou seja, utiliza-se esta norma para calcular o COP do aparato experimental.

Em um sistema de condicionamento de ar automotivo o compressor é fixado no bloco do motor do veículo com auxílio de em um suporte. As áreas destacadas em vermelho na Figura 8, representam os pontos de fixação do suporte do compressor. Abaixo segue a Figura 10 que mostra o suporte do compressor.

Figura 10 - Suporte do compressor



Fonte: Autor (2021)

A Figura 10, mostra o suporte do compressor e as áreas destacadas em vermelho representam o local onde é acoplado o compressor com parafusos e porcas. A área destacada em azul é o ponto de apoio, onde é conectada uma chapa metálica que é posteriormente conectada ao compressor. Por fim as áreas destacadas em verdes são pontos onde o suporte é conectado ao bloco do motor do automóvel.

### 3.1.2. Motor elétrico

Na maioria das vezes, os compressores automotivos utilizam o trabalho gerado pelos gases proveniente do processo de combustão para rotacionar uma polia do compressor, que é conectada ao motor do veículo por uma correia. Entretanto, o aparato experimental será utilizado em um ambiente fechado. Utilizar um motor a combustão se torna relativamente complexo, levando em consideração a quantidade de gases gerados e o ruído causado por esse tipo de motor. Assim optou-se por utilizar um motor elétrico para gerar o torque e conseqüentemente a compressão do fluido refrigerante.

O motor elétrico W22 IR3 Premium da Weg, foi o selecionado para ser utilizado no aparato. Segue abaixo a Figura 11 que mostra o modelo escolhido.

Figura 11 - W22 IR3 Premium



Fonte: WEG (2022, p. 1)

Esse modelo apresenta potência de 2,2kW (3HP), frequência de operação de 60Hz, tensão de 220/380V, momento de inércia 0.0077 kgm<sup>2</sup>, corrente de partida 61,1/35.3 A, fixação na parte inferior, ambos os sentidos de rotação, nível de ruído 51,0 dB(A), peso de aproximadamente 25.8kg, 35 cm de comprimento e diâmetro do eixo de aproximadamente 24 mm. Segundo o fabricante, a rotação nominal é de 1745 rpm, porém se utilizar um inversor de potência a faixa de operação do motor é de 360 a 3600 rpm, obedecendo a curva de *derating* (redução de carga quando necessário) para cada frequência.

Esse modelo foi selecionado com base na Tabela 3. Observa-se que para a rotação nominal do motor (1745 rpm) a potência do motor elétrico é quase duas vezes maior que a potência necessária no compressor nessa mesma rotação, ou seja, ele entrega uma potência suficiente para o aparato experimental.

A polia a ser acoplada ao eixo tem diâmetro interno de 50mm, ou seja, maior que o diâmetro do eixo do motor. Para isso foi necessário adicionar uma luva para unir a polia no eixo do motor. A luva foi usinada em material metálico, com diâmetro de 60 mm e comprimento de 73 mm.

A luva é presa à polia por meio de parafuso concêntrico ao eixo do motor, enquanto o eixo do motor é fixado por meio de um parafuso na luva, que atua de modo equivalente a uma chaveta. Segundo Norton (2013), as chavetas cônicas podem ser padronizadas com o diâmetro igual à largura das chavetas paralelas, segue a Tabela 4 que mostra a padronização das chavetas.

Tabela 4 – Chavetas padronizadas

Diâmetro do eixo (in)	Largura nominal da chaveta (in)	Diâmetro do parafuso (in)	Diâmetro do eixo (mm)	Largura x altura da chaveta (mm)
$0,312 < d \leq 0,437$	0,093	#10	$8 < d \leq 10$	3 × 3
$0,437 < d \leq 0,562$	0,125	#10	$10 < d \leq 12$	4 × 4
$0,562 < d \leq 0,875$	0,187	0,250	$12 < d \leq 17$	5 × 5
$0,875 < d \leq 1,250$	0,250	0,312	$17 < d \leq 22$	6 × 6
$1,250 < d \leq 1,375$	0,312	0,375	$22 < d \leq 30$	8 × 7
$1,375 < d \leq 1,750$	0,375	0,375	$30 < d \leq 38$	10 × 8
$1,750 < d \leq 2,250$	0,500	0,500	$38 < d \leq 44$	12 × 8
$2,250 < d \leq 2,750$	0,625	0,500	$44 < d \leq 50$	14 × 9
$2,750 < d \leq 3,250$	0,750	0,625	$50 < d \leq 58$	16 × 10
$3,250 < d \leq 3,750$	0,875	0,750	$58 < d \leq 65$	18 × 11
$3,750 < d \leq 4,500$	1,000	0,750	$65 < d \leq 75$	20 × 12
$4,500 < d \leq 5,500$	1,250	0,875	$75 < d \leq 85$	22 × 14
$5,500 < d \leq 6,500$	1,500	1,000	$85 < d \leq 95$	25 × 14

Fonte: Norton (2013, p. 571)

Com o eixo do motor apresenta um diâmetro de 24 mm, a chaveta cônica utilizada deve apresentar um diâmetro de 8mm. Norton (2013) ressalta que as chavetas do tipo cônicas podem criar excentricidade entre o eixo e o cubo, uma vez que, ao apertar essa chaveta a força aplicada e devido a folga radial, faz com que aconteça um deslocamento do centro do eixo.

### **3.1.3. Condensador e duto**

Em um sistema de condicionamento de ar automotivo o condensador tem a função de rejeitar o calor absorvido no ciclo de refrigeração por meio de convecção forçada. O ar com uma temperatura abaixo da temperatura de condensação do fluido refrigerante escoar na região externa do trocador de calor através dos tubos e aletas, assim trocando calor fazendo com que o fluido refrigerante que escoar dentro do condensador possa rejeitar calor e mudar de fase.

O Condensador está localizado na parte frontal do automóvel (ver Figura 6), pois a vazão mássica de ar proveniente do movimento do veículo nesse ponto é relativamente alta devido às elevadas velocidades que o automóvel pode chegar. Porém em baixas velocidades, o veículo pode não alcançar a vazão mássica desejada para condensar o fluido refrigerante, seria necessário a instalação de uma hélice para aumentar a vazão e conseqüentemente a troca de calor.

No aparato experimental será utilizado o condensador de alumínio de aproximadamente 560 mm de largura, 385 mm de altura e 35 mm de espessura. Contém 37 dutos com micro canais e ainda possui aletas entres os canais para ajudar na troca de calor. A Figura 12 mostra o condensador a ser utilizado na bancada

Figura 12 - Condensador

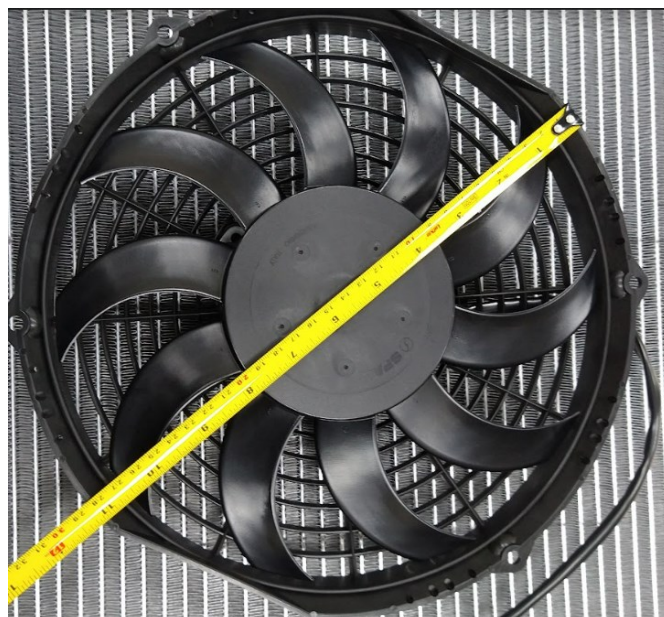


Fonte: Autor (2021)

Ainda na Figura 12 estão destacados os pontos de entrada e saída de fluido refrigerante do condensador.

Diferentemente dos veículos, o aparato experimental ficará estático, ou seja, se faz necessário adicionar uma hélice e criar um duto para posicionar o condensador dentro. Isso é necessário para que se possa simular o fluxo de ar passando por dentro deste duto, assim podendo fazer a análises do condensador de forma mais assertiva. A Hélice é instalada juntamente ao condensador e pode ser observado na Figura 13 .

Figura 13 - Hélice do condensador



Fonte: Autor (2021)

Na Figura 13 observa-se a hélice a ser utilizado no condensador, essa hélice apresenta um diâmetro aproximadamente de 28,5 cm e 10 pás para movimentação do fluido.

O material escolhido para confecção do duto será uma chapa de MDF (*Medium Density Fiberboard*), esse material foi escolhido pois é fácil de trabalhar e tem baixo custo. A chapa de MDF possui 220 cm de largura, 160 cm de altura e 25 mm de espessura. Essas dimensões foram escolhidas pois essa chapa deveria comportar as seguintes partes do aparato: base do duto do condensador, topo do duto do condensador, laterais do duto do condensador e uma base para o evaporador.

Dado que o condensador tem uma altura de 38,5 cm, as laterais do duto do condensador deverão ser maiores ou iguais a este valor, para que o mesmo se encaixe dentro do duto. A altura das laterais escolhida foi de 39,0 cm, optando por uma margem de segurança de 0,5 cm, essa margem é necessária no projeto, pois leva em consideração possíveis desvios proveniente do processo de corte das chapas.

