

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

MATHEUS FELIPE ESSER HILLESHEIM

CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE CARGA DE FLUIDOS
REFRIGERANTES PARA SISTEMAS AUTOMOTIVOS

Joinville

2025

MATHEUS FELIPE ESSER HILLESHEIM

CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE CARGA DE FLUIDOS
REFRIGERANTES PARA SISTEMAS AUTOMOTIVOS

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

Orientador: Dr. Diogo Lôndero da Silva

Joinville

2025

MATHEUS FELIPE ESSER HILLESHEIM

CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE CARGA DE FLUIDOS
REFRIGERANTES PARA SISTEMAS AUTOMOTIVOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 26 de novembro 2025.

Banca Examinadora:

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

Prof. Marcos Alves Rabelo, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Este trabalho é dedicado à minha família e amigos, cujo apoio constante e incentivo foram fundamentais ao longo de todo o curso.

RESUMO

Atualmente, as políticas de proteção ambiental estão em destaque, resultando em pressões por redução das emissões de poluentes, que impõem limites máximos permitidos e exigem relatórios de monitoramento das indústrias. No setor automotivo, o fluido refrigerante predominante é o R-134a, que é um gás de efeito estufa com alto potencial de aquecimento global (GWP = 1300), estando listado na Emenda de Kigali e em cronograma de redução de utilização. Uma alternativa promissora para mitigar essas emissões é a reutilização dos fluidos refrigerantes, especialmente durante os serviços de manutenção, onde muitas vezes o gás é liberado na atmosfera. Com esse objetivo, propõe-se o desenvolvimento de uma estação de carga de fluido refrigerante controlada por uma interface gráfica, que será capaz de coletar o gás refrigerante e armazená-lo em um reservatório, permitindo seu uso posterior em outros sistemas de refrigeração. Para tanto, foi realizado o dimensionamento e a modelagem dos componentes do equipamento no programa SolidWorks, e o protótipo da estação de carga foi posteriormente construído, sendo capaz realizar os processos de recuperação, evacuação e recarga. Foram realizados testes experimentais que comprovaram a capacidade do equipamento em realizar o processo de carga de fluido refrigerante com erros inferiores a 25 gramas para cargas de 1500 gramas e inferiores a 5 gramas para cargas de 400 gramas.

Palavras-chave: estação de carga para sistemas de condicionamento de ar automotivos; fluido refrigerante; aquecimento global; poluentes.

ABSTRACT

Currently, environmental protection policies have gained prominence, leading to increasing pressure to reduce pollutant emissions both from the market and from regulatory frameworks, which establish maximum allowable limits and require monitoring reports from industries. The predominant refrigerant used in vehicles is a greenhouse gas with a high global warming potential, and the countries that have adopted the Kigali Amendment aim to reduce these emissions. A promising alternative to mitigate such emissions is the reuse of refrigerants, especially during maintenance procedures, where the gas is often released into the atmosphere. With this objective, the development of a charging station controlled by a graphical interface is proposed, capable of recovering the refrigerant gas and storing it in a reservoir for later reuse in other refrigeration systems. The components were modeled using SolidWorks software, and the prototype was subsequently designed and built, being capable of performing the processes of recovery, evacuation, and recharging. Experimental tests demonstrated the equipment's capability to perform refrigerant charging with errors below 25 g for 1500 g loads and below 5 g for 400 g loads.

Keywords: Automotive charging station; refrigerant fluid; global warming; emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gerações de desenvolvimento dos fluidos.	9
Figura 2 – Sistema de refrigeração automotivo	12
Figura 3 - Sistema de ventilação automotivo	13
Figura 4 - Sistema de recolhimento de fluido refrigerante.	15
Figura 5 - Compressor hermético	18
Figura 6 - Condensador	19
Figura 7 - Válvula solenoide	20
Figura 8 - Projeto detalhado.	23
Figura 9 - Mangueiras de serviço	26
Figura 10 - Sistema de recolhimento	27
Figura 11 - Sistema de carga de fluido	28
Figura 12 - Fluxo de modelagem e prototipagem do sistema	33
Figura 13 - Base de suporte	40
Figura 14 - Cilindro de armazenamento	41
Figura 15 - Compressor hermético	42
Figura 16 - Bomba de vácuo.....	43
Figura 17 - Montagem dos componentes	44
Figura 18 - Sistema completo	44
Figura 19 - Manômetro	45
Figura 20 - Válvula solenoide	46
Figura 21 - Pressostato	48
Figura 22 - Válvulas manuais	48
Figura 23 - Esquema elétrico.....	49
Figura 24 - Tela de comando.....	50
Figura 25 - Placa de controle.....	51
Figura 26 - Célula de carga	51
Figura 27- Parte traseira da máquina	57
Figura 28 - Suporte da balança	57
Figura 29 - Parte frontal da máquina	58
Figura 30 - Reservatório de óleo	58
Figura 31 - Carenagem.....	59
Figura 32 - Máquina completa	60

Figura 33 – Cilindro de teste.....	61
Figura 34 - Teste com carga de 400 g de carga	62
Figura 35 - Teste com carga de 1500 gramas	63
Figura 36 - Desenho técnico do protótipo da estação de carga.....	69
Figura 37 - Desenho técnico da bomba de vácuo	70
Figura 38 - Desenho técnico do reservatório de fluido	71
Figura 39 - Desenho técnico o compressor hermético	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos técnicos do projeto	25
Tabela 2 - Tabela de vapor saturado R-134a	29
Tabela 3 - Plano de testes	39
Tabela 4 - Teste com 400g de carga	62
Tabela 5 - Teste com 1500 g de carga	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHRI	<i>Air-Conditioning, Heating and Refrigeration Institute</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design (Desenho Assistido por Computador)</i>
°C	<i>Grau Celsius</i>
CFC	<i>Clorofluorcarbono</i>
CFM	<i>Cubic Feet per Minute (Pés Cúbicos por Minuto)</i>
GWP	<i>Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)</i>
HCFC	<i>Hidroclorofluorcarbono</i>
HP	<i>Horse Power (Cavalo-Vapor)</i>
CLP	<i>Controlador Lógico Programável</i>
mmHg	<i>Milímetros de mercúrio</i>
MPa	<i>Megapascal</i>
PSI	<i>Pound per Square Inch (Libra por Polegada Quadrada)</i>
R134a	<i>1,1,1,2-Tetrafluoretano (Fluido Refrigerante)</i>
RPM	<i>Rotação por Minuto</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	<i>Massa específica</i>
$\rho_{média}$	<i>Massa específica média</i>
V	<i>Volume</i>
$\dot{V}$	<i>Vazão volumétrica</i>
m	<i>Massa do fluido</i>
$\dot{m}$	<i>Vazão mássica</i>
$\dot{m}_{medio}$	<i>Vazão mássica média</i>
t	<i>Tempo</i>
n	<i>Rotação do compressor</i>
V_d	<i>Deslocamento volumétrico</i>
η	<i>Eficiência volumétrica</i>
R	<i>Constante universal dos gases ideais</i>
T	<i>Temperatura</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. OBJETIVOS	10
1.1.1. Objetivo Geral	10
1.1.2. Objetivos Específicos	10
2. FUNDAMENTAÇÃO	12
2.1. FLUIDOS REFRIGERANTES	13
2.2. SISTEMA DE RECOLHIMENTO DE FLUIDO REFRIGERANTE	14
2.2.1. Processos realizados pelas estações de carga de fluido refrigerante	16
2.3. COMPRESSOR.....	17
2.4. CONDENSADOR	19
2.5. VÁLVULAS DE COMANDO	20
2.6. SEPARADOR DE ÓLEO	21
2.7. FILTRO SECADOR.....	21
2.8. NORMAS PARA ESTAÇÃO DE CARGA DE FLUIDO REFRIGERANTE	21
3. METODOLOGIA	24
3.1. REQUISITOS TÉCNICOS DA ESTAÇÃO DE CARGA DE FLUIDO REFRIGERANTE	25
3.2. DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO	26
3.3. DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES	28
3.4. MODELAGEM 3D.....	32
3.5. CIRCUITO DE FLUIDO REFRIGERANTE	34
3.6. SISTEMA ELÉTRICO	35
3.7. SISTEMA DE CONTROLE	36
3.8. MONTAGEM DO PROTÓTIPO	37
3.9. TESTE DE CARGA DE FLUIDO	38
4. RESULTADOS.....	40
4.1. FUNÇÃO DE RECOLHIMENTO.....	53
4.2. FUNÇÃO DE CARGA.....	53
4.3. TESTE DE VAZAMENTO.....	55
4.4 ELIMINAÇÃO DE FLUIDOS NÃO CONDENSÁVEIS.....	55
5. CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS	66

APÊNDICE A	69
APÊNDICE B	70
APÊNDICE C	71
APÊNDICE D	72

1. INTRODUÇÃO

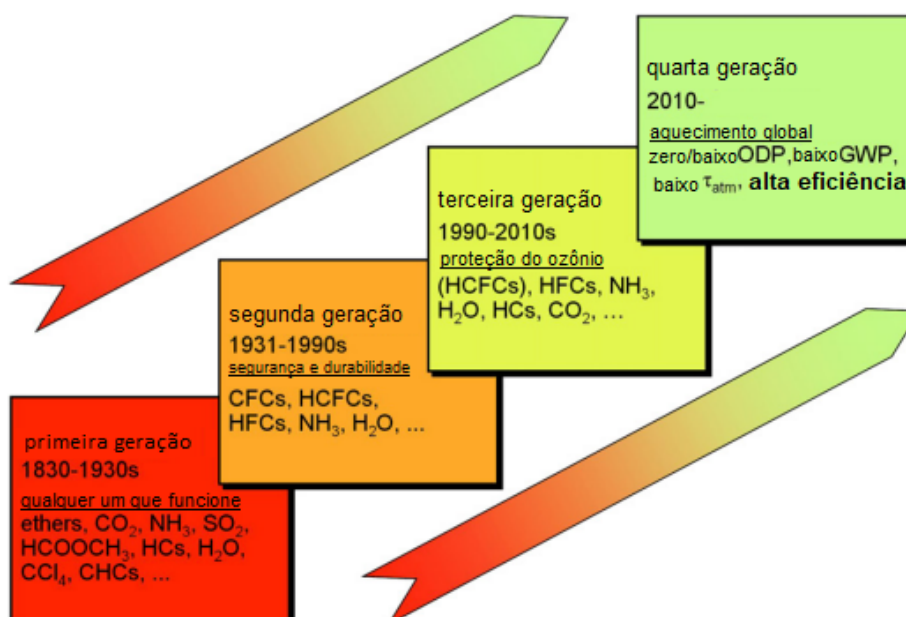
Os sistemas de refrigeração e condicionamento de ar desempenham um papel importante na economia mundial desde o século XIX, quando, nos Estados Unidos era extraído gelo dos rios e lagos nas regiões frias e transportado em navios até para outros continentes. Esse método natural tinha alto custo devido à dificuldade de armazenamento e transporte do gelo, isso estimulou o desenvolvimento dos primeiros sistemas de refrigeração mecânicos para produzir gelo de maneira artificial (Briley, 2004).

Os primeiros registros de um sistema de refrigeração artificial são de 1755, com um experimento de Cullen, que desenvolveu uma máquina capaz de produzir uma pequena quantidade de gelo, utilizando como princípio a evaporação de éter etílico com a redução da pressão por uma bomba de vácuo, resultando na formação de gelo na região que estava em contato com a água. Apesar disso, esse modelo não encontrou aplicações práticas, apenas em 1834, com o modelo patenteado por Perkins (Briley, 2004), que realizava o ciclo de compressão utilizando uma bomba mecânica, seguido por um condensador e um evaporador, que esse tipo de sistema se tornou mais próximo ao utilizado atualmente.

Os principais sistemas de condicionamento de ar utilizados nos automóveis atuais utilizam o processo de compressão mecânica de vapor. Neste conceito, utilizam-se um compressor, dois trocadores de calor e um dispositivo de expansão. Adicionalmente, o fluido refrigerante é necessário para viabilizar a transferência de energia térmica entre os reservatórios frios e quentes envolvidos no processo de climatização da cabine do veículo (Da Silva et al., 2024).

Os fluidos refrigerantes têm sido utilizados desde o surgimento dos primeiros sistemas mecânicos de refrigeração. Inicialmente os sistemas buscavam apenas a capacidade de refrigeração, sem se preocupar com a toxicidade e inflamabilidade dos fluidos. Com o passar do tempo novos materiais foram desenvolvidos e a legislação foi aperfeiçoada para garantir o cumprimento das políticas ambientais e de segurança, percebendo-se uma divisão dos principais fluidos utilizados em quatro gerações, conforme ilustrado na Figura 1 (Calm, 2008).

Figura 1 - Gerações de desenvolvimento dos fluidos.



Fonte: Calm (2008, p. 1124).

A primeira geração de fluidos refrigerantes tinha como critério de escolha apenas o funcionamento do sistema, quando muitos gases utilizados eram tóxicos ou inflamáveis. A segunda geração levava em consideração também a toxicidade, a inflamabilidade e a compatibilidade química dos materiais para melhorar a durabilidade do sistema. A terceira geração passou a excluir, também, os gases que danificam a camada de ozônio. Atualmente, na quarta geração, devido aos efeitos de aquecimento global, procura-se substituir os gases de efeito estufa (Calm, 2008).

A escolha dos fluidos refrigerantes utilizados para reduzir os danos causados ao meio ambiente vem sendo determinada por acordos internacionais, como o protocolo de Montreal, que aconteceu em 1987 e tinha como principal objetivo a proteção da camada de ozônio. Esse protocolo definiu os gases que deveriam deixar de ser utilizados e estipulou um prazo para a redução das emissões (Da Silva e Melo, 2016).

O protocolo de Montreal provocou a mudança da segunda para a terceira geração de fluidos, onde o fluido refrigerante R12 começou a ser substituído pelo R134a na maioria dos sistemas automotivos. Em 2016, com a emenda de Kigali, foram introduzidas medidas para redução de gases de efeito estufa, fazendo-se

necessário a busca por alternativas ao fluido R134a, que foi um gás classificado com alto potencial de aquecimento global (Da Silva, 2008; Park *et al.*, 2021).

A maioria dos sistemas de ar-condicionado em operação ainda utilizam fluidos refrigerantes com alto potencial de efeito estufa quando liberados na atmosfera, o que acaba acontecendo quando é realizado algum reparo ou manutenção no sistema. Para evitar que esses gases sejam liberados na atmosfera, pode-se utilizar equipamentos conhecidos como máquinas recicladoras de fluido refrigerante, ou estação de carga de fluido refrigerante, que são capazes de recolher esses fluidos (Fajar; Panca; Wicaksono, 2018).

Existem modelos de máquinas para recolher fluido refrigerante disponíveis no mercado brasileiro, porém, em razão dos custos de importação elevados, e da ausência de suporte técnico, esses equipamentos ainda são pouco utilizados. Considerando isso, desenvolveu-se um protótipo de uma máquina recicladora automatizada, apresentando funções de recolhimento e também carga de gás e óleo lubrificante.

1.1. OBJETIVOS

Para resolver a problemática da emissão de fluido refrigerante na atmosfera durante a manutenção automotiva, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Projetar e construir uma máquina capaz de realizar os processos de recuperação, evacuação e recarga de fluido refrigerante e óleo em sistemas de condicionamento de ar automotivos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Apresentar o funcionamento de uma estação de carga de fluido refrigerante para sistemas automotivos.;
- Modelar uma estação de carga de fluido refrigerante para sistemas automotivos;
- Construir um protótipo físico;

- Realizar testes de medição de massa de fluido refrigerante durante o processo de recarga;

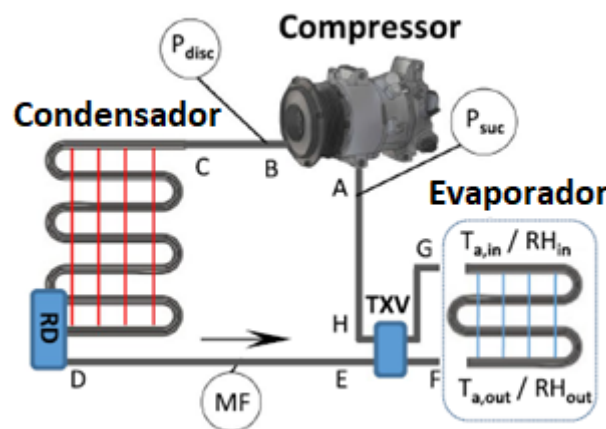
Este trabalho está organizado em cinco capítulos. Após o capítulo de introdução, onde é apresentada a motivação para realização do trabalho e a definição dos objetivos, o capítulo de fundamentação aborda os principais conceitos teóricos e técnicos relacionados ao funcionamento dos componentes do sistema. Em seguida, o capítulo de metodologia descreve as etapas práticas do projeto, incluindo a modelagem 3D, o sistema de fluido refrigerante, o sistema elétrico e o sistema de controle. No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos com a modelagem e montagem do protótipo e os testes realizados, permitindo avaliar o desempenho da solução proposta. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões e sugestões para próximos trabalhos.

