



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

IGOR SANTOS DE OLIVEIRA

**DETECÇÃO PREDITIVA DE FALHAS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE
CONTÊINERES COM ÊNFASE EM VAZAMENTOS DE CARGA DE FLUIDO
REFRIGERANTE**

Joinville

2025

IGOR SANTOS DE OLIVEIRA

**DETECÇÃO PREDITIVA DE FALHAS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE
CONTÊINERES COM ÊNFASE EM VAZAMENTOS DE CARGA DE FLUIDO
REFRIGERANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenheiro naval.

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

Joinville

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.

Dados inseridos pelo próprio autor.

De Oliveira, Igor Santos

Detecção preditiva de falhas em sistemas de refrigeração de contêineres com ênfase em vazamentos de carga de fluido refrigerante. / Igor Santos De Oliveira ; orientador, Diogo Lôndero Da Silva, 2025.

71 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Contêiner refrigerado. 3. Carga de fluido refrigerante. 4. Manutenção preditiva. 5. Tomada de decisão. I. Da Silva, Diogo Lôndero. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval. III. Título.

IGOR SANTOS DE OLIVEIRA

Detecção preditiva de falhas em sistemas de refrigeração de contêineres com ênfase em vazamentos de carga de fluido refrigerante.

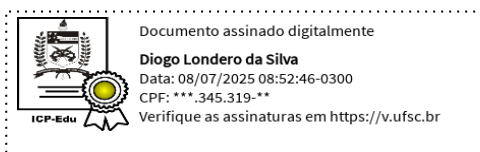
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro naval e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Naval.

Local Joinville, 25 de Junho de 2025.



Coordenação do Curso

Banca examinadora



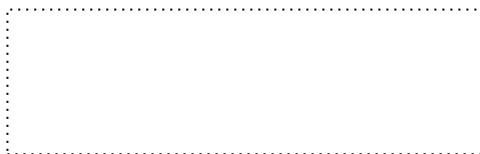
Prof. Diogo Lôndero da Silva, Dr.(a)

Orientador



Prof.(a) Luis Fernando Peres Calil, Dr.(a)

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.(a) Vitor Takashi Endo, Dr.(a)

Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais, por me guiarem, confiarem e sempre me incentivarem durante minha jornada. A todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me permitido superar todas as dificuldades e todos os obstáculos que surgiram durante a minha jornada para a elaboração deste trabalho.

Sou eternamente grato à minha mãe, Maria de Fátima S. S. Oliveira, e ao pai, Luiz Carlos Abreu de Oliveira, por sempre acreditarem em mim, e pelas sempre sábias palavras de coragem e perseverança, essenciais para seguir em frente e atingir meus objetivos.

Meus irmãos Yan Lucas e Iago, por acreditar que sou capaz de grandes conquistas. Ao meu orientador, Prof. Dr. Diogo Lôndero da Silva, pelos ensinamentos, paciência, ajuda e por estar sempre disposto a contribuir com excelência no meu aprendizado e formação profissional.

Aos meus professores do curso de Engenharia Naval da UFSC, pela excelência no aprendizado e por contribuir na minha formação profissional.

Aos meus amigos da UFSC, pelo compartilhamento de momentos alegres, pelas palavras amigas nas horas difíceis, pelo auxílio nos trabalhos e principalmente por estarem comigo nesta caminhada, tornando-a mais fácil e agradável.

A todos os profissionais da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por contribuírem, mesmo que de forma indireta, no meu aprendizado.

Enfim, a todos que de alguma forma tornaram este caminho mais fácil de ser percorrido.

“Se queres vencer o mundo inteiro, vence-
te a ti mesmo.”
(Fiódor Dostoiévski).

RESUMO

No contexto marítimo, a refrigeração surge da necessidade de transportar cargas perecíveis, mantendo suas características de qualidade por mais tempo durante as longas viagens. Inicialmente, o alto custo financeiro da refrigeração tornou a sua utilização inviável, mas, com os avanços tecnológicos e a crescente demanda das viagens marítimas europeia, durante século XIX, permitiu contornar esse problema. Nesse caso, a evolução desses sistemas e a especialização das embarcações levaram à consolidação do transporte por contêineres refrigerados, especialmente em navios de múltiplos propósitos. Entretanto, os sistemas de refrigeração são suscetíveis a falhas, tais como a parada de algum componente ou vazamento da carga de fluido refrigerante. Para evitar esse tipo de situação, é necessária a utilização de sistemas altamente confiáveis que minimizem a possibilidade de danos à carga e prejuízos financeiros. Diante desse contexto, o objetivo do presente trabalho é propor um método preditivo para a identificação de falhas em sistemas de refrigeração utilizados em contêineres refrigerados, com ênfase na detecção de vazamentos de fluidos refrigerantes. Para tanto, no laboratório de refrigeração Veicular, ReVe, localizado no campus Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina, foi implementado um modelo computacional para a detecção de vazamento de fluido refrigerante. O aparato experimental utilizado consiste em um sistema de produção de frio instrumentado. Os dados experimentais foram empregados para validação do modelo, que permitiu prever a carga de fluido refrigerante com erros máximos de $\pm 7\%$ em relação a carga real. Um método capaz de prever vazamentos de fluido refrigerante em contêineres refrigerados antes que eles comprometam a capacidade de refrigeração oferece vantagens significativas para a operação e conservação de cargas sensíveis à temperatura. A principal vantagem é a possibilidade de realizar manutenções preventivas de forma mais eficiente, evitando falhas no sistema que poderiam resultar na perda total da carga transportada. O método também aumenta a vida útil dos equipamentos, minimiza custos operacionais com reparos.

Palavras-chave: Contêiner refrigerado; Manutenção preditiva; Carga de fluido refrigerante; Tomada de decisão.

ABSTRACT

In the maritime context, refrigeration arises from the need to transport perishable cargo, maintaining its quality characteristics for longer during long voyages. Initially, the high financial cost of refrigeration made its use unfeasible, but technological advances and the growing demand for European sea travel during the 19th century made it possible to overcome this problem. In this case, the evolution of these systems and the specialization of vessels led to the consolidation of transport by refrigerated containers, especially in multi-purpose vessels. However, refrigeration systems are susceptible to failures, such as the failure of a component or leakage of the refrigerant load. To avoid this type of situation, it is necessary to use highly reliable systems that minimize the possibility of damage to the cargo and financial losses. Given this context, the objective of this work is to propose a predictive method for identifying failures in refrigeration systems used in refrigerated containers, with an emphasis on detecting refrigerant leaks. To this end, a computational model for detecting refrigerant leaks was implemented at the ReVe Vehicle Refrigeration Laboratory, located at the Joinville campus of the Federal University of Santa Catarina. The experimental apparatus used consists of an instrumented cold production system. The experimental data were used to validate the model, which allowed the refrigerant load to be predicted with maximum errors of $\pm 7\%$ in relation to the actual load. A method capable of predicting refrigerant leaks in refrigerated containers before they compromise the refrigeration capacity offers significant advantages for the operation and conservation of temperature-sensitive cargo. The main advantage is the possibility of performing preventive maintenance more efficiently, avoiding system failures that could result in the total loss of the transported cargo. The method also increases the useful life of the equipment and minimizes operational costs with repairs.

Keywords: Refrigerated container; Predictive maintenance; Refrigerant charge; Decision making.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Refrigeração do contêiner refrigerado apresentando a circulação de ar interno.	20
Figura 2 - Circuito do sistema de refrigeração de um contêiner refrigerado.....	22
Figura 3 - Compressor de um contêiner refrigerado.....	23
Figura 4 - Unidade condensadora de um contêiner refrigerado.	24
Figura 5 - Evaporador de um contêiner de refrigeração.....	25
Figura 6 - Válvula de expansão termostática.	26
Figura 7 - Visor de informações de contêiner refrigerado.	27
Figura 8 - Modelos de tomada de decisão e métodos de detecção de falhas.....	29
Figura 9 - Componentes do aparato experimental.	35
Figura 10 - Diagrama da posição de instalação dos transdutores.....	36
Figura 11 - Interface o programa de aquisição de dados.	39
Figura 12 – Principais causas de falhas encontradas em contêineres refrigerados com o vazamento de fluido refrigerante	48
Figura 13 – Principais tipos de falhas em contêineres refrigerados.	49
Figura 14 - Diagrama de Ishikawa para a identificação de causas de vazamentos de fluido refrigerante.	51
Figura 15 - Fluxograma para identificação da causa da falha.....	53
Figura 16 - Base de dados experimentais	55
Figura 17 – Estimativa da massa do lado alto do sistema para o título igual a zero.	56
Figura 18 – Curva varrendo relações de carga para estimar a região que melhor representa a distribuição de cargas no sistema.	57
Figura 19 – Erros em condições experimentais.	58
Figura 20 – A massa de refrigerante no lado de baixa pressão em função do superaquecimento.....	59
Figura 21 – A massa de refrigerante no lado de alta pressão em função do subresfriamento.....	60
Figura 22 – Variação de carga de fluido refrigerante utilizando os parâmetros para compressor de velocidade fixa	61
Figura 23 – Regressão para estimar os parâmetros ajustados.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Lista de códigos de alarme do controlador.....	28
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Plano experimental.....	40
Tabela 2 - Parâmetros do Sistema.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ESS	Engineering Equation Solver
k_{ch}	Constante do sistema da região de subresfriamento dividida pela massa do sistema
k_{sc}	Constante do sistema da região de subresfriamento
k_{sh}	Constante do sistema da região de superaquecimento
$\frac{k_{sh}}{sc}$	Constante do sistema do sistema da região de superaquecimento dividida pela constante k_{sc}
k_x	Constante do sistema do título na entrada do evaporador
$\frac{k_x}{sc}$	Constante do sistema do título na entrada do evaporador dividida pela constante k_{sc}
m_{hs}	Carga de fluido refrigerante na região de alta pressão
$m_{hs,0}$	Carga de fluido refrigerante na região de alta pressão na condição de saturação
$m_{hs,padrão}$	Carga de fluido refrigerante na região de alta pressão na condição nominal
m_{ls}	Carga de fluido refrigerante na região de baixa pressão
$m_{ls,0}$	Carga de fluido refrigerante na região de baixa pressão na condição de saturação
$m_{ls,padrão}$	Carga de fluido refrigerante na região de baixa pressão na condição nominal
m_{total}	Carga de fluido refrigerante do sistema total
$m_{total,padrão}$	Carga de fluido refrigerante do sistema total na condição nominal
TEU	Unidade Equivalente de vinte pés (<i>Twenty-Foot Equivalent Unit</i>)
T_{sc}	Temperatura de subresfriamento
$T_{sc,padrão}$	Temperatura de subresfriamento na condição nominal
T_{sh}	Temperatura de superaquecimento
$T_{sh,padrão}$	Temperatura de superaquecimento na condição nominal
$X_{sc,0}$	Título na entrada do evaporador para condição de saturação no condensador
X_{evap}	Título na entrada do evaporador
$X_{evap,in,padrão}$	Título na entrada do evaporador na condição nominal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivo Geral.....	18
1.1.2	Objetivo Específicos.....	18
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE CONTÊINERES REFRIGERADOS ..	21
2.1.1	Compressor de um contêiner refrigerado	22
2.1.2	Unidade condensadora e evaporador	23
2.1.3	Dispositivo de expansão	25
2.1.4	Painel de controle e coleta de dados do contêiner refrigerado	26
2.2	DETECÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS REFRIGERADOS E MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO	28
2.2.1	Detecção de falhas em sistema de refrigeração de contêineres	31
3	METODOLOGIA	34
3.1	TRABALHO EXPERIMENTAL	34
3.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	40
3.3	MODELO COMPUTACIONAL	41
4	RESULTADOS	47
4.1	PRINCIPAIS TIPOS DE FALHAS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE CONTÊINERES.	47
4.2	PROCEDIMENTO PARA IDENTIFICAÇÃO DAS CAUSAS ASSOCIADAS AO VAZAMENTO DE FLUIDO REFRIGERANTE	50
4.3	RESULTADOS DO MODELO COMPUTACIONAL.....	54
4.3.1	Obtenção dos parâmetros do modelo matemático com base em dados experimentais	54
4.3.2	Determinação da quantidade de fluido refrigerante perdida devido ao vazamento.....	59
5	CONCLUSÕES.....	62
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64

APÊNDICE A.....	67
APÊNDICE B.....	68

1 INTRODUÇÃO

No contexto marítimo, a refrigeração surgiu como uma necessidade da preservação de mantimentos perecíveis durante as viagens e na busca de prolongar a qualidade dos alimentos pelo maior tempo possível. No entanto, devido aos elevados custos envolvidos durante o transporte marítimo tornavam inviável a refrigeração das cargas, apenas no final do século XIX e início do século XX com a demanda crescente do mercado europeu, que os armadores observaram a viabilidade de atender esse mercado (Dellacasa, 1987).

Visando atender o mercado europeu, com o passar dos anos ocorreu a intensificação e o avanço da tecnologia utilizada para transporte marítimo refrigerado, desenvolvendo diferentes tipos de sistemas de refrigeração e aderindo a diversos fluidos refrigerantes. Posteriormente, consolidou-se a tendência da containerização das mercadorias com ênfase nas embarcações porta-contêineres com a evolução dos sistemas de refrigeração e a especialização das embarcações (Dellacasa, 1987).

No comércio internacional, o transporte de contêineres se destaca como o meio mais difundido, oferecendo vantagens com a redução do risco de danos às mercadorias durante a viagem e a minimização do transporte nas operações portuárias (Złoczowska, 2018). Nesse sentido, a Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD) (2025) relata que o transporte marítimo é responsável por mais de 80% do comércio internacional, sendo o principal modal utilizado para o transporte de cargas devido à sua elevada capacidade e eficiência.

Desta forma, a movimentação de carga refrigeradas utilizando-se dos contêineres se justifica devido à unitarização das mercadorias, permitindo a incorporação de módulos de refrigeração juntamente a unidades de transporte, melhorando o controle da qualidade da mercadoria durante o transporte, passando pelo fornecedor até o destinatário final; enfrentando condições climáticas diversas e alteração dos modais durante o fretamento. Esse transporte refrigerado é amplamente utilizado para produtos sensíveis à temperatura, que consistem, predominantemente, em alimentos e produtos farmacêuticos (Castelein *et al.*, 2020).

Em geral, as unidades utilizadas para o condicionamento e refrigeração dos contêineres atuais apresentam o funcionamento do sistema fundamentados no princípio da compressão mecânica de vapor para a produção de frio, realizando o

acompanhamento e controle das condições de operação do contêiner de forma direta pelo operador. As aplicações que utilizam o transporte refrigerado por contêineres são amplas e, devido a esse motivo, os parâmetros de operação são selecionados com base no tipo de carga transportada, tempo de deslocamento e no serviço destinado à unidade de básica de refrigeração (Carrier, 2024).

Assim, destaca-se a importância dos sistemas refrigerados para garantir a conservação adequada das cargas perecíveis e torna-se necessário a implementação de sistemas altamente eficientes e confiáveis. Złoczowska (2018) relata que, durante o transporte existe a necessidade de evitar prejuízos financeiros, em decorrência de falhas em componentes essenciais para o funcionamento do sistema de refrigeração em contêineres, tais como a parada de algum componente ou vazamento da carga de fluido refrigerante.

Os componentes dos sistemas de refrigeração dos contêineres são equipados com transdutores que possibilitam o monitoramento contínuo durante o trajeto. Esses dispositivos são conectados a um painel de coleta de dados, que podem ser utilizados para identificação de um conjunto de problemas previamente programados no sistema de refrigeração (Carrier, 2024).

Com base nas informações obtidas de cada componente, é possível coletar e monitorar os dados de temperatura, pressão, umidade relativa, entre outros, viabilizando o tratamento e análise dos dados para verificar as condições de funcionamento. Assim, possibilitando a caracterização dos componentes do sistema de refrigeração, permitindo a análise e a modelagem da condição operacional do sistema e avaliação analítica e/ou computacional de cada componente (Pereira *et al.*, 2015).

Atualmente, o monitoramento dos dados é realizado manualmente por operadores, por meio de coletas periódicas diretamente nos contêineres. Esse método, além de exigir uma vultosa soma de trabalho, expõe o trabalhador a eventuais riscos e situações inoportunas, além disso permite identificar apenas os problemas que já aconteceram, não detectando falhas em tempo hábil para manutenção preventiva do sistema. Nesse sentido, há uma tendência na demanda por qualidade, confiabilidade e segurança dos processos de refrigeração que tem impulsionado o desenvolvimento de diversas técnicas para a detecção de falhas, visando garantir a eficiência operacional e minimizar os riscos associados a falhas inesperadas em sistemas complexos (Perreira et al., 2015).

De acordo com Złoczowska (2018), embora os contêineres refrigerados sejam projetados para oferecer elevada confiabilidade e reduzir prejuízos decorrentes de falhas, as condições operacionais adversas às quais estão sujeitos favorecem o surgimento de problemas técnicos. Entre os incidentes mais recorrentes, destacam-se os vazamentos de fluido refrigerante, que representam mais de 50% dos casos analisados. Esses dados reforçam a importância de estratégias eficazes de monitoramento e diagnóstico, uma vez que tais falhas comprometem diretamente a eficiência e a funcionalidade dos sistemas de refrigeração.