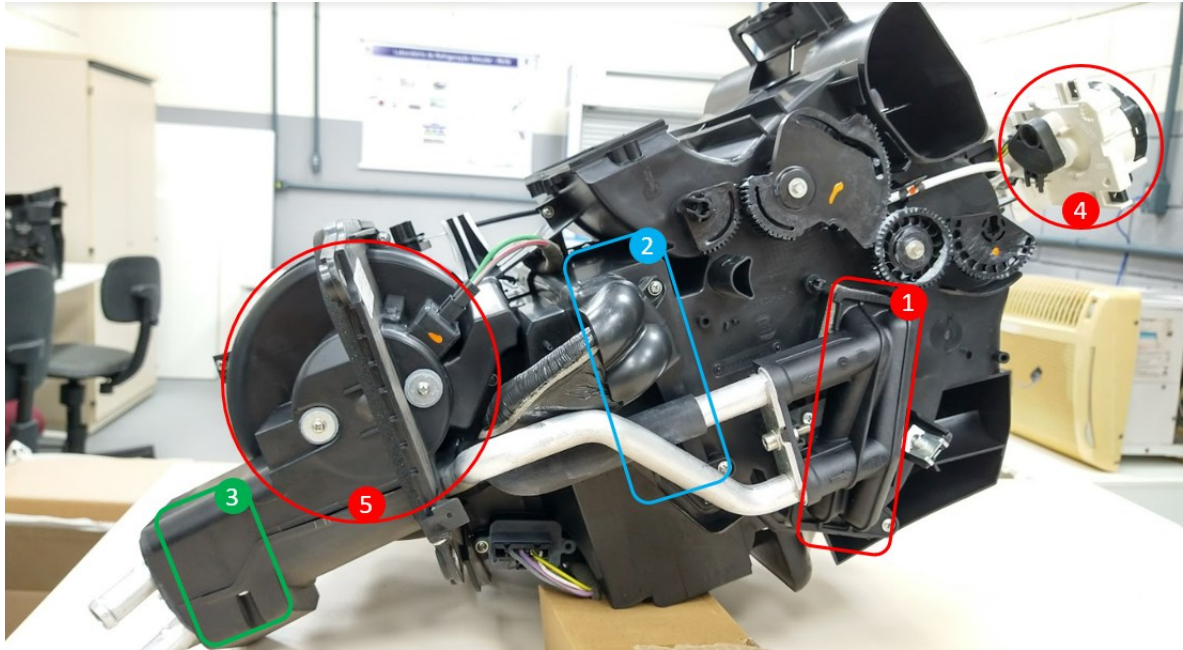
A parte do topo do duto deve ser maior que a largura do condensador, ou seja, maior que 56 cm. Na Figura 12 podemos evidenciar que a saída do condensador é pela parte lateral inferior do mesmo, isso faz com que exista a necessidade de um maior espaço para facilitar a conexão das mangueiras. Com base neste argumento o topo do duto a ser utilizado é de aproximadamente 65 cm de largura, tirando 25 mm em cada lado que serviram de apoio para o topo do duto assim ficando com 4 cm de tolerância para facilitar a conexão das mangueiras. Por fim a base do duto do condensador tem aproximadamente 85 mm.

#### **3.1.4. Evaporador e Dispositivo de expansão**

Em sistemas de condicionamento de ar automotivo, geralmente o evaporador está localizado dentro da cabine do veículo, logo atrás do painel. No intuito de facilitar a montagem e agilizar o processo, o evaporador, dispositivo de expansão e controles do sistema de refrigeração são montados juntos, para depois serem acoplados ao painel do veículo. A Figura 14 mostra o conjunto que é acoplado ao painel do veículo.



Figura 14 - Conjunto sistema evaporador



Fonte: Autor (2021)

Na Figura 14 alguns elementos foram destacados do conjunto. O primeiro elemento destacado ①, mostra a localização do sistema de ar quente do veículo, porém como o intuito do aparato experimental não é avaliar esse tipo de sistema, optou-se por deixar o sistema desligado. A área ② indica a localização do evaporador no conjunto, a área ③ indica o local do dispositivo de expansão do sistema de refrigeração. O controle do sistema de refrigeração está destacado na área ④. Por fim a área ⑤ mostra onde está localizado o ventilador responsável por prover o fluxo de ar dentro da cabine.

Como observado na Figura 14 o conjunto do evaporador apresenta uma geometria relativamente complexa, isso faz com que seja um elemento do sistema difícil de ser modelado.

O dispositivo de expansão do sistema em questão, se trata de uma válvula de expansão termostática do tipo *Block* e é acoplada no lado oposto aos controles do sistema. As conexões entre o evaporador e a válvula estão internamente no conjunto do evaporador, assim sendo necessário somente conectar a saída do condensador com a entrada da válvula e a saída da válvula com o retorno ao compressor, essas conexões são realizadas por meio de mangueiras. Destacado em vermelho na Figura 15 mostra como é posicionada a válvula de expansão termostática.

Figura 15 - Posição do dispositivo de expansão



Fonte: Autor (2021)

A Figura 15 ilustra, em amarelo, um tampão de vedação do conjunto do evaporador, tem extrema importância uma vez que impede que o sistema seja contaminado com umidade ou com alguma outra impureza. Esse elemento será retirado apenas ao realizar as conexões das mangueiras, assim reduzindo o tempo que o sistema estará exposto às condições climáticas do ambiente. A área 1 destacada na Figura 15, mostra o ponto de conexão da mangueira que será conectada ao retorno do compressor, já a área 2 mostra o ponto de conexão da válvula onde será conectado a mangueira do evaporador.

### 3.1.5. Conexões e Mangueiras

A conexão de elementos de um sistema tem extrema importância, pois se não feito de maneira adequada podem gerar vazamentos e perda de fluido refrigerante, o que irá causar uma redução na capacidade de refrigeração do sistema, ou ainda podendo contaminar o sistema com impurezas. O número de elementos de conexões do aparato experimental está descrito e caracterizado na Tabela 5 abaixo.



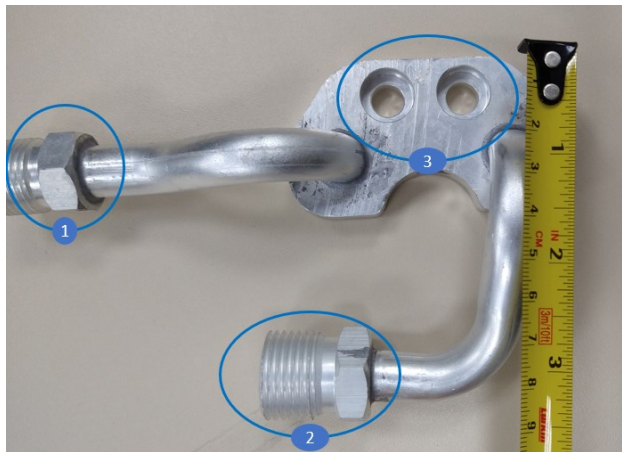
Tabela 5 – Conexões do Sistema

Índice	Quantidades	Descrição
1	1	Conexão do compressor
2	2	Válvula para tomada de pressão
3	2	Conexão entre mangueiras
4	1	Conexão entrada do condensador
5	1	Conexão saída do condensador
6	1	Elemento de admissão do fluido ao sistema
7	1	Conexão na entrada do sistema de evaporação
8	1	Conexão na saída do sistema de evaporação

Fonte: Autor (2022).

Para conectar as mangueiras no compressor é utilizado uma conexão de material metálico. Essa conexão tem a função de facilitar as conexões das mangueiras e permitir uma melhor fixação no compressor. A Figura 16 a seguir, mostra a conexão do compressor.

Figura 16 - Conexão do compressor



Fonte: Autor 2022.

A área 1 destacada na Figura 16, mostra o ponto de conexão da mangueira que liga o compressor com o evaporador, já a área 2 representa o ponto de retorno do fluido ao compressor, ou seja, nesse ponto irá ser conectada a mangueira da saída da válvula de expansão. Os dois furos destacados na área 3, servirão para fixação da conexão com o compressor por meio de parafusos.

No sistema de condicionamento de ar automotivo as mangueiras seriam conectadas diretamente no ponto 1 e 2 da Figura 16, porém como os se trata de um aparato experimental, conhecer os dados de pressão na entrada e saída do compressor tem extrema importância, para isso se faz necessário instalar válvulas que permitam a tomada de pressão nestes pontos. A Figura 17 mostra como são conectadas as mangueiras no veículo.

Figura 17 - Conexão das mangueiras sem válvulas.

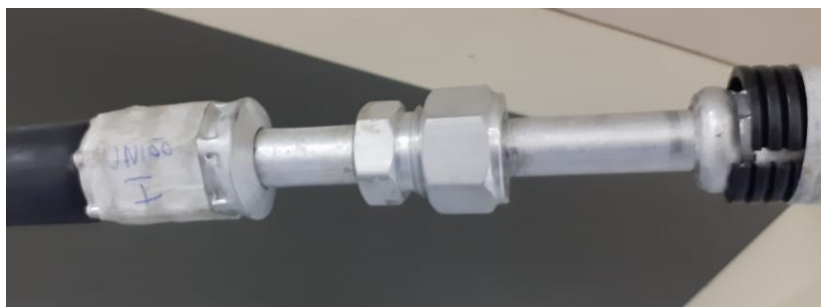


Fonte: Autor 2022.

A área destacada na Figura 17, mostra o local onde serão instaladas as válvulas que permite aferir as pressões do sistema.

O sistema de refrigeração apresentava mangueiras com comprimentos dimensionados para o uso no veículo, como no veículo os componentes estão dispostos mais próximos do que no aparato experimental, o comprimento das mangueiras não seria suficiente para conectar os componentes, isso fez com que fosse necessário a utilização de conexões entre mangueiras.

Figura 18 – Conexão entre mangueiras

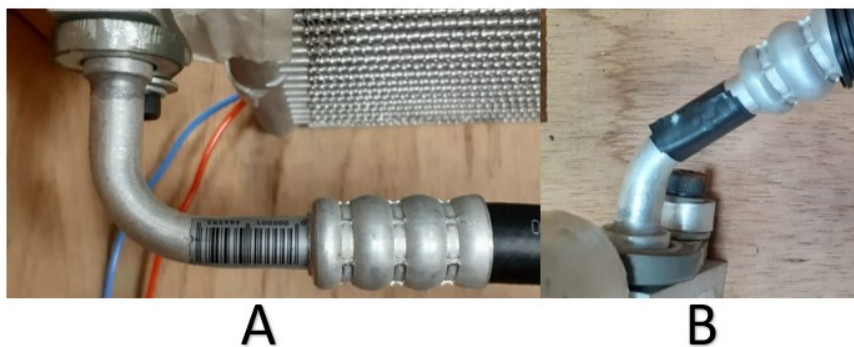


Fonte: Autor 2022.