2. FUNDAMENTAÇÃO

O sistema de ar-condicionado automotivo tem como função proporcionar conforto térmico e segurança aos ocupantes do veículo, promovendo o resfriamento e a desumidificação do ar no habitáculo, em climas quentes e úmidos. Esse sistema opera a partir de um ciclo termodinâmico de compressão mecânica de vapor, que é viabilizado pela utilização de componentes fundamentais, tais como o compressor, condensador, dispositivo de expansão e o evaporador (Da Silva e Melo, 2016).

A Figura 2 ilustra o funcionamento de um ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor, iniciando pela etapa de compressão (1-2), na qual o compressor pressuriza o fluido refrigerante do estado gasoso, elevando a pressão e a temperatura do fluido acima da temperatura ambiente. Em seguida, o fluido escoa pelo condensador (2-3), onde, ao ser resfriado pelo fluxo de ar externo, condensa ao estado líquido. Este líquido, ao escoar pelo dispositivo de expansão (3-4), sofre uma queda brusca de pressão e temperatura, ingressando no evaporador. No evaporador (4-1), o fluido refrigerante absorve o calor do ar que circula pelo interior do veículo, evaporando e completando o ciclo. O ar resfriado é então distribuído para a cabine por meio do sistema de ventilação (Da Silva et al., 2024, Çengel; Boles; Kanoglu, 2019).

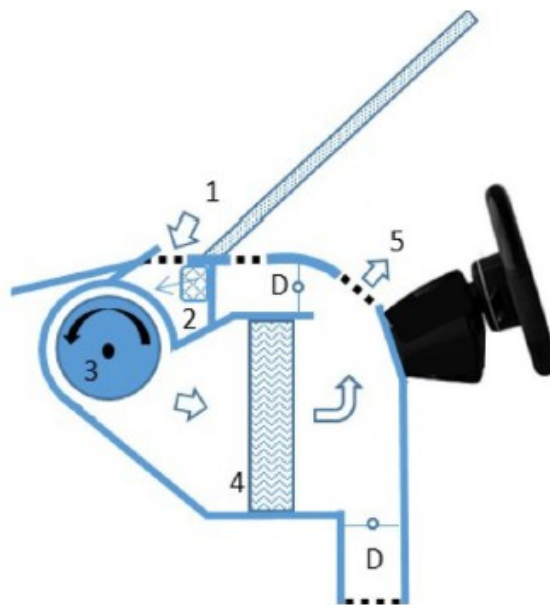
Figura 2 – Sistema de refrigeração automotivo



Fonte: Da Silva et al., 2024.

A Figura 3 apresenta uma representação esquemática de um sistema de ventilação e climatização automotivo, no qual observa-se que o ar proveniente da parte externa do veículo (1) é succionado para o interior pelo ventilador (3) e, em seguida, escoo pelo evaporador (4), sendo então direcionado para a cabine do veículo. A entrada de ar externo (1) pode ser fechada, permitindo que o ar da cabine circule (2), sem a captação de ar externo.

Figura 3 - Sistema de ventilação automotivo



Fonte: Da Silva et al., 2024.

2.1. FLUIDOS REFRIGERANTES

Os fluidos refrigerantes utilizados em sistemas de ar-condicionado automotivo são necessários para realizar os processos de troca de calor no condensador e no evaporador. O R-134a é um fluido amplamente utilizado em veículos de passeio e ônibus desde a década de 1990. Dentre os principais motivos destacam-se a sua estabilidade química, baixa toxicidade, bom desempenho termodinâmico e ser inofensivo para a camada de ozônio. Com propriedades que permitem operação eficiente em sistemas compactos, o R-134a oferece compatibilidade com óleos lubrificantes sintéticos, especialmente os do tipo PAG (polialquilen glicol), sendo

fácil de manusear e com baixa higroscopicidade (Halderman e Mitchell, 2017; Da Silva et al., 2019).

Com o avanço das políticas ambientais e elevado potencial de aquecimento global do R-134a, o R-1234yf foi desenvolvido como substituto direto do R-134a, apresentando desempenho térmico semelhante. Seu coeficiente de desempenho (COP) e capacidade volumétrica são próximos aos do R-134a, o que permite sua aplicação com algumas modificações nos sistemas existentes. No entanto, o R-1234yf apresenta maior permeabilidade, exigindo o uso de mangueiras e conexões mais resistentes à difusão de gás. Além disso, é um fluido classificado como levemente inflamável (Mitchell e Halderman, 2017; Da Silva et al., 2024).

Em um estudo comparativo sobre o desempenho do refrigerante R-1234yf em relação ao R-134a, foram realizados testes sob condições de refrigeração típicas de verão e aquecimento de inverno em um simulador de sistemas de climatização automotiva. Os resultados indicaram que o coeficiente de performance do R-1234yf é entre 0,8% e 2,7% inferior ao do R-134a, enquanto a capacidade de refrigeração apresentou uma redução de até 4%. Além disso, a temperatura de descarga do compressor foi de 6,4 °C a 6,7 °C mais baixa com o uso do R-1234yf, e a carga de refrigerante necessária foi 10% a 11% menor. Apesar dessas diferenças, o R-1234yf é considerado uma solução ambientalmente mais sustentável, pois não possui potencial de destruição da camada de ozônio e apresenta um potencial de aquecimento global (GWP) igual a quatro, podendo ser utilizado como uma alternativa viável a longo prazo, com apenas pequenas modificações nos sistemas existentes (Lee; Jung, 2012).

2.2. SISTEMA DE RECOLHIMENTO DE FLUIDO REFRIGERANTE

Os sistemas de recolhimento de fluido refrigerante, também são conhecidos como estações de serviço de ar-condicionado ou estações de carga de fluido refrigerante. O uso destes equipamentos durante a manutenção de sistemas de ar-condicionado automotivo é uma prática essencial para garantir a preservação ambiental e a conformidade com legislações ambientais. Esses sistemas são empregados durante operações de reparo, recarga ou descarte de componentes do sistema de condicionamento de ar, momentos nos quais há risco de liberação do fluido refrigerante para a atmosfera. O recolhimento adequado impede que

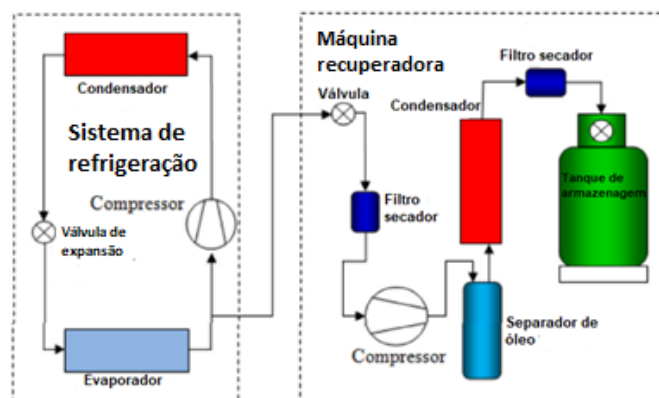
compostos com alto potencial de aquecimento global (GWP), como os hidrofluorcarbonetos (HFCs), sejam emitidos, contribuindo diretamente para a mitigação das mudanças climáticas (Fajar; Panca; Wicaksono, 2018).

Além de reduzir impactos ambientais, o recolhimento permite a recuperação e o reuso dos refrigerantes, promovendo uma economia circular e diminuindo a necessidade de produção de novos fluidos. Essa prática está alinhada com os princípios da sustentabilidade e com acordos internacionais, como o Protocolo de Montreal e sua Emenda de Kigali, que visam a redução do uso e das emissões de substâncias que destroem a camada de ozônio e intensificam o aquecimento global.

Os sistemas para recolhimento de fluido refrigerante utilizam como princípio de funcionamento a movimentação de fluidos através de um diferencial de pressão gerado por um compressor elétrico. A linha de entrada do compressor é conectada com o sistema de gás a ser recolhido, na linha de saída é conectado um cilindro para armazenar o fluido refrigerante (Fajar; Panca; Wicaksono, 2018).

A Figura 4 ilustra a representação esquemática de um sistema de recolhimento de gás, compreendendo um compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador. À direita, está representado o sistema destinado ao recolhimento do gás refrigerante, utilizando uma válvula de comando na entrada para regular o fluxo do gás que posteriormente atravessa um filtro secador que é responsável por retirar a umidade do fluido antes de entrar no compressor, onde é comprimido em direção ao filtro separador de óleo. Após essa etapa, o gás escoar por um condensador e outro filtro secador antes de concluir o processo no cilindro de armazenamento (Fajar; Panca; Wicaksono, 2018).

Figura 4 - Sistema de recolhimento de fluido refrigerante.



Fonte: Fajar; Panca; Wicaksono (2018, p. 3).

Fluidos refrigerantes distintos necessitam de sistemas projetados de maneira específica para atender às suas características únicas, como miscibilidade com óleos lubrificantes, inflamabilidade e potencial de corrosão. Por exemplo, o R-134a não é miscível com o óleo mineral utilizado no R-12, o que exige a utilização de lubrificantes alternativos, como óleos polialquilenos glicol (PAG) ou ésteres. O sistema também deve ser desenvolvido para prevenir a corrosão, uma vez que os refrigerantes podem reagir de maneiras diferentes com materiais como aço, alumínio ou cobre. Além disso, as vedações precisam ser compatíveis tanto com o fluido refrigerante quanto com o óleo lubrificante utilizado. (Dinçer; Kanoglu, 2010).

2.2.1. Processos realizados pelas estações de carga de fluido refrigerante

De acordo com Fajar; Panca; Wicaksono (2018) e Bosch (2025), os principais processos realizados pelos sistemas de recolhimento de fluido refrigerante são:

I) Recuperação

Esse processo tem como objetivo preservar o refrigerante para possível reutilização e proteger o meio ambiente. Na etapa de recuperação, o fluido refrigerante existente no sistema de ar-condicionado é extraído e transferido para um reservatório interno da estação. Durante esse processo, o fluido refrigerante passa por filtros que separam o óleo lubrificante e removem impurezas sólidas. O fluido refrigerante é então armazenado em um cilindro pressurizado.

II) Evacuação (vácuo)

Antes de recarregar o sistema, a estação executa a evacuação, ou seja, a remoção de ar e umidade do circuito interno. Isso é feito por meio de uma bomba de vácuo que reduz a pressão interna a níveis muito baixos (geralmente abaixo de 500 microns).

III) Recarga

Na etapa final de recarga, a estação introduz novamente o refrigerante purificado (ou novo) e a quantidade correta de óleo lubrificante no sistema. A operação é feita de modo controlado e automatizado, garantindo massa de fluido conforme especificação do fabricante (tolerância típica: ± 15 g), condições de

pressão e temperatura adequadas e estabelecimento completo da funcionalidade do sistema.

IV. Reciclagem

Algumas estações de serviço de ar-condicionado, também realizam o processo de reciclagem, que consiste na purificação do fluido refrigerante recuperado no processo I, para que ele possa ser reutilizado com segurança no mesmo sistema ou em outro. Este processo tem como objetivo restaurar a qualidade do fluido refrigerante, garantindo que ele mantenha suas propriedades termodinâmicas e não cause danos ao compressor ou às válvulas do sistema. Durante o processo de recuperação a estação realiza: a) a filtragem e separação de partículas sólidas, umidade e resíduos de óleo; b) a verificação da pureza do refrigerante, conforme limites estabelecidos em normas como SAE J2099 (pureza ≥ 98 % em massa).

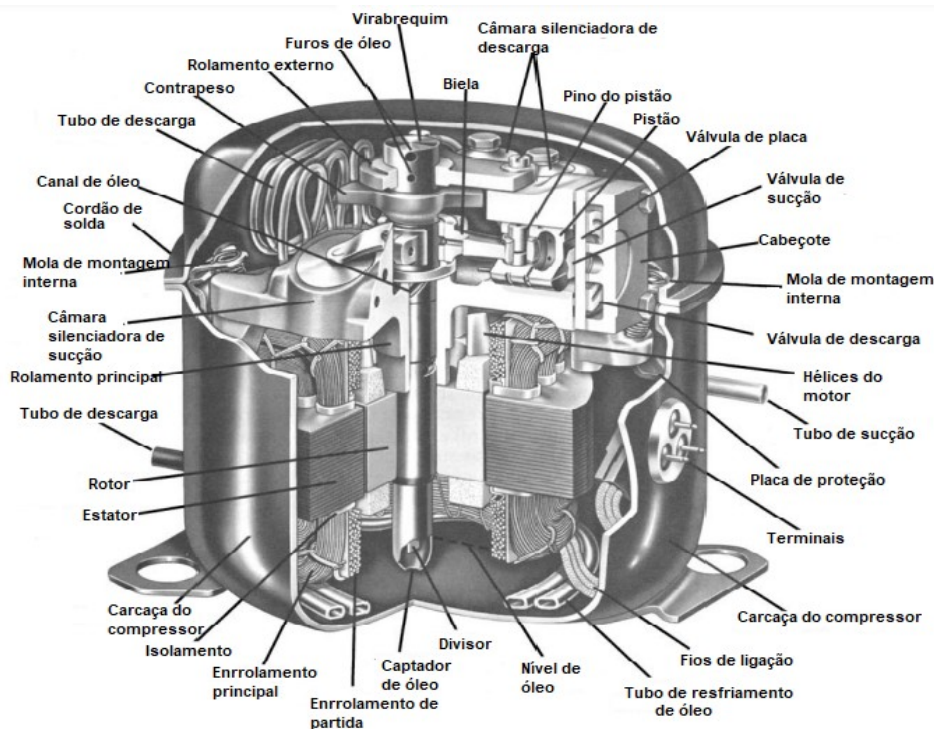
2.3. COMPRESSOR

O compressor é o componente responsável por comprimir e promover o escoamento do fluido refrigerante ao longo do sistema, estabelecendo o fluxo de massa que possibilita a realização do ciclo de refrigeração. Existem diferentes tipos de compressores, cada um adequado a determinadas aplicações e faixas de capacidade. Os mais comuns são os compressores alternativos (ou de pistão), que realizam a compressão por meio do movimento recíproco de pistões dentro de cilindros, sendo utilizados em sistemas residenciais e comerciais de pequeno e médio porte. Outro tipo bastante empregado é o compressor scroll, que utiliza dois espirais excêntricos um fixo e outro móvel para comprimir o gás. Já os compressores de parafuso operam com rotores helicoidais entrelaçados que comprimem o fluido refrigerante à medida que giram, sendo especialmente indicados para sistemas de grande capacidade (Miller, 2006; Cordova e Da Silva, 2017).

Compressores herméticos são utilizados em sistemas de recolhimento de fluido refrigerante por oferecerem uma solução de baixo custo, dimensões reduzidas já que dispensam o uso de motor externo e menor propensão a vazamentos em relação a outros modelos de compressores.

A figura 5 exibe um corte de compressor hermético, destacando todos os componentes do motor elétrico integrados ao sistema de compressão. Esse tipo de compressor é amplamente empregado em sistemas de refrigeração doméstica devido à sua robustez, confiabilidade e tamanho compacto, características que favorecem sua instalação em espaços reduzidos (Miller, 2006). Além disso, seu projeto selado evita vazamentos de fluido refrigerante e contaminações externas, contribuindo para maior durabilidade. A integração entre o motor e o mecanismo de compressão em um único invólucro simplifica a fabricação e reduz os custos de produção, também permite uma operação mais silenciosa e com menores níveis de vibração, aspectos importantes para o conforto em aplicações residenciais.

Figura 5 - Compressor hermético



Fonte: Miller (2006).

Os compressores também podem ser classificados por sua forma de operação, podendo ser de rotação fixa ou variável. Estes últimos oferecem maior eficiência energética e um controle mais preciso da capacidade de refrigeração. Diferentemente dos compressores de velocidade fixa, os modelos de rotação variável utilizam um inversor de frequência que ajusta continuamente a rotação do motor de acordo com a demanda térmica, reduzindo os ciclos de liga-desliga e,

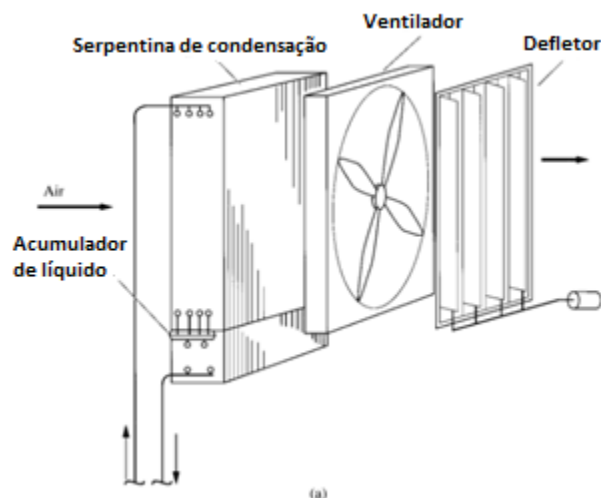
consequentemente, diminuindo o consumo de energia e o desgaste mecânico (Whitman *et al.*, 2020).