A detecção preditiva das falhas permite a adoção de medidas corretivas antes que falhas mais severas ocorram, evitando prejuízos a mercadoria e prejuízos e financeiros, além de contribuir para a melhoria desempenho energético e para a redução de impactos ambientais associados ao mau funcionamento dos sistemas. Diante da importância desse contexto, este trabalho propõe os seguintes objetivos:

1.1 OBJETIVOS

Para resolver a problemática associada à perda de carga de fluido refrigerante durante o transporte de contêineres refrigerados, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um método preditivo para a identificação de falhas em sistemas de refrigeração utilizados em contêineres refrigerados, com ênfase na detecção de vazamentos de fluidos refrigerantes.

1.1.2 Objetivo Específicos

- Identificar as técnicas de detecção de falhas e métodos de tomada de decisão;
- Investigar os principais tipos de falhas em sistemas de refrigeração de contêineres;
- Propor um procedimento para identificação de causas relacionadas ao vazamento de fluido refrigerante em contêineres refrigerados detecção e correção de falhas nos sistemas de refrigeração;

- Implementar e validar um modelo computacional para detecção de falhas por vazamentos de fluido refrigerante;
- Empregar o modelo para identificar o comportamento de variáveis que indicam o vazamento de fluido refrigerante.

1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, organizados de forma a apresentar de maneira progressiva o desenvolvimento do estudo, desde sua contextualização até as conclusões obtidas.

No primeiro capítulo, é realizada a introdução ao tema, apresentando uma contextualização histórica sobre a evolução dos sistemas de geração de frio no contexto marítimo, abordando os principais marcos desde a origem desses sistemas até a especialização das embarcações e a disseminação da containerização. Abordando sobre a necessidade de sistemas de refrigeração confiáveis, relacionando à coleta de dados, assim como à detecção e identificação de falhas. Ao final do capítulo, são apresentados os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo, referente à revisão bibliográfica, são apresentados os principais conceitos e componentes relacionados aos sistemas de refrigeração utilizados em contêineres. Adicionalmente, são apresentados os métodos empregados para a detecção de falhas que podem ser utilizados em contêineres.

No capítulo três, é descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo. Este capítulo inclui o equacionamento do modelo computacional para detecção do vazamento de fluido refrigerante em sistemas de refrigeração. Após isso, é apresentado os procedimentos de implementação do modelo, as condições experimentais e o método de aquisição dos dados experimentais.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados, abordando o procedimento adotado para a identificação dos tipos de falhas, a detecção de falhas em sistemas de refrigeração de contêineres refrigerados e o desenvolvimento do modelo proposto com base nos dados coletados.

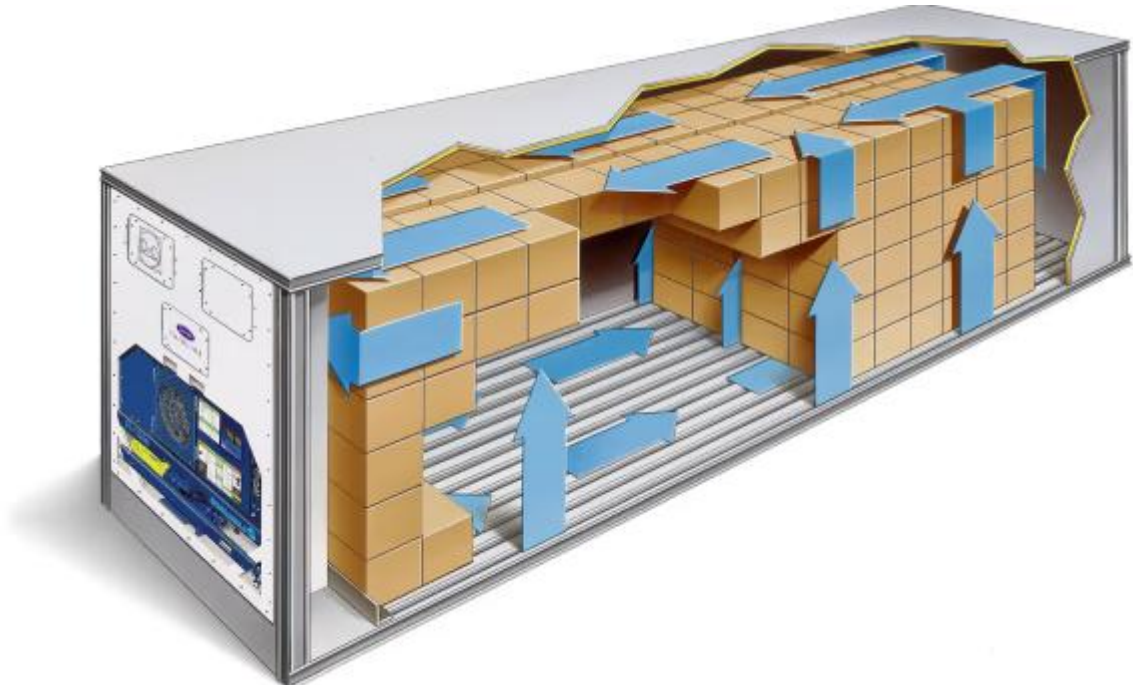
Por final, o capítulo cinco apresenta as conclusões do trabalho, destacando os principais resultados e contribuições da pesquisa, além de apresentar sugestões para estudos futuros relacionados ao tema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os contêineres refrigerados são utilizados no transporte intermodal mundialmente, visando garantir a manutenção da qualidade da carga de alimentos e materiais sensíveis à temperatura durante todo o transporte (Günaydın *et al.*, 2021). Sendo composto por uma unidade de refrigeração, que apresenta autonomia em operação e por uma de armazenamento, podendo apresentar o tamanho de 1 ou 2 *Twenty-Foot Equivalent Unit (TEU)*, unidade equivalente a vinte pés, o que corresponde a um valor aproximado de 6 ou 12 metros, respectivamente.

A Figura 1 apresenta o interior de um contêiner refrigerado e o sistema de refrigeração, o qual é conectado ao painel de informações do contêiner. Devido à construção em bloco único, também são utilizados no transporte de cargas valiosas, tanto por terra quanto por mar, pois apresentam maior confiabilidade no sistema (Günaydın *et al.*, 2021).

Figura 1 – Refrigeração do contêiner refrigerado apresentando a circulação de ar interno.



Fonte: GCS referer (2013).

2.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE CONTÊINERES REFRIGERADOS

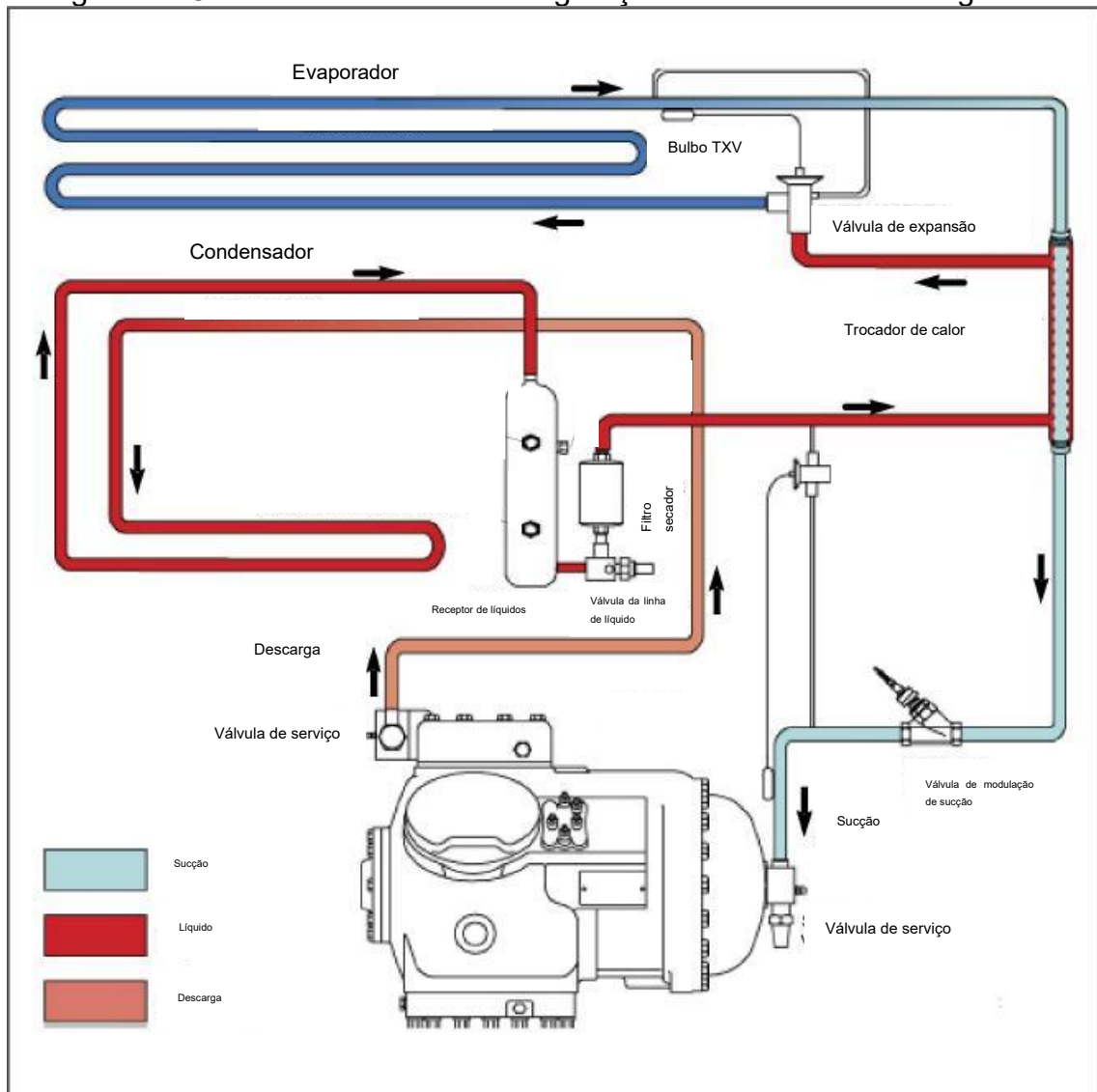
O sistema de refrigeração utilizado em contêineres refrigerados é baseado no princípio da compressão mecânica de vapor e por conta disso, para efeitos de análise, pode ser representado no ciclo termodinâmico pelos quatro componentes principais: o compressor, a válvula de expansão, o evaporador e o condensador. Além desses, também se fazem necessários outros componentes essenciais para o funcionamento tais como, conectores do sistema, tubulação, transdutores, baterias, entre outros (Fisher, 2022).

No sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor, o compressor é o componente responsável por promover a vazão mássica mediante um processo contínuo de compressão do fluido refrigerante, enquanto o dispositivo de expansão restringe a passagem do fluido, o que ocasiona na redução da pressão e da temperatura. A troca de calor entre o ambiente e o sistema é realizada por intermédio dos trocadores de calor, o evaporador e o condensador, que são responsáveis, respectivamente, por absorver calor do ambiente a ser resfriado e rejeitar calor para o ambiente externo (Stoecker e Jabardo, 2003; Da Silva e Melo, 2016).

Além disso, geralmente o contêiner refrigerado é equipado com transdutores para o monitoramento do funcionamento do sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor em tempo real e pode ser equipado com geradores movidos a diesel para acionamento elétrico de forma independente ao modal de transporte. Esse sistema de monitoramento possibilita a aquisição dos dados de operação de cada componente e da mercadoria transportadas detectando parâmetros que indiquem problemas no sistema (Carrier, 2024).

A Figura 2 ilustra a representação do sistema de produção de frio de uma unidade básica de refrigeração. A região em azul indica o circuito de baixa pressão, onde se encontra localizado o evaporador. Em vermelho está representado o sistema em alta pressão, no qual localiza-se o condensador. O compressor e o dispositivo de expansão estabelecem a fronteira entre esses níveis distintos de pressão.

Figura 2 - Circuito do sistema de refrigeração de um contêiner refrigerado.



Fonte: Carrier (2021) adaptado pelo autor.

2.1.1 Compressor de um contêiner refrigerado

No sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor, o compressor desempenha a função de promover o fluxo do fluido refrigerante através dos componentes. Durante o funcionamento do sistema, há o deslocamento de massa do fluido refrigerante por meio da compressão mecânica do vapor saturado, o qual, é deslocado de uma região do sistema que está submetida a uma baixa pressão para uma região com uma pressão mais elevada, no qual, este processo resulta, invariavelmente, em um aumento na temperatura do fluido refrigerante (Borgnakke e Sonntag, 2009).

Na Figura 3, é apresentado um compressor da empresa Carrier empregado em contêineres refrigerados, no qual, sendo este projetado para a operação com o fluido refrigerante R-744 (CO₂) (Carrier, 2024). Em geral, o contêiner refrigerado é projetado para não necessitar do acionamento do compressor durante o deslocamento por pequenas distâncias, mas, caso haja necessidade, há opção do uso de um gerador de energia para contêineres refrigerados conhecido tecnicamente como grupo gerador transportável para contêineres refrigerados ou simplesmente Genset Transportável. Dentre os fatores que influenciam a autonomia do sistema de refrigeração estão o isolamento térmico do contêiner, a temperatura externa, o tipo de carga e sua sensibilidade térmica, a temperatura interna no momento do desligamento e as condições do transporte.

Figura 3 - Compressor de um contêiner refrigerado.



Fonte: Carrier (2024).

2.1.2 Unidade condensadora e evaporador

O evaporador e o condensador têm como objetivo promover a transferência de calor entre o fluido refrigerante e o ambiente no qual estes componentes estão instalados. Por conta disso, é fundamental que esses trocadores de calor apresentem

uma área superficial compatível com as taxas de troca de calor (Stoecker e Jabardo, 2002).

A Figura 4 mostra uma unidade típica de condensação, no qual, é composta por uma serpentina que desempenha a função de trocador de calor, no qual, o fluido refrigerante é resfriado mediante do fluxo forçado de ar gerado por um ventilador, esse ventilador promove a circulação do ar externo através do trocador de calor, proporcionando a dissipação do calor do fluido refrigerante (Carrier, 2021).

Figura 4 - Unidade condensadora de um contêiner refrigerado.



Fonte: Carrier (2024).

A Figura 5 apresenta o evaporador da marca Carrier, sendo esse posicionado na parte interna do contêiner refrigerado. O evaporador também é acompanhado por ventiladores, que promovem a circulação forçada de ar através dos tubos e aletas do evaporador. Além disso, ele possui resistências elétricas com o intuito de evitar o bloqueio da passagem de ar, caso ocorra o congelamento da umidade do ar que circula no interior do contêiner. Em geral, o evaporador é projetado a operar em temperaturas entre 5°C até -30°C (Carrier, 2021).

Figura 5 - Evaporador de um contêiner de refrigeração.



Fonte: GCS refer (2013).

2.1.3 Dispositivo de expansão

O dispositivo de expansão é o componente responsável por realizar a expansão do fluido refrigerante, regulando a vazão mássica e pressão do fluido refrigerante, e, conseqüentemente, a temperatura de operação do evaporador. Durante o processo de expansão, ocorre a queda de pressão e a evaporação de parte do fluido refrigerante, resultando na queda da temperatura do fluido refrigerante. Este processo permite que a temperatura do evaporador seja mantida dentro da faixa desejada para cada operação (Stoecker e Jones, 1985).

A Figura 6 apresenta válvulas de expansão termostáticas, que são um tipo de dispositivo de expansão. Elas contêm um bulbo que é acoplado na tubulação de saída do evaporador, permitindo assim, o controle do fluxo do fluido refrigerante com base no grau de superaquecimento observado na saída do evaporador (Stoecker e Jones, 1985).

Figura 6 - Válvula de expansão termostática.



Fonte: Danfoss (2022).

2.1.4 Painel de controle e coleta de dados do contêiner refrigerado

O processo de coleta de dados no contêiner é realizado utilizando transdutores para medição de temperatura, pressão e umidade relativa em diferentes pontos do sistema de refrigeração. Os dados são utilizados para monitorar as propriedades e operações dos componentes do sistema de refrigeração (Carrier, 2021).

Para a leitura e interpretação dos dados coletados, os contêineres refrigerados contam com o auxílio de um painel de visualização de informações, que é utilizado na parametrização das informações do contêiner, bem como, para a identificação de problemas apresentados. Esses dados podem ser coletados localmente e analisados para a avaliação e monitoramento das condições do sistema, auxiliando na identificação de inconformidades no desempenho e indicando eventuais problemas (Carrier, 2024).

A Figura 7 apresenta o visor de informações do contêiner refrigerado da empresa Carrier, modelo ThinLINE, onde podem ser exibidas as informações de funcionamento do sistema de refrigeração. A partir das informações coletadas pelos transdutores e enviadas ao sistema de controle do sistema de refrigeração do contêiner, podem ser identificados problemas e as possíveis causas (Carrier, 2024).

Figura 7 - Visor de informações de contêiner refrigerado.



Fonte: Grupo CESAR (2019).