A Figura 18 mostra o tipo de conexão utilizado, vale ressaltar que ao alterar o comprimento da mangueira isso implica em uma perda de carga devido ao atrito entre o fluido e as paredes da mangueira.

No sistema utilizado, o evaporador possui dois tipos de conexões distintas sendo conexão da entrada do evaporador e a conexão da saída do evaporador. A Figura 19 mostra os dois tipos de conexão utilizados para conectar o condensador.

Figura 19 - Conexão Condensador

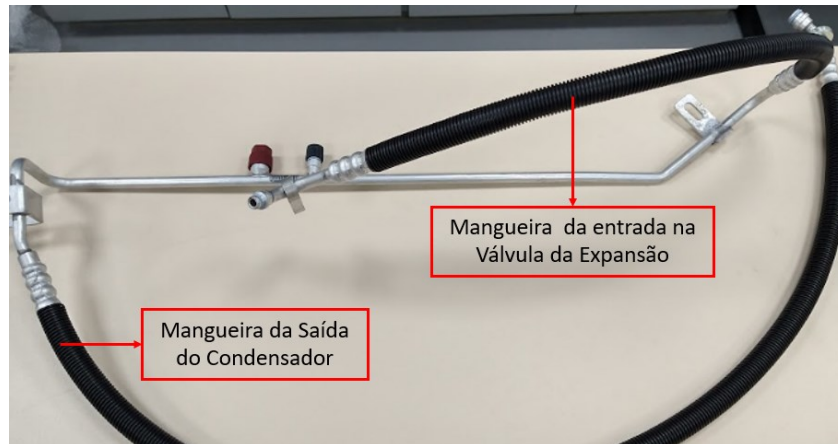


Fonte: Autor 2022.

A imagem (A) da Figura 19, mostra a conexão da entrada do condensador, essa conexão apresenta uma curva de  $90^\circ$  fazendo com que a mangueira fique de modo paralelo ao condensador. A imagem (B) mostra a conexão de saída do condensador, essa conexão apresenta uma curvatura de aproximadamente  $30^\circ$ .

Em um sistema de refrigeração automotivo é necessário um componente na linha de alta pressão para admissão de fluido refrigerante ao sistema, normalmente esse dispositivo encontra-se dentro do capô do veículo em um lugar de fácil acesso, para possíveis manutenções do sistema. A Figura 20 mostra o elemento de admissão de fluido refrigerante.

Figura 20 – Elemento de Admissão de fluido refrigerante no sistema



Fonte: Autor 2022.

A Figura 20 mostra o elemento de admissão do fluido, juntamente com as mangueiras conectadas. A tampa no dispositivo em vermelho mostra onde deve ser conectado ao sistema de aquisição de fluido, vale ressaltar que são necessários dois pontos de conexão, um na linha de baixa pressão que normalmente é localizado após o retorno do evaporador e o outro na linha de alta pressão mostrado na figura acima.

As conexões do conjunto do evaporador acontecem na válvula de expansão, a mangueira que vem do dispositivo de aquisição de fluido, se conecta a entrada da válvula de expansão. As conexões dentro do conjunto do evaporador já estão prontas, então só se torna necessário conectar a saída da válvula de expansão ao retorno do compressor. A Figura 21, mostra como estão dispostas as conexões no dispositivo de expansão.

Figura 21 - Conexões na Válvula de expansão



Fonte: Autor 2022.

A área 1 mostrada na Figura 21 representa o ponto de conexão da mangueira vinda do dispositivo de aquisição de fluido, já a área 2 mostra a conexão da saída do dispositivo de expansão. O ponto 3 destacado na figura acima mostra o ponto de conexão na linha de baixa pressão do sistema, onde deve-se conectar o sistema de aquisição de fluido.

O aparato experimental conta com 6 mangueiras, apresentam comprimentos e diâmetros distintos, essas dimensões estão expressas através da Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Dimensões das mangueiras

n°	Comprimento	Diâmetro externo	Conexão (Entrada / Saída)
1	100 cm	2,50 cm	Compressor / Conexão entre Mangueiras
2	155 cm	1,75 cm	Conexão entre Mangueiras / Entrada Evaporador
3	100 cm	1,75 cm	Saída Evaporador / Elemento de aquisição de fluido
4	46 cm	1,75 cm	Elemento de aquisição de fluido / Entrada dispositivo de expansão
5	40 cm	2,25 cm	Saída dispositivo de expansão/ Conexão entre Mangueiras
6	100 cm	2,50 cm	Conexão entre Mangueiras / Retorno Compressor

Fonte: Autor (2022).

### 3.1.6. Fluido refrigerante

Os fluidos refrigerantes são compostos químicos que através da sua mudança de fase são encarregados de realizar a troca térmica nos sistemas de refrigeração, podendo ser classificados em hidrocarbonetos halogenados, hidrocarbonetos puros, misturas azeotrópicas, misturas não azeotrópicas componentes inorgânicos. O fluido utilizado no sistema em estudo é o R-134a, que se trata de um hidrocarboneto, com a composição  $CF_3CH_2F$  (Tetrafluoretano)(NASCIMENTO,2015). A quantidade recomendada de fluido refrigerante pelo fabricante para este sistema de condicionamento de ar é de 650 gramas.

### 3.1.7. Dispositivos elétricos, componentes elétricos e cabos

Os sistemas de um condicionamento de ar automotivo têm seu funcionamento com uma tensão em torno de 12 Volts. O primeiro componente elétrico utilizado na bancada é uma fonte de 12 Volts, que tem a função de prover energia ao ventilador, aos controles e ao compressor. A Figura 22 abaixo mostra a fonte utilizada no aparato experimental.

Figura 22 - Fonte 12 v



Fonte: Autor (2022).

Destacado na Figura 22, observa-se a etiqueta com as principais características desta fonte, sendo elas: o modelo S-600-12, tensão de entrada 110/220v, tensão de saída 12v. A fonte apresenta comprimento de 22,5 cm, largura de 11,5 cm e espessura de 5 cm.

O aparato experimental ainda contará com dois disjuntores, os disjuntores têm a por objetivo garantir que não haja uma sobrecarga na corrente elétrica no sistema, o uso de dois disjuntores é necessário, pois um será utilizado para a fonte de 12 V e o outro para o inversor de potência. A Figura 23 abaixo mostra os dois disjuntores que serão utilizados no aparato experimental.

Figura 23 - Disjuntores do sistema



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 23 são os dois disjuntores utilizados no sistema, onde o modelo (A) C16 será utilizado na tensão da fonte, enquanto o (B) se C20 será utilizado para no inversor de potência.

O fusível utilizado no sistema será o modelo da WEG com uma corrente nominal de 20 A. Esse fusível é montado em corpo cerâmico, capacidade de interrupção do fusível é de 100 kA em 690Vca, com uma potência dissipada de a 3,2W. A Figura 24 mostra o fusível que será utilizado no sistema.



Figura 24 - Fusível do sistema elétrico.



Fonte: Autor (2022).

O inversor de potência tem a função de controlar a velocidade do motor por indução trifásico, o modelo em questão tem uma tensão nominal de entrada de 200-240 V, corrente nominal de 10 A. A Figura 25 mostra o inversor de frequência a ser utilizado no sistema.

Figura 25 - Inversor de frequência



Fonte: Autor (2022).



Os fios utilizados para fazer a ligação dos componentes com a fonte, apresentam uma seção nominal min de  $1 \times 1,5 \text{ mm}^2$ . A ligação da fonte a rede elétrica acontece por meio de um cabo com seção nominal de  $2 \times 2,5 \text{ mm}^2$ , por fim as ligações até chegar o inversor utilizam um cabo de  $3 \times 4,0 \text{ mm}^2$ .

### 3.2. MODELAGEM EM CAD

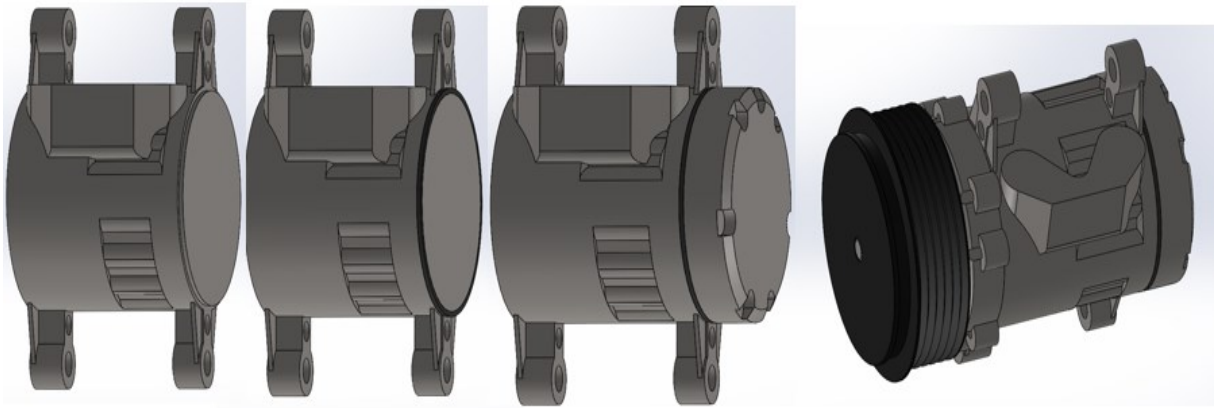
A sigla CAD vem do inglês *Computer Aided Design/Drafting*, basicamente se designa com um *software* CAD, aquele que auxilia no projeto, desenho, modelamento e design de produtos (SOUZA, 2013). Segundo Souza (2013), a integração dos sistemas CAD com os demais sistemas de engenharia, pode gerar uma significativa contribuição na cadeia de produção de um produto, visto que além dos aspectos geométricos do produto, esses *softwares* são capazes de reunir diversas informações como: tolerância, material e suas propriedades, dentre outros.