2.4. CONDENSADOR

Os condensadores empregados em sistemas de refrigeração são classificados conforme o tipo de fluido utilizado para o seu resfriamento. Na indústria, os modelos mais comuns incluem os condensadores a ar, a água e os evaporativos. A escolha do modelo adequado depende de fatores como o tipo de fluido refrigerante, a capacidade de troca térmica necessária, as dimensões do sistema, o custo de instalação e operação, bem como a disponibilidade de recursos, como água ou espaço físico (Dinçer; Kanoglu, 2010).

Os condensadores refrigerados a ar são amplamente utilizados em aplicações comerciais e residenciais, principalmente devido ao seu menor custo inicial e à simplicidade construtiva, quando comparados aos demais tipos. Esse sistema não requer tubulações de água, torres de resfriamento ou bombas auxiliares, o que reduz significativamente a complexidade e os custos de manutenção. O resfriamento ocorre através do ar ambiente, como o ilustrado na figura 6, geralmente impulsionado por um ou mais ventiladores, que aumentam a vazão de ar através dos trocadores de calor (Dinçer; Kanoglu, 2010).

Figura 6 - Condensador



Fonte: Wang (2001).

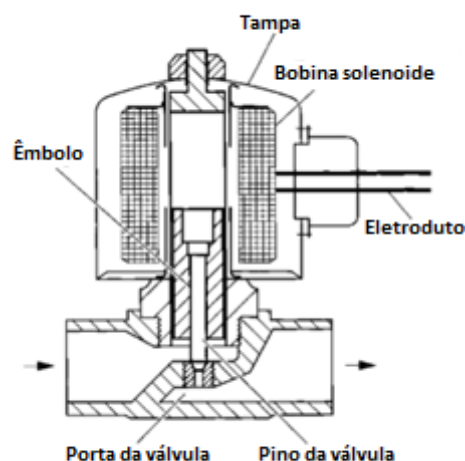
2.5. VÁLVULAS DE COMANDO

As válvulas de comando são dispositivos que controlam o fluxo de ar pressurizado, acionados por impulsos pneumáticos, mecânicos ou elétricos. Elas controlam o fluxo de ar no sistema e incluem tipos como válvulas unidimensionais, controladoras de pressão, lógicas e de retardo. Entre as válvulas mais comuns, destacam-se as válvulas de controle direcional, que influenciam a direção e o fluxo do ar (Whitman et al., 2020).

As válvulas direcionais podem ser classificadas em dois tipos de acionamento, direto ou indireto. As válvulas de acionamento direto realizam a comutação por meio da força aplicada diretamente ao elemento de controle. Já as válvulas de acionamento indireto utilizam um sistema de pilotagem, geralmente pneumático ou hidráulico, que amplifica o sinal de comando, permitindo controlar vazões e pressões elevadas com um esforço mínimo. (Whitman et al., 2020).

A figura 7 apresenta uma válvula solenoide, operada por um comando elétrico, utilizando uma bobina que desloca o núcleo para bloquear ou liberar a passagem do gás. Esse tipo de acionamento é amplamente utilizado em automação industrial. Além disso, o uso de válvulas solenoides facilita a integração com sistemas de controle lógico programável (CLP), permitindo sequências automatizadas no controle dos processos (Barber, 1997).

Figura 7 - Válvula solenoide



Fonte: Wang (2001).

2.6. SEPARADOR DE ÓLEO

Nos sistemas de reciclagem de gás refrigerante, é essencial remover a umidade e o óleo que se misturam com o fluido durante o processo de extração. A presença desses contaminantes compromete a qualidade do gás e pode afetar o desempenho e a durabilidade dos componentes do sistema. Um dos elementos utilizados para essa purificação é o filtro separador de óleo, cuja função é reter as partículas líquidas de óleo presentes no fluxo de gás. Isso é feito por meio de defletores internos, que forçam as gotículas a se acumularem nas superfícies, formando um filme que escoar por gravidade até o fundo do reservatório. Na maioria das aplicações, o separador é instalado entre a saída de descarga do compressor e a entrada do condensador. Sua estrutura interna é projetada para capturar a névoa de óleo presente no vapor do refrigerante, promovendo a separação das gotículas (Xu; Hrnjak, 2020).

2.7. FILTRO SECADOR

O filtro secador desempenha um papel importante nos sistemas de refrigeração e ar-condicionado, pois é responsável pela remoção de impurezas sólidas e pela eliminação da umidade presente no fluido refrigerante. Conforme Wang (2001), um filtro secador eficiente previne a formação de gelo e a corrosão no sistema, protegendo componentes sensíveis, como válvulas de expansão e compressores, garantindo assim o funcionamento correto do ciclo frigorífico.

Além de filtrar partículas, o filtro secador contém um material higroscópico que absorve a umidade do refrigerante, evitando reações químicas indesejadas e contaminação do óleo lubrificante. A seleção adequada do filtro secador deve levar em consideração o tipo de refrigerante e as condições operacionais do sistema, sendo essencial para assegurar a eficiência, confiabilidade e longevidade dos equipamentos de refrigeração.

2.8. NORMAS PARA ESTAÇÃO DE CARGA DE FLUIDO REFRIGERANTE

A AHRI Standard 740 constitui uma referência técnica para a avaliação do desempenho de equipamentos destinados à recuperação e reciclagem de

refrigerantes em sistemas de climatização e refrigeração. Essa norma estabelece critérios para a eficiência na remoção do fluido refrigerante, exigindo, por exemplo, que os equipamentos sejam capazes de reduzir a pressão do sistema até o equivalente a 101 mmHg abaixo da pressão atmosférica, durante o processo de recuperação (AHRI, 2016).

Além disso, a norma determina requisitos para a eficiência da purificação, assegurando que contaminantes como umidade, óleos, ácidos e partículas sólidas sejam removidos de forma eficaz. Para a pureza do refrigerante reciclado, a AHRI 740 especifica limites máximos de contaminantes como: umidade (máx. 10 ppm em peso) e resíduos não voláteis (máx. 0,01% em massa) (AHRI, 2016).

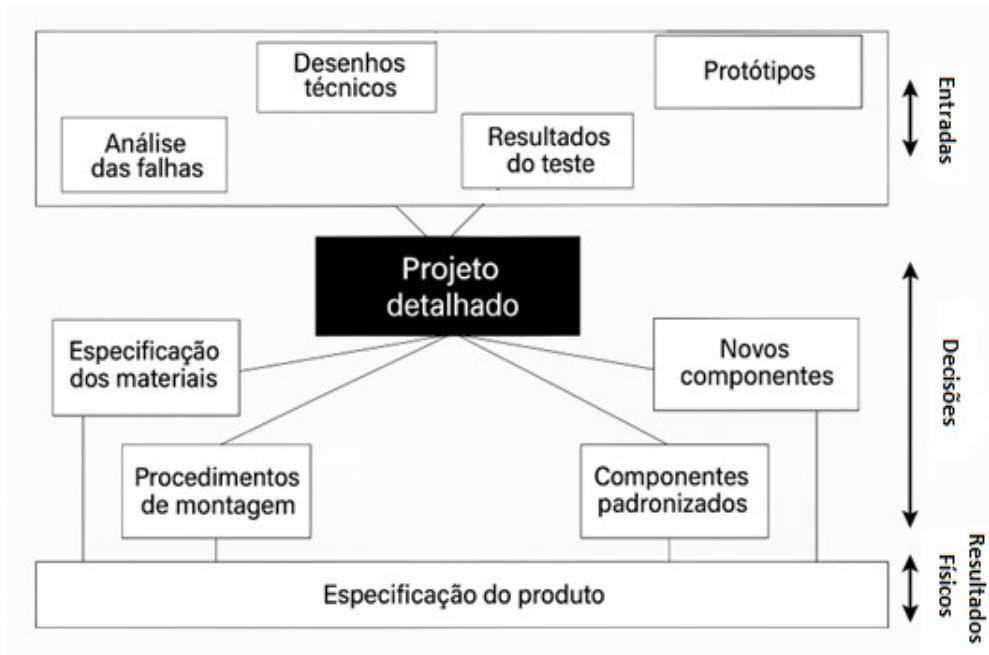
A norma também impõe diretrizes para evitar a contaminação cruzada entre diferentes tipos de refrigerantes, como o uso de sistemas de identificação e separação de fluidos, promovendo boas práticas na manutenção e descarte de equipamentos.

2.9. PROJETO DO PRODUTO

O projeto de um produto pode ser dividido em duas partes: o projeto conceitual e o projeto detalhado. Na fase conceitual, o foco está na definição das ideias iniciais e na exploração das soluções para o produto. Já o projeto detalhado é a fase que segue a definição das especificações técnicas. Aqui, as soluções são refinadas, detalhadas e organizadas de forma a serem viáveis para a produção. Isso inclui a escolha precisa dos materiais, a definição dos processos de fabricação, a realização de testes de protótipos e a elaboração de desenhos técnicos de cada componente (Baxter, 2000; Taguchi *et al.*, 2005).

A Figura 8 ilustra as etapas do projeto detalhado organizadas em blocos, com o objetivo de facilitar a compreensão do processo e permitir a análise isolada de cada etapa. O projeto detalhado utiliza esses resultados para definir como o produto será fabricado, incluindo a decisão de fabricar ou comprar componentes. Ao final, o projeto detalhado resulta em um conjunto de especificações para a fabricação do produto, incluindo desenhos técnicos, procedimentos de montagem e controle de qualidade (Baxter, 2000).

Figura 8 - Projeto detalhado.



Fonte: Baxter (2000, p. 232).

Conforme apresentado na revisão bibliográfica, foram abordados o funcionamento básico de um sistema de refrigeração automotivo, e o funcionamento de sistemas de recolhimento, com a descrição de seus principais componentes. Observa-se que a liberação para a atmosfera do fluido refrigerante dos veículos representa um problema ambiental relevante, devido ao seu alto potencial de aquecimento global. Por esse motivo, é fundamental evitar sua liberação na atmosfera. Nesse contexto, o uso de uma estação de carga de fluido refrigerante capaz de recolher o fluido e fazer o reaproveitamento do mesmo mostra-se essencial, justificando os objetivos propostos neste trabalho. Apesar dos avanços na utilização de fluidos mais ecológicos, a maioria dos veículos ainda utilizam fluidos refrigerantes com alto potencial de aquecimento global, como o R-134a. Além disso, mesmo quando são empregados fluidos menos poluentes, o recolhimento permanece necessário devido ao elevado custo dos mesmos.

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado na oficina ACVEL em Rio do Sul, Santa Catarina e contou com o suporte técnico do Laboratório de Refrigeração Veicular (ReVe) do campus Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina. A metodologia adotada para o desenvolvimento do projeto de uma estação de carga de fluido refrigerante inicia-se com o levantamento de informações como os requisitos técnicos associados ao tipo de fluido refrigerante, óleo lubrificante, as necessidades dos usuários, além das características dos equipamentos similares já disponíveis no mercado. Em seguida, são definidos os processos que a máquina deverá executar, abrangendo, principalmente, as etapas de recolhimento e recarga do fluido refrigerante. Na sequência, realizam-se os cálculos de dimensionamento e a modelagem tridimensional do equipamento por meio de programas CAD. Por fim, é feita a prototipagem do equipamento para a realização de testes.

Além de seguir os critérios estabelecidos pela AHRI (2016), o desenvolvimento do projeto também considerou as orientações técnicas das normas SAE J2788:2020 e SAE J2810:2022, ambas publicadas pela Society of Automotive Engineers (SAE) e amplamente utilizadas no setor automotivo para equipamentos de recuperação, reciclagem e recarga de fluidos refrigerantes.

A AHRI Standard 740 estabelece os métodos de ensaio e os critérios de desempenho para equipamentos destinados à recuperação e reciclagem de fluidos refrigerantes, definindo parâmetros mínimos de eficiência, taxas de recuperação, pureza do fluido reciclado e limites aceitáveis de contaminação por óleo, umidade e gases não condensáveis.

Já a SAE J2788:2020 especifica os requisitos de projeto, desempenho e precisão para equipamentos de recuperação, reciclagem e recarga de fluido refrigerante HFC-134a (R-134a) utilizados em sistemas de ar-condicionado automotivo.

A SAE J2810:2022, por sua vez, é voltada exclusivamente para equipamentos de recuperação de fluido refrigerante, não abrangendo os processos de reciclagem ou recarga. Essa norma estabelece requisitos mínimos de desempenho, como a eficiência de recolhimento, o controle de vazamentos e o armazenamento seguro do fluido recuperado. Também orienta quanto ao uso de

componentes adequados à pressão de trabalho do fluido e às práticas de manutenção preventiva.

3.1. REQUISITOS TÉCNICOS DA ESTAÇÃO DE CARGA DE FLUIDO REFRIGERANTE

Os requisitos técnicos de uma estação de carga, recuperação e reciclagem de fluido refrigerante são cruciais para a precisão e segurança. Utilizando como referência os critérios da SAE J2788:2020 e da AHRI 740, juntamente com uma análise dos dispositivos semelhantes disponíveis no mercado. A estação deve incorporar um sistema de vácuo capaz de atingir um nível abaixo de 500 microns de mercúrio (microns Hg), para a remoção completa de umidade e contaminantes. Também deve recuperar pelo menos 95% do fluido refrigerante e para o processo de recarga deve ter uma precisão de ± 15 g.

A Tabela 1 apresenta os requisitos técnicos selecionados para o projeto da estação de carga de fluido refrigerante. Esses requisitos foram definidos considerando o tipo específico de fluido e óleo a serem manuseados, bem como as funções que a máquina deve ser capaz de executar (como recuperação, evacuação e recarga).

Tabela 1 - Requisitos técnicos do projeto

Parâmetro	Descrição / Valor de Referência
Processos realizados	Recuperação, vácuo e recarga de óleo e fluido refrigerante
Fluido refrigerante utilizado	R-134a
Tipo de óleo lubrificante	Óleo sintético compatível com R-134a (PAG ou POE)
Tensão de alimentação	220 V / 60 Hz
Interface de controle	Painel digital com seleção de parâmetros de carga e vácuo
Capacidade de armazenamento de fluido	13,6 Kg
Capacidade de armazenamento de óleo	500 ml
Capacidade de vácuo	Pressão abaixo de 500 microns
Capacidade de recuperação de fluido	Acima de 95%

Fonte: Autor (2025).

3.2. DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Inicialmente, a máquina deve ser conectada às entradas de serviço do veículo, permitindo a leitura das pressões do sistema e sua exibição para o operador. Essas conexões são feitas por meio das válvulas de serviço de alta e baixa pressão. Na Figura 9 podemos visualizar a conexão das mangueiras de uma estação de carga de fluido refrigerante em um automóvel.

Figura 9 - Mangueiras de serviço



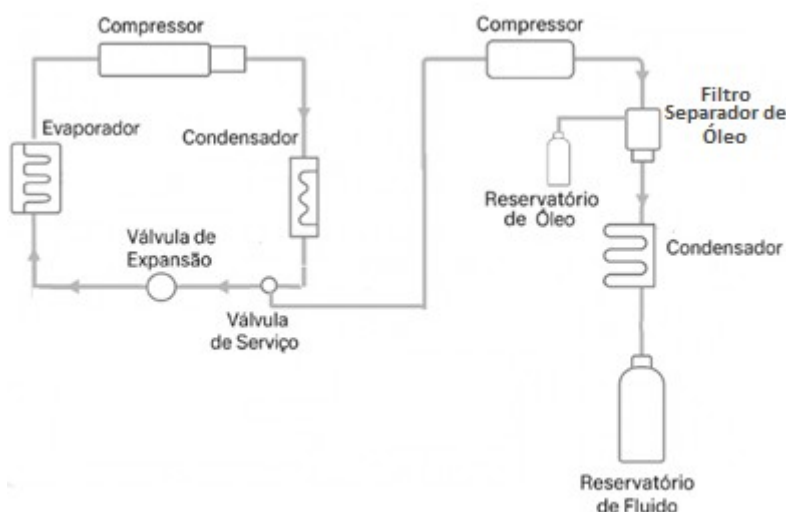
Fonte: Autor (2025).

Além da diferenciação por cores, que evita a inversão entre as linhas de alta e baixa pressão, cada tipo de gás refrigerante conta com um padrão exclusivo de engate. No caso do R-134a, os engates de serviço das linhas de alta e baixa pressão possuem formato e dimensões distintos, o que impede a conexão com sistemas projetados para outros refrigerantes. Essa padronização é essencial para evitar erros operacionais e contaminação cruzada entre diferentes tipos de gases.

Para iniciar o processo de recolhimento do fluido refrigerante, o operador deve conectar à máquina ao sistema de condicionamento de ar do veículo e selecionar a função correspondente no painel de controle. A partir desse comando, o equipamento inicia automaticamente a extração do gás, realizando simultaneamente

a separação do óleo presente no sistema. O fluido é direcionado para um cilindro de armazenamento apropriado, enquanto o óleo é coletado em um reservatório separado. O procedimento segue até que a pressão no sistema caia para um valor abaixo da pressão atmosférica, indicando que o sistema está em vácuo e que o fluido foi completamente removido. Ao final, a máquina informa ao operador que o recolhimento foi finalizado. Na figura 10 podemos ver o circuito do sistema de recolhimento ligado a um sistema de refrigeração. Onde o fluido é retirado através da válvula de serviço passando pelo compressor, separador de óleo, condensador e no final o reservatório.