Fabricantes de unidades de refrigeração, como a Carrier e a Fortrak, disponibilizam manuais contendo indicadores de possíveis problemas que podem ser identificados no sistema. Estes códigos são listados conforme o Quadro 1, que apresenta algumas das falhas que podem ser detectadas (Carrier, 2021).

Quadro 1 – Lista de códigos de alarme do controlador

Código	Indicação de erro
AL4	Perda de controle do superaquecimento
AL5	Falha na chave manual de degelo
AL6	Falha no teclado ou na fiação do teclado
AL7	Saída de ar aberta
AL13	Alarme de comunicação de VFD
AL14	Falha detectada na sequência de fases
AL18	Perda de congelamento
AL19	Temperatura de descarga elevada
AL20	Fusível da contadora de controle (F3)
...	...

Fonte: O Autor (2024).

2.2 DETECÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS REFRIGERADOS E MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO

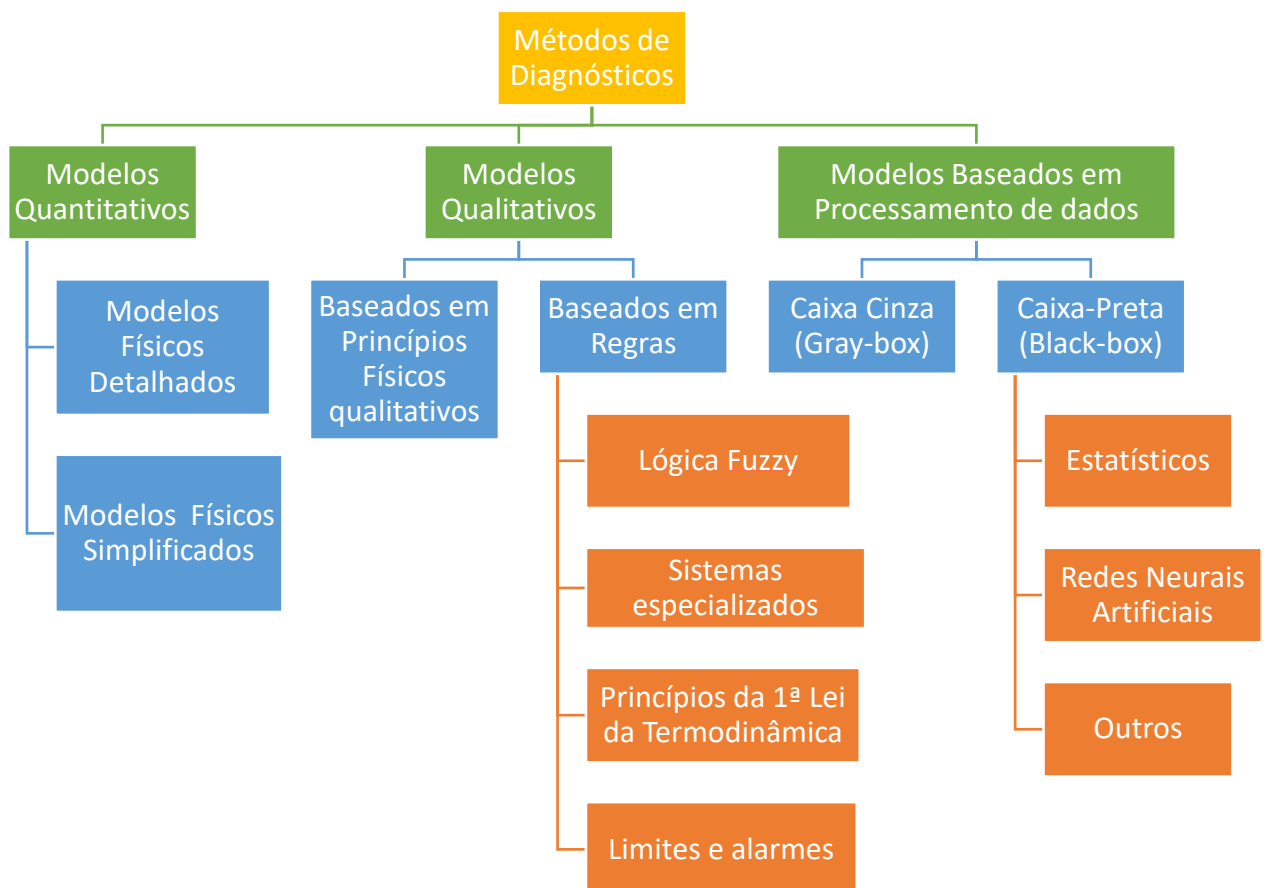
As falhas em sistemas de refrigeração podem ser classificadas com base em seu impacto sobre o funcionamento do sistema, sendo divididas em duas categorias: falhas “pesadas” (hard ou abrupt), que ocorrem de forma abrupta e provocam a interrupção do sistema e as falhas “suaves” ou “graduais” (soft ou gradual), que provocam a degradação do desempenho do sistema e se desenvolvem de forma progressiva. A distinção entre esses dois tipos permite um direcionamento mais eficiente das estratégias de manutenção e controle (Breuker e Braun, 1998; Li e Braun, 2007; Senger *et al.*, 2024; Singh *et al.*, 2022)

E de acordo com Senger *et al.* (2024) e Weis *et al.* (2023), as falhas abruptas, por geralmente causarem a parada imediata do sistema, são mais facilmente detectáveis. Por outro lado, as falhas graduais são mais difíceis de serem identificadas. No entanto, mesmo que o sistema continue operando com falhas suaves, elas provocam um impacto significativo, pois a degradação do desempenho

leva ao desgaste prematuro dos componentes, ao aumento no consumo de energia e à redução da capacidade de refrigeração do sistema.

Assim, com o intuito de definir as estratégias de diagnóstico e detecção de falhas a serem adotadas, é necessário considerar as abordagens disponíveis na literatura, que podem ser classificadas em três categorias principais que apresentam subcategorias mais especializadas, de forma a avaliar o sistema com os métodos quantitativos, qualitativos ou métodos baseados em histórico de operação (*data-driven*) (Breuker e Braun, 1998). A Figura 8 apresenta a divisão das categorias apresentadas na literatura, de forma a organizar a classificação dos métodos existentes.

Figura 8 - Modelos de tomada de decisão e métodos de detecção de falhas.



Ainda em relação a Figura 8, observa-se que os métodos quantitativos utilizam modelos matemáticos e ferramentas analíticas para representar o comportamento do sistema em condições ideais, permitindo a comparação entre os valores estimados e os valores medidos. Já os métodos qualitativos são baseados em regras e no conhecimento prévio sobre o funcionamento do sistema, aplicando lógica para identificar comportamentos anômalos. Enquanto isso, os métodos quantitativos se baseiam em equações e simulações, que dependem de conhecimentos preestabelecidos para acionar eventos quando determinadas condições são detectadas (Llopis-Mengual, 2025).

Além disso, há os métodos de análise por meio de abordagens baseadas em dados, que consiste em registrar e analisar os dados de operação e utilizar princípios físicos ou técnicas de aprendizado de máquina para detectar padrões e anomalias, sendo utilizados em aplicações que envolvem automatização e aplicação de inteligência artificial, sendo mais utilizado quando não há modelos físicos bem definidos do sistema em análise (Breuker e Braun, 1998).

Assim, conforme Breuker e Braun (1998), os processos de desenvolvimento de métodos de detecção e diagnóstico de falhas mais comuns são baseados na introdução controlada de falhas e na de seus impactos nas variáveis monitoradas pelo sistema. Diante disso, a utilização e implementação de novas tecnologias para detecção e diagnóstico de falhas proporcionam a capacidade de aumentar a confiabilidade do sistema de refrigeração e contribuir para a integridade da carga ao longo do transporte, reduzindo custos com sensores físicos e manutenção possibilitando à tomada de decisão e manutenção preditiva de falhas.

Dentre os métodos existentes, encontram-se os métodos da razão de Sensibilidade, que mede a taxa de variação dos parâmetros e condições de operação, o uso de modelos de regime permanente que utilizam modelos numéricos para simular o comportamento e para identificar desvios (Chen e Braun, 2000).

Também existem métodos que utilizam o aprendizado por máquinas, como o método proposto por Tassou e Grace (2005), que apresenta uma técnica baseada em dados, utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA), com o intuito de distinguir entre condições normais, subcarga e sobrecarga.

Outro método existente é o proposto por Navarro-Esbri *et al.* (2006), que utiliza um modelo dinâmico de caixa preta, capaz de ser aplicado tanto em regimes transientes quanto estacionários. Kim *et al.* (2021), propuseram um método heurístico

baseado em conhecimento, que não utiliza modelos matemáticos explícitos, focado em sistemas residenciais.

Além disso, existem métodos baseados em sensores virtuais, como o de Takeuchi *et al.* (2017), que exploraram o uso de sensores virtuais baseados em modelos físicos e técnicas de controle de equipamentos comerciais, oferecendo uma alternativa para a detecção de falhas sem a necessidade de sensores físicos dedicados. Por exemplo, por meio da medição de temperaturas em diferentes regiões do sistema, é possível inferir a pressão, o consumo de energia ou outras variáveis de interesse. A utilização desses sensores virtuais para a detecção e diagnóstico de falhas apresenta melhorias significativas no desempenho de sistemas de climatização e refrigeração, permitindo uma abordagem que antecipa a identificação de falhas e a avaliação de seus impactos, contribuindo para a redução do consumo de energia em sistemas avariados, dos custos operacionais e possibilitando manutenções preditivas (Kim e Lee, 2021).

Esses sensores virtuais atuam sobre bases de dados que foram capturados por sensores previamente instalados no sistema, apresentando estimativas fiáveis e a opção de validar a exatidão dos sensores físicos. Mais ainda, podem realizar as tarefas dos sensores danificados ou com desempenho de maneira temporal, mantendo a continuidade do monitoramento até os componentes. Esta flexibilidade converte os sensores virtuais em peça importante para o uso de estratégias de manutenção preditiva, tornando viável a detecção contínua das falhas em tempo real e contribuindo para a utilização mais racional dos recursos, a redução dos custos e maior confiabilidade operacional.

2.2.1 Detecção de falhas em sistema de refrigeração de contêineres

A detecção de falhas em sistema de refrigeração de contêineres consiste na identificação de anomalias ou desvios no funcionamento de unidades ou componentes de um sistema, que podem comprometer seu desempenho ou segurança operacional. Nos sistemas de refrigeração de contêineres, essa detecção é fundamental para evitar a deterioração de cargas sensíveis, como alimentos e medicamentos, garantindo a integridade da cadeia de frio, reduzindo eventuais perdas financeira e aumentando a confiabilidade dos sistemas e possibilitando a adoção de estratégias de manutenção preventiva (Babazadeh e Lang, 2009)

Na prática, um dos grandes desafios enfrentados pelas empresas que operam contêineres refrigerados é o elevado custo com manutenção, devido ao alto valor das cargas e multas por não cumprimento de contratos. Por isso, como relatado por Christensen *et al.* (2018), a cada viagem, os equipamentos precisam passar por testes rigorosos em condições padronizadas conforme os critérios definidos pelos fabricantes e por isso há uma grande necessidade pela busca de sistemas que possibilitem a redução de custos com a mesma.

Dessa forma, uma elevada confiabilidade dos sistemas de refrigeração em contêineres é essencial para garantir a conservação adequada das cargas transportadas devido ao longo período durante o transporte marítimo, que em geral, supera em muitas vezes o valor do equipamento de refrigeração. Por esse motivo, falhas inesperadas nesses sistemas podem gerar prejuízos significativos, tornando a detecção precoce de falhas uma área estratégica dentro do setor logístico e de transporte refrigerado (Christensen *et al.*, 2018),

De acordo com a literatura disponível, existem sobre esse assunto alguns métodos que têm como objetivo apresentar e desenvolver métodos a detecção de falhas e diagnóstico de falhas nesses sistemas. Babazadeh e Lang (2009) mostram que a detecção eficiente de uma falha significa perceber, o quanto antes, que algo não está funcionando como deveria. Por isso, a busca por alternativas mais inteligentes e menos onerosas tem ganhado força.

Assim, dentre os métodos presentes na literatura está o uso de controle preditivo baseado em modelos (*Model Predictive Control* – MPC), como proposto por Van e Verdijck (2001), prevendo o comportamento do sistema com base em modelos matemáticos, ajustando automaticamente os pontos de operação da unidade de refrigeração para economizar energia sem comprometer a qualidade da carga, utilizando o método de aprendizado por máquinas.

Outro estudo no setor na detecção de falhas em sistemas de frio em contêineres refrigerados consiste no uso de aprendizado por máquinas, como proposto por Lee *et al.* (2022). Neste trabalho, os autores utilizaram algoritmos como *XGBoost* e *LightGBM* para detectar falhas em sistemas de refrigeração. Esses algoritmos, realizam o aprendizado por máquinas para a partir de grandes volumes de dados coletados dos contêineres, identificar falhas em sistemas de refrigeração.

Babazadeh e Lang (2009) também utilizam redes de sensores sem fio (WSN) dentro dos contêineres, com o objetivo de monitorar variáveis ambientais como

temperatura, umidade e qualidade do ar. Isso permite uma análise contínua e em tempo real das condições internas, aumentando a capacidade de resposta a possíveis falhas.

Outro método detecção de falhas é apresentado por Christensen *et al.* (2018), no qual, utiliza os dados que já são coletados pelos sensores dos contêineres, mas que muitas vezes são utilizados apenas de forma reativa, após a ocorrência de uma falha, propondo o uso de métodos não supervisionados, capazes de identificar comportamentos fora do padrão com base em dados históricos de operação, como o consumo de corrente do compressor e com isso criar indicadores de qualidade operacional, auxiliando o processo de tomada de decisão.

Assim, com base na revisão da literatura é possível observar que existe um crescimento no número de publicações relacionadas aos modelos e estratégias de detecção de falhas em sistemas de refrigeração, contudo, ainda há uma carência de estudos vinculados à indústria naval, principalmente envolvendo vazamentos de fluidos refrigerantes, dados experimentais e simulação computacional. Tais fatos reforçam a necessidade do estudo do presente trabalho.

3 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido em duas etapas, a primeira consistiu no desenvolvimento de um modelo computacional para a detecção de vazamentos de fluido refrigerante, com validação experimental em sistemas de refrigeração e a segunda envolveu a elaboração de um procedimento elaborado e estruturado para identificação das causas de vazamentos

O trabalho experimental, necessário para a validação do modelo computacional, foi realizado no Laboratório de Refrigeração Veicular (ReVe), empregando como base o modelo matemático que foi desenvolvido com base no estudo de Li e Braun (2009) e, aprimorado por Kim e Braun (2015).

Para detecção de vazamento de fluido refrigerante em contêiner refrigerado, foi utilizando um modelo matemático, capaz de estimar a carga perdida durante a operação.

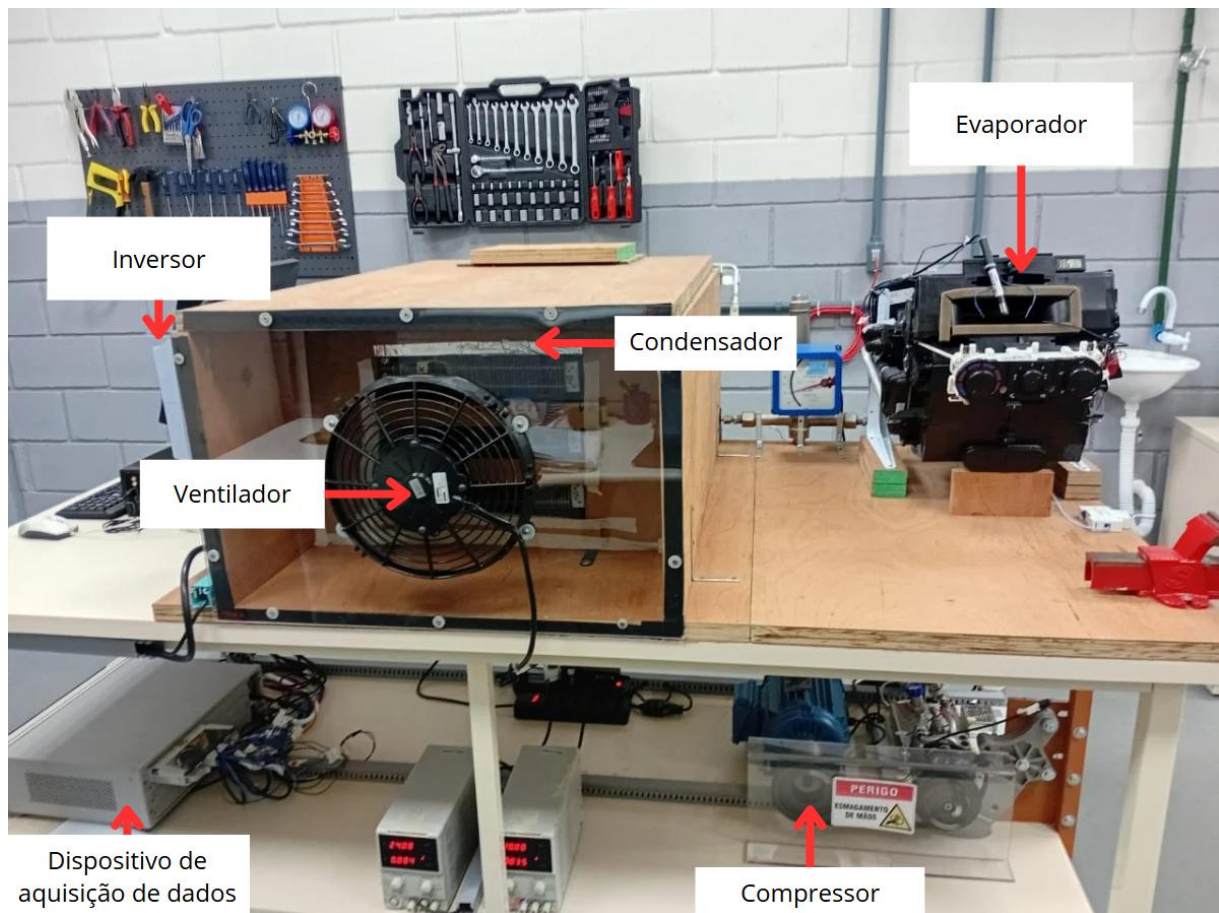
3.1 DIAGNÓSTICO DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS

3.1.1 TRABALHO EXPERIMENTAL

O aparato experimental consiste em um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor, que utiliza o mesmo princípio de produção de frio encontrado em contêineres refrigerados para aplicações comerciais. O aparato foi instrumentado com transdutores de pressão, temperatura, umidade relativa, vazão mássica e um sistema de aquisição de dados montado em uma bancada de testes, destinado à execução de ensaios experimentais visando a coleta de dados (Oliveira, 2023; Da Silva *et al.*, 2024; Oliveira; 2024).