O Solidworks® é um *software* de modelagem CAD, foi fundado por Jon Hirschtick em 1993, porém chegando ao mercado em 1995. O *Software* tem a capacidade de maximizar a performance, por meio dele é possível estimar custos com matéria prima, analisar interferências durante a montagem, análise de movimento e também é possível fazer cálculos de pesos, densidade e volume, tudo isso de forma intuitiva e relativamente fácil (RAZOR, 2020). Devido a esses fatores foi o *software* escolhido para realizar as modelagens do sistema

A modelagem dos componentes em CAD é de suma importância, pois com a modelagem é relativamente fácil desenvolver diferentes configurações para a bancada. Além disso, a modelagem irá auxiliar no projeto das peças necessárias para o suporte dos componentes dos sistemas.

O compressor foi modelado em cinco partes, a primeira parte modelada foi a parte central do compressor, partindo de um elemento cilíndrico de diâmetro 90 mm, por meio de extrusão, corte e diversas funcionalidades do *software* CAD. A segunda e a terceira peça modeladas foram a tampa do compressor e o anel de vedação, posteriormente foi modelada a tampa frontal juntamente com o eixo do compressor, e por último foi modelada a polia do compressor. A Figura 26 abaixo mostra as etapas que foram necessárias para modelagem do compressor.

Figura 26 - Etapas da modelagem do compressor



Fonte: Autor (2022).

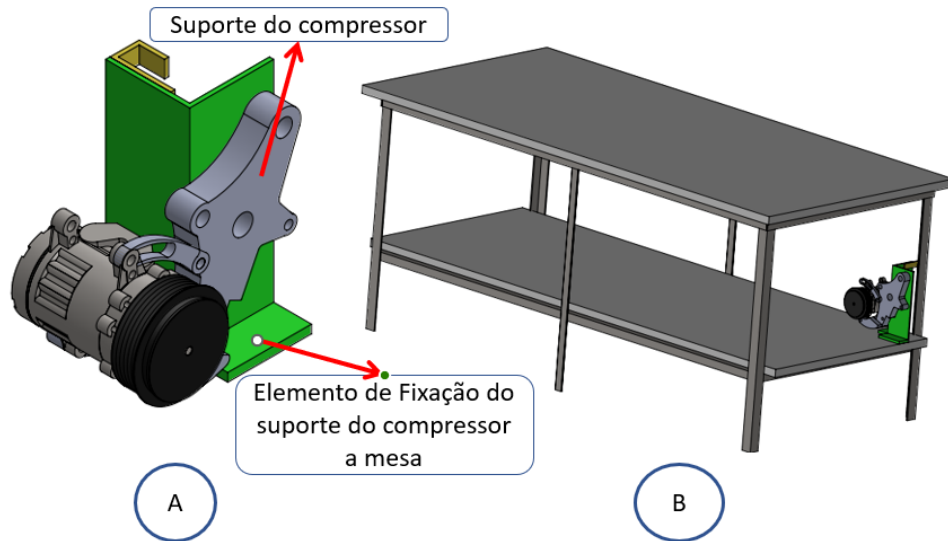
A Figura 26 mostra o quão complexa pode ser a modelagem de um elemento, devido ao grande número de detalhes que o elemento possui, no entanto buscou-se modelar o mais fidedigno o compressor, respeitando principalmente as dimensões e geometria do elemento.

O suporte do compressor apresenta uma geometria relativamente menos complexa se comparado com o compressor, alguns pontos devem apresentar as mesmas medidas para que na montagem não exista nenhum tipo de interferência entre objetos.

Anteriormente mencionado, o suporte do compressor de um sistema de refrigeração automotivo é fixado ao bloco do motor, porém como o aparato experimental não terá esse ponto de apoio, se faz por necessidade o modelamento de um elemento para fixação do suporte do compressor a estrutura. Para esse estudo foi proposto três configurações para elemento de fixação do suporte do compressor a estrutura.

A primeira configuração de elemento de fixação proposto, consiste em uma chapa de aço de 200 mm de largura (dobrado ao meio), altura de 260 mm, espessura de aproximadamente 5 mm e uma base de aproximadamente 50 mm. O elemento de fixação ainda apresenta uma chapa metálica conectada a estrutura metálica, essa chapa teria a função de aumentar a rigidez do sistema. A Figura 27 é a primeira configuração para o elemento de fixação do suporte do compressor.

Figura 27 - Elemento de Fixação do suporte do compressor - Configuração 1

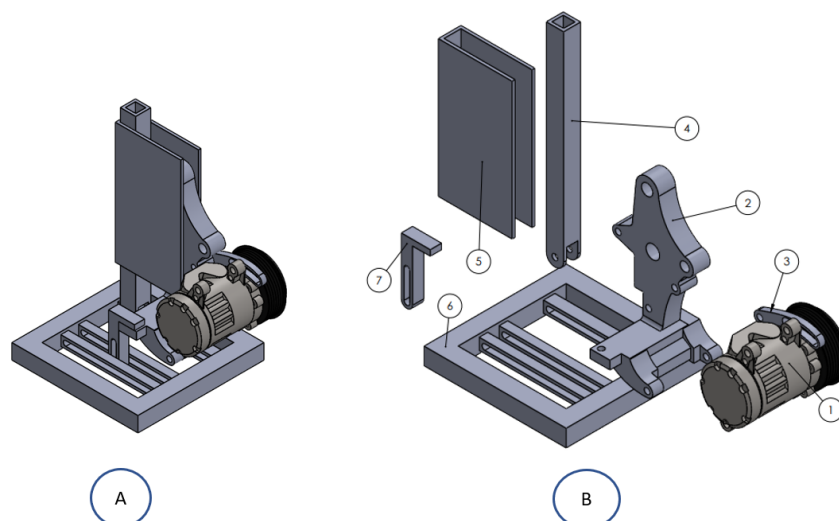


Fonte: Autor (2022).

A imagem (A) da Figura 27, mostra o elemento de fixação do suporte do compressor, enquanto a imagem(B) mostra a posição e a fixação do elemento na estrutura.

Para uma segunda abordagem de elemento fixador do suporte, buscou-se uma configuração que pudesse ser instalado em qualquer posição da estrutura, tanto na parte superior quanto na parte inferior, sendo fixado somente por parafusos na estrutura. Essa segunda configuração ainda possibilita ajuste do compressor em pelo menos dois graus de liberdade. A Figura 28 mostra a segunda configuração.

Figura 28 - Elemento de Fixação do suporte do compressor - Configuração 2

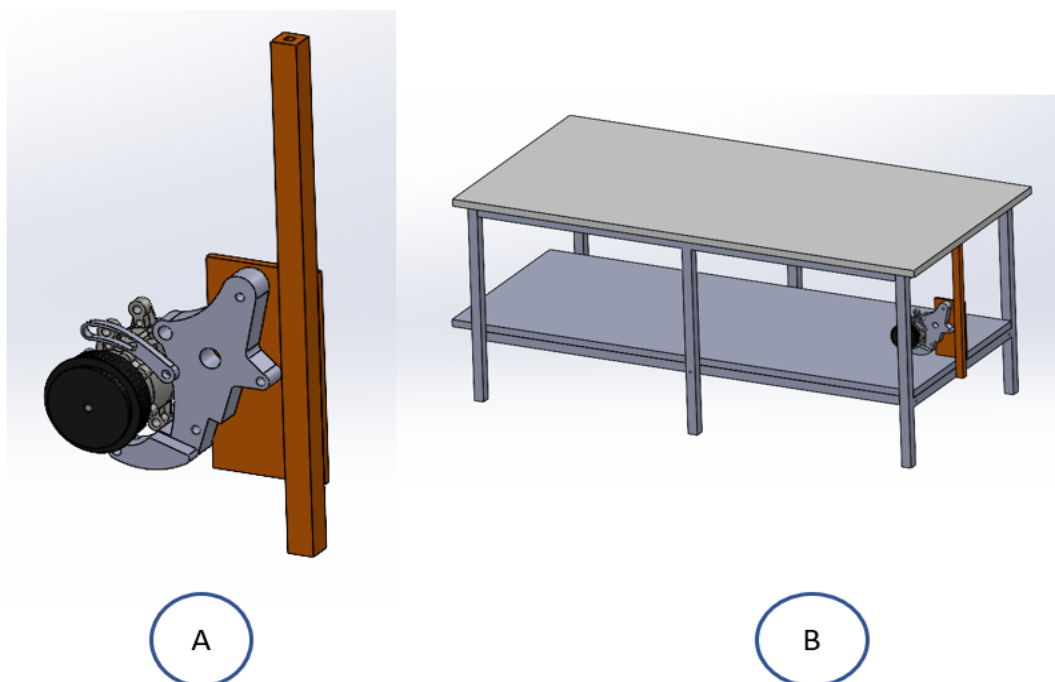


Fonte: Autor (2022).

A Figura 28 (A) mostra a segunda configuração modelada, enquanto a imagem (B) mostra todos os elementos necessários para construção do elemento de fixação do suporte do compressor. Os elementos identificados de 1 a 3 são aos elementos já encontrados em um veículo, ou seja, a partir destes elementos desenhou-se o elemento de fixação. O item 4 é uma barra de conexão com a base (6), o elemento 5 é uma chapa de aço que tem a função de unir o suporte do compressor (2) e a barra de aço por meio de parafusos e porcas, por fim o item 7 que tem a função de aumentar a rigidez torcional do conjunto.