Figura 10 - Sistema de recolhimento

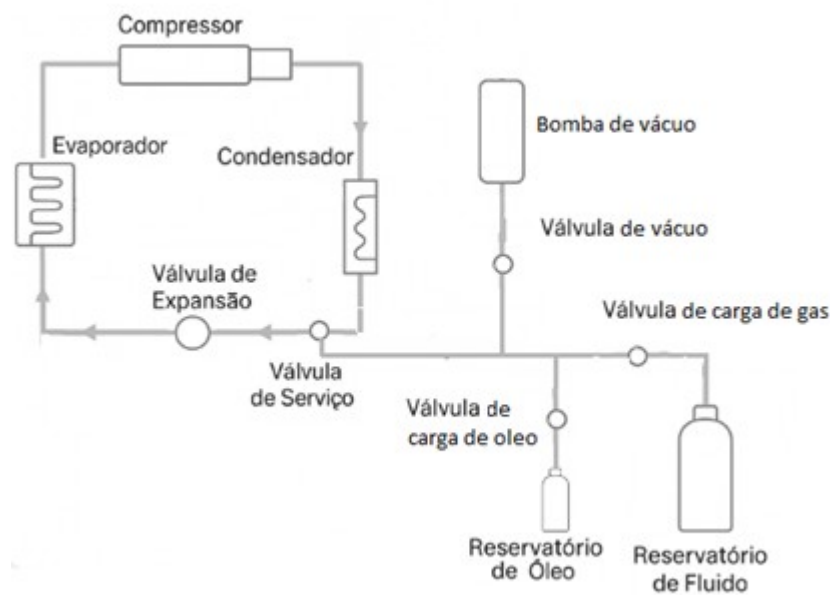


Fonte: Autor (2025).

Para a realização da função de carga no sistema, o operador deve informar previamente a quantidade de óleo a ser inserida, a carga de gás refrigerante e o tempo necessário para o processo de vácuo. Após o início da função, a máquina realiza o vácuo conforme o tempo definido pelo operador, garantindo a remoção de umidade e impurezas do sistema. Com o sistema em vácuo, a transferência do óleo e do fluido refrigerante ocorre por diferença de pressão: o óleo é succionado para o circuito devido à pressão negativa, e em seguida, o fluido refrigerante, que está sob pressão no reservatório, é automaticamente transferido para o sistema. Caso a carga de fluido refrigerante não seja completamente transferida apenas pela diferença de pressão, o operador pode acionar o sistema do veículo, fazendo com que o compressor entre em funcionamento e realize a sucção do gás restante,

completando assim a carga. Ao final do processo, a máquina exibe uma mensagem de conclusão no visor e emite um aviso sonoro, informando que a operação foi finalizada com sucesso. Na figura 11 podemos observar o circuito de carga de fluido ligado ao sistema de refrigeração, com as válvulas responsáveis pelo direcionamento do fluido e os componentes ligados na linha de carga.

Figura 11 - Sistema de carga de fluido



?::

Fonte: Autor (2025).

Após a definição das funções principais, são identificados os componentes básicos necessários para o desenvolvimento do projeto. Em seguida, realiza-se a modelagem desses componentes por meio de ferramentas computacionais, etapa fundamental para a análise do projeto antes da construção do protótipo físico, que será executado posteriormente.

3.3. DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES

Para o dimensionamento adequado do sistema, é fundamental compreender a pressão de trabalho envolvida. No cilindro de armazenamento, o fluido refrigerante deve se manter na condição de líquido saturado. Assim, quando o sistema estiver em repouso e em equilíbrio térmico com o ambiente, pode-se considerar que a região interna do cilindro se encontra na pressão de saturação correspondente à

temperatura ambiente. Os valores de pressão para diferentes temperaturas do refrigerante R-134a, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Tabela de vapor saturado R-134a

Temp (°C)	Pressão Abs. (MPa)	Pressão Abs. (PSI)
-30	0,08	12,34
-20	0,13	19,39
-10	0,20	29,25
0	0,29	42,64
10	0,42	60,31
20	0,57	83,08
30	0,77	111,82
40	1,02	147,52
50	1,32	191,16
60	1,68	243,92
70	2,12	307,03
80	2,63	381,99
90	3,24	470,62
101,15	4,06	589,43

Fonte: Adaptado de Sonntag; Borgnakke; Van Wylen (2003).

A presença de gases não condensáveis no cilindro de armazenamento de fluido refrigerante pode provocar o aumento da pressão no reservatório. Isso ocorre quando, durante o recolhimento, além do fluido refrigerante, são admitidos gases indesejados provenientes do sistema ou da atmosfera. Para verificar essa condição, é necessário comparar a pressão interna do cilindro com a pressão de saturação correspondente à temperatura ambiente: caso a pressão medida seja superior à de saturação, há indícios da presença de gases não condensáveis. Para garantir a estabilidade e segurança do sistema, esses gases devem ser removidos por meio de um sistema de purga. O compressor deve ser selecionado com base no tipo de fluido utilizado no sistema, as pressões de operação na sucção e na descarga, a vazão desejada para o tempo de recolhimento, além da compatibilidade com outros componentes do circuito.

Para recolher o fluido refrigerante, o compressor deve ser capaz de gerar pressão de descarga superior à pressão presente no reservatório, o qual contém o fluido no estado de vapor saturado. Além disso, é necessário que o compressor

mantenha essa condição de pressão mesmo quando a linha de sucção estiver submetida a baixas pressões, nas etapas finais do processo de recolhimento.

A vazão mássica do compressor está diretamente relacionada às pressões de sucção e descarga. À medida que a pressão na sucção diminui, ocorre uma redução na densidade do fluido aspirado, o que resulta na diminuição da vazão mássica transportada pelo compressor, que é expressa por:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (1)$$

onde ρ é a densidade do fluido e $\dot{V}$ é a vazão volumétrica do compressor.

Para determinar $\dot{V}$, é necessário considerar a capacidade volumétrica do compressor, bem como a velocidade de rotação de operação. Assim, a vazão volumétrica pode ser expressa como:

$$\dot{V} = V_d \cdot n \cdot \eta \quad (2)$$

onde V_d é o volume deslocado pelo compressor por ciclo, n é a rotação em RPM do compressor e η é a eficiência volumétrica, que corrige perdas por reexpansão, vazamentos e aquecimento do fluido refrigerante.

Portanto, a vazão mássica real admitida pelo compressor pode ser expressa como:

$$\dot{m} = \rho \cdot V_d \cdot n \cdot \eta \quad (3)$$

Durante o processo de recolhimento, a densidade do fluido varia à medida que a pressão do sistema diminui; por isso, para estimar o tempo necessário para recolher a carga total, utiliza-se uma densidade média aproximada. A determinação da densidade média do fluido, sob a hipótese de que este se encontra integralmente na fase gasosa, pode ser realizada por meio de uma aproximação utilizando a equação dos gases ideais utilizando a pressão e a temperatura do fluido

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (4)$$

A densidade média do fluido, considerando a temperatura constante e utilizando a pressão inicial P_1 e final P_2 durante o recolhimento, pode ser estimada por:

$$\rho_{média} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{2} = \frac{P_1 - P_2}{2R.T} \quad (5)$$

Utilizando $\rho_{média}$ para calcular $\dot{m}_{medio}$

$$\dot{m}_{medio} = \rho_{média} \cdot V_d \cdot n \cdot \eta \quad (6)$$

Para estimar o tempo de recolhimento podemos utilizar $\dot{m}_{medio}$. Portanto o tempo de recolhimento em função da carga de gás (M) e do deslocamento volumétrico do compressor é expresso por

$$t = \frac{M}{\rho_{média} \cdot V_d \cdot n \cdot \eta} \quad (7)$$

O tempo de recolhimento pode ser um fator determinante para o desempenho de uma estação de carga de fluido refrigerante, especialmente em oficinas automotivas, onde procedimentos rápidos são essenciais para reduzir o tempo de serviço e aumentar a produtividade. Além disso, um recolhimento mais ágil beneficia diretamente o cliente, ao diminuir o tempo de espera e aprimorar a experiência geral do serviço.

Considerando uma carga de 450 g de fluido refrigerante R-134a para veículos populares, para que o tempo de carga seja inferior a 5 minutos, um compressor operando a 3400 RPM e com eficiência volumétrica média (η) de 0,8 deverá possuir um deslocamento volumétrico mínimo de aproximadamente 6,3 cm³ por rotação.

O compressor deve apresentar capacidade de operação em condições de pressão extremamente baixas, de modo a garantir o recolhimento do fluido refrigerante presente no sistema. De acordo com a norma AHRI Standart 740, é permitido que o processo de recolhimento deixe de recuperar, no máximo, 100 g de fluido refrigerante ou 4% da carga total do sistema, adotando-se o menor valor entre esses dois critérios.

3.4. MODELAGEM 3D

A criação de modelos tridimensionais dos componentes é uma etapa no processo de desenvolvimento de produtos. Essa abordagem permite uma visualização detalhada do sistema antes da fabricação, facilitando a identificação antecipada de interferências, erros dimensionais e possíveis dificuldades na montagem, além de permitir análises funcionais e estéticas.

Diversos programas CAD (Computer-Aided Design) são utilizados para essa finalidade. Entre eles, o SolidWorks se destaca por sua interface intuitiva, além da robustez de suas ferramentas para modelagem sólida paramétrica. Essa técnica permite que os modelos sejam atualizados mediante a alteração de parâmetros como dimensões, posições ou restrições geométricas, proporcionando flexibilidade e eficiência no processo de projeto.

Adicionalmente, o SolidWorks oferece integração com simulações estruturais, análise de movimento, geração automática de desenhos técnicos e montagem de conjuntos complexos, o que o torna uma ferramenta completa para o ciclo de desenvolvimento de produtos, do conceito à prototipagem.

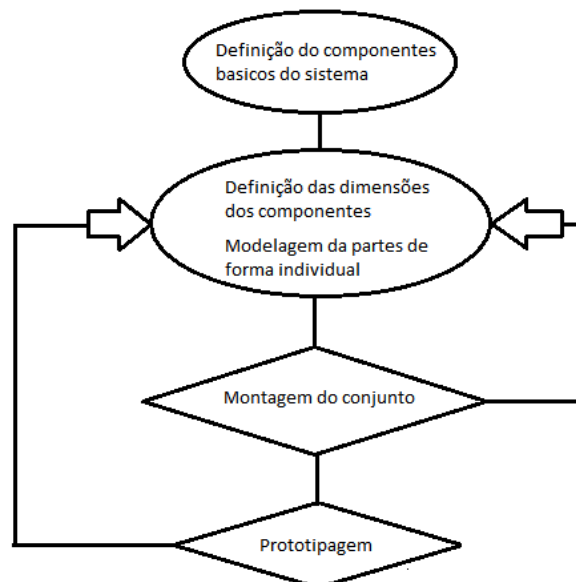
Após a definição das funções básicas que a estação de carga de fluido refrigerante deve desempenhar, procede-se à especificação dos componentes essenciais para sua operação. Entre eles, destacam-se o compressor, responsável pelo deslocamento do fluido refrigerante; a bomba de vácuo, que promove a remoção de gases não condensáveis e umidade; o reservatório, destinado ao armazenamento do fluido; e o filtro separador de óleo. Além desses elementos, é necessário projetar uma base de suporte adequada, que garanta a fixação de todos os componentes, facilitando o transporte e permitindo a manutenção do equipamento. Com a seleção desses itens, pode-se então iniciar a etapa de modelagem tridimensional.

A modelagem de um sistema complexo exige a criação individual de cada um de seus componentes, respeitando dimensões, restrições geométricas e critérios funcionais. O SolidWorks oferece recursos que permitem que cada peça seja modelada separadamente e, posteriormente, integrada em um ambiente de montagem por meio de um arquivo paramétrico. Essa integração assegura que qualquer alteração em um componente individual seja automaticamente atualizada na montagem geral.

Após a modelagem individual de cada componente, realiza-se a montagem do conjunto no programa de modelagem para permitir a visualização do sistema completo. Nessa etapa, caso seja identificado que algum componente necessita de ajustes ou modificações, é necessário retornar à fase anterior para realizar as correções na modelagem. Com o conjunto virtual montado, procede-se à construção do protótipo físico, etapa em que podem ser identificados problemas práticos e oportunidades de melhoria. Se forem detectadas falhas de encaixe, funcionamento ou desempenho, torna-se necessário retornar novamente à fase de modelagem para realizar os devidos ajustes.

A Figura 12 ilustra o fluxo de modelagem e prototipagem dos componentes do sistema: após a seleção dos componentes básicos, realiza-se o dimensionamento e a modelagem individual de cada parte, seguida pela montagem do conjunto, na qual qualquer problema detectado exige o retorno à etapa anterior; caso a montagem esteja correta, o processo avança para a prototipagem, onde, se for identificado um problema, o fluxo deve retornar à etapa de definição das dimensões e modelagem.

Figura 12 - Fluxo de modelagem e prototipagem do sistema



Fonte: Autor (2025).

A modelagem deve ser iniciada pela base de suporte da máquina, pois ela servirá como estrutura principal onde os demais componentes serão posicionados.

Essa base deve ser projetada com foco na simplicidade de fabricação e montagem, levando em conta o peso, dimensões e pontos de fixação dos elementos a serem acoplados. Uma distribuição equilibrada da carga sobre a base é essencial para garantir a estabilidade do sistema e minimizar vibrações ou esforços excessivos em alguns pontos.

Os componentes que devem ser fixados e modelados individualmente incluem: compressor, tela de controle, separador de óleo, condensador, bomba de vácuo e o reservatório de gás. Cada um desses elementos possui características próprias que devem ser respeitadas na modelagem, como conexões de entrada e saída, suportes de fixação, volumes de ocupação e requisitos de acessibilidade para manutenção.

Após a modelagem individual, realiza-se a montagem do modelo completo. Esse processo permite a visualização tridimensional do sistema, possibilitando a identificação de conflitos geométricos, problemas de acesso a componentes e interferências entre peças. Com isso, é possível realizar ajustes e otimizações no projeto ainda na fase digital, reduzindo custos e retrabalho na etapa de fabricação.

3.5. CIRCUITO DE FLUIDO REFRIGERANTE

O circuito de fluido refrigerante da estação de carga é projetado para transportar o fluido refrigerante em diferentes direções, conforme a função selecionada no painel de controle. Para isso, o circuito integra componentes fundamentais como manômetros, mangueiras de conexão, válvulas direcionais atuadoras, sensores de pressão, reservatórios de fluido e filtro separador de óleo.

O manômetro tem a função de indicar, em tempo real, a pressão do fluido no sistema, possibilitando o monitoramento visual das condições de operação. Esse componente é essencial para garantir que a operação ocorra dentro dos limites de segurança estabelecidos. As mangueiras são responsáveis por conduzir o fluido entre os diversos elementos do sistema, assegurando sua movimentação conforme o ciclo de operação definido.

As válvulas direcionais atuadas (manual ou eletricamente) são utilizadas para controlar o fluxo do fluido, permitindo que este seja direcionado de forma precisa para os compartimentos desejados, como o reservatório de coleta ou o sistema de recarga. Além disso, sensores de pressão e temperatura são incorporados ao

sistema para fornecer dados em tempo real sobre as condições operacionais, o que facilita o diagnóstico de falhas e garante maior segurança durante o processo.

A modelagem do sistema inclui todos os componentes posicionados e interligados conforme a lógica de funcionamento da máquina. O diagrama deve contemplar os circuitos de recolhimento e de recarga, incluindo o trajeto do fluido, os pontos de controle e os sensores de monitoramento.

Após a definição do esquema de ligação, é realizada a montagem do protótipo físico. Durante essa etapa, são feitos ajustes e testes para verificar o funcionamento correto do sistema. Os testes incluem simulações das funções de recolhimento e recarga, análise do desempenho dos sensores, verificação da estanqueidade do sistema e medições de pressão e vazão. Com os resultados obtidos nos testes, são feitas eventuais correções no projeto, visando otimizar o desempenho e garantir a confiabilidade da máquina recicladora.

3.6. SISTEMA ELÉTRICO

A estação de carga de fluido refrigerante possui um conjunto de componentes que operam em diferentes faixas de tensão e tipos de corrente elétrica (corrente alternada e corrente contínua). Para o funcionamento correto e seguro de todos esses elementos, torna-se indispensável uma modelagem elétrica detalhada, que aborde a distribuição adequada das tensões, a separação entre os circuitos de potência e de controle, e o uso apropriado de fontes de alimentação e conversores de nível lógico.

Essa modelagem deve ser realizada inicialmente por meio de programa, utilizando ferramentas de desenho para criar o esquema de ligação entre os componentes do sistema. Nessa etapa, são definidos os circuitos elétricos, permitindo uma análise do sistema antes da implementação física. Após a validação do esquema no ambiente virtual, parte-se para a montagem do protótipo, conectando fisicamente os componentes conforme o projeto elaborado. Essa fase inclui a fiação, a fixação dos módulos em uma estrutura de suporte adequada e a alimentação elétrica do sistema. Em seguida, são realizados testes para verificar o funcionamento correto dos circuitos, identificar possíveis falhas, validar a lógica de controle programada e ajustar o sistema conforme necessário.