Os dados experimentais foram coletados mediante a execução de ensaios no Laboratório de Refrigeração Veicular (ReVe, 2025), localizado no campus da UFSC Joinville. A Figura 9 apresenta a configuração da bancada experimental e a representação dos principais componentes para o sistema de geração de frio.

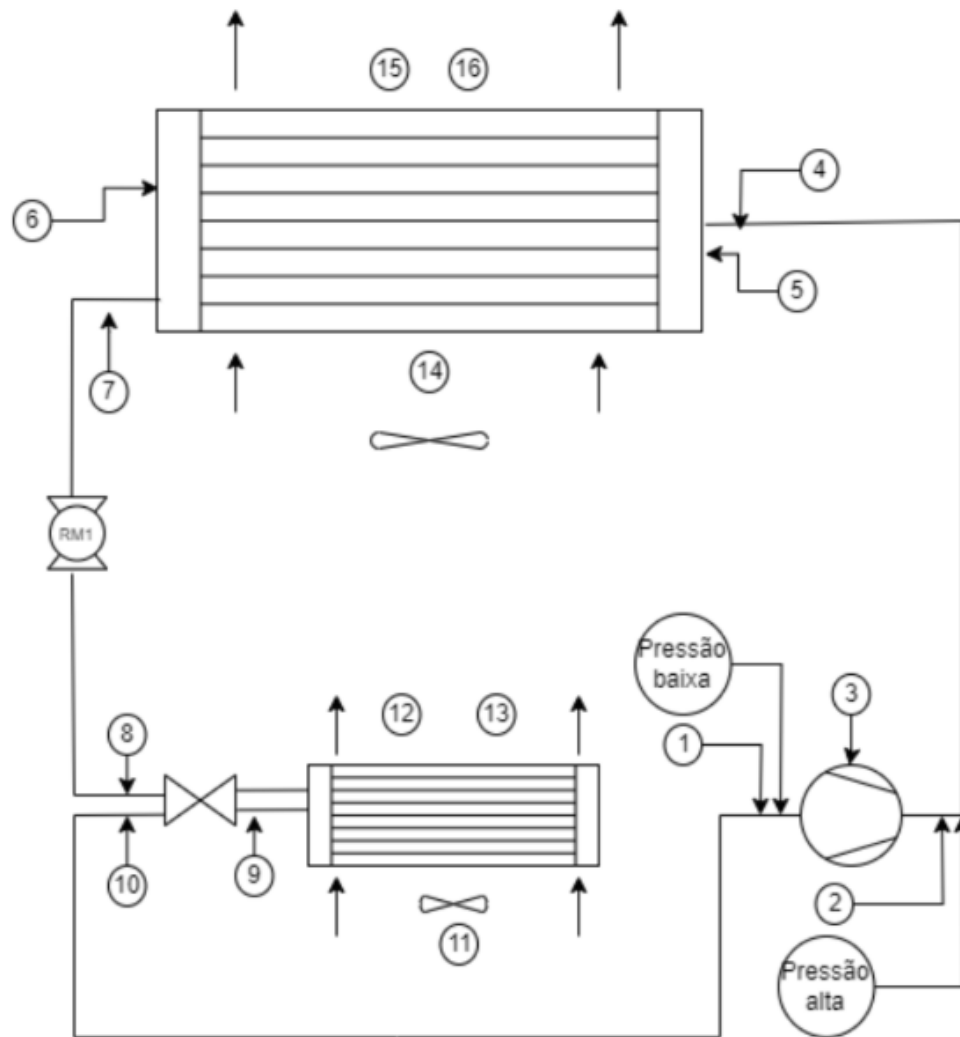
Figura 9 - Componentes do aparato experimental.



Fonte: O Autor (2025).

A Figura 10 apresenta o diagrama esquemático do sistema de refrigeração experimental utilizado neste trabalho. O circuito é composto pelos principais componentes de um ciclo de compressão mecânica a vapor, destacando-se os sensores de pressão e temperatura distribuídos ao longo do percurso do fluido refrigerante, no qual, os termopares são representados por números, os transdutores de pressão estão indicados em pontos específicos do sistema, e o transdutor de vazão mássica é identificado como RM1.

Figura 10 - Diagrama da posição de instalação dos transdutores.



Fonte: Oliveira (2024).

Ainda conforme a Figura 10, o ciclo inicia-se no ponto (1), onde o fluido refrigerante em baixa pressão e temperatura é admitido pelo compressor, que o comprime até atingir uma condição de alta pressão e temperatura. Na saída do compressor, o fluido refrigerante passa por um transdutor de pressão e é conduzido ao condensador, onde ocorre a rejeição de calor para o ambiente. Essa troca térmica é promovida por um fluxo de ar forçado por um ventilador, resultando na condensação do fluido refrigerante, no qual, o sentido do fluxo de ar através das aletas do condensador é indicado pelas setas, e as temperaturas do ar de entrada e saída são monitoradas pelos termopares posicionados nos pontos 14, 15 e 16, respectivamente.

Após o processo de condensação, o fluido refrigerante em estado líquido é passa pelo transdutor de vazão mássica (RM1) e é direcionado à válvula de expansão termostática. O fluido refrigerante expandido é conduzido ao evaporador, onde absorve calor do ar ambiente, promovendo seu resfriamento e desumidificação. O sentido do fluxo de ar no evaporador é indicado por setas, e a variação de temperatura do ar é registrada pelos termopares localizados nas posições 11, 12 e 13.

Na saída do evaporador, o fluido refrigerante passa por sensores de temperatura 9 e 10, sendo então direcionado novamente à entrada do compressor, completando o ciclo termodinâmico.

Além dos termopares já mencionados, também estão acoplados ao sistema os termopares 2 e 3, posicionados respectivamente na saída do fluido refrigerante do compressor e no corpo do compressor. Os termopares 4, 5 e 6 estão instalados na estrutura do condensador, enquanto os termopares 7 e 8 encontram-se entre o condensador e o dispositivo de expansão.

O sistema é acionado por um motor elétrico de velocidade variável, cuja rotação é controlada por um inversor de frequência. Esse controle permite ajustar a rotação do compressor, influenciando diretamente a capacidade de refrigeração do sistema.

Em laboratório, para analisar as consequências das falhas por perda de carga de fluido refrigerante, foram reproduzidos ensaios com carga parcial de fluido refrigerante, provocando, por um curto período de tempo, uma perda controlada de fluido com o intuito de avaliar as características dos parâmetros para a modelagem. Após a aquisição, os dados serão submetidos a um tratamento a fim de realizar a modelagem computacional para descrever o comportamento do sistema. Conforme Kim e Braum (2022), foram coletados dados de diferentes pontos do sistema experimental, para modelar o sensor de carga virtual, tais como:

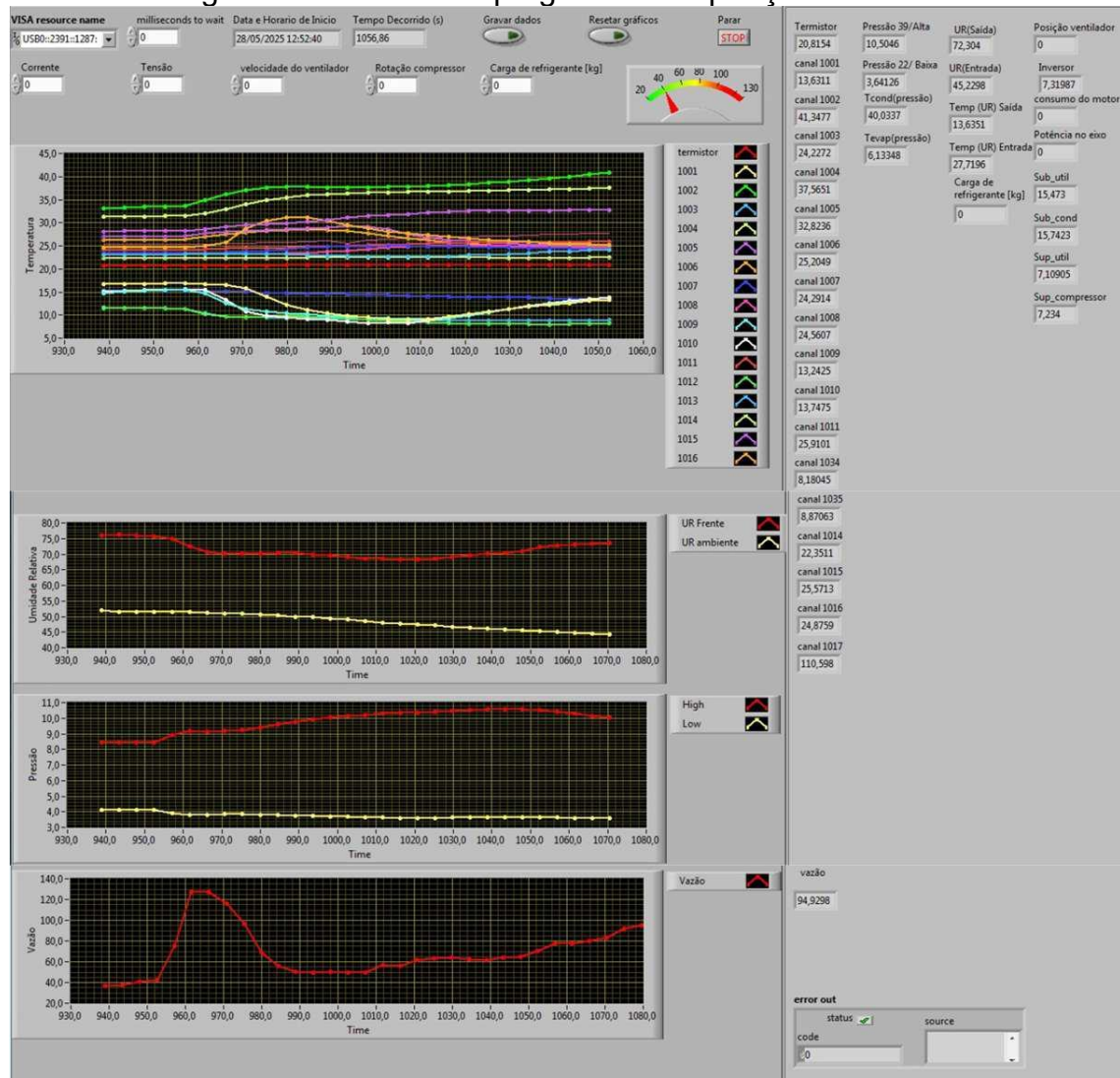
- Pressão de sucção [bar];
- Pressão de descarga [bar];
- Temperatura de subresfriamento [°C];
- Temperatura de superaquecimento [°C];
- Título na entrada do evaporador [-];
- Rotação do compressor [rpm];

Os dados do sistema foram coletados por meio de um sistema de aquisição de dados e armazenados em uma planilha eletrônica, no qual foi desenvolvido a modelagem computacional.

Para registrar os dados, foi utilizado o programa desenvolvido por Oliveira (2023) que tem o intuito de permitir a rápida visualização das grandezas medidas no sistema e registrar os dados coletados em uma planilha eletrônica. Com base nos dados dos transdutores de cada fabricante, os dados são encaminhados a um módulo específico que interpreta o sinal e por meio de uma referência fornecida pelo fabricante do equipamento, equação ou datasheet, transformar o sinal recebido em uma grandeza desejada (Oliveira, 2023).

O ambiente gráfico, também conhecido como painel frontal, foi desenvolvido de modo a propiciar uma rápida visualização na mudança dos parâmetros analisados, buscando apresentar, de forma sucinta, os dados coletados em tempo real como apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Interface o programa de aquisição de dados.



Fonte: O Autor (2025).

As incertezas de medição no sistema foram determinadas de acordo com a metodologia utilizada por Da Silva et al. (2023) e Oliveira (2023), que utilizaram o programa computacional EES, Engineering Equation Solver, para calcular a incerteza combinada do sistema, identificando um incerteza combinada do COP em $\pm 10\%$, da capacidade de refrigeração em ± 90 W, com base na incerteza de incertezas de medição para os dados da bancada experimental de $\pm 0,5$ °C para os termopares, $\pm 0,05$ bar para os transdutores de pressão, $\pm 2,5\%$ para os sensores de umidade relativa, potência consumida é de ± 10 W e da vazão mássica de ± 2 kg/h.

3.1.1.1 Planejamento experimental

Foi elaborado um plano de teste para validar o método computacional com base nos dados coletados pelo sistema de aquisição de dados. Durante a etapa de experimentos, foi elaborado um roteiro específico com determinadas perdas de carga no sistema, como condições experimentais, as quais estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Plano experimental

ROTAÇÃO [RPS]	CARGA [g]
690	300
690	500
690	700
690	780
690	885
690	985
690	1035
690	1080
1074	300
1074	500
1074	700
1074	780
1074	885
1074	985
1074	1035
1074	1080

Fonte: O Autor (2024).

Durante a fase experimental, foram estabelecidas e controladas as condições de temperatura e vazão de ar nos trocadores de calor, condensador e evaporador, para garantir a repetibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos. Essas condições foram mantidas constantes conforme a proposta experimental, sendo registradas em cada ensaio.

Para a determinação dos parâmetros de operação, foram coletadas, em cada condição do plano experimental, as variáveis de resposta: sub-resfriamento (Sub), superaquecimento (Sup) e o título na entrada do evaporador. Essas variáveis foram

selecionadas por sua relevância na caracterização termodinâmica do ciclo de refrigeração e são fundamentais para a aplicação da regressão do modelo descrito na Seção 3.1.2.

Os dados coletados foram analisados avaliando a precisão dos dados coletados após o tratamento dos dados por meio do modelo computacional com os valores reais, avaliando o erro percentual em cada faixa de operação analisada.

3.1.2 MODELO COMPUTACIONAL

O modelo computacional foi elaborado com base no método do sensor virtual apresentado por Li e Braun (2009) e, aprimorado por Kim e Braun (2015) para sistemas com velocidade variável, estabelecendo uma relação da carga do sistema com a temperatura do superaquecimento e subresfriamento, relacionando a temperatura de superaquecimento com o lado da baixa pressão do sistema e a temperatura de subresfriamento com a temperatura do lado de pressão alta. De acordo com esse método, apresenta-se uma estimativa da carga de fluido refrigerante do sistema com base em variáveis relativamente de medição relativamente mais simples.

Nesse caso, para a estimativa convencional de carga em um sistema por compressão mecânica de vapor, os fabricantes informam às condições normais de funcionamento para cargas padronizadas, determinando um valor de superaquecimento e subresfriamento padrão no sistema. Desta forma, utilizando dados já coletados pelo sistema, o método utilizado estabelece uma relação para diferentes condições de carga no sistema que pode ser medida de forma não invasiva e de forma contínua no sistema, utilizando os mesmos parâmetros já mensurados e possibilitando a automatização por Li e Braun (2009).

A massa de fluido refrigerante do sistema é dividida nas duas regiões de pressão sistema, a região de pressão alta e pressão baixa, e devido a isso, Li e Braun (2009) observaram ser possível relacionar a massa de fluido refrigerante de cada região com a temperatura de superaquecimento e subresfriamento. Na região que compreende o condensador o fluido refrigerante se encontra em estado de mistura de duas fases, líquido e vapor, permanecendo com o volume constante devido às propriedades dos fluidos e o título que apresenta uma relação quase linear. Dessa forma, a carga pode ser estimada por:

$$m_{hs} = k_{sc}T_{sc} + m_{hs,0} \quad (1)$$

que estabelece a relação da carga na região de alta pressão (m_{hs}) com a carga no sistema em condições sem subresfriamento ($m_{hs,0}$), a temperatura de subresfriamento (T_{sc}) e a constante que relaciona as características do sistema (k_{sc}) (Kim e Braun, 2015).