Na última configuração proposta, buscou-se uma alternativa mais simples e barata no intuito de facilitar a produção, para isso foi utilizado uma chapa de aço de 8 mm de espessura 250 mm de altura e 130 mm de largura. Essa chapa será metálica unida por meio de parafusos, arruelas e porcas a uma haste metálica, que posteriormente será fixada na estrutura metálica. A haste metálica apresenta uma seção quadrada com lado de 30 mm e ainda com um furo no centro, a haste possui uma altura de aproximadamente 595 mm de comprimento. A Figura 29 mostra a configuração 3 de elemento de fixação

Figura 29 - Elemento de Fixação do suporte do compressor – Configuração 3



Fonte: Autor (2022).

A Figura 29 (A) mostra o elemento de fixação, enquanto a imagem (B) da figura em questão mostra a posição em que o elemento deverá ser fixado.

O motor elétrico foi relativamente fácil de ser modelado, utilizando como esboço os desenhos técnicos fornecidos pelos fabricantes. Porém essa modelagem teve extrema importância na confecção da luva de acoplamento do eixo a polia.

O condensador foi modelado de maneira simplificada, pois as inúmeras fileiras de aletas ocasionariam uma grande densidade de informações que não seria relevante a esse processo, visto que o mais importante nesse momento é a disposição espacial do elemento.

O conjunto do evaporador tem a geometria mais complexa a ser modelada se comparada com as demais devido à complexidade da geometria. Como se trata de uma geometria complexa, na modelagem buscou-se respeitar as principais características do sistema como: altura, largura, profundidade, posições dos pontos de fixação e a posição da válvula de expansão.

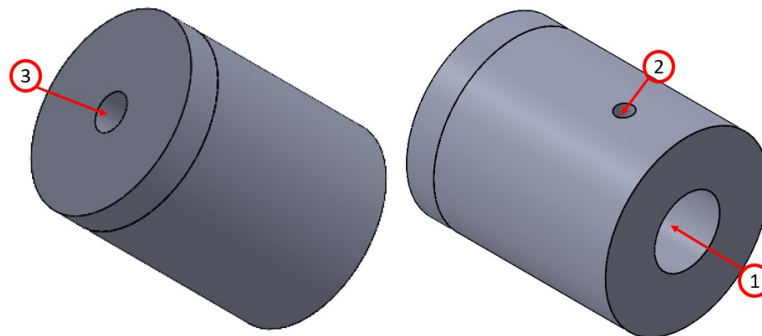
## 4. RESULTADOS

Essa seção compreende os resultados obtidos durante a modelagem dos principais componentes, assim evidenciando a melhor disposição dos componentes. Neste capítulo também será abordado a montagem do aparato experimental.

### 4.1. ACOPLAMENTO DO EIXO DO MOTOR ELÉTRICO

Como mencionado no capítulo anterior o acoplamento do eixo do motor elétrico com a polia, acontecerá por meio de uma luva. A Figura 30 abaixo mostra o elemento que liga a polia com o eixo do motor.

Figura 30 - Modelagem da luva do motor elétrico



Fonte: Autor (2022).

O eixo do motor elétrico será conectado na abertura de número 1 indicada na Figura 30, a chave cônica será inserida no ponto 2, a polia ficará entre os elementos da luva e posteriormente ligada por um parafuso no ponto 3. O eixo do motor possui um diâmetro de aproximadamente 24 mm, utilizando a Tabela 4, temos que o diâmetro da chave cônica utilizada neste projeto deve ser de 8mm.

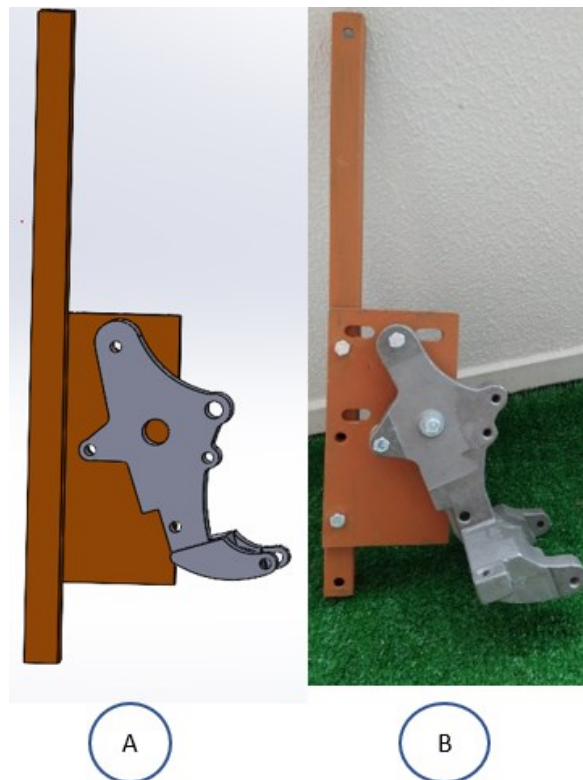
### 4.2. SUPORTE DO COMPRESSOR

No capítulo anterior foi proposto três modelos de suporte para o compressor, a primeira configuração não foi escolhida, pois ao fixar o suporte a estrutura metálica o

compressor ficaria próximo a lateral da estrutura e como o motor elétrico tem um comprimento maior do que o conjunto (compressor mais suporte), ocasionaria de o motor elétrico ficar parcialmente fora da estrutura. Uma possível solução para utilizar esse suporte seria virar o motor e mudar o sentido de rotação.

A segunda configuração proposta, devido ao grande número de elementos e complexidade da manufatura, não foi selecionada essa configuração, pois não foi encontrado nenhum profissional que estava com disponibilidade de tempo para fazer esse modelo. Entende-se que devido à maior complexidade do modelo o custo seria elevado, mesmo com a vantagem de ser possível a fixação em qualquer lugar da bancada o custo tem extrema importância nesse projeto. Assim a terceira configuração foi selecionada para ser utilizado no aparato experimental, na Figura 31 abaixo mostra o modelo de suporte do compressor escolhido.

Figura 31 - Suporte do compressor escolhido



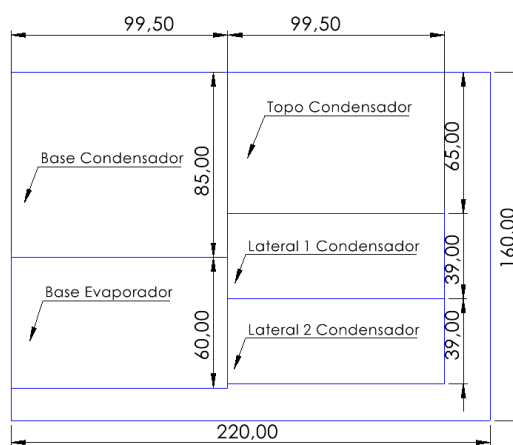
Fonte: Autor (2022).

A Figura 31 mostra os modelos em CAD (A) e após a fabricação (B). A escolha deste suporte foi devido a fácil confecção, não necessitar processos de união por soldagem, maiores variações de posicionamento se comparado com a configuração 1 é a maior simplicidade geométrica se comparado com a configuração 2.

### 4.3. DUTO DO CONDENSADOR

Mencionado nos capítulos anteriores, o material escolhido para confecção do duto do condensador é uma chapa de MDF de 220x160 cm. A disposição dos cortes nessa chapa pode ser observada na Figura 32 abaixo, que mostra o gabarito dos cortes que foram feitos na chapa de MDF.

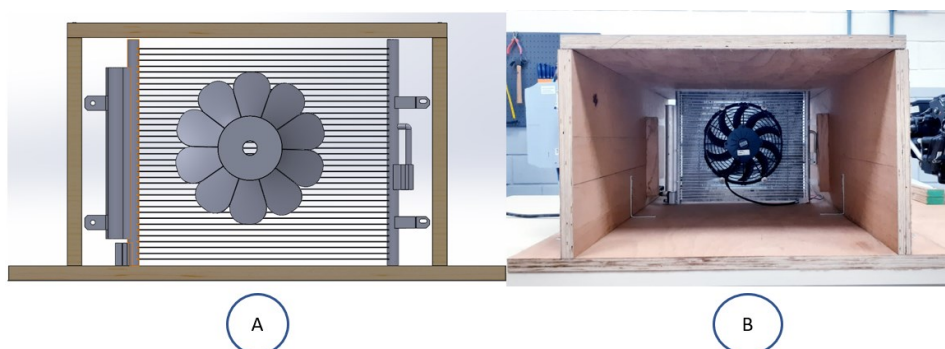
Figura 32 - Gabarito dos cortes



Fonte: Autor (2022).

Evidencia-se que na Figura 32 que há sobra de material, isso é ocasionado pois caso utiliza-se o modelo menor de chapa não seria suficiente para construção da base do evaporador. O material que restou após o corte será utilizado para confecção de suportes, como por exemplo para fixar o condensador nas paredes do duto. Segue abaixo a Figura 33 que mostra a montagem do duto

Figura 33 - Resultado frontal do duto



Fonte: Autor (2022).



A imagem da direita (A) da Figura 33 mostra a modelagem do duto do condensador, enquanto a imagem da esquerda (B) mostra o duto já montado. As laterais do duto foram fixadas à base por meio de cantoneiras em formato de L, tanto do lado de dentro do duto quanto pelo lado de fora. O condensador foi fixado em duas chapas de MDF que sobraram no corte. A lateral do duto pode ser observada na Figura 34 abaixo.