A modelagem dos circuitos eletrônicos foi realizada utilizando o editor disponível na plataforma EasyEDA.com. Essa ferramenta oferece um ambiente integrado para o desenvolvimento de esquemáticos elétricos, permitindo a seleção de componentes a partir de uma biblioteca, que inclui tanto modelos genéricos quanto componentes de fabricantes específicos. Além disso, a plataforma conta com uma interface intuitiva, que torna a modelagem mais acessível mesmo para usuários com pouca experiência. Outro recurso importante é a possibilidade de conversão automática do esquemático em uma placa de circuito impresso (PCB), com ferramentas que permitem o roteamento manual ou automático das trilhas, a definição de camadas e o posicionamento físico dos componentes.

3.7. SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle de uma estação de carga pode ser dividido em duas partes principais: a interface gráfica e a programação das funções. A interface gráfica, desenvolvida para uma tela *touch*, permite a interação direta do usuário com o sistema, facilitando o envio de comandos e a visualização de informações. Essa interface se comunica com o microcontrolador, que é o responsável por executar as funções solicitadas. A interface deve ser projetada de forma intuitiva, com comandos simples, e com a apresentação clara dos dados em tempo real, como status dos processos e medições de sensores.

Na programação do microcontrolador, é necessário definir todas as funções que a máquina deverá realizar, como acionamento de válvulas, leitura de sensores e resposta a comandos do usuário. Além disso, deve-se estabelecer quais informações serão enviadas à tela, garantindo que o usuário tenha acesso imediato ao estado do sistema.

A modelagem da interface deve ser realizada utilizando o programa nativo da tela escolhida, o DGUS, que oferece recursos intuitivos para o desenvolvimento de interfaces gráficas. Esse programa facilita a criação de uma interface funcional, com botões, indicadores e gráficos. Além disso, o DGUS permite a simulação parcial do funcionamento da interface, o que contribui para a validação do layout e da navegação antes da implementação final. Por meio dele, também é possível configurar os comandos e dados que a tela deve enviar ao microcontrolador, estabelecendo uma comunicação serial organizada.

Para a programação das funções do microcontrolador ESP32, foi utilizado o programa do Arduino, devido à sua interface amigável, ampla documentação e compatibilidade com diversas bibliotecas. Essa plataforma possibilita o desenvolvimento do código, com facilidade para escrita, depuração e testes em tempo real. Com isso, é possível implementar as funções necessárias, interpretar os comandos recebidos da interface gráfica e acionar os componentes da máquina recicladora conforme a lógica programada, garantindo uma operação precisa e confiável.

Após a modelagem da interface no programa DGUS e a programação das funções no microcontrolador, ambos devem ser integrados ao sistema elétrico da máquina para a realização dos testes para validar o funcionamento das funções definidas, verificando se a comunicação entre a interface gráfica e o microcontrolador ocorre de forma correta e se os componentes do sistema são acionados conforme a lógica programada. Durante os testes, são analisadas a resposta do sistema aos comandos do usuário, a exibição dos dados em tempo real e o comportamento dos atuadores e sensores, permitindo identificar possíveis ajustes ou correções antes da finalização do projeto.

3.8. MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Para a montagem do protótipo, diversos componentes estavam disponíveis na oficina ou foram reaproveitados de equipamentos já existentes, o que contribuiu para a redução de custos e o aproveitamento de recursos. Entre os principais itens que não precisaram ser adquiridos estão o compressor, a bomba de vácuo, o condensador, o sensor de pressão, as válvulas solenoides, tubos de cobre, as mangueiras e conectores de serviço, os manômetros, os cabos elétricos e as chapas metálicas utilizadas na fabricação da estrutura da máquina. Já os componentes que precisaram ser comprados incluíram o reservatório de armazenamento do fluido refrigerante, a fonte de alimentação em corrente contínua, a tela de controle, o microcontrolador, a célula de carga e a carenagem da máquina.

A montagem do protótipo foi realizada com base no projeto original, porém com algumas adaptações para aproveitar os materiais e componentes disponíveis na oficina, visando reduzir os custos de produção sem comprometer a funcionalidade do sistema. Em vez da estrutura tubular originalmente prevista, foram

utilizadas chapas de ferro com 1 mm de espessura, que estavam disponíveis em estoque e apresentaram resistência mecânica adequada para suportar os componentes do sistema. A fixação dessas chapas e demais elementos estruturais foi realizada por meio de soldagem com eletrodo revestido, técnica escolhida pela sua praticidade e compatibilidade com o tipo de metal utilizado.

As conexões do sistema de fluido foram executadas com tubulações de cobre, material apropriado para condução de refrigerantes e que garante boa estanqueidade e resistência à pressão. As uniões entre as tubulações foram feitas por brasagem, garantindo vedação e durabilidade nas conexões.

O sistema elétrico foi montado com fios disponíveis, selecionados com base na bitola adequada à corrente de operação de cada componente. Foram utilizadas conexões simples, com terminais e isolamento apropriada, garantindo segurança e organização dos circuitos. Apesar das adaptações realizadas, todas as etapas da montagem seguiram critérios técnicos para assegurar a integridade e o desempenho funcional do protótipo durante os testes operacionais.

3.9. TESTE DE CARGA DE FLUIDO

Para avaliar o desempenho da estação de carga de fluido refrigerante, foi realizado um ensaio experimental utilizando um reservatório e uma balança auxiliar, com resolução de ± 5 g, e independente do protótipo. O reservatório externo tem a função de simular o sistema que receberia a carga de fluido, sendo posicionado sobre a balança auxiliar, onde é possível medir a massa de fluido refrigerante introduzida durante o processo de carga.

Os procedimentos dos testes foram realizados conforme a tabela 3, iniciando o teste com o reservatório externo conectado à estação de carga e, em seguida, as válvulas manuais foram abertas, estabelecendo a comunicação entre o reservatório e o circuito da máquina. Inicialmente, executou-se o processo de recolhimento, assegurando que o reservatório estivesse completamente vazio. Após essa etapa, procedeu-se à tara da balança externa, de modo que apenas a massa de fluido adicionada fosse registrada.

Em seguida, selecionou-se a função de carga de fluido, na qual são definidos os parâmetros de tempo de vácuo, carga de óleo e carga de fluido. Para este ensaio, a carga de óleo não foi utilizada, e o tempo de vácuo adotado foi de 2

minutos. A massa de fluido configurada foi de 400 gramas para os dez primeiros testes e de 1500 gramas para os dez testes subsequentes.

Ao término de cada processo de carga, foram registrados os valores indicados tanto na balança externa quanto na interface da estação de carga, possibilitando a comparação entre as medições e a avaliação da precisão do sistema.

Tabela 3 - Plano de testes

Plano de testes de carga de fluido					
1	2	3	4	5	6
Selecionar função de carga com 400g na tela da máquina	Tempo de vácuo de 2 minutos	Carga de fluido para o reservatório externo realizada	Registro dos valores de carga indicados na estação de carga	Registro dos valores de carga medida pela balança externa	Recolhimento do fluido do reservatório externo
Repetir o processo 10 vezes					
Selecionar função de carga com 1500g na máquina	Tempo de vácuo de 2 minutos	Carga de fluido para o reservatório externo realizada	Registro dos valores de carga indicados na estação de carga	Registro dos valores de carga medida pela balança externa	Recolhimento do fluido do reservatório externo
Repetir o processo 10 vezes					

Fonte: Autor (2025).

4. RESULTADOS

4.1. MODELAGEM 3D E MONTAGEM DOS PRINCIPAIS COMPONENTES

A figura 13 apresenta a base da máquina modelada no SolidWorks, com uma estrutura tubular metálica de aço 1020 com bitola de 25,4 mm e espessura de 0,9 mm, que proporciona rigidez ao conjunto. A base foi projetada com áreas para a fixação dos componentes principais, como o compressor, condensador, reservatório de gás e bomba de vácuo, respeitando critérios de distribuição de peso e facilidade de acesso para montagem e manutenção. Além disso, foram incorporadas duas rodas com 200 mm de diâmetro na parte traseira e duas rodas direcionáveis com 50 mm de diâmetro na parte dianteira, que facilitam a mobilidade da máquina. A geometria da estrutura também considera o espaço necessário para o roteamento de mangueiras, tubulações e fiação elétrica.

Figura 13 - Base de suporte



Fonte: Autor (2025).

O cilindro de armazenamento foi modelado com dimensões correspondentes a um reservatório padrão para R-134a disponível no mercado, com capacidade aproximada de 13,6 kg de fluido refrigerante. Na figura 14 é possível visualizar o cilindro modelado em solidworks. O modelo é de aço com espessura de 3 mm, o reservatório foi projetado para suportar pressões de até 800 psi, valor compatível com os reservatórios comercialmente disponíveis, garantindo resistência mesmo em condições de temperatura elevada e incorporando uma margem de segurança adequada. Para garantir a segurança do sistema, o reservatório é equipado com uma válvula de alívio calibrada para 600 psi. O modelo possui 24 cm de diâmetro e 44,5 cm de altura. O cilindro vazio tem massa de 6,8 kg. O desenho técnico pode ser visualizado no apêndice C.

Figura 14 - Cilindro de armazenamento

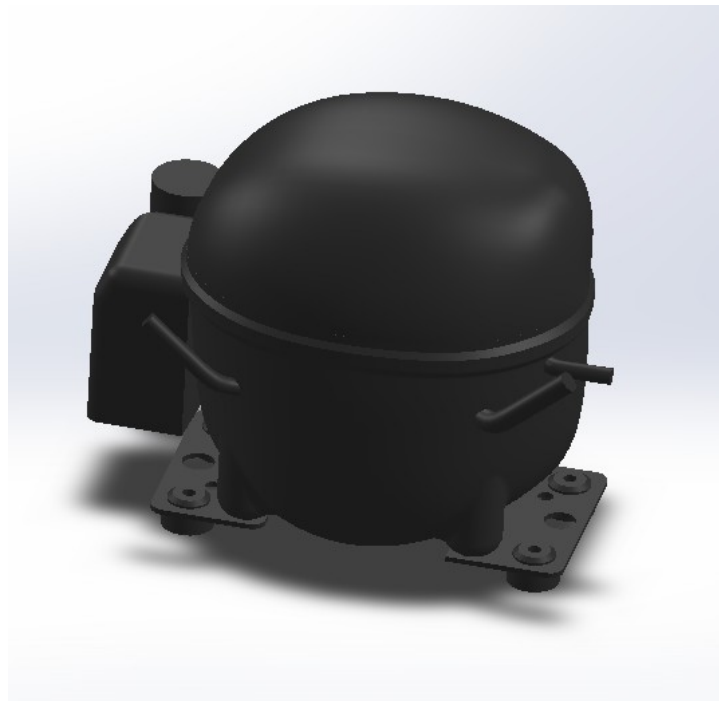


Fonte: Autor (2025).

O compressor exibido na figura 15 foi modelado com base nas especificações de um modelo de 1/3 HP com deslocamento volumétrico de $10,61 \text{ cm}^3$ utilizado para sistemas de refrigeração e climatização de pequeno e médio porte. Este modelo específico apresenta dimensões de 185 mm de comprimento, 160 mm de largura e 200 mm de altura. O desenho técnico pode ser visualizado no apêndice D. Essas dimensões foram escolhidas para garantir compatibilidade com os demais

componentes do sistema, além de proporcionar eficiência espacial e operacional. Embora o compressor final do sistema possa ser menor, a escolha de um modelo maior foi feita durante a avaliação de espaço para garantir que não houvesse limitações de espaço físico no projeto. Dessa forma, essa escolha visa proporcionar flexibilidade e evitar problemas de instalação e montagem no futuro.

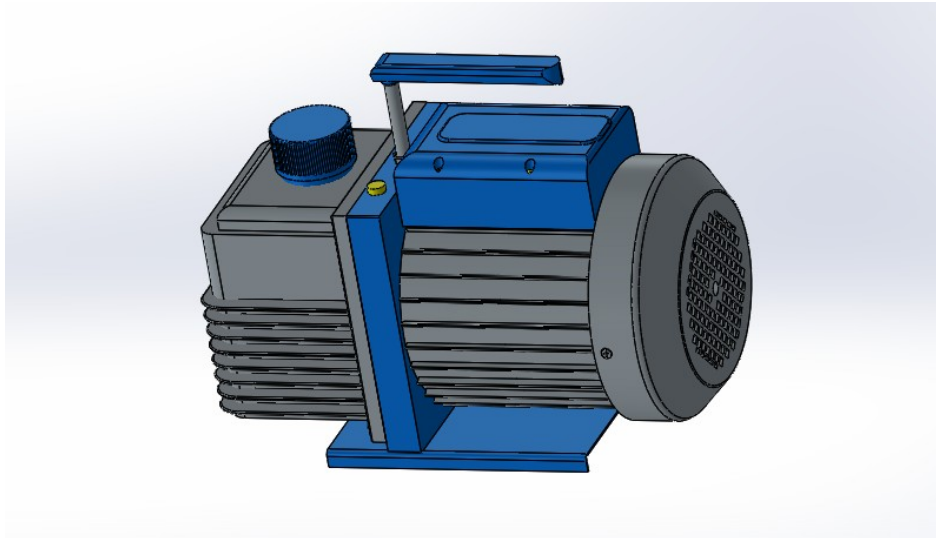
Figura 15 - Compressor hermético



Fonte: Autor (2025).

Para a modelagem da bomba de vácuo exibida na figura 16, foram adotadas dimensões aproximadas de uma bomba de 7 cfm de capacidade, capaz de atingir pressões abaixo de 500 microns. Com dimensões de 150 mm de largura, 120 mm de altura e 200 mm de comprimento, com base em equipamentos comerciais disponíveis. O desenho técnico pode ser visualizado no apêndice B. Essas medidas foram utilizadas como referência para representar o componente de forma compatível com o espaço físico do conjunto da máquina recicladora, assegurando tanto a viabilidade construtiva quanto a coerência visual e funcional do modelo tridimensional.

Figura 16 - Bomba de vácuo



Fonte: Autor (2025).

O primeiro passo na montagem é o posicionamento da base, que atua como referência principal para o alinhamento e fixação das demais partes. A partir dela, as demais peças são inseridas e posicionadas com base em relações de montagem, garantindo a integridade dimensional e funcional do sistema.

A Figura 17 apresenta os componentes básicos montados sobre a base de suporte, incluindo o compressor, bomba de vácuo e reservatório de gás. Essa disposição inicial não apenas define a configuração espacial do sistema, mas também serve como referência para a modelagem detalhada das conexões, permitindo o roteamento preciso das mangueiras e tubulações das linhas de gás, bem como a organização dos sistemas elétricos. A partir dessa montagem, são planejadas as passagens de cabos, posicionamento de conectores, e trajetos dos dutos, garantindo que o sistema seja funcional e que atenda aos requisitos de manutenção e acessibilidade. Um desenho técnico com as principais dimensões do protótipo é apresentado no apêndice 1.

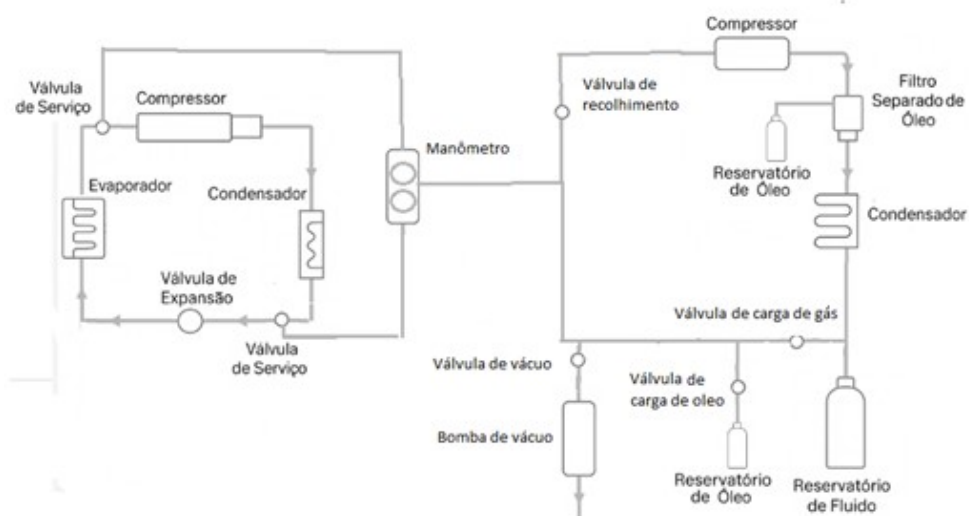
Figura 17 - Montagem dos componentes



Fonte: Autor (2025)

O circuito de fluido refrigerante que pode ser visualizado na figura 18 contempla as conexões com o compressor, o filtro de óleo, o condensador, o reservatório e a bomba de vácuo, formando um circuito fechado responsável pelo recolhimento do fluido refrigerante. O circuito também possui válvulas solenoides que permitem o controle automático do fluxo de fluido entre os diferentes componentes, além de um manômetro instalado na entrada do sistema para o monitoramento contínuo da pressão de operação.