O volume ocupado pelo fluido refrigerante na região de superaquecimento do evaporador apresenta uma proporcionalidade com a temperatura de superaquecimento na saída do evaporador. Assim, a carga de fluido refrigerante no lado de baixa pressão é estimada diretamente com o valor do superaquecimento conforme:

$$m_{ls} = m_{ls,0} - k_{sh}T_{sh} \quad (2)$$

que estabelece a relação da carga na região de baixa pressão (m_{ls}) com a carga no sistema em condições de saturação ($m_{ls,0}$), temperatura de superaquecimento (T_{sh}) e a constante que relaciona as características do sistema (k_{sh}) (Kim e Braun, 2015).

Dessa forma, a equação (1) pode ser reorganizada considerando as condições de operação padrão determinadas pelo fabricante, permitindo a obtenção da carga nominal de fluido refrigerante em regime de operação ($m_{hs,padrão}$) e da temperatura de subresfriamento correspondente a essas condições ($T_{sc,padrão}$) conforme:

$$m_{hs,padrão} = k_{sc}T_{sc,padrão} + m_{hs,0} \quad (3)$$

Assim, é possível calcular a diferença de carga de fluido refrigerante no lado de alta pressão e temperatura para uma condição qualquer, em relação à carga nominal. Essa diferença é obtida por meio da subtração entre a carga nominal, determinada para as condições padrão (1), e a carga correspondente à condição analisada (3). A estimativa dessa diferença de carga é dada por:

$$m_{hs,padrão} - m_{hs} = k_{sc}(T_{sc,padrão} - T_{sc}) + (m_{hs,0} - m_{hs,0}) \quad (4)$$

$$m_{hs,padrão} - m_{hs} = k_{sc}(T_{sc,padrão} - T_{sc}) \quad (5)$$

A equação (5) pode ser reorganizada de forma a evidenciar os termos dependentes da temperatura e da carga de fluido refrigerante, expressando-os em função das condições padrão de operação do sistema.

$$k_{sc}(T_{sc} - T_{sc,padr\tilde{a}o}) = (m_{hs} - m_{hs,padr\tilde{a}o}) \quad (6)$$

Utilizando um procedimento semelhante no lado de baixa pressão do sistema, determina-se a carga de fluido refrigerante correspondente às condições padrão desse lado ($m_{ls,padr\tilde{a}o}$), bem como a temperatura de superaquecimento nas condições padrão de operação ($T_{sh,padr\tilde{a}o}$) conforme:

$$-k_{sh}(T_{sh} - T_{sh,padr\tilde{a}o}) = (m_{ls} - m_{ls,padr\tilde{a}o}) \quad (7)$$

Sendo assim, é possível estimar a carga total de fluido refrigerante do sistema (m_{total}), tanto para uma condição operacional qualquer quanto para a condição padrão ($m_{total,padr\tilde{a}o}$), por meio da soma das cargas de fluido refrigerante nos lados de alta e baixa pressão, dado por:

$$m_{total} = k_{sc}(T_{sc}) + m_{hs,0} + m_{ls,0} - k_{sh}(T_{sh}) \quad (8)$$

$$m_{total,padr\tilde{a}o} = k_{sc}(T_{sc,padr\tilde{a}o}) + m_{hs,0} + m_{ls,0} - k_{sh}(T_{sh,padr\tilde{a}o}) \quad (9)$$

Assim, é possível estimar a carga do sistema em uma condição qualquer, a partir das propriedades da carga nominal, conforme:

$$m_{total} = m_{total,padr\tilde{a}o} + k_{sc}\{(T_{sc} - T_{sc,padr\tilde{a}o}) - k_{sh}(T_{sh} - T_{sh,padr\tilde{a}o})\} \quad (10)$$

A fim de avaliar o vazamento de fluido refrigerante do sistema, a equação pode ser reorganizada, isolando os termos dependentes das temperaturas analisadas, conforme equação:

$$\frac{m_{total} - m_{total,padr\tilde{a}o}}{m_{total,padr\tilde{a}o}} = \frac{1}{k_{ch}} \{(T_{sc} - T_{sc,padr\tilde{a}o}) - \frac{k_{sh}}{k_{sc}}(T_{sh} - T_{sh,padr\tilde{a}o})\} \quad (11)$$

sendo as constantes k_{ch} e $\frac{k_{sh}}{sc}$ constantes auxiliares para simplificar a equação, apresentadas nas equações:

$$k_{ch} = \frac{m_{total,padrão}}{k_{sc}} \quad (12)$$

$$k_{sh/sc} = \frac{k_{sh}}{k_{sc}} \quad (13)$$

Conforme Kim e Braun (2015), para compressores de velocidade variável, é aplicado um ajuste no método apresentado na equação (2). Nesse ajuste, é introduzido um parâmetro que minimiza o erro entre a carga estimada e a carga real, por meio de técnicas de regressão linear, conforme:

$$m_{ls} = m_{ls,0} - k_{sh}T_{sh} + k_x(X_{sc,0} - X_{evap,in}) \quad (14)$$

Acrescentando os termos que são influenciados pela mudança no título na entrada do evaporador, tal que, $X_{evap,in}$ é o título na entrada do evaporador, $X_{sc,0}$ é o parâmetro constante do título na entrada do evaporador para zero sub-resfriamento do condensador, k_x é uma constante do sistema independente das condições de operação e da carga total.

Assim, isolando os termos novamente, obtém-se a equação (11), ajustada para sistemas que operam com compressores de velocidade variável, estimando a variação de carga em percentual,

$$\begin{aligned} \frac{m_{total} - m_{total,padrão}}{m_{total,padrão}} = & \frac{1}{k_{ch}} \left\{ (T_{sc} - T_{sc,padrão}) - \frac{k_{sh}}{sc} (T_{sh} - T_{sh,padrão}) \right. \\ & \left. + k_{x/sc} (X_{evap,in} - X_{evap,in,padrão}) \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

é apresentada em termos percentuais, podendo avaliar diretamente a porcentagem de carga presente no sistema.

3.1.3 VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

A validação do modelo computacional foi conduzida por meio de uma abordagem comparativa entre os resultados numéricos obtidos por meio do modelo computacional e os dados experimentais coletados em ambiente controlado de laboratório. Para isso, o sistema de refrigeração foi instrumentado com sensores posicionados em pontos estratégicos, permitindo o monitoramento contínuo de variáveis relevantes, como temperatura, pressão, umidade relativa, vazão mássica e potência elétrica consumida.

A obtenção dos parâmetros foi realizada nas mesmas condições controladas dos experimentos. O critério adotado para validação consistiu no cálculo do erro relativo percentual entre os valores simulados pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente. A análise concentrou-se, principalmente, nas condições de regime permanente, em que as oscilações dinâmicas do sistema são minimizadas, favorecendo maior precisão na comparação dos resultados.

Com base nos valores obtidos e na consistência entre os conjuntos de dados, o modelo foi considerado validado para as condições operacionais analisadas. A metodologia adotada permite, portanto, o uso do modelo computacional como ferramenta de apoio para estudos paramétricos, predição de comportamento e otimização do sistema em estudo.

3.2 PROCEDIMENTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE CAUSAS DE VAZAMENTOS

O desenvolvimento do procedimento será baseado em revisão bibliográfica, identificação dos tipos de falhas e elaboração de um fluxograma detalhado para identificação das causas com base no diagrama de Ishikawa.

Assim, com o objetivo de identificar os tipos mais recorrentes de falhas em sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor, especialmente em contêineres refrigerados. Os estudos analisados permitiram a categorização das falhas em sete grandes grupos: vazamentos de fluido refrigerante, falhas em componentes mecânicos, falhas elétricas, falhas de controle, falhas de descongelamento, erros operacionais e falhas não especificadas.

Além disso, foi desenvolvido um fluxograma estruturado e direcionado para a análise de falhas com base no Diagrama de Causa e Efeito (Diagrama de Ishikawa),

também conhecido espinha de peixe. O diagrama é uma ferramenta da gestão da qualidade usada para identificar e detalhar os fatores (causas) que influenciam um resultado (efeito) em um processo, auxiliando na análise os inputs que afetam a qualidade e a encontrar as causas dos problemas, facilitando a definição de ações corretivas (Martinelle, 2009).

O fluxograma está elaborado de modo a possibilitar a identificação das possíveis causas de falhas por vazamento de fluido refrigerante, organizando-as segundo categorias como: falhas mecânicas, falhas no manuseio do sistema, problemas em vedações, falhas em sensores, entre outros.

4 RESULTADOS

A identificação dos principais tipos de falhas em sistemas de refrigeração de contêineres foi fundamentada em uma revisão da literatura especializada. Paralelamente, a instrumentação do equipamento de condicionamento de ar instalado na bancada experimental foi realizada por meio da integração de transdutores destinados à medição de temperatura, pressão, umidade relativa e corrente elétrica.

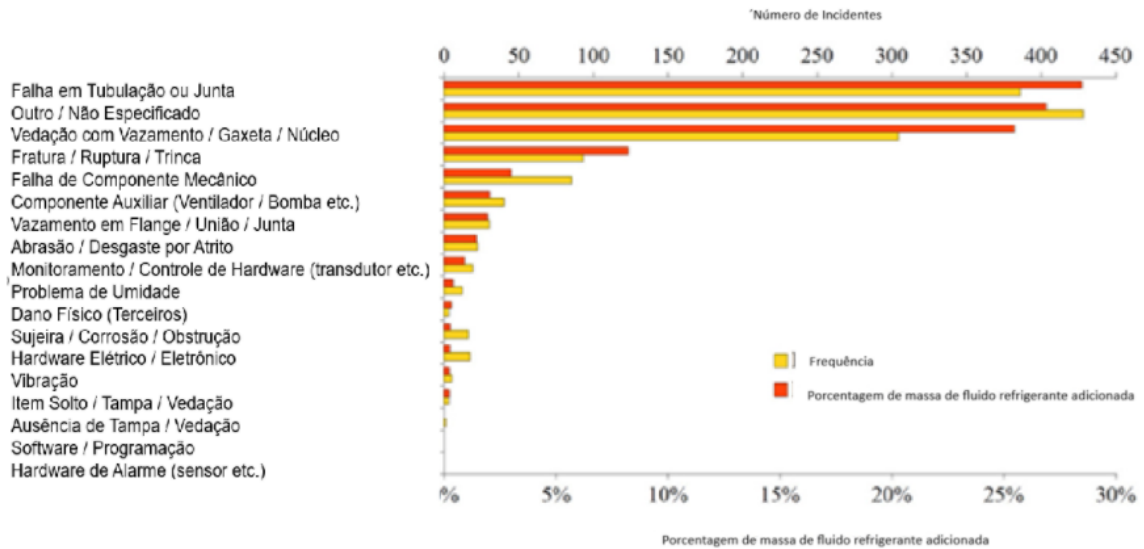
A coleta de dados foi conduzida com êxito, garantindo a obtenção de parâmetros do sistema de forma precisa e confiável, possibilitando a caracterização do comportamento do sistema em diferentes condições operacionais.

4.1 PRINCIPAIS TIPOS DE FALHAS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DE CONTÊINERES.

Durante a revisão de literatura foi possível identificar que, de acordo com diferentes autores citados ao longo desse trabalho, as falhas mais comuns nos sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor convencionais estão relacionadas às falhas mecânicas nos componentes e no manuseio do sistema. Essas falhas estão relacionadas à perda de fluido refrigerante, falhas em compressores ou falhas nos ventiladores dos trocadores de calor, como o entupimento da unidade condensadora no lado do escoamento de ar e o congelamento da superfície externa do evaporador.

Francis *et al.* (2017), elenca uma série de falhas relacionadas ao vazamento de fluido refrigerante em sistemas de refrigeração comerciais, onde apresenta uma série com 18 categorias de falhas, desde vazamentos em tubos, selos e flanges, até falhas em componentes mecânicos, elétricos, eletrônicos e sensores. A Figura 12 apresenta os principais tipos de falhas encontradas em sistemas com o vazamento de fluido refrigerante e quantidade média de fluido adicionada em cada incidente.

Figura 12 – Principais causas de falhas encontradas em contêineres refrigerados com o vazamento de fluido refrigerante

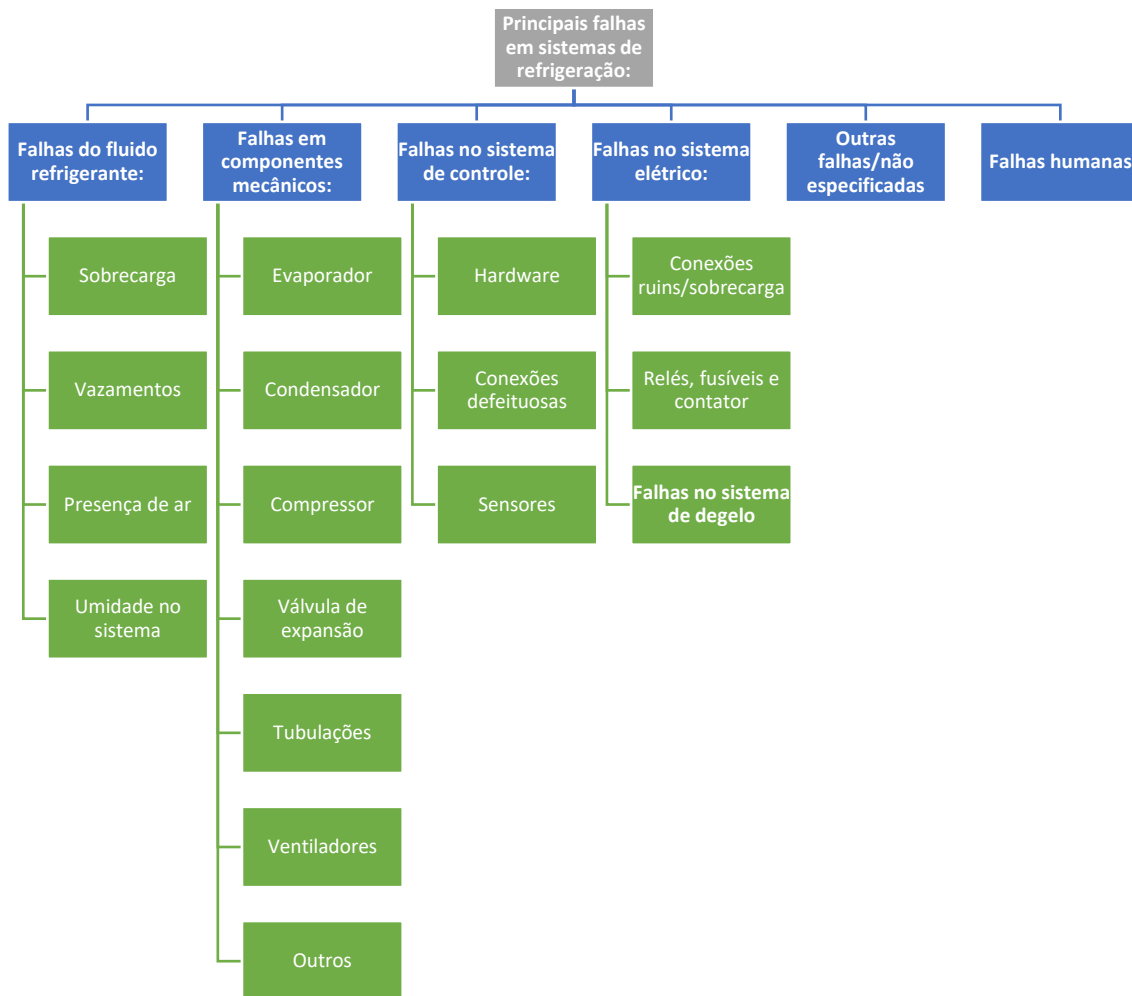


Fonte: Francis *et al.* (2017) adaptado pelo autor.

Conforme está apresentado na Figura 12, a maior ocorrência de falhas se encontra na união entre tubos e conexões, com uma presença superior a 50 por cento dos números de incidentes analisados. Em contrapartida, as falhas de vazamento de fluido menos presentes estão relacionadas aos erros de software e sensores.

A Figura 13 apresenta os principais tipos de falhas identificadas por Złoczowska (2018), sendo classificadas de acordo com sete categorias, que abrangem desde falhas técnicas até erros operacionais, dentre elas, dentre ela estão o vazamento de fluido refrigerante, falhas em componentes mecânicos, falhas no controle do sistema, falhas no sistema elétrico, falhas de descongelamento, falhas humanas e outras falhas não declaradas.

Figura 13 – Principais tipos de falhas em contêineres refrigerados.



Fonte: O autor (2025).

Os resultados obtidos mostram que as falhas mais recorrentes em contêineres refrigerados estão relacionadas com o vazamento de fluido refrigerante. Na sequência, é apresentado um método qualitativo proposto para identificar as causas de vazamentos de fluidos refrigerantes, seguido dos resultados obtidos com modelo computacional que quantifica a massa de fluido refrigerante perdida, devido ao vazamento.