Figura 34 - Lateral do Duto



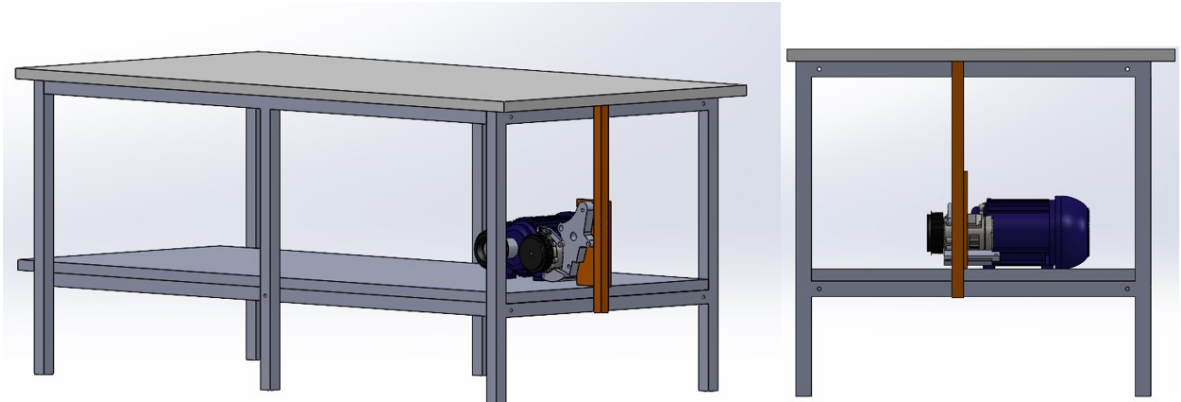
Fonte: Autor (2022).

A Figura 34 mostra a lateral do duto de ventilação do condensador, a imagem da esquerda(A), mostra o modelo em CAD do duto, enquanto o modelo ao lado direito (B) mostra a montagem do duto. Vale destacar que a lateral do duto serve de suporte para alguns componentes elétricos do sistema.

#### 4.5. RESULTADO DA MONTAGEM EM CAD DOS COMPONENTES

Iniciou-se a montagem pela estrutura metálica do aparato experimental, após o posicionamento da mesma, começou a etapa de escolha da melhor posição para colocar o suporte do compressor juntamente com o compressor. Com a posição do suporte definida posicionou-se a polia do motor elétrico de forma a ficar alinhada com a polia do compressor. A Figura 35 mostra o posicionamento do elemento descrito no texto acima.

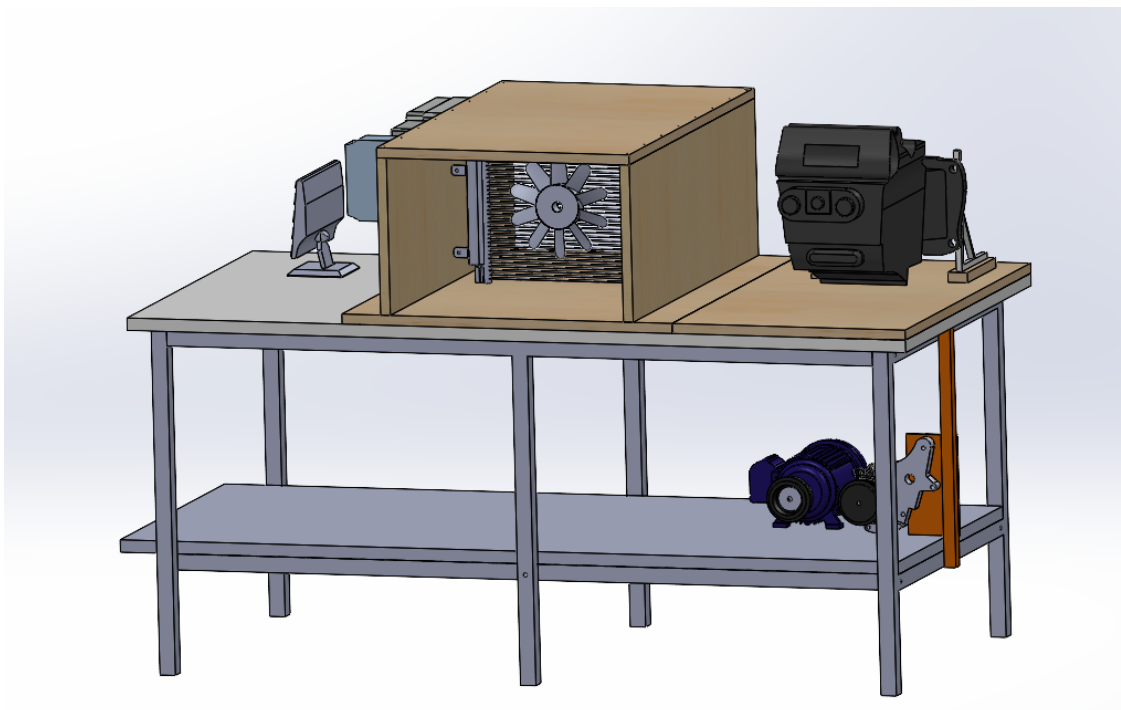
Figura 35 - Início da montagem



Fonte: Autor (2022).

Observa-se que o sistema de motor mais compressor foi posicionado na parte inferior da estrutura metálica, ou seja, isso implica que evaporador deve ser posicionado na parte superior da estrutura a cima do compressor, isso deve ser feito pois assim a válvula de expansão onde fica o retorno do compressor ficará mais próximo ao compressor, assim não sendo necessário um tamanho de mangueira maior. Ao lado do evaporador será instalado o duto do condensador, pelo mesmo motivo. A Figura 36 mostra a modelagem final do aparato experimental.

Figura 36 - Modelagem final do aparato experimental



Fonte: Autor (2022).

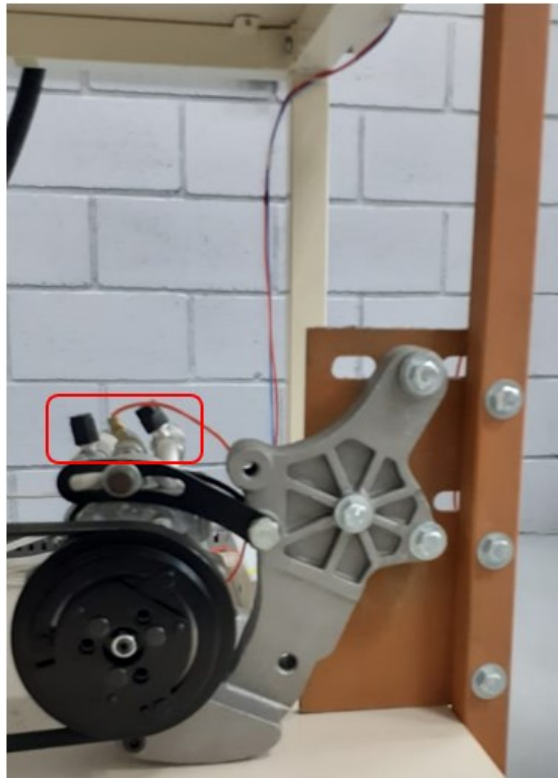
Buscou-se modelar a bancada o mais fidedigno possível, porém devido a complexidade de algumas geometrias não foi possível, entretanto as principais dimensões foram respeitadas

#### 4.6. RESULTADO DA MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL

Vale ressaltar que a montagem só foi possível devido a parceria com o Laboratório de Refrigeração Veicular (ReVe) da Universidade Federal de Santa Catarina, que disponibilizou o material e o suporte necessário para confecção do aparato.

A montagem foi iniciada com a escolha da posição da estrutura metálica no laboratório, a mesma foi posicionada no centro do laboratório, assim sendo relativamente fácil conectar, montar e posteriormente instrumentar a bancada. Posteriormente ao posicionamento da estrutura, fixou-se o suporte do compressor juntamente com compressor a estrutura, por meio de parafusos, arruelas e porcas. A Figura 37 abaixo mostra a montagem do conjunto do compressor.

Figura 37 – Montagem do conjunto do compressor

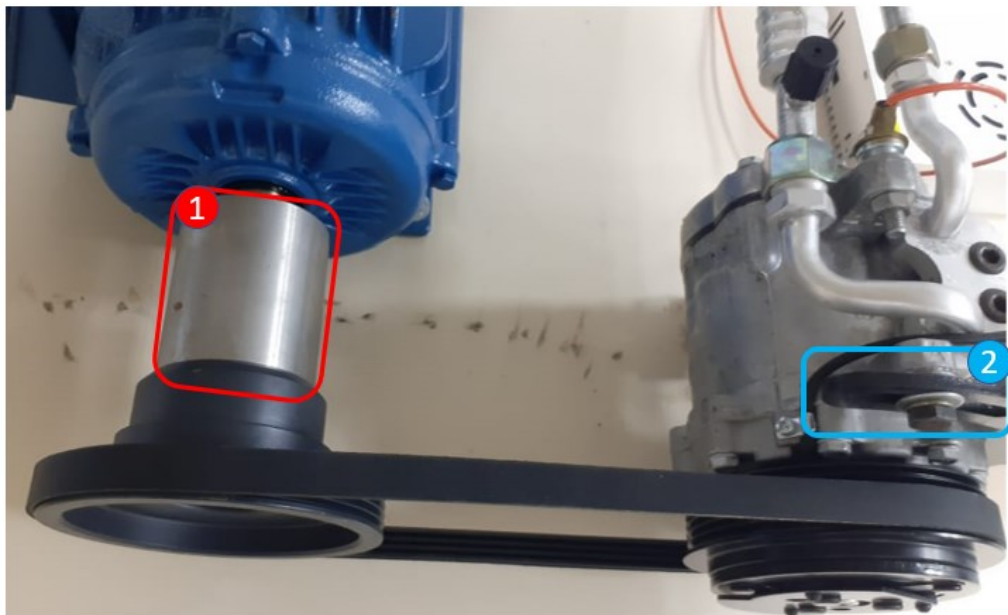


Fonte: Autor (2022).

Esse conjunto pode estar sujeito a vibrações devido ao desbalanceamento causado pela adição da chaveta na luva de acoplamento da polia. Assim, durante a montagem do conjunto do compressor buscou-se garantir o aperto dos parafusos para assegurar uma maior rigidez.

A próxima etapa da montagem foi a fixação do motor elétrico a estrutura, para fixar o compressor foram feitos quatro furos passantes, onde foram adicionados os parafusos para unir o motor elétrico à estrutura. Ainda nessa etapa foram adicionados a luva de conexão da polia ao eixo e a correia que irá transmitir o torque do motor elétrico para o compressor. A Figura 38 abaixo mostra o resultado desta etapa da montagem.