Figura 18 - Sistema completo



Fonte: Autor (2025).

4.2. DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES AUXILIARES

O manômetro utilizado em uma estação de carga de fluido refrigerante automotiva que pode ser visualizado na figura 19 indica em tempo real, a pressão interna do sistema. Embora o sistema também possua sensores eletrônicos para monitoramento contínuo e controle automatizado, o manômetro mecânico serve como uma conferência visual direta para o operador, garantindo uma verificação rápida e confiável das pressões. Geralmente, ele possui escala compatível com os refrigerantes automotivos mais comuns (como R-134a ou R-1234yf) e é conectado ao circuito por meio de engates rápidos, proporcionando praticidade e segurança durante o uso.

O manômetro destinado à medição da pressão no lado de baixa do sistema apresenta faixa de medição de 0 a -30 inHg para pressões abaixo da atmosférica e de 0 a 120 psi para pressões acima, com resolução de ± 1 psi em pressões positivas e ± 5 inHg em pressões negativas. Já o manômetro utilizado no lado de alta possui faixa de medição de 0 a 500 psi, com resolução de ± 5 psi.

Figura 19 - Manômetro



Fonte: Autor (2025).

As válvulas solenoide de ação direta como a exibida na figura 20 são dispositivos eletromecânicos utilizados para controlar o fluxo de fluidos em sistemas hidráulicos ou pneumáticos. Elas operam por meio de um solenoide que, ao ser energizado, movimenta diretamente o êmbolo ou núcleo da válvula, abrindo ou fechando a passagem do fluido sem a necessidade de uma pressão diferencial entre a entrada e a saída.

As válvulas solenoide de ação indireta, também conhecidas como válvulas piloto-operadas, funcionam de forma diferente: elas utilizam a própria pressão do fluido para auxiliar na abertura ou fechamento da válvula principal. Quando o solenoide é acionado, ele altera a pressão em uma câmara de controle, permitindo que a pressão do fluido mova o diafragma ou êmbolo principal. Esse mecanismo possibilita o controle de fluxos maiores e pressões mais elevadas com menor esforço elétrico. No entanto, essas válvulas apresentam uma desvantagem importante: elas requerem uma diferença mínima de pressão entre a entrada e a saída para funcionarem corretamente. Quando essa diferença é muito pequena como em situações de baixíssima pressão ou quando o sistema está equilibrado a válvula pode não vedar adequadamente.

Figura 20 - Válvula solenoide



Fonte: Autor (2025).

Essas válvulas podem ser do tipo normalmente aberta (NA) ou normalmente fechada (NF). No modelo normalmente fechado, o fluxo permanece bloqueado quando a válvula está desenergizada, sendo liberado apenas quando a corrente

elétrica é aplicada. Já nas válvulas normalmente abertas, o fluxo é livre na ausência de corrente, sendo interrompido quando o solenoide é energizado. A escolha entre uma e outra depende das exigências de segurança e funcionamento do sistema em que serão aplicadas.

Para uma estação de carga de fluido refrigerante, foi utilizado válvulas solenoide de ação direta do tipo normalmente fechada (NF), pois elas garantem que o fluido não circule entre os diferentes compartimentos da máquina quando o sistema estiver desligado. Isso evita vazamentos indesejados, contaminações cruzadas e perdas de fluido. Ao serem energizadas, essas válvulas permitem o controle do fluxo, ativando a passagem apenas nos momentos adequados do processo de reciclagem. O modelo utilizado da marca Danfoss compatível com o fluido refrigerante R134a, possui tensão de operação de 12V com pressão máxima de 550 psi.

Sensores de pressão eletrônicos são componentes essenciais no projeto de uma recicladora de fluido refrigerante, pois permitem o monitoramento preciso das pressões nos diferentes estágios do ciclo de recuperação, filtragem e reintrodução do fluido. Esses sensores funcionam convertendo a pressão física do gás ou líquido em um sinal elétrico, geralmente por meio de elementos piezoresistivos, capacitivos ou piezoelétricos, que variam sua resistência ou carga elétrica conforme a pressão aplicada. No projeto em questão, foi utilizado um pressostato eletrônico como o demonstrado na figura 21, originalmente empregado em sistemas de ar-condicionado veicular, devido à sua compatibilidade com a tensão de operação do sistema e à adequação às pressões máximas envolvidas no processo. O pressostato utilizado opera com tensão de 12V e faixa de pressões de medidas de 0 a 2000 KPa. Essa escolha proporciona uma solução econômica e confiável, aproveitando um componente automotivo disponível e já validado.

Figura 21 - Pressostato



Fonte: Autor (2025).

O sistema da recicladora de fluido refrigerante deve possuir duas válvulas manuais localizadas na entrada da máquina, responsáveis pelo controle do fluxo de gás como pode ser visto na figura 22. Uma dessas válvulas é dedicada à linha de baixa pressão e a outra à linha de alta pressão, permitindo ao operador regular manualmente a entrada do fluido de acordo com a necessidade do processo. Essa configuração oferece maior segurança e controle durante as etapas de recuperação e recarga, além de facilitar o isolamento de cada circuito em caso de manutenção ou diagnóstico.

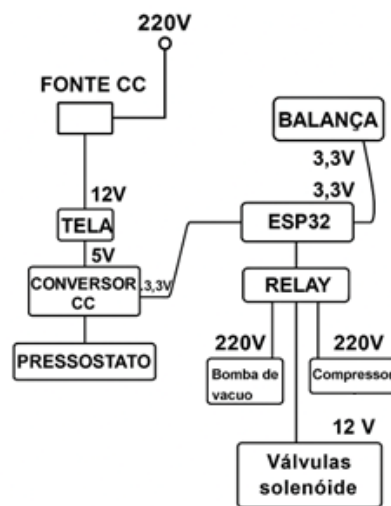
Figura 22 - Válvulas manuais



Fonte: Autor (2025).

O sistema elétrico exibido na figura 23 deve isolar os componentes de potência, que operam em 220V, dos circuitos de acionamento e controle, que funcionam com sinais de apenas 3,3V. Além disso, a tela utilizada no projeto apresenta uma tensão de alimentação de 12V, mas se comunica com o microcontrolador por meio de sinais de 5V, o que exigiu a implementação de conversores de nível lógico para garantir a compatibilidade e o funcionamento estável de todos os elementos do circuito.

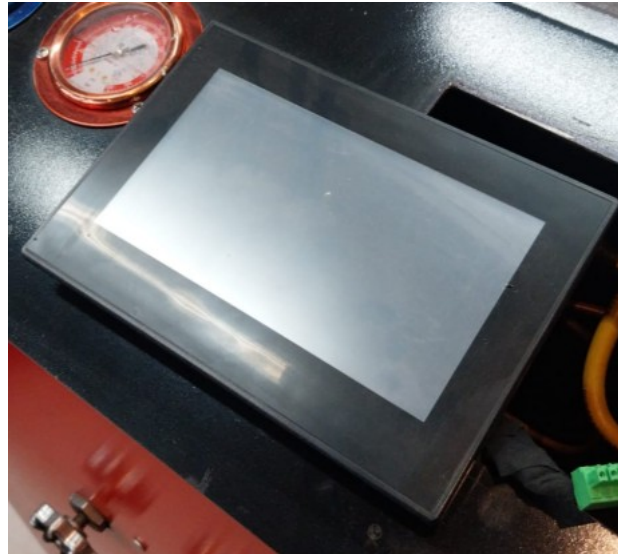
Figura 23 - Esquema elétrico



Fonte: Autor (2025).

Para a criação da interface com o usuário, pode ser utilizada uma tela com funcionalidade *touch screen* como pode ser visto na figura 24. Um dos dispositivos disponíveis para essa finalidade é uma tela de 7 polegadas da marca DWIN. Para garantir a compatibilidade entre os diferentes níveis de tensão, deve ser utilizado um conversor de nível lógico entre a tela e o microcontrolador, que opera a 3,3V.

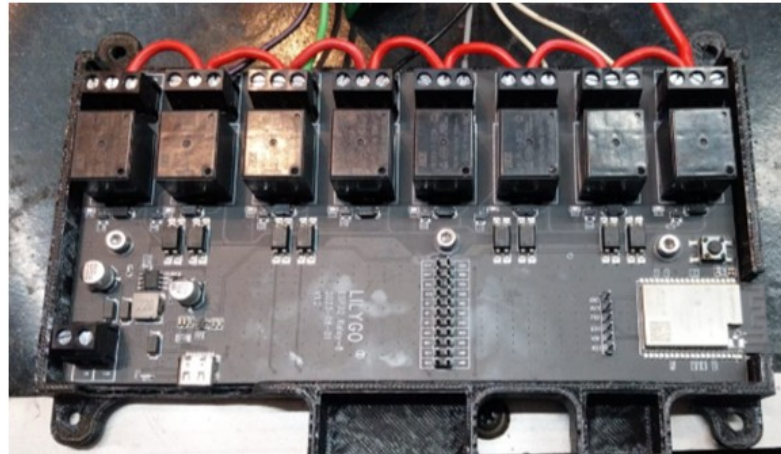
Figura 24 - Tela de comando



Fonte: Autor (2025).

Para o controle do sistema, foi utilizado o microcontrolador ESP32, que opera com tensão de alimentação de 3,3V e utiliza um núcleo dual-core, além de contar com conectividade Wi-Fi e Bluetooth integradas. Em conjunto com uma placa contendo 9 relés acoplados conforme a figura 25, o ESP32 controla o acionamento de dispositivos de alta potência por meio dos relés, assegurando o isolamento elétrico entre os circuitos de baixa tensão do microcontrolador e as cargas conectadas. A programação do ESP32 é realizada em C/C++ utilizando a plataforma Arduino, que oferece uma interface simplificada para desenvolvimento. Essa flexibilidade permite a implementação de lógicas de controle sofisticadas, comunicação via diversos protocolos e integração com sensores e atuadores, tornando o ESP32 ideal para sistemas embarcados que demandam controle e conectividade avançada.

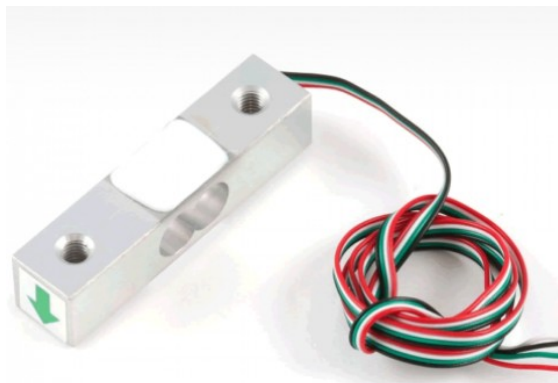
Figura 25 - Placa de controle



Fonte: Autor (2025).

A célula de carga utilizada no sistema exibida na figura 26 é do tipo barra de flexão, com capacidade de medição de até 50 kg. Esse tipo de sensor converte a força aplicada em um sinal elétrico proporcional por meio de extensômetros fixados em sua estrutura metálica. Quando submetida a uma carga, a célula sofre uma deformação mínima, que altera a resistência dos extensômetros, gerando uma variação de tensão que pode ser lida e interpretada por um circuito eletrônico. No projeto da recicladora, a célula de carga é responsável por monitorar o peso do fluido refrigerante armazenado no reservatório, permitindo o controle da quantidade recuperada ou recarregada no sistema. Ela é conectada diretamente ao microcontrolador por meio de um módulo amplificador de sinal.

Figura 26 - Célula de carga



Fonte: Eletronik LV (2025).

O software de controle de uma estação de carga de fluido refrigerante automatizada pode ser estruturado em duas partes principais: a interface gráfica e a programação das funções operacionais. Para o desenvolvimento da interface gráfica, foi utilizado o software nativo da tela LCD, o DGUS, que oferece ferramentas para a criação de botões, elementos visuais e transições entre diferentes telas. Para possibilitar a comunicação com o controlador, o DGUS envia os dados necessários ao ESP32, que é responsável pelo processamento das funções exibidas. Essa integração garante que ações como seleção de modos de operação, acionamento de válvulas, visualização de pressões e monitoramento de sensores sejam corretamente transmitidas e executadas. Em contrapartida, o ESP32 também envia informações em tempo real para a tela, como leituras de sensores e mensagens de status.

A programação das funções do ESP32 foi realizada utilizando a linguagem C. Por meio dessa linguagem, foi possível estabelecer uma comunicação entre o controlador e a interface gráfica da tela LCD, viabilizando o envio e recebimento contínuo de dados. Isso garante que todas as funções da máquina desde a leitura de sensores até o acionamento de componentes sejam executadas de forma sincronizada, com feedback visual atualizado de acordo com o estado operacional do sistema. Para assegurar a operação correta, os sensores permanecem ativos em tempo integral, enviando dados continuamente ao processador, que interpreta essas informações e toma decisões conforme as condições detectadas.

No caso específico dos sensores de pressão, os sinais digitais captados precisam ser convertidos em unidades compreensíveis, como PSI ou BAR. Para garantir a precisão dessas leituras, foi realizado um processo de calibração, no qual os valores lidos foram comparados com os indicados por um manômetro de referência. A partir dessa comparação, foi determinado um fator de correção que ajusta os dados do sensor, permitindo uma leitura mais fiel da pressão real do sistema. No entanto, observou-se que o comportamento do sensor de pressão não era linear em relação à pressão aplicada. Por isso, foi necessário o desenvolvimento de uma fórmula de correção baseada em dados experimentais, garantindo a exatidão das medições durante a operação.

Um procedimento semelhante foi adotado para a balança eletrônica, responsável por medir o peso do reservatório de fluido refrigerante. Cargas conhecidas foram aplicadas sobre a balança e comparadas com os valores

registrados pelo sistema, permitindo o ajuste dos fatores de correção e assegurando uma medição precisa do fluido durante a recarga. A precisão desses sensores é fundamental para o funcionamento eficiente e seguro da estação de carga já que qualquer erro nas leituras pode comprometer o desempenho do sistema.

4.1. FUNÇÃO DE RECOLHIMENTO

Para iniciar o recolhimento do fluido refrigerante, o compressor da máquina recicladora é acionado e a válvula de recolhimento é aberta, permitindo que o fluido seja transferido do sistema de refrigeração para o cilindro de armazenamento. Durante esse trajeto, o fluido passa por um filtro separador de óleo, responsável por remover o óleo presente no gás, que é então direcionado para um reservatório específico de óleo usado.

Enquanto o compressor está em funcionamento, o cooler de ventilação localizado na parte traseira da máquina é automaticamente acionado. Sua função é dissipar o calor gerado na linha de alta pressão, reduzindo a temperatura e, conseqüentemente, a pressão de descarga. Isso alivia o esforço do compressor, contribuindo para a estabilidade do processo e aumentando a vida útil do equipamento.

O processo de recolhimento é monitorado constantemente pelo controlador: a máquina é programada para se desligar assim que o sensor de pressão, localizado na entrada da máquina, detectar uma pressão muito baixa. Essa condição indica que praticamente todo o gás do sistema foi removido, finalizando a etapa de recolhimento.

O sistema também monitora continuamente a leitura da célula de carga para determinar a quantidade de gás sendo recolhida. Esse monitoramento permite calcular em tempo real o total de fluido transferido para o cilindro. Ao final do processo, a máquina emite um sinal sonoro indicando a conclusão da operação e exibe na tela a quantidade total de gás recolhida.

4.2. FUNÇÃO DE CARGA

A carga de fluido refrigerante no sistema deve ser acompanhada dos processos de vácuo e da carga de óleo, garantindo o funcionamento e a lubrificação

correta dos componentes. O tipo de óleo mais utilizado em sistemas de refrigeração veicular que operam com R-134a é o PAG (Polialquilen glicol), um lubrificante sintético com alta capacidade de lubrificação e boa miscibilidade com o refrigerante, o que favorece a circulação do óleo no sistema. No entanto, para veículos híbridos e elétricos, tem-se adotado o óleo POE (Poliol éster), devido à sua compatibilidade com componentes elétricos.

Para evitar problemas de contaminação, é fundamental utilizar apenas um tipo de óleo em cada sistema, evitando a mistura entre PAG e POE, que são incompatíveis e podem causar falhas no sistema de refrigeração. Em máquinas projetadas para recolher dois tipos diferentes de gás refrigerante, é imprescindível que possuam sistemas completamente separados, com circuitos e reservatórios independentes, para garantir a integridade dos fluidos e a confiabilidade operacional.

No início da recarga, realiza-se o processo de vácuo no sistema, que tem como objetivo remover a umidade e o ar. O tempo de vácuo deve ser ajustado de acordo com o tamanho do sistema e suas condições internas. Em casos em que há presença significativa de umidade, o tempo de vácuo pode precisar ser estendido para garantir a completa eliminação da água e de contaminantes.

Após o término do tempo de vácuo, a bomba de vácuo é desligada e a válvula correspondente é automaticamente fechada para isolar o sistema. O processo de vácuo é realizado utilizando tanto a linha de alta quanto a de baixa pressão, garantindo uma extração mais eficiente dos gases e da umidade do sistema. Em seguida, a válvula responsável pela injeção de óleo é aberta, permitindo que o óleo presente no reservatório seja introduzido no circuito. A injeção ocorre até que a quantidade previamente estipulada seja atingida, momento em que a válvula de óleo é fechada.