4.2 PROCEDIMENTO PARA IDENTIFICAÇÃO DAS CAUSAS ASSOCIADAS AO VAZAMENTO DE FLUIDO REFRIGERANTE

Nesta seção, apresenta-se um procedimento estruturado e elaborado pelo autor para identificação das causas associadas ao vazamento de fluido refrigerante e posterior tomada de decisão. Este procedimento emprega como base o diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito ou espinha de peixe. Tal diagrama permite realizar uma análise das causas envolvidas, facilitando a identificação das causas-raiz e orientando a tomada de decisão para eliminação de vazamentos de fluido refrigerante.

A etapa inicial do procedimento consiste na observação dos sintomas (efeitos), inferindo-se, com base no método de diagnóstico e detecção de falhas, identificando as falhas mais prováveis. Após isso, busca-se relacionar os sintomas ou condições causadas pela falha do componente, dessa forma, é possível realizar uma análise quantitativa e sistemática para o diagnóstico de falhas, integrando sintomas e variáveis externas para proporcionar decisões mais precisas e robustas em sistemas complexos como dos sistemas de refrigeração.

A Figura 14 apresenta o diagrama Ishikawa elaborado pelo autor, para identificar a causa raiz de vazamento de fluido refrigerante em contêineres refrigerados. Como usualmente empregado, as possíveis causas foram classificadas em categorias: Método, Máquina, Material, Mão de Obra, Ambiente e Medições.

Figura 14 - Diagrama de Ishikawa para a identificação de causas de vazamentos de fluido refrigerante.



Fonte: O autor (2025).

Dentre as categorias do diagrama, foram listadas as causas de acordo com a sua classe. O processo sugerido para identificação das causas com base no diagrama de causa e efeito desenvolvido neste trabalho, é apresentado na Figura 15. Este processo deve ser conduzido de forma sistemática, permitindo uma análise direcionada e organizada considerando fatores como método, mão de obra, material, meio ambiente, máquina e medidas adotadas durante o uso e manutenção do sistema.

Para a categoria máquina, foram consideradas as causas relacionadas aos próprios equipamentos do sistema de refrigeração, como a corrosão e fissuras nos componentes. Na categoria método, foram definidas causas da falha de acordo com procedimentos realizados, como o carregamento incorreto de fluido refrigerante durante a manutenção, a ausência de inspeções periódicas e falta de inspeções. E, para a categoria material, foram associadas as causas referentes à qualidade dos componentes utilizados, como a incompatibilidade dos materiais.

Já para a categoria medição, foram definidas as causas devido às falhas nos sensores, como sensores mal calibrados e ausência de sensores de pressão ou devido ao vazamento gradual que dificulta a detecção desta falha. Visando incluir a categoria mão-de-obra foram apontadas causas devido a erro do operador e, por fim,

na categoria meio ambiente, as causas relacionadas ao meio externo como mudanças impactos devido a movimentação dos equipamentos durante a navegação e mudanças extremas de temperatura.

Para a identificação da causa da falha com base nos itens apresentados no diagrama de Ishikawa, propõe-se um processo de investigação que se inicia com a observação do desempenho térmico e das pressões de operação do sistema. Caso, seja identificada uma diferença nas pressões de referência em relação as condições nominais de funcionamento, há indícios de vazamento de fluido refrigerante, assim, deve-se realizar uma inspeção visual nos componentes do sistema, verificando as conexões e juntas. Assim, caso seja identificado que o problema está relacionado com a instalação fora do padrão, a falha é relacionada à mão de obra, indicando uma falha no processo de montagem ou manutenção.

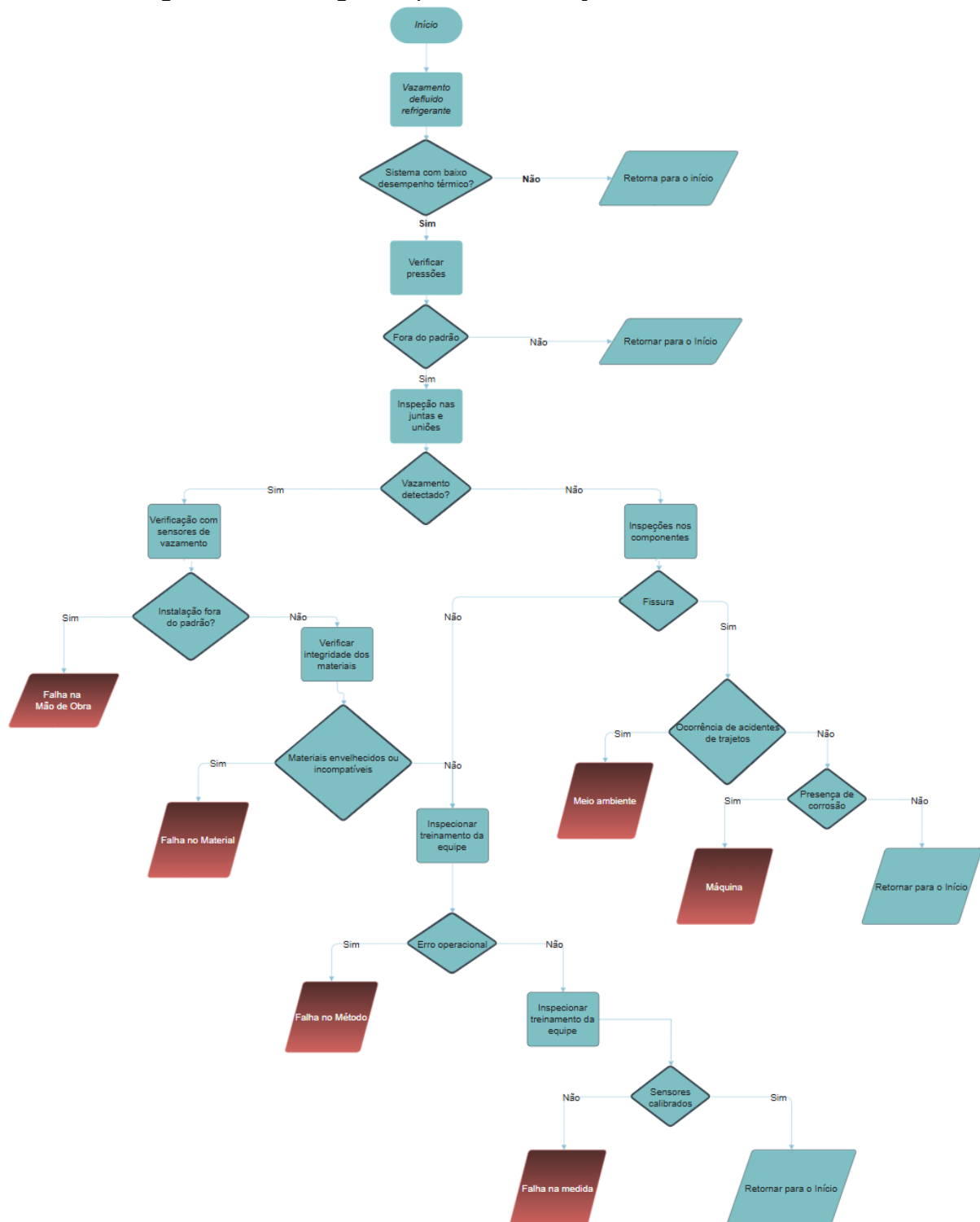
Se a instalação das juntas e conexões estiverem de acordo com as especificações exigidos, deve-se analisar a integridade dos materiais utilizados no sistema de refrigeração. Quando são identificados componentes envelhecidos ou inadequados para a aplicação, considera-se que a falha tem origem no próprio material relacionadas ao desgaste natural, incompatibilidade química ou uso de peças que não atendem às especificações recomendadas.

Caso não sejam identificados problemas com o material, deve-se investigar a capacitação técnica visando identificar falha humana, caso seja confirmado que a equipe não apresentava capacidade técnica ou seguiu procedimentos incorretos, pode-se concluir que a causa está relacionada a um erro de método.

Também deve-se verificar a presença de fissuras no sistema, caso alguma seja identificada, deve-se verificar se durante o transporte houve registro de acidentes ou impactos. Caso seja confirmada a ocorrência de algum evento externo, como batidas ou vibrações excessivas, a falha é atribuída a fatores ambientais. Entretanto, se não houver indícios de acidentes, deve-se verificar a presença de corrosão no sistema, assim, a falha é associada à própria máquina.

Se nenhuma dessas causas for confirmada, é indicado recomeçar a análise do fluxograma da Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma para identificação da causa da falha.



Fonte: O autor (2025).

4.3 RESULTADOS DO MODELO COMPUTACIONAL

Diante da dificuldade em identificar vazamentos de fluido refrigerante em contêineres refrigerados, especialmente aqueles com pequenas taxas de vazão, propôs-se a utilização do modelo matemático descrito na Seção 3.3, para tal finalidade. Destaca-se que este modelo matemático é capaz de estimar a quantidade de fluido refrigerante que vazou do sistema, em função de variáveis normalmente medidas e monitoradas pela interface do contêiner, tais como pressões e temperaturas.

4.3.1 Obtenção dos parâmetros do modelo matemático com base em dados experimentais

Na fase experimental deste estudo, foi aplicado um modelo computacional desenvolvido por Li e Braun (2009) e, aprimorado por Kim e Braun (2015) com o objetivo de desenvolver um sensor virtual não invasivo para a medição de vazamento de fluido refrigerante. A validação do modelo foi realizada por meio da comparação dos valores conhecidos com os resultados obtidos de forma experimental, conforme descrito na metodologia.

Nessa fase experimental, foram coletados dados para as diferentes condições experimentais que após serem tratados, excluindo períodos dos regimes de transição e mantendo somente os dados referentes aos regimes permanentes de interesse para cada condição, foi elaborada uma base de dados experimentais que está ilustrada conforme a Figura 16.

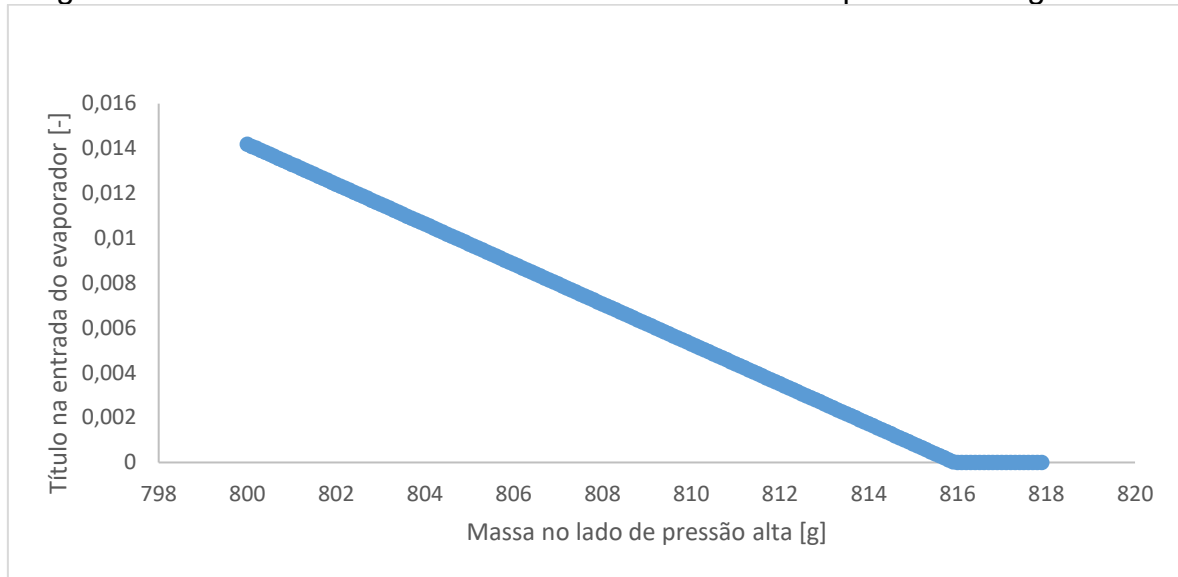
Figura 16 - Base de dados experimentais



Fonte: O autor (2025).

Foram determinados os parâmetros de operação do sistema, como carga padrão e temperatura de superaquecimento e subresfriamento, utilizando os dados dos componentes do sistema e dados previamente conhecidos com base nas equações (1), (14) e (15). Após isso, conforme descrito no desenvolvimento das equações, foi determinada a constante do título necessária para o desenvolvimento do modelo computacional com o auxílio da ferramenta computacional EES, *Engineering Equation Solver*, determinando o título na entrada do evaporador para a condição de operação que corresponde-se a um ponto de operação com subresfriamento igual a zero, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Estimativa da massa do lado alto do sistema para o título igual a zero.



Fonte: O autor (2025).

As constantes que relacionam a carga de fluido refrigerante em cada região com as temperaturas de superaquecimento e subresfriamento foram determinadas por meio do método dos mínimos quadrados, visando estimar as equações que melhor descrevem o comportamento da carga em função dessas variáveis. O procedimento foi aplicado tanto para a região de baixa pressão quanto para a de alta pressão. Para isso, foi desenvolvido um código em linguagem Visual Basic for Applications (VBA), integrado à planilha eletrônica Excel, permitindo a automação dos cálculos. O código utilizado está apresentado no Apêndice A, e as propriedades empregadas na estimativa estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do Sistema

Variável	Valor	Unidade
Ksh	0,68	[-]
Kx	543,70	[-]
Ksc	9,060	[-]
mhs	815,9	g

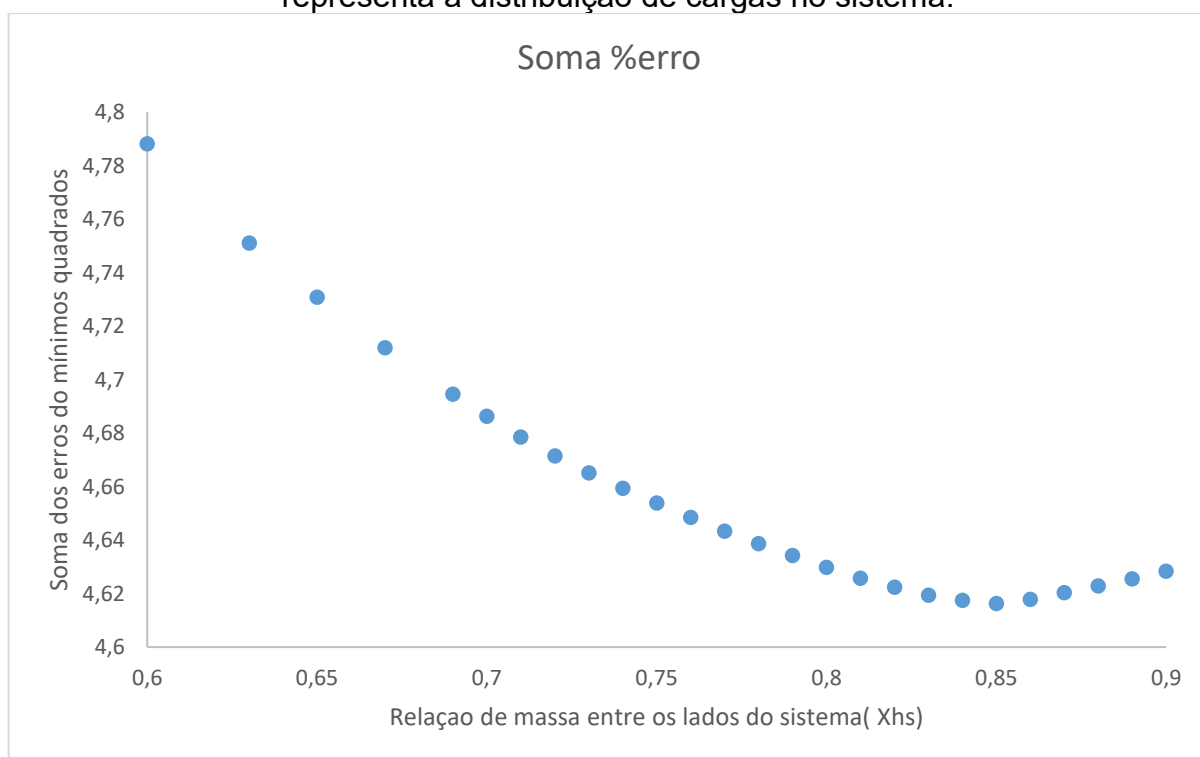
Fonte: O autor (2025).

Com base nos resultados obtidos utilizando as condições padrões apresentadas na literatura para a divisão de cargas em cada região, foi constatado um elevado valor no erro percentual em cada condição analisada. Por isso, foi

proposto a utilização de um método iterativo para reduzir o erro encontrado, ajustando de forma automática os parâmetros que descrevem as cada relação.

Utilizando uma planilha eletrônica foi desenvolvido a verificação dos erros para as diferentes condições analisadas buscando minimizá-las, variando a relação de massa em cada região e calculando as constantes novamente utilizando o método da bissecção conforme apresentado na Figura 18, onde foi encontrado o valor do ponto ótimo, que melhor descreve as relações.

Figura 18 – Curva varrendo relações de carga para estimar a região que melhor representa a distribuição de cargas no sistema.