Figura 38 - Montagem da luva do motor elétrico



Fonte: Autor (2022).

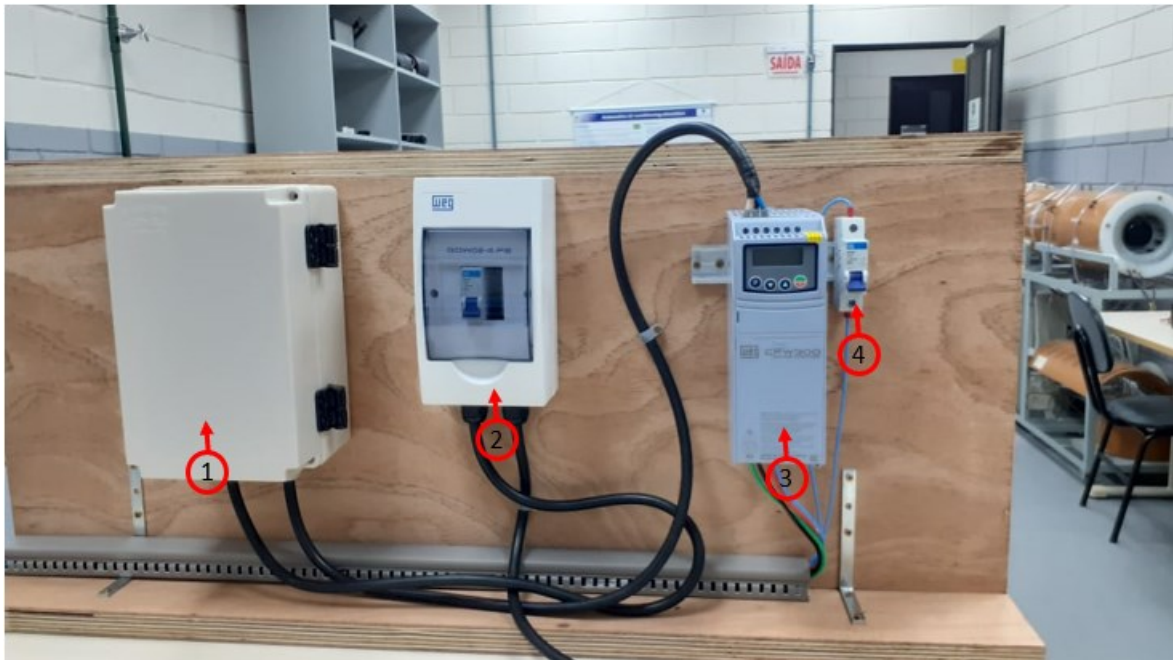
A luva do eixo do motor elétrico está destacada com o número ① na Figura 38, já o elemento ② destacado, tem a função de regular a tensão na correia que liga o compressor com o motor elétrico.

Em seguida, iniciou-se a montagem do duto do evaporador, utilizando as chapas já cortadas com as dimensões descritas anteriormente, posicionou-se a base na parte superior da estrutura, então foi fixado as laterais do duto por meio de cantoneiras em L, sendo uma nas paredes internas e duas nas paredes externas de

cada chapa lateral do duto. A parte superior do duto não foi fixada apenas posicionada para um acesso relativamente fácil dos componentes.

Com a montagem do duto, foi fixado o condensador por meio de parafusos em dois pedaços de MDF fixados no duto, após a fixação do condensador foi parafusado o ventilador no condensador do sistema, essa união foi feita por meio de parafusos passando entre as aletas do condensador. A lateral do duto do evaporador ainda servirá para fixação dos componentes elétricos do aparato experimental, os componentes a serem fixados são: inversor, disjuntores de proteção e do fusível do sistema. A Figura 39 abaixo mostra como estão dispostos os componentes elétricos do sistema.

Figura 39 - Fixação dos componentes elétricos.



Fonte: Autor (2022).

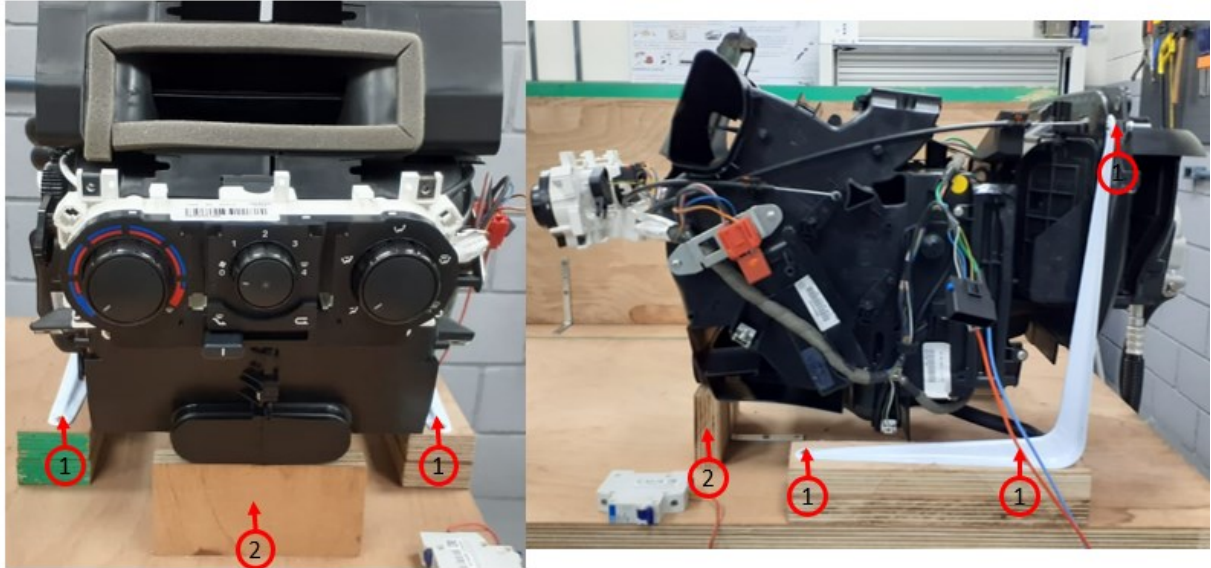
Os componentes 1,2,3 e 4 da Figura 39 são respectivamente o porta fusível, disjuntor de proteção do inversor, inversor de potência e disjuntor de proteção do sistema 12v.

Subsequentemente a montagem dos elétricos, sucedeu a fixação do conjunto do evaporador ao lado do duto do condensador, foi necessário adaptar duas mãos francesas para servir de suporte para o conjunto, como os suportes em L não apresentavam altura suficiente para deixar o conjunto suspenso, adicionou-se duas chapas de MDF no intuito de elevar o sistema de evaporação. Ainda foi adicionado



um terceiro ponto de apoio na parte frontal do sistema para aumentar a estabilidade do conjunto. A Figura 40 mostra como foi fixado o conjunto do evaporador.

Figura 40 - Fixação do conjunto do evaporador

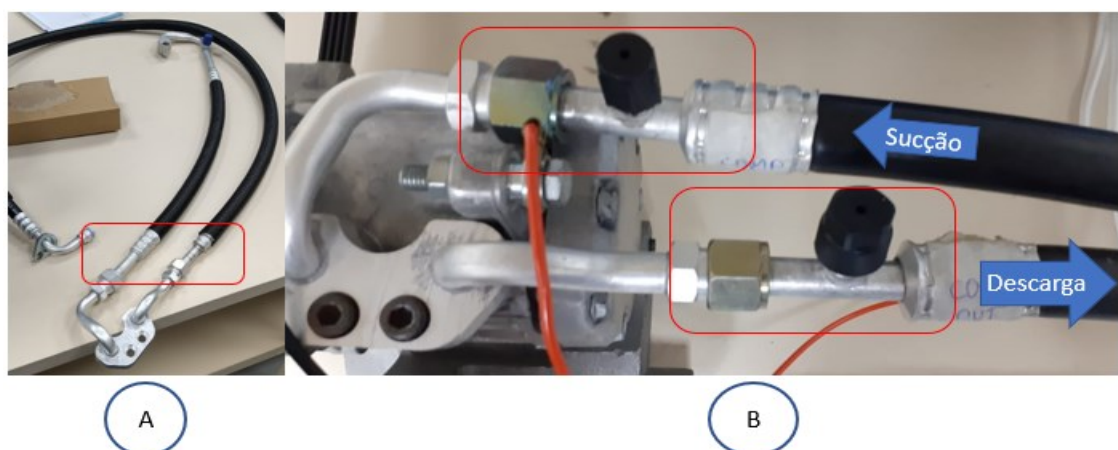


Fonte: Autor (2022).

Destacados com o número 1 na Figura 40, são os pontos de união onde foram adicionados parafusos, enquanto o elemento indicado com o número 2 representa o terceiro ponto de apoio do sistema.

Após o posicionamento e fixação dos principais componentes do sistema, veio a etapa de adaptação das mangueiras para posteriormente realizar a conexão do sistema. A primeira adaptação realizada foi a adição de duas válvulas para tomada de pressão de sucção e descarga. A Figura 41 mostra a adaptação realizada.

Figura 41 - Adaptação da conexão do compressor



Fonte: Autor (2022).

A Figura 41 (A) mostra como são conectadas originalmente as mangueiras, enquanto a Figura 41 (B) mostra a conexão já conectadas ao compressor com as válvulas de tomada de pressão. Depois desta conexão, realiza-se as conexões entre mangueiras e conecta-se todas as suas entradas respectivamente.

Com todas as mangueiras conectadas adequadamente realiza-se o vácuo do sistema, essa etapa tem grande importância, uma vez que nesse processo é retirado o ar de dentro do sistema e com o ar a umidade presente no sistema também é retirada. Durante o processo do vácuo pode-se identificar se há possíveis vazamentos. Após realizar o vácuo do sistema adiciona-se o fluido refrigerante, no caso o utilizado foi o R-134a. A Figura 42 mostra o resultado da montagem.