Na sequência, a válvula de carga de fluido refrigerante é acionada, iniciando o processo de enchimento do sistema. A recarga do fluido é feita exclusivamente pela linha de baixa pressão, assegurando um controle mais preciso e seguro da injeção. Durante essa etapa, a célula de carga monitora continuamente o peso do cilindro de gás, permitindo o controle da quantidade de fluido injetado. Quando o peso programado é alcançado, a válvula de carga é automaticamente fechada, finalizando o processo

4.3. TESTE DE VAZAMENTO

Além das funções principais de recuperação e recarga de fluido refrigerante, a máquina recicladora também desempenha papéis na manutenção preventiva e corretiva do sistema de ar-condicionado automotivo. Uma dessas funções é o teste de estanqueidade, que permite verificar a existência de vazamentos no sistema. Esse teste é realizado ao colocar o circuito em vácuo por meio da bomba da própria recicladora e, em seguida, monitorar a pressão interna por um determinado período. Caso haja um aumento gradual da pressão, isso indica a presença de ar entrando no sistema, geralmente causada por falhas em conexões, mangueiras ressecadas ou componentes defeituosos.

Esse procedimento é fundamental antes da recarga do fluido refrigerante, pois assegura a integridade do sistema e minimiza riscos operacionais. A realização do teste de estanqueidade reduz significativamente a chance de falhas futuras e evita o desperdício de gás refrigerante, o que, além de representar um prejuízo econômico, também causa impacto ambiental negativo. Após manutenções que exigem a desmontagem do sistema, esse teste se torna ainda mais relevante, pois permite identificar eventuais problemas na remontagem, como conexões mal ajustadas ou vedação inadequada de componentes.

4.4 ELIMINAÇÃO DE FLUIDOS NÃO CONDENSÁVEIS

Durante o processo de recuperação do fluido refrigerante, a estação de carga também realiza a separação dos gases não condensáveis, como o ar atmosférico, que podem ter entrado no sistema devido a vazamentos ou a manuseio inadequado durante manutenções anteriores. Esses gases não se condensam nas mesmas condições de temperatura e pressão que o fluido refrigerante, e por isso tendem a se acumular na parte superior do reservatório de armazenamento da máquina. Se não forem devidamente eliminados, podem comprometer a eficiência do sistema de ar-condicionado, provocando aumento de pressão, redução da capacidade de troca térmica e maior desgaste dos componentes.

Na parte traseira da estação de carga, há um manômetro conectado diretamente ao cilindro de armazenamento de fluido refrigerante, que permite ao operador monitorar a pressão interna do reservatório. Essa leitura pode ser

comparada com uma tabela de pressão e temperatura do fluido refrigerante em estado de saturação para avaliar a presença de gases não condensáveis. Se a pressão registrada no manômetro estiver acima do valor correspondente à temperatura ambiente indicada na tabela, isso indica a presença de gases indesejados, como o ar atmosférico, no reservatório.

Para evitar esses problemas, a estação de carga é equipada com uma válvula de purga manual, localizada na parte traseira do equipamento. Trata-se de uma válvula de abertura e fechamento rápido, que utiliza uma esfera interna para bloquear ou liberar o fluxo, permitindo que o operador descarregue periodicamente os gases não condensáveis acumulados e evitando que esses retornem ao sistema durante o processo de recarga. A purga deve ser realizada com o equipamento em repouso e com o reservatório em temperatura ambiente, garantindo que apenas os gases não condensáveis sejam expelidos, sem perda do fluido refrigerante líquido. Esse procedimento é fundamental para manter a pureza do refrigerante recuperado.

O protótipo foi desenvolvido com algumas adaptações visando à redução de custos, priorizando o aproveitamento de materiais disponíveis na oficina no momento da montagem. Em vez de utilizar uma estrutura tubular, como o desenhado inicialmente, os componentes fundamentais do sistema foram instalados sobre uma base construída com chapas metálicas reaproveitadas.

A estrutura foi dividida em dois lados: na parte frontal, encontram-se as válvulas solenoides responsáveis pelo controle do fluxo de gás no sistema, além do compressor, da bomba de vácuo, do filtro separador de óleo e dos reservatórios de óleo novo e usado. Essa disposição foi adotada para otimizar o acesso aos principais componentes, facilitando manutenções e para aproveitar os materiais disponíveis para a fabricação da estrutura.

Na parte traseira exibida na figura 27, estão posicionados o cilindro de gás com a balança utilizada para o controle da carga de fluido, a fonte de alimentação do sistema elétrico e um trocador de calor com um cooler acoplado, responsável por auxiliar na dissipação térmica durante o funcionamento do sistema.

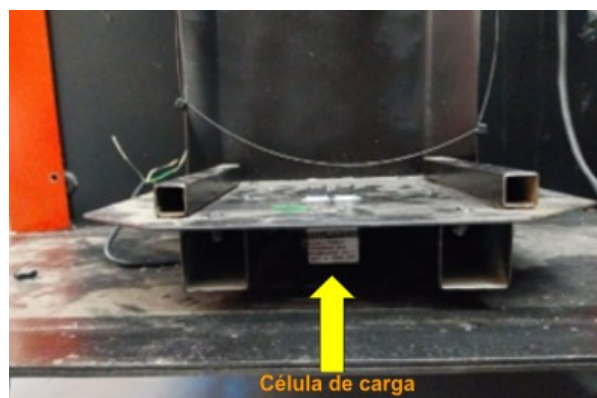
Figura 27- Parte traseira da máquina



Fonte: Autor (2025).

Para fixar a célula de carga da balança, foi confeccionada uma base rígida, na qual a célula é parafusada (figura 28). Sobre essa base, o cilindro de gás é posicionado, permitindo que o peso do conteúdo seja transmitido diretamente à célula de carga.

Figura 28 - Suporte da balança



Fonte: Autor (2025).

O sistema conta com um compressor de 1/3 HP para realizar o recolhimento do fluido refrigerante, e uma bomba de vácuo de 7 cfm. Para a montagem das tubulações internas, optou-se pela utilização de tubos de cobre, devido à sua disponibilidade, e à praticidade na realização das conexões. Já para as mangueiras externas de serviço, foram utilizadas mangueiras próprias para o gás refrigerante R-

134a. Na figura 29 podemos visualizar o sistema montado com os tubos de cobre e as mangueiras de serviço.

Figura 29 - Parte frontal da máquina



Fonte: autor (2025).

Os reservatórios de óleo novo e usado foram posicionados na parte externa da carenagem conforme a figura 30, com o objetivo de facilitar o acesso durante as operações de reabastecimento e descarte. Essa escolha se deve ao fato de que a carga de óleo novo precisa ser reposta com frequência, assim como o óleo usado deve ser descartado regularmente.

Figura 30 - Reservatório de óleo



Fonte: Autor (2025).

Para a carenagem da máquina, foi confeccionada uma capa utilizando chapas metálicas cortadas e dobradas de acordo com as dimensões e o contorno da estrutura, conforme a figura 31. Essas chapas foram fixadas por meio de parafusos à estrutura principal, com o objetivo de fechar o conjunto, proteger os componentes internos, e proporcionar um acabamento visual mais limpo. Além disso, a carenagem contribui para a segurança operacional, ao impedir o contato direto com partes elétricas do sistema.

Figura 31 - Carenagem



Fonte: Autor (2025).

A carenagem passou pelo processo de pintura com tinta anticorrosiva, visando proteger as superfícies metálicas contra a oxidação provocada por agentes ambientais, como umidade e produtos químicos, além de conferir um acabamento visual mais limpo e profissional. Após a secagem completa da pintura, as peças da carenagem foram fixadas na estrutura da máquina. Em seguida, foi realizada a instalação dos componentes externos, tais como os reservatórios de óleo, responsáveis pelo armazenamento e fornecimento de lubrificação ao sistema; as mangueiras de serviço, que possibilitam a conexão para operações de manutenção e carregamento de fluidos; e as válvulas manuais, que permitem o controle direto de determinados fluxos, facilitando intervenções operacionais e ajustes no sistema. A carenagem pronta e montada pode ser visualizada na figura 32.

Figura 32 - Máquina completa



Fonte: autor (2025).

Com o protótipo montado, foram realizados os primeiros testes para avaliação do desempenho da máquina e identificação de possíveis pontos de melhoria. O sistema elétrico foi avaliado exclusivamente quanto à sua funcionalidade, sendo considerado satisfatório por operar de forma estável, sem desligamentos ou perdas de conexão. A parte de controle também apresentou funcionamento adequado, sem ocorrência de falhas, bugs ou travamentos durante os testes. A interface gráfica demonstrou-se funcional e intuitiva, possibilitando a operação do equipamento de maneira simples por diferentes usuários.

Observou-se que a máquina apresentou uma dificuldade de movimentação devido ao peso elevado, tanto pela natureza dos seus principais componentes que são intrinsecamente pesados, como a bomba de vácuo, o compressor, o separador de óleo e o cilindro de armazenamento de fluido refrigerante, e também pelo uso de peças reaproveitadas na construção do protótipo, como chapas metálicas espessas e estruturas reforçadas. Esse conjunto de fatores dificulta a movimentação do equipamento, podendo comprometer sua mobilidade em ambientes de trabalho.

Para avaliar o desempenho das funções da máquina recicladora desenvolvida, foram definidos alguns parâmetros importantes para o uso do equipamento. Um dos critérios considerados foi o tempo de recolhimento do fluido

refrigerante, que está diretamente relacionado ao tamanho e à carga de gás do sistema em teste. Por isso, é fundamental comparar o desempenho com sistemas que utilizem quantidades semelhantes de fluido refrigerante.

Com base nisso, foram selecionados dois tipos de sistemas como referência para os testes: Sistema veicular de pequeno porte, com carga de gás próxima a 400 g, valor comum em veículos leves modernos. Sistema veicular de maior porte com carga de gás de aproximadamente 1,5 kg, típica em veículos como vans e micro-ônibus, que exigem maior capacidade de refrigeração devido ao maior volume interno.

O teste realizado foi o de precisão na carga de fluido refrigerante, com o objetivo de verificar se a quantidade de gás indicada pela máquina durante o processo de carga corresponde, de fato, à quantidade efetivamente transferida para o sistema. Para esse teste, foi utilizado um cilindro externo posicionado sobre uma balança de precisão conforme a figura 33, permitindo a medição direta do peso do fluido transferido. Ao comparar o valor registrado pela célula de carga da máquina com o peso medido pela balança, foi possível avaliar a exatidão do sistema de medição e controle da carga.

Figura 33 – Cilindro de teste



Fonte: autor (2025).

Os testes realizados com a estação de carga juntamente com o cilindro externo apresentaram valores medidos bem próximos do esperado. Inicialmente foram realizadas 10 medições para carga de 400 g de fluido. Os valores medidos na máquina e na balança para a carga de 400 g podem ser vistos na tabela 4.

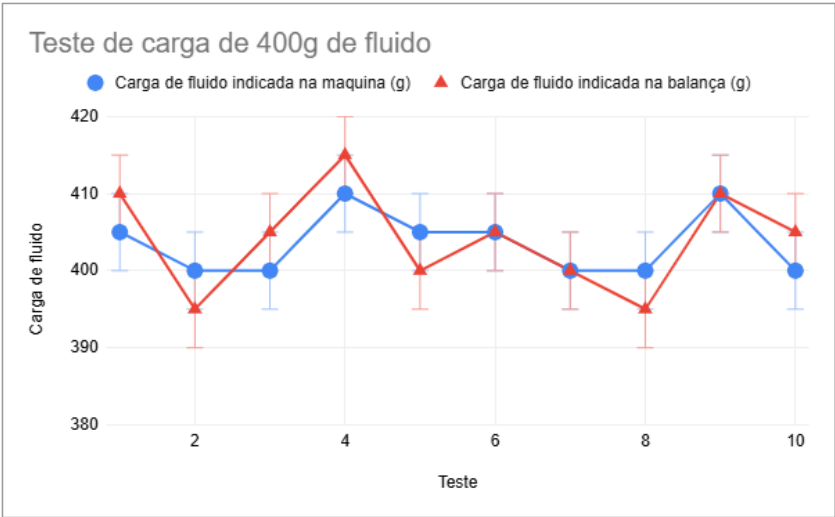
Tabela 4 - Teste com 400g de carga

Carga selecionada de 400g		
Teste	Carga de fluido indicada na maquina (g)	Carga de fluido indicada na balança (g)
1	405	410
2	400	395
3	400	405
4	410	415
5	405	400
6	405	405
7	400	400
8	400	395
9	410	410
10	400	405

Fonte: autor (2025).

A Figura 27 apresenta um comparativo das cargas de refrigerante medidas. Para as medições de carga de 400 g, os resultados indicaram erros máximos de 5 gramas entre o valor reportado pela máquina e o valor aferido pela balança de referência.

Figura 34 - Teste com carga de 400 g de carga



Fonte: autor (2025).

Após as 10 medições com 400 g de carga foram realizadas 10 medições com carga de 1500 g para avaliar o desempenho de carga em sistemas maiores. Os resultados estão na tabela 5.

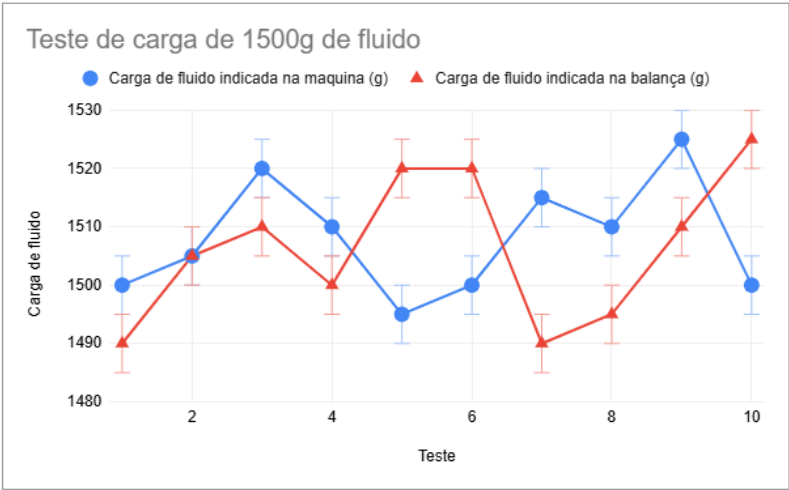
Tabela 5 - Teste com 1500 g de carga

Carga selecionada de 1500g		
Teste	Carga de fluido indicada na maquina (g)	Carga de fluido indicada na balança (g)
1	1500	1490
2	1505	1505
3	1520	1510
4	1510	1500
5	1495	1520
6	1500	1520
7	1515	1490
8	1510	1495
9	1525	1510
10	1500	1525

Fonte: autor (2025).

A Figura 28 ilustra a comparação entre as quantidades de refrigerante carregadas e as lidas pela estação de carga para cargas de 1500 g. Ao analisar as medições, observou-se que o erro máximo entre o valor indicado pela estação de carga e o peso real medido foi de 25 g, o que representa um erro menor que 7%.

Figura 35 - Teste com carga de 1500 gramas



Fonte: autor (2025).

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo modelar e construir uma máquina capaz de realizar os processos de recuperação, evacuação e recarga de fluido refrigerante e óleo em sistemas de condicionamento de ar automotivos. A partir do desenvolvimento teórico, do dimensionamento dos sistemas, da modelagem computacional e da construção do protótipo físico, verificou-se que todos os objetivos propostos foram integralmente alcançados.

Inicialmente, foi apresentado o princípio de funcionamento de uma estação de carga de fluido refrigerante para sistemas automotivos, detalhando os processos de recuperação, vácuo e recarga, bem como os componentes responsáveis pelo controle e transferência do fluido. O dimensionamento do sistema de carga foi conduzido com base em normas vigentes e compatibilidade com o fluido R-134a.

A modelagem tridimensional dos componentes no programa SolidWorks possibilitou o refinamento do projeto, permitindo a visualização integrada dos subsistemas e facilitando a etapa de montagem do protótipo. A construção física da máquina incorporou dispositivos de controle, válvulas, sensores e conexões apropriadas para o manuseio seguro do fluido refrigerante e do óleo lubrificante. O protótipo obtido demonstrou capacidade funcional nos testes, sendo capaz de realizar os processos de recuperação, vácuo, injeção de óleo, e recarga de fluido refrigerante, além de contar com uma interface de operação simples e intuitiva.

Os testes experimentais de medição de massa de fluido refrigerante durante o processo de recarga foram conduzidos, apresentando uma diferença máxima de apenas 25 gramas em relação à massa medida por uma balança auxiliar para cargas de 1500 gramas e 5 gramas de diferença para cargas de 400 gramas.