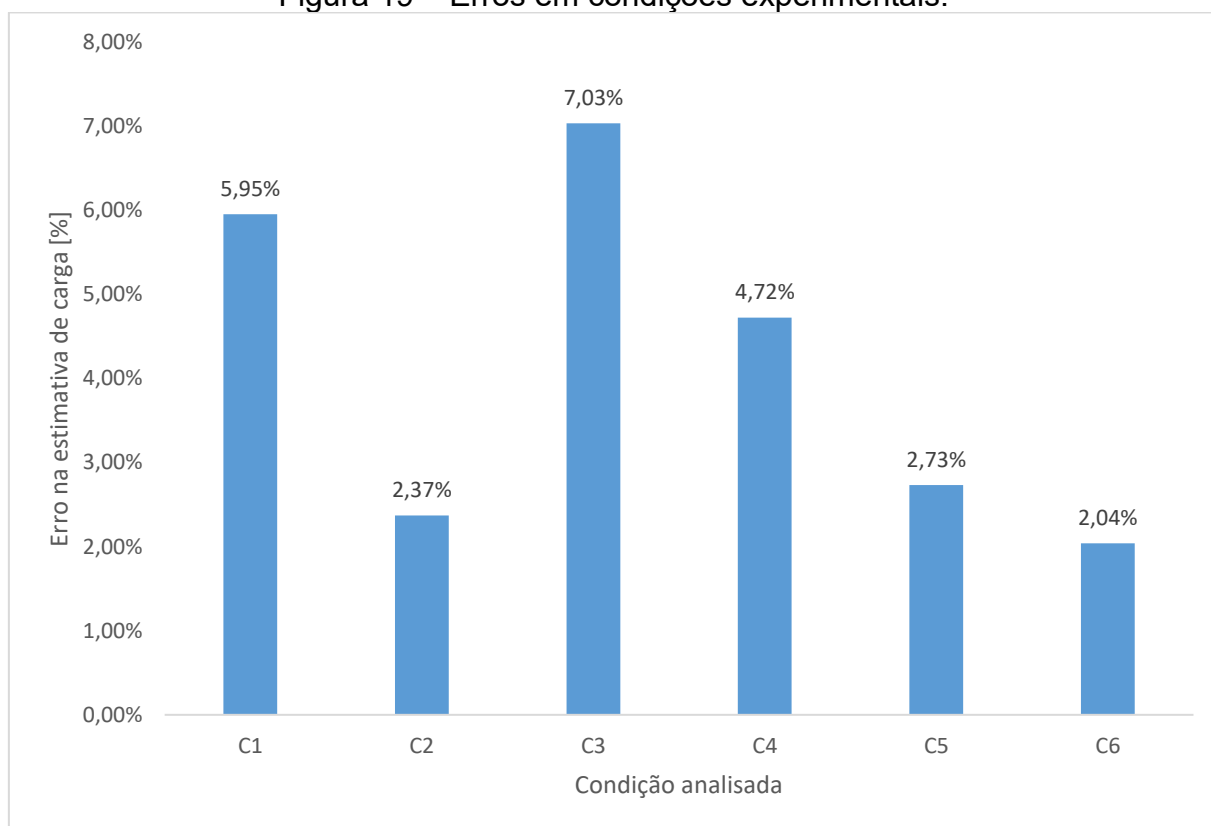
Fonte: O autor (2025).

Com base no método computacional analisado, foi possível verificar que as simulações apresentam boa correspondência com os dados experimentais. No entanto, o maior erro foi identificado que nas regiões mais distantes dos pontos ajustados conforme o Apêndice B, que apresenta os dados utilizados para o modelo computacional, no qual encontrou-se o maior erro percentual de 7% quando comparado com o valor real após o ajuste.

A Figura 19 apresenta o erro percentual associado para diferentes condições operacionais (C1 a C6). As condições C1 e C3, com carga de fluido refrigerante de 885g e rotações do compressor de 890rpm e 1074rpm, respectivamente,

apresentaram os maiores erros, de 5,95% e 7,03%, indicando maior divergência em relação à carga estimada. Já as condições C2 e C4, com carga de 985g e rotações de 890rpm e 1074rpm, respectivamente, apresentaram uma redução nos erros de 2,37% e 4,72%. Por fim, as condições C5 e C6, com cargas mais elevadas (1035g e 1080g), com rotação de 890rpm mostraram os menores erros percentuais, de 2,73% e 2,04%, respectivamente. Esses resultados sugerem que, nas faixas de carga mais elevadas, o método de estimativa adotado apresentou maior precisão.

Figura 19 – Erros em condições experimentais.



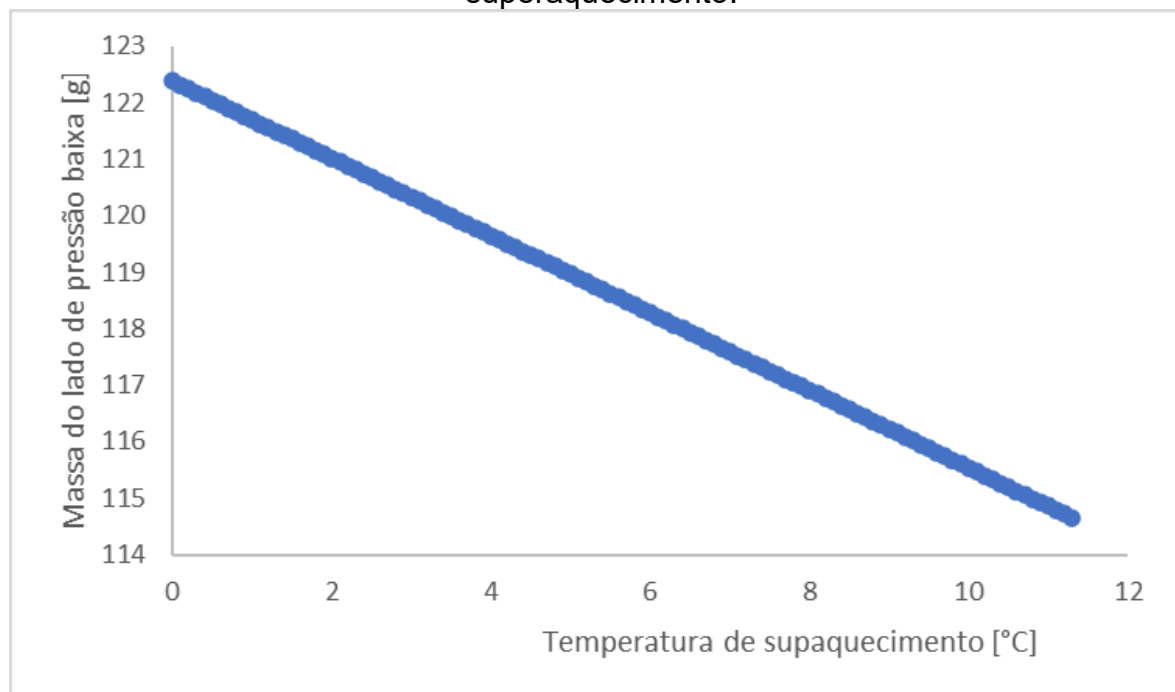
Fonte: O autor (2025).

De maneira geral, os erros observados em todas as condições experimentais avaliadas permaneceram próximos ou abaixo de 7%, o que demonstra uma boa acurácia do modelo desenvolvido. Esses resultados reforçam a capacidade do método proposto em estimar com precisão a massa de fluido refrigerante no sistema, mesmo diante de diferentes condições de operação, validando sua aplicação como uma ferramenta confiável para diagnóstico e monitoramento de carga em sistemas de refrigeração.

4.3.2 Determinação da quantidade de fluido refrigerante perdida devido ao vazamento

A Figura 20 apresenta a relação entre a temperatura de superaquecimento ($^{\circ}\text{C}$) e a massa de fluido refrigerante no lado de baixa pressão (g) do sistema de refrigeração, conforme obtido por meio do modelo matemático descrito nas equações (2). Apresentando a tendência inversamente proporcional, evidenciando que o aumento da temperatura de superaquecimento está diretamente associado à redução da massa de fluido refrigerante nessa região do sistema.

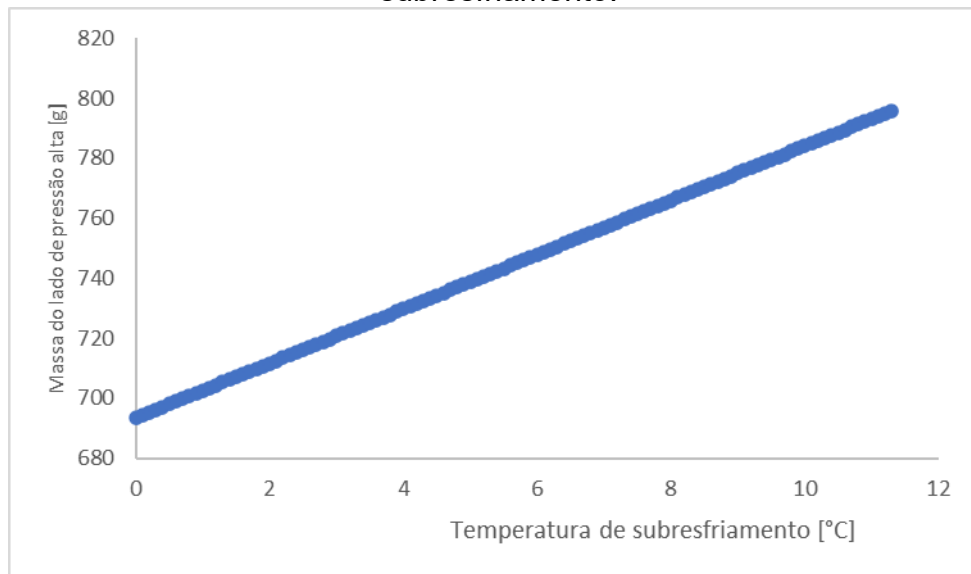
Figura 20 – A massa de refrigerante no lado de baixa pressão em função do superaquecimento.



Fonte: O autor (2025).

É apresentado na Figura 21 a correlação entre a temperatura de subresfriamento ($^{\circ}\text{C}$) e a massa de fluido refrigerante no lado de alta pressão (g) do sistema de refrigeração, conforme obtido a partir do modelo matemático proposto conforme equação (2). Há uma tendência linear crescente, indicando que o aumento da temperatura de subresfriamento está associado a uma elevação da massa de refrigerante nessa região do sistema.

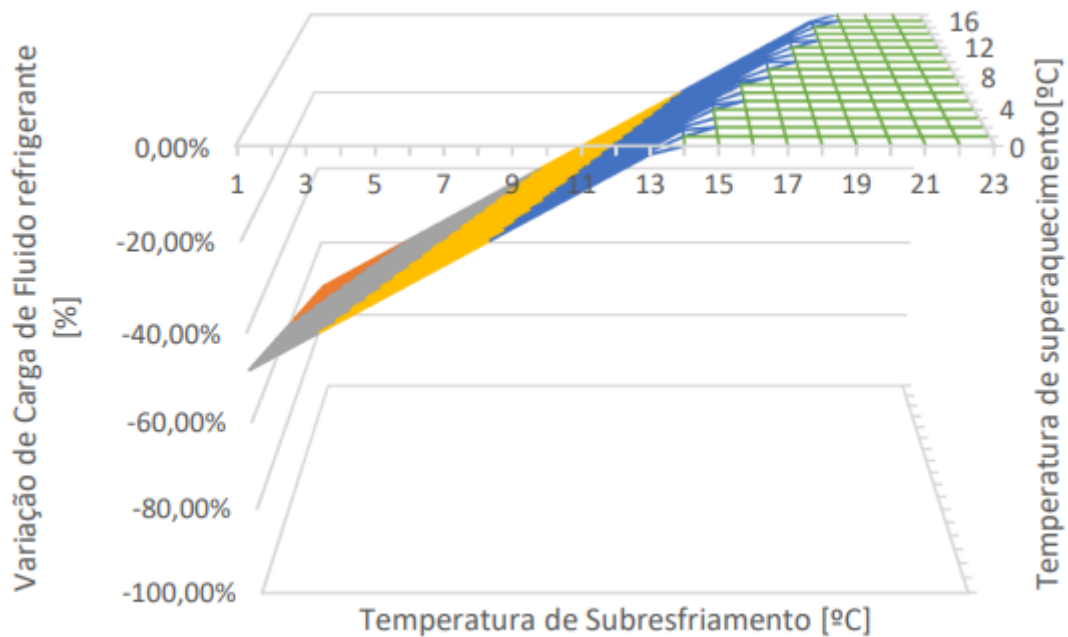
Figura 21 – A massa de refrigerante no lado de alta pressão em função do subresfriamento.



Fonte: O autor (2025).

A Figura 22 apresenta a superfície gerada a partir da equação (11), a qual permite identificar as regiões críticas na modelagem do sistema de refrigeração. O gráfico mostra a interação entre três variáveis fundamentais: temperatura de subresfriamento, temperatura de superaquecimento e a variação da carga de fluido refrigerante (em percentual), sendo negativa para vazamento e positiva para excesso de carga. Essa representação possibilita a estimativa da carga de fluido refrigerante com base em medições em regime permanente, além de evidenciar como a combinação desses parâmetros influencia o desempenho do sistema, destacando as regiões de maior sensibilidade à perda de fluido.

Figura 22 – Variação de carga de fluido refrigerante utilizando os parâmetros para compressor de velocidade fixa



Fonte: O autor (2025).

É importante destacar que os resultados apresentados foram obtidos em uma bancada experimental e não refletem diretamente o comportamento de um contêiner refrigerado em operação real. No entanto, o método proposto mostra-se promissor e de fácil aplicação em sistemas reais, como os contêineres refrigerados, podendo contribuir significativamente para a detecção precoce de vazamentos, identificação de falhas e tomada de decisões mais assertivas para correção e manutenção do sistema.

5 CONCLUSÕES

O desempenho dos sistemas de refrigeração de contêineres refrigerados se mostra fundamental para garantir a integridade das cargas perecíveis durante o transporte, assegurando não apenas a conservação adequada dos produtos, mas também a redução de prejuízos financeiros e a minimização de impactos ambientais.

A partir das buscas na literatura sobre o assunto, foram identificados os principais tipos de falhas em sistemas de refrigeração de contêineres. Verificou-se que estes, são semelhantes aos encontrados em sistemas convencionais. Em relação às falhas, foi verificado que a maior ocorrência são os vazamentos de fluido refrigerante.

Por este motivo, foi proposto um modelo de tomada de decisão adaptado para contêineres refrigerados para auxiliar na identificação da causa raiz de falhas associadas a vazamentos de fluido refrigerante.

Devido a dificuldades práticas para a detecção quantitativa de vazamentos, foi utilizado um modelo matemático capaz identificar a quantidade de fluido refrigerante perdida devido ao vazamento. Outra vantagem deste modelo, é que as variáveis de entrada são o superaquecimento do evaporador e subresfriamento do condensador, que geralmente podem ser determinadas com base em variáveis já medidas no sistema de refrigeração de contêineres refrigerados.

Os parâmetros do modelo matemático foram ajustados com base em dados experimentais obtidos no Laboratório de Refrigeração Veicular (ReVe). As previsões da massa de fluido refrigerante realizadas pelo modelo apresentaram erros menores que 7% em relação a toda base de dados experimental.

Os resultados obtidos mostram a capacidade do modelo matemático em prever quantidade de fluido refrigerante perdida devido ao vazamento. Após o vazamento ser comprovado, recomenda-se o uso do método de tomada de decisão proposto para identificação da causa raiz e posterior solução do problema.

Além disso, apresenta um método capaz de prever vazamentos de fluido refrigerante em contêineres refrigerados antes que eles comprometam a capacidade de refrigeração oferece vantagens significativas para a operação e conservação de cargas sensíveis à temperatura. A principal vantagem é a possibilidade de realizar manutenções preventivas de forma mais eficiente, evitando falhas no sistema que poderiam resultar na perda total da carga transportada. O método também aumenta a vida útil dos equipamentos, minimiza custos operacionais com reparos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nesse estudo realizado, foram identificadas limitações no monitoramento atual dos sistemas de refrigeração de contêineres causadas principalmente pela dependência de intervenções manuais durante o período entre transportes marítimos, diante dos dados apresentados nesse estudo propõe-se como sugestões para trabalhos futuros:

- **Implementar sistemas de monitoramento em tempo real:** Aplicação de tecnologias que utilizem sensores inteligentes e plataformas conectadas para acompanhar permitir o acompanhamento de forma remota o desempenho dos sistemas, permitindo respostas mais rápidas a possíveis falhas.
- **Desenvolver sensores virtuais:** Criar modelos computacionais e matemáticos para estimar parâmetros do sistema a partir de dados já disponíveis, sem necessidade de instalar sensores físicos em todos os pontos.
- **Realizar estudos estatísticos sobre a confiabilidade dos componentes em operação:** Analisar estatisticamente os componentes mais propensos a falhas, como compressores, evaporadores e válvulas, visando a manutenção preventiva e preditiva dos componentes.
- **Criar ferramentas de apoio à decisão:** Propor metodologias automatizadas que auxiliem os operadores a escolher o momento ideal para realizar manutenções, levando em conta fatores como custo, impacto na operação e segurança.