Apesar das incertezas de medição não terem sido avaliadas neste trabalho, uma vez que não foram realizados experimentos. Estima-se, com base em estudos prévios realizados em condições semelhantes, e que as incertezas de medição para a temperatura, pressão e consumo de energia serão da ordem de  $\pm 0,5$  °C,  $\pm 0,05$  bar e  $\pm 10\%$  W.

Figura 42 - Resultado da montagem



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 42 (A), temos o resultado da modelagem, enquanto em (B) temos o aparato experimental montado.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal projetar e construir um aparato experimental para avaliação do desempenho energético de um sistema de condicionamento de ar automotivo.

A modelagem em CAD dos componentes do sistema, fez com que se tornasse possível projetar os suportes que seriam utilizados no aparato experimental, assim constatou-se que a escolha correta dos parâmetros para modelagem, juntamente com a habilidade do operador do *software*, auxilia significativamente na rapidez e na assertividade da manufatura dos projetos. No projeto em questão, a modelagem teve papel importante na disposição espacial dos componentes, essa abordagem é importante para o estudo de interferências entre componentes e projetos de novos elementos do sistema.

O primeiro desafio encontrado durante esse projeto foi a dificuldade de profissionais que pudessem confeccionar os suportes destes projetos, notou-se que para geometria complexas de suportes o custo de manufatura seria inviável. Ainda se destaca a relativa dificuldade de encontrar informações do produto, em alguns casos mesmo entrando em contato com o fabricante dos dispositivos não foram obtidas respostas.

Com a montagem do sistema buscou-se garantir a segurança dos operadores do sistema, no entanto ainda está em andamento o projeto de um sistema de segurança para ser posicionado em frente a correia das polias, para prevenção de possíveis acidentes.

Destaca-se que as incertezas de medições não foram estimadas, uma vez que não foram realizados experimentos. Porém, com base em estudos prévios realizados em condições semelhantes, estima-se que as incertezas de medição para a temperatura, pressão e consumo de energia serão da ordem de  $\pm 0,5$  °C,  $\pm 0,05$  bar e  $\pm 10\%$  W.

Ao utilizar o inversor de frequência, a faixa de rotação do motor elétrico permitida pelo fabricante, varia de 360 rpm à 3600 rpm. Porém, os motores a combustão automotivos atuam, no geral, em rotações maiores que 360 rpm, a faixa de rotação proposta para o aparato experimental é de 700 rpm a 3600 rpm. Com auxílio da ferramenta de simulação, juntamente com a definição das condições de



temperatura, pressão e faixa de rotação descritas neste trabalho, obtém-se a capacidade de refrigeração, coeficiente de performance e o consumo do aparato experimental, sendo de 1,704 à 8,711 kW, 4,14 à 3,56 W/W e 0,412 à 2,447 kW, respectivamente.

O aparato experimental mostrou-se uma ferramenta de aprendizado de extremo valor, pois nele há todos os componentes de um sistema de condicionamento de ar automotivo e por meio dele o entendimento das funções de cada componente pode ser facilmente observado ao utilizar esse projeto.

#### Sugestões de trabalhos futuros:

- Instrumentação do condensador e avaliação da quantidade de calor trocada;
- Análise das incertezas de medições presentes no sistema;
- Análise das perdas de carga proveniente das extensões entre mangueiras;
- Análise da capacidade de refrigeração do aparato experimental com variação de velocidade de rotação do compressor;
- Análise de otimização da quantidade de fluido refrigerante no sistema;
- Análise de quantidade de água de condensação produzida pelo aparato experimental em um período de tempo.

## REFERÊNCIAS

ARIAZONE. **Automotive Air Conditioning**: training manual. Training Manual. 2020. Disponível em: <https://www.fliphtml5.com/ifwll/fvny/basic>. Acesso em: 21 out. 2021.

BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E.. **Fundamentos da Termodinâmica**. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2018. 730 p.

CARNEIRO, A. **Carros brasileiros inovadores: você conhece 15 dos pioneiros do país?** 2020. Disponível em: <https://autopapo.uol.com.br/noticia/carros-brasileiros-inovadores-15/>. Acesso em: 25 out. 2021.

DA SILVA, DIOGO LÔNDERO; GOEDERT, JEAN ; HERMES, CHRISTIAN ; GALVAO, IGOR . **EVALUATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF FORCED CONDENSERS FOR BUS AIR-CONDITIONING SYSTEMS**. In: 25th International Congress of Mechanical Engineering, 2019. Proceedings of the 25th International Congress of Mechanical Engineering.

DA SILVA, DIOGO LÔNDERO, MEDEIROS DE CORDOVA, GUILHERME. **Mathematical Model of an Automotive Air-Conditioning System under Steady-State Conditions**. In: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2017. Proceedings of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering.

DA SILVA, D. L.; MELO, C. . **A PERSPECTIVE ON R&D&I ACTIVITIES IN THE BRAZILIAN MOBILE AIR CONDITIONING MARKET**. In: 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2016, Vitoria-ES. A PERSPECTIVE ON R&D&I ACTIVITIES IN THE BRAZILIAN MOBILE AIR CONDITIONING MARKET. Vitoria-ES, 2016.

DIVYA, Arputham Selvaraj; KIRUBAKARAN, Victor. **Vapour absorption refrigeration system for rural cold storage: a comparative study**. Germany, p. 1-11, 21 jul. 2020.

GOMES, Marina. **Variação histórica dos preços e das reservas de petróleo brasileiras e internacionais no período de 1992-2011**. 2013. TCC (Graduação) - Curso de Graduação em Geografia (IGCE), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013.

INCROPERA, Frank P *et al.* **Fundamento de transferência de calor e de massa**: 2008. 6. ed. Rio de Janeiro: John Wiley & Sons, Inc, 2008.

JULIANI, Aline Durrer Patelli; JASKOWIAK, Pablo Andretta; SILVA, Diogo Lôndero da. Estratégias de Controle para Sistemas de Condicionamento de Ar Automotivo. **Conemb: Projetos e Processo da Engenharia**. Joinville, p. 1-8. 19 set. 2017.

MALHEIROS, Péricles. Ar-condicionado: a história do item de conforto mais desejado nos carros. **Estadão**. São Paulo, p. 1-23. 19 jun. 2020. Disponível em: <https://jornaldocarro.estadao.com.br/fanaticos/historia-ar-condicionado/>. Acesso em: 30 nov. 2021.

MORIAR. **COMO FUNCIONA O AR CONDICIONADO DO CARRO?** 2017. Disponível em: <http://www.moriarlondrina.com.br/blog/como-funciona-o-ar-condicionado-veicular/>. Acesso em: 02 fev. 2022.

NASCIMENTO, Bruno Daniel Alves do. **Performance comparativa entre R437 eR134A para drop-in em um condicionador de ar automotivo**. 2015. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 882 p.

PRABAKARAN, Rajendran; LAL, Dhasan Mohan; DEVOTTA, Sukumar. Effect of thermostatic expansion valve tuning on the performance enhancement and environmental impact of a mobile air conditioning system. **Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry**. Budapest, p. 0-17. 11 jan. 2020.

RAZOR. **HISTÓRIA DOS SOFTWARES: SOLIDWORKS**. 2020. Disponível em: <https://razor.com.br/blog/tecnologia/historia-dos-sofwarees-solidworks/>. Acesso em: 01 jan. 2022.

RONZONI, Adriano Francisco. **COMO FUNCIONA UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO?** 2020. Disponível em: <https://refrigerationclub.com/pt-br/como-funciona-um-sistema-de-refrigeracao/>. Acesso em: 21 nov. 2021.

ROSA, Stella Vieira. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO IMPACTO HIDRODINÂMICO POR MEIO DE UM MÉTODO DE PARTÍCULAS**. 2015. 18 f. - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SOUZA, Adriano Fagali de. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC - princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2013. 358 p.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W.. **Refrigeração e ar condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill, 1985. 481 p

VALEO. **Valeo compressors performance tool**. 2020. Disponível em: <http://www.valeocompressors.com/performance-tool>. Acesso em: 20 jan. 2022.

VENTURINI, Osvaldo José; PIRANI, Marcelo José. **Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial**. Rio de Janeiro: Mme - Ministério de Minas e Energia, 2005. 316 p.

WEG. **Detalhes do Produto**. Jaraguá do Sul, 2022. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/>. Acesso em: 15 jun. 2022.

## APÊNDICE A – CÓDIGO DOS CÁLCULOS EM EES

```

"DADOS"
"Condições de operação"
T_cond = 55 [C]
T_SUB = 5 [C]
T_evap = 4 [C]
T_SUP = 10 [C]
//n = 700 "rpm"
CC = 100e-6 [m^3]

"Entalpias do sistema"
P_c = P_SAT(R134a;T=T_cond)
T3 = T_cond - T_SUB
h3 = ENTHALPY(R134a;T=T3;P=P_c)
h4 = h3

P_e = P_SAT(R134a;T=T_evap)
T1 = T_evap + T_SUP
h1 = ENTHALPY(R134a;P=P_e;T=T1)

"Compressão: Processo isentrópico"
s1 = Entropy(R134a;T=T1;P=P_e)
s1 = s2
h2 = ENTHALPY(R134a;P=P_c;s=s2)

"Densidade na admissão do compressor"
rho_suc = DENSITY(R134a;T=T1;P=P_e)

"Eficiência Volumétrica"
n_v = -2,170E-8*(n^2) + 9,188E-5*(n) + 6,159E-1

"Eficiência Isentrópica"
n_s = -4,310E-9*(n^2) - 2,863E-5*(n) + 9,975E-1

"Vazão massica"
m_dot = (n/60)*CC*n_v*rho_suc

"Capacidade de refrigeração"
Q = m_dot*(h1-h4)

"Capacidade de refrigeração"
W = m_dot*(h2-h1)/n_s

"Capacidade de refrigeração"
COP = Q/W

```