Dessa forma, conclui-se que o protótipo desenvolvido é funcional, cumprindo os objetivos estabelecidos e demonstrando potencial de aplicação prática em oficinas e laboratórios de manutenção automotiva. Além de validar o conceito proposto, o trabalho contribui para o avanço do conhecimento na área de sistemas de serviço de ar-condicionado automotivo nacional.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a implementação de um sistema de análise da pureza do fluido refrigerante após as etapas de recuperação e filtragem, em conformidade com a norma SAE J2099, que estabelece critérios de

verificação de contaminantes, umidade e gases não condensáveis. Essa análise permitirá avaliar a eficácia do processo de separação e garantir que o fluido recuperado atenda aos requisitos de qualidade e desempenho para reutilização. Além disso, recomenda-se incorporar recursos de comunicação sem fio, como Wi-Fi ou Bluetooth, possibilitando a integração da unidade de carga com computadores, tablets ou aplicativos móveis, de forma a facilitar o controle remoto e o registro automático de dados.

REFERÊNCIAS

AIR-CONDITIONING, HEATING, AND REFRIGERATION INSTITUTE (AHRI). **Standard 740: Performance Rating of Refrigerant Recovery Equipment**. Arlington, VA, 2016.

BARBER, A.. **Pneumatic Handbook**. 8 th edition. Oxford: Elsevier Science & Technology Books, 1997.

BAXTER, M. R. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. 2. ed. rev. Tradução de Itrio Ilda. São Paulo: Blucher, 2000. 5. reimpressão, 2008. (Título original: Product design: a practical guide to systematic methods of new product development).

BOSCH. Recicladoras de ar-condicionado automotivo. Disponível em: <https://am.boschaftermarket.com/br/pt/equipamentos/equipamentos-de-teste/recicladoras-de-ar-condicionado/>. Acesso em: 7 nov. 2025.

BRILEY, G.. 2004, **A History of refrigeration**. Ashrae Journal, v. 46, n. 11, p. 31-34.

CALM, J.. 2008, The next generation of refrigerants – Historical review, considerations, and outlook. **International journal of refrigeration**. v. 31, n. 7, p. 1123-1133.

CORDOVA, G.M., DA SILVA, D.L., 2017, **Mathematical Model of an Automotive Air-Conditioning System under Steady-State Conditions**, 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2017, (10.26678/ABCM.COBEM2017.COB17-0367)

DA SILVA, D.L, DE OLIVEIRA, I.S., JULIANI, A.D.P., CORDOVA, G.M., 2024, **Automotive air-conditioning system thermal performance assessment: an experimental approach combining first and second laws of thermodynamics**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 46, n. 12, p. 703, 2024 (<https://doi.org/10.1007/s40430-024-05283-1>).

DA SILVA, D.L., 2008, **Análise teórico-experimental da expansão transcritical de dióxido de carbono em tubos capilares adiabáticos**, **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

DA SILVA, GOEDERT, J., HERMES C.J.L, GALVAO, I., 2019, **Evaluation of the Thermal Performance of Forced Condensers for Bus Air-Conditioning Systems**, Proceedings of the 25th International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2019 (10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-0522)

DA SILVA, D.L., MELO, C., 2016, **A Perspective on R&D&I Activities in the Brazilian Mobile Air Conditioning Market**, In Proceedings of the 16th Brazilian

Congress of Thermal Sciences and Engineering, ENCIT 2016, (10.26678/ABCM.ENCIT2016.CIT2016-0650).

DİNÇER, Ibrahim; KANOĞLU, Mehmet. **Refrigeration systems and applications**. 2 th Edition. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2010.

FAJAR, Berkah; PANCA, Delta; WICAKSONO, Guawan. Unsteady exergy analysis for a recycle and recovery machine. **International journal of refrigeration**. v.87, p. 1-9, 2018.

MILLER, Rex. **Air conditioning and refrigeration**. New York: McGraw-Hill, 2006.

PARK, Won Young; SHAH, Nihar; VINE, Edward; BLAKE, Patrick; HOLUJ, Brian; KIM, James Hyungkwan; KIM, Dae Hoon. Ensuring the climate benefits of the Montreal protocol: Global governance architecture for cooling efficiency and alternative refrigerants. **Energy Research & Social Science**. v. 76, p. 102068, 2021.

TAGUCHI, G., CHOWDHURY, S., & WU, Y. (2005). **Taguchi's Quality Engineering Handbook**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

UNEP (United Nations Environment Programme). HFCs: **A Critical Link in Protecting Climate and the Ozone Layer**. 2011. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/hfcs-critical-link-protecting-climate-and-ozone-layer>

XU, Jiu; HRNJAK, Pega. Impinging oil separator for compressors. **International Journal of Refrigeration**. v119, p. 110-118, 2020.

HALDERMAN, J. D. ; MITCHELL Jr., C. D., **Automotive heating and air conditioning**. 8. ed. Boston: Pearson, 2017

WANG, Shan K. **Handbook of air conditioning and refrigeration**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

LEE, Yohan; JUNG, Dongsoo. A brief performance comparison of R1234yf and R134a in a bench tester for automobile applications. **Applied Thermal Engineering**. v. 35, p. 240-242, 2012.

WHITMAN, Bill; JOHNSON, Bill; TOMCZYK, John; SILBERSTEIN, Eugene. **Refrigeration and air conditioning technology**. 9. ed. Boston: Cengage Learning, 2020.

ÇENGEL, Yunus A; BOLES, Michael A; KANOĞLU, Mehmet. **Thermodynamics: an engineering approach**. 9th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.

SAE INTERNATIONAL. SAE J2099: **Standard of Purity for Recycled R-134a (HFC-134a) and R-1234yf (HFO-1234yf) for Use in Mobile Air-Conditioning Systems**. Warrendale, PA: SAE International, 2011.

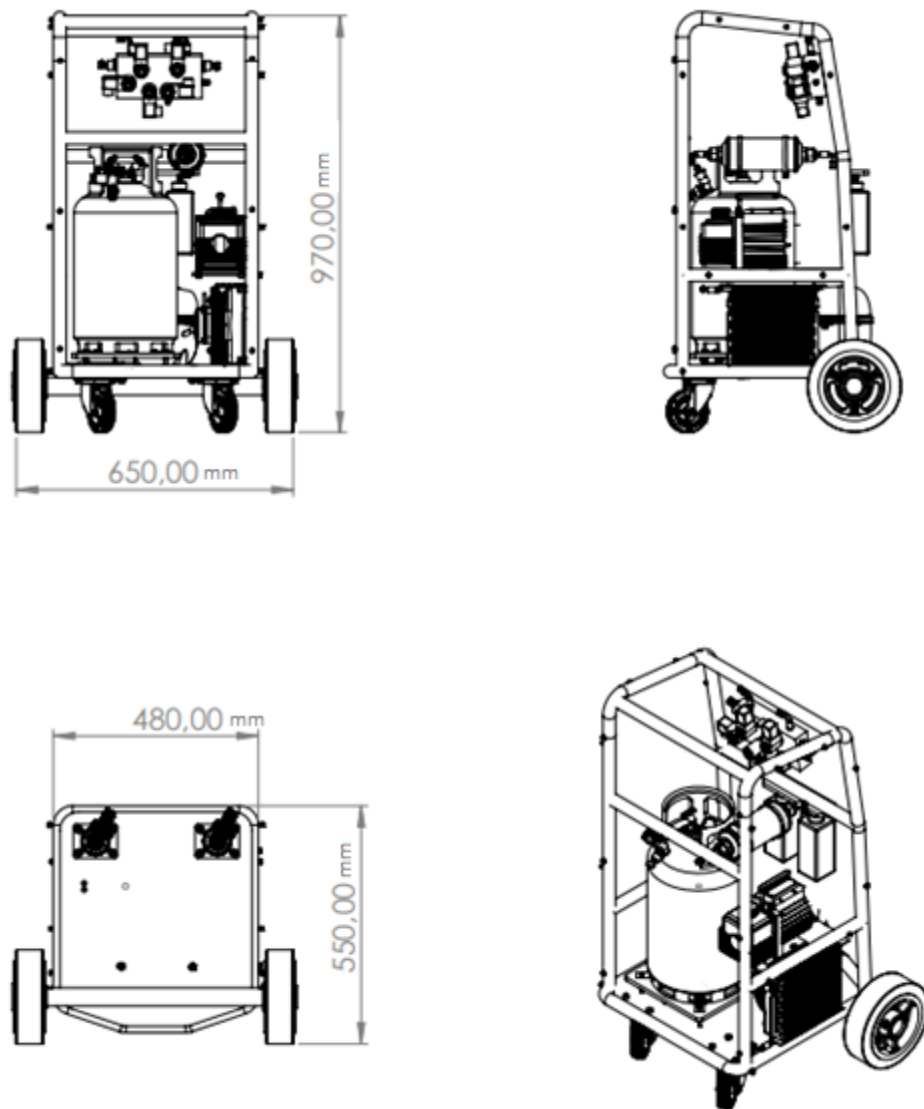
SONNTAG, R. E; BORGNAKKE, C; VAN WYLEN, G. J. ***Fundamentos da Termodinâmica***. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

ELETRONIK LV. *Célula de carga 50 kg*. Disponível em: <https://eletroniklv.com.br/image/cache/catalog/products/CELULADECARGA50KGS-1000x1000.png>. Acesso em: 20 out. 2025.

APÊNDICE A

A Figura 36 mostra o desenho técnico do protótipo da estação de carga de fluidos refrigerantes para sistemas automotivos, desenvolvido neste trabalho, onde são apresentadas as vistas do equipamento, bem como suas principais dimensões externas.

Figura 36 - Desenho técnico do protótipo da estação de carga

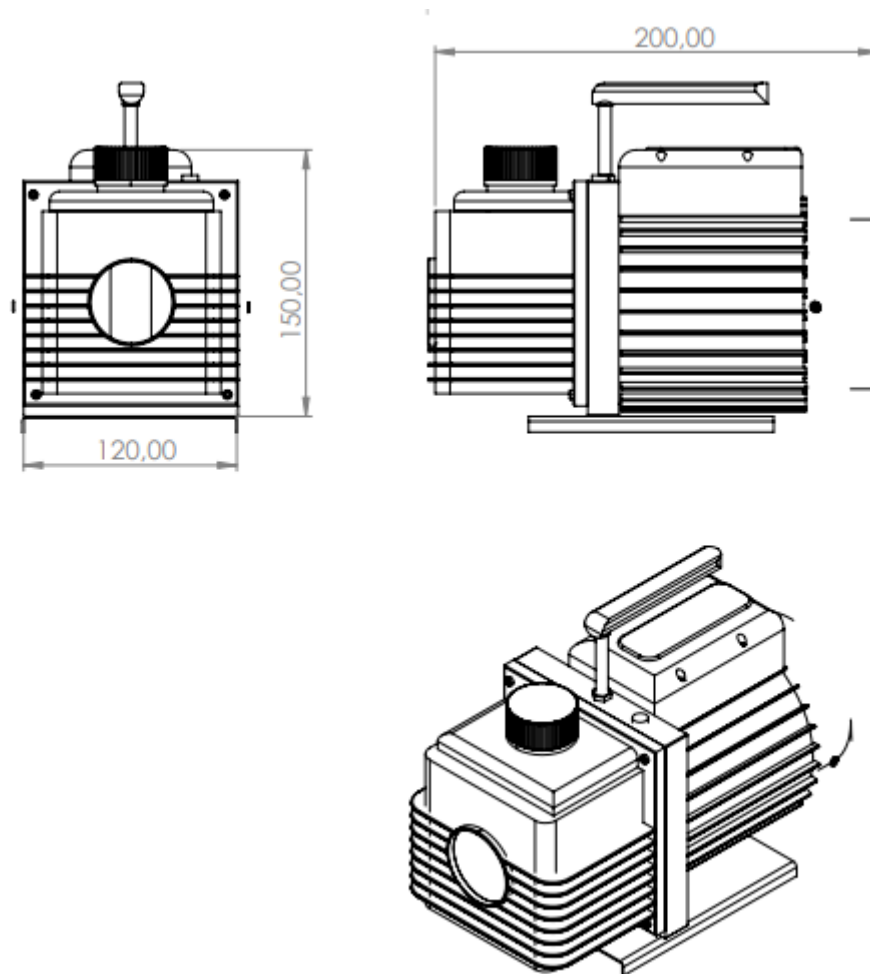


Fonte: autor (2025).

APÊNDICE B

A Figura 37 mostra o desenho técnico da bomba de vácuo utilizada no projeto com suas principais dimensões.

Figura 377 - Desenho técnico da bomba de vácuo

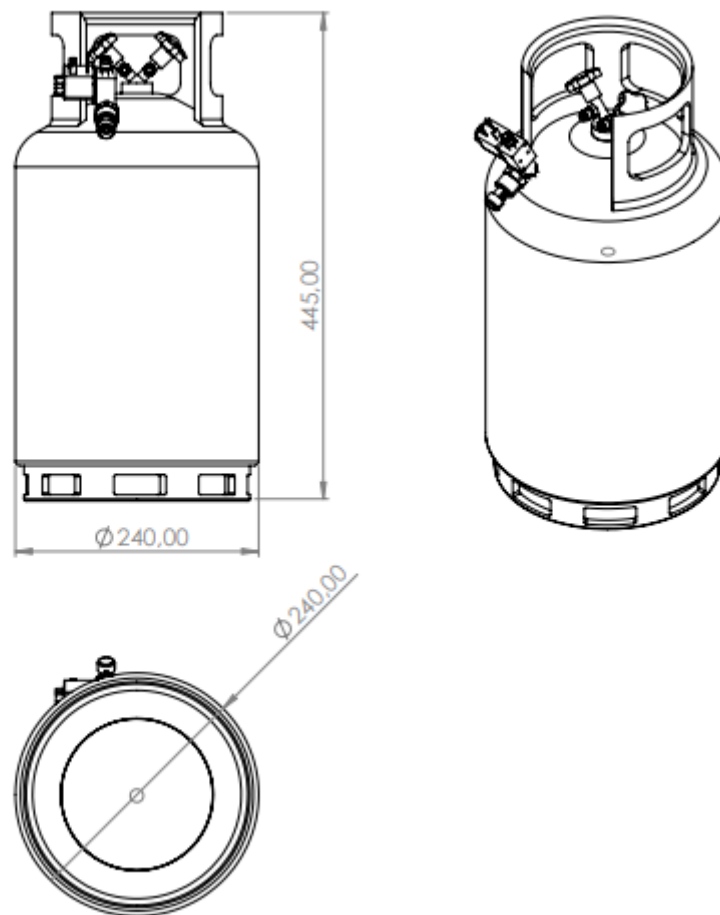


Fonte: autor (2025).

APÊNDICE C

A Figura 38 mostra o desenho técnico do cilindro de armazenamento de fluido utilizado no projeto com suas principais dimensões.

Figura 388 - Desenho técnico do reservatório de fluido

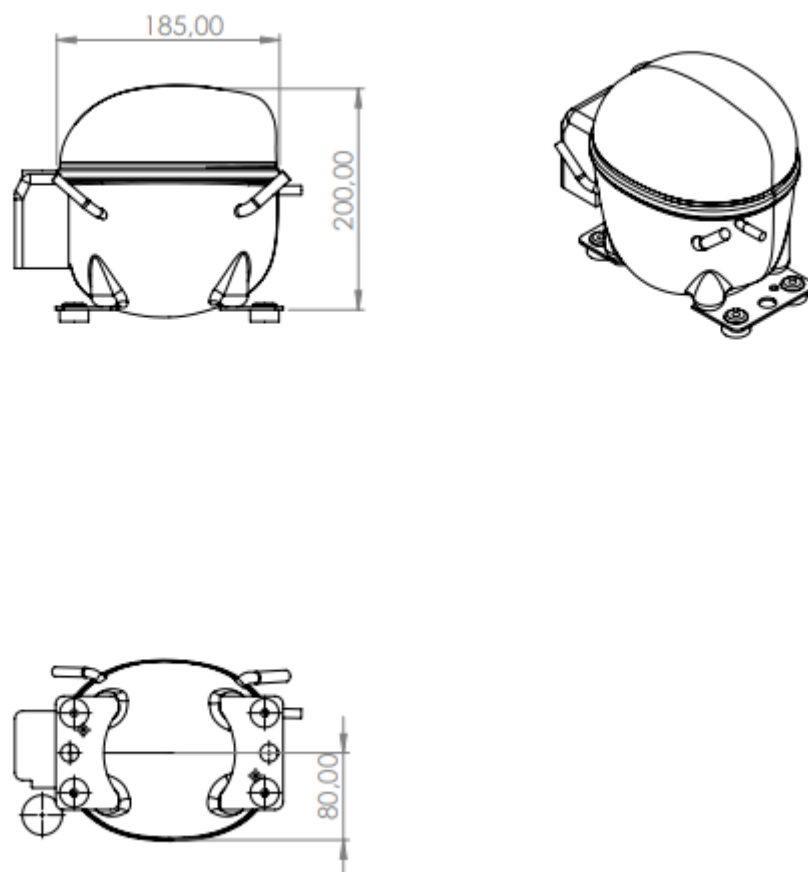


Fonte: autor (2025).

APÊNDICE D

A Figura 39 mostra o desenho técnico do compressor hermético utilizado no projeto com suas principais dimensões.

Figura 399 - Desenho técnico o compressor hermético



Fonte: autor (2025).