Essas sugestões podem contribuir para tornar os sistemas de refrigeração de contêineres mais eficientes, seguros e adaptados às exigências operacionais e ambientais atuais.

- **Realizar estudos sobre o desenvolvimento de sistema de telemetria:** Propor a implementação de sistemas de telemetria para o monitoramento remoto dos dados, com o objetivo de automatizar e otimizar o processo de coleta, além de ampliar a eficiência na detecção de falhas e no acompanhamento em tempo real do desempenho dos sistemas.

REFERÊNCIAS

- BABAZADEH, Mehrdad; LANG, Walter. Fault diagnosis while monitoring environmental variables by a sensor network. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 42, n. 13, p. 272-277, 2009.
- BI, Jian; WANG, Hua; YANA, Enbo ; WANG, Chuan; YAN, Ke. AI in HVAC fault detection and diagnosis: a systematic review. **Energy Review**, v. 3, n. 2, 2024.
- BORGNACKE, Claus; E. SONNTAG, Richard. **Fundamentos da termodinâmica**. 7. ed. Blucher, 2009. 461 p.
- BREUKER, Mark S.; BRAUN, James E. Common faults and their impacts for rooftop air conditioners. **Hvac&R Research**, v. 4, n. 3, p. 303-318, 1998.
- CARRIER. **Carrier Transicold**. 10 jan. 2024. Disponível em: <https://www.carrier.com/carrier/en/worldwide/>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- CARRIER. **Carrier Transicold: operations and service manual**. 2021. Disponível em: <https://www.carrier.com/carrier/en/worldwide/>. Acesso em: 20 jun. 2024.
- CASTELEIN, Bob; GEERLINGS, Harry; VAN DUIN, Ron. The reefer container market and academic research: a review study. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, 2020.
- CHEN, Bin; BRAUN, James E. Simple fault detection and diagnosis methods for packaged air conditioners. **Anais do The International Refrigeration and Air Conditioning Conference**. 2000.
- CHRISTENSEN, Rasmus L.; KRESTEN K. SØRENSEN; WISNIEWSKI, Rafal ; SZNAIER Mário. Unsupervised Fault Detection of Reefer Containers: A Moments-Based SDP Approach. **Anais do 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)**. IEEE, 2018. p. 368-373.
- DA SILVA, Diogo Lôndero; OLIVEIRA, Igor Santos de; JULIANI, Aline Durrer Patelli; CORDOVA, Guilherme Medeiros de. 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. 1–11, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05283-1>.
- DA SILVA, Diogo Lôndero; MELO, Cláudio. A perspective on R&D&I activities in the Brazilian mobile air conditioning market. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS TÉRMICAS E ENGENHARIA – ENCIT**, 16., 2016, Vitória-ES. Rio de Janeiro: ABCM, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.26678/ABCM.ENCIT2016.CIT2016-0650>.
- DELLACASA, A. Refrigerated transport by sea. **International Journal of Refrigeration**, v. 10, n. 6, p. 349-352, 1 jan. 1987.
- GCS reefer, **Global container service**. 2013. Disponível em: <https://www.gcs-reefer.com/en/reefer-containers>. Acesso em: 23 de jun. 2024.

GÜNAYDIN, Talha; ÜNSAL, Can; ÖZTABAK, Efe; OLCAY, Ali Bahadır. Thermal fluid analysis of reefer containers. In: **CONGRESS ON THERMAL SCIENCE AND TECHNOLOGY**, 23., 2021, Gaziantep, Turquia. Anais [...]. Gaziantep: [s.n.], 2021.

KATIPAMULA, S.; BRAMBLEY, M. R. Review Article: Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems—A Review, Part I. **HVAC&R Research**, v. 11, n1, p. 3–25, 2005.
<https://doi.org/10.1080/10789669.2005.10391123>

KIM, Donghyuk; KANG, Sukkyung; YOO, Jaisuk; KIM, Dong-Kwon; YOUN, Baek. A study on the quantitative single and dual fault diagnosis of residential split type air conditioners in static operation using support vector machine method. **International Journal of Refrigeration**, v. 131, jul. 2021. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.07.002>.

KIM, Woohyun; BRAUN, James E. Extension of a virtual refrigerant charge sensor. **International Journal of Refrigeration**, v. 55, p. 224-235, 2015.

KIM, Woohyun; LEE, Je-Hyeon. Fault detection and diagnostics analysis of air conditioners using virtual sensors. **Thermal Engineering**, v. 191, 2021.

LLOPIS-MENGUAL, Belén; YUILL, David P.; NAVARRO-PERIS, Emilio. Fault detection and diagnosis algorithm for multiple simultaneous faults in residential air-conditioning systems: Development, validation study and critical analysis. **Thermal Engineering**, v. 269, 2025.

LI, Haorong; BRAUN, James E. A methodology for diagnosing multiple simultaneous faults in vapor-compression air conditioners. **HVAC&R Research**, v. 13, n. 2, p. 369-395, 2007.

LI, Haorong; BRAUN, James E. Development, evaluation, and demonstration of a virtual refrigerant charge sensor. **HVAC&R Research**, v. 15, n. 1, p. 117-136, 2009.

MARTINELLI, F. B. **Gestão da Qualidade Total**. Rio de Janeiro: Fundação Biblioteca Nacional, 2009. 202 p.

NAVARRO.ESBRI, J.; TORRELLA, Eb; CABELLO, R. A vapour compression chiller fault detection technique based on adaptative algorithms. Application to on-line refrigerant leakage detection. **International Journal of Refrigeration**, v. 29, n. 5, p. 716-723, 2006.

FISCHER, Filipe. **Projeto de um aparato experimental para análise de sistemas de condicionamento de ar automotivo**. 2022. 68 p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) — Universidade Federal de Santa Catarina. Campus Joinville, Joinville, 2022.

FRANCIS, Christina; MAIDMENT, Graeme; DAVIES, Gareth. An investigation of refrigerant leakage in commercial refrigeration. **International Journal of Refrigeration**, v. 74, p. 12-21, 2017.

OLIVEIRA, Igor Santos de. Avaliação do desempenho energético de sistemas automotivos de condicionamento de ar. **Anais do 33º Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica**, Santa Catarina, 2023.

OLIVEIRA, Igor Santos de. Avaliação do desempenho energético de sistemas automotivos de condicionamento de ar. **Anais do 34º Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica**, Santa Catarina, 2024.

PEREIRA, Jader Fernandes; HORTA, Euler Guimarães; MENDES, Tiago. Detecção de falhas em um sistema de refrigeração por compressão de vapor. **Anais do 12 congresso brasileiro de inteligência computacional**. Curitiba: ABRICOM, 2015.

REVE, 2025. Laboratório de refrigeração Veicular. Disponível em: <https://refridynamics.ufsc.br/>. Acesso em: 29 de Mar. 2025.

SENGER, Guilherme; Alexsandro; RONZONI, Adriano; HERMES, Christian. COP-Based Decision Tree for Fault Detection and Diagnosis in Single-Door Refrigerating Appliances. **Anais do 20 International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue**, July 15 - 18, 2024

SINGH, V.; MATHUR, J.; BHATIA, A.A comprehensive review: Fault detection, diagnostics, prognostics, and fault modeling in HVAC systems. **International Journal of Refrigeration**, v.144,p. 283-295, 2022.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. Saiz. **Refrigeração industrial**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2012. 384 p.

TASSOU, S. A.; GRACE, I.N. Fault detection and diagnosis in liquid chillers. **Journal of Process Mechanical Engineering**, v. 219. I. 2, p 117-125, 2005.

TAKEUCHI, S.; NISHINO, T.; SAITO, T.; WATANABE, I. Semi-supervised Approach to Soft Sensor Modeling for Fault Detection in Industrial Systems with Multiple Operation Modes. **Anais do International Conference on Advanced Intelligent System and Informatics**, 2017.

UNCTAD. **Comércio e Desenvolvimento da ONU (UNCTAD)**. Disponível em: <https://unctad.org/about>. Acesso em: 06 jan. 2025.

VAN DER SMAN, R. G. M.; VERDIJCK, G. J. C. Model predictions and control of conditions in a CA-reefer container. **Anais do VIII International Controlled Atmosphere Research Conference** 600. 2001. p. 163-171.

ZŁOCZOWSKA, Ewelina. Maritime containers refrigeration plant faults survey. **New Trends in Production Engineering**, v. 1, p. 589-595, 2018.

WEIS, Gabrielle; SENGGER, Guilherme; VITOR, Murilo; Vitor; SILVEIRA, Alexsandro; HERMES; Algoritmo especialista para detecção de falhas em sistemas de refrigeração que utilizam compressores de velocidade variável. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente e X Simpósio Brasileiro de Sistemas de Elétricos**. In: Sociedade Brasileira de Automática (SBA). Manaus, Out. de 2023

APÊNDICE A

Figura 23 – Regressão para estimar os parâmetros ajustados.

Lado de baixa pressão						Lado de alta pressão					
M_baixa_exp	M_baixa_calculada	Erro^2	Tsup	Delta_X	MIs,O	M_alta_exp	M_alta_calculada	Erro^2	Tsub	MIs,O	Ksc
133,5	142,2809678	77,1053957	10,4	0,0235	122,39	756,5	792,9767106	1330,55	10,98	693,515	9,05844359
133,65	140,8270642	51,5102503	10,5	0,0207	122,39	757,35	797,5059324	1612,5	11,48	693,515	Sum_erro 214456,51
133,8	140,6217069	46,5356856	10,2	0,0207	122,39	758,2	794,4260616	1312,33	11,14	693,515	
133,95	140,3764545	41,2993171	10,1	0,0204	122,39	759,05	790,0780086	962,737	10,66	693,515	
134,1	141,0643884	48,5027059	9,97	0,0218	122,39	759,9	790,0780086	910,712	10,66	693,515	
134,25	139,6027622	28,652063	10,3	0,0187	122,39	760,75	791,5273596	947,246	10,82	693,515	
134,4	137,9781196	12,8029398	10,2	0,0158	122,39	761,6	792,433204	950,686	10,92	693,515	
134,55	137,9854501	11,8023175	9,92	0,0162	122,39	762,45	786,2734623	567,557	10,24	693,515	
134,7	138,6682003	15,7466137	9,73	0,0177	122,39	763,3	785,8205402	507,175	10,19	693,515	
134,85	139,7070959	23,5913805	9,82	0,0195	122,39	764,15	785,9111246	473,547	10,2	693,515	
135	136,9063733	3,63425904	10,7	0,0133	122,39	765	789,6250865	606,395	10,61	693,515	
135,15	136,7815906	2,662088	10,2	0,0137	122,39	765,85	792,2520351	697,067	10,9	693,515	
135,3	136,7336739	2,05542098	10,1	0,0137	122,39	766,7	788,7461566	290,571	9,961	693,515	
135,45	138,3788523	8,57817555	10,2	0,0166	122,39	767,55	784,0994359	273,884	10	693,515	
135,6	141,0019039	29,1805655	10,1	0,0215	122,39	768,4	788,5380732	405,542	10,49	693,515	
135,75	141,4787183	32,8182138	10,3	0,0221	122,39	769,25	791,2556063	484,247	10,79	693,515	
135,9	138,8089262	8,46185192	10,6	0,0169	122,39	770,1	792,7049573	510,984	10,95	693,515	
136,05	138,6305579	6,65927907	10,2	0,017	122,39	770,95	794,3354771	546,881	11,13	693,515	
136,2	139,0044945	7,86518939	9,98	0,018	122,39	771,8	789,3533332	308,12	10,58	693,515	
136,35	139,7184404	11,3463904	9,91	0,0194	122,39	772,65	784,7335269	146,012	10,07	693,515	
136,5	139,1947922	7,26190505	10,3	0,018	122,39	773,5	789,3533332	251,328	10,58	693,515	
136,65	137,1637479	0,26393694	10,5	0,014	122,39	774,35	789,6250865	233,328	10,61	693,515	
136,8	137,9499545	1,32239532	10	0,016	122,39	775,2	786,2734623	122,622	10,24	693,515	
136,95	139,5330339	6,6720643	9,8	0,0192	122,39	776,05	788,0851511	144,845	10,44	693,515	
137,1	138,7731318	2,79936986	10,2	0,0173	122,39	776,9	793,2484639	267,272	11,01	693,515	
137,25	136,6542756	0,35488761	10,5	0,013	122,39	777,75	793,882555	260,259	11,08	693,515	
137,4	137,4404821	0,0016388	10,1	0,015	122,39	778,6	787,9945666	88,2579	10,43	693,515	
137,55	138,7503432	1,44082383	9,85	0,0177	122,39	779,45	786,1828779	45,3316	10,23	693,515	
137,7	140,9155542	10,3397889	9,84	0,0217	122,39	780,3	787,8133977	56,4511	10,41	693,515	
137,85	140,4460831	6,73964747	10,4	0,0201	122,39	781,15	796,5095036	235,914	11,37	693,515	
138	137,7626005	0,05635851	10,6	0,0149	122,39	782	797,2341791	232,08	11,45	693,515	
138,15	137,6648068	0,23541246	10,1	0,0154	122,39	782,85	792,0708662	85,0244	10,88	693,515	
138,3	138,3643776	0,00414448	10	0,0168	122,39	783,7	788,7192421	25,1928	10,51	693,515	
138,45	139,954794	2,26440502	10	0,0197	122,39	784,55	788,1757355	13,146	10,45	693,515	
138,6	138,8012969	0,04052043	10,4	0,0171	122,39	785,4	790,983853	31,1794	10,76	693,515	
138,75	137,1025328	2,71414806	10,5	0,0139	122,39	786,25	790,1685931	15,3554	10,67	693,515	
138,9	137,40704	2,22892943	10,2	0,0148	122,39	787,1	786,7263845	0,13959	10,29	693,515	
139,05	138,3373887	0,50781481	10	0,0167	122,39	787,95	785,7299557	4,9286	10,18	693,515	
139,2	139,7513971	0,3042388	10,1	0,0197	122,39	788,8	790,1685931	1,87305	10,67	693,515	

Fonte: O autor (2005).

APÊNDICE B

1) Retirar informações da carga nominal

Descrição	valor	Como foi obtido
Carga nominal, M _{rated}	985,00	Ref: 1 kg
X _{hs} =	0,85	Parâmetro padrão (razão de carga)
M _{hs, rated} =	837,25	utilizado a eq 5
T _{sc,rated}	18,23	Dos dados coletados (média)
T _{sh,rated}	10,31	Dos dados coletados (média)
Delta_X _{evap,rated}	0,04	Dos dados coletados (média)

Deconforme dito no artigo, deve ser coleta em condições nominais

M ₀	815,9	Deconforme dito no artigo, dados para Tsub=0
X ₀	0	
X _{evap_0}	0,2743	

Justificativas:

1) Foi utilizado como referência de carga, 1kg e a média dos T_{sc} e T_h desses pontos
The two constants T_{sc,rated} and T_{sh,rated} can be readily obtained from technical data provided by manufacturers. As

2) Como vai ser calculado a variação da carga em relação à carga nominal:

$$\frac{(M_{hs} - M_{hs, rated})}{M_{hs, rated}} = \frac{1}{K_{hs}} \{ (T_{sc} - T_{sc, rated}) - K_{sh}(T_{sh} - T_{sh, rated}) \}$$

3) De onde são retiradas os dados:

are characteristics of a given system, and T_{sc, rated} and T_{sh, rated} are liquid line subcooling and suction line superheat at rated conditions with the nominal charge. respectively.

4) Como são estimados os parametros K_{sh} e K_{hs}

$$K_{hs} = \frac{M_{hs, rated}}{K_{hs}} = \frac{T_{sc, rated}}{(1 - x_0) \cdot T_{sc, rated}}$$
$$K_{sh, sc} = \frac{K_{hs}}{K_{hs}} = \frac{(T_{sc} - T_{sc, rated})}{(T_{sh} - T_{sh, rated})}$$
$$M_{hs, rated} = M_0 \cdot M_{hs, rated}$$
$$M_{hs, rated} = M_{hs, rated} \cdot M_{hs, rated}$$

ajuste de K_{sh/sc} e K_{hs} usando regressão linear aplicada às medições.

5) como foi definido a razão de carga

Based on data available from [https://www.hvac.com/technical/cooling-load-calculator](#) it was found that a reasonable estimate for T_{sc, rated} is 18.23 °C whereas a value of 0.75 was determined for x₀. As a default parameter, a reasonable estimate for K_{sh, sc} for systems using

O método de ajuste de parâmetros minimiza os erros entre a carga de refrigerante prevista e a conhecida usando técnicas de regressão linear

Carga [g]	Carga alta [g]	Carga baixa[g]	P_desc [bar]	P_suc [bar]	T1008	T_in	Tout	Rot	T_sub	X	T_sup	X-X_evap
815,9	693,515	122,385							0	0,2743		0

Dados 690

Carga [g]	Carga alta [g]	Carga baixa[g]	P_desc [bar]	P_suc [bar]	T1008	T_in	Tout	Rot	T_sub	X	T_sup	X-X_evap
890	756,5	133,5	14,04	3,83	41,54	18	63	690	10,98	0,2508	10,4	0,0235
891	757,35	133,65	14,2	3,76	41,49	17,6	62,78	690	11,48	0,2536	10,5	0,0207
892	758,2	133,8	14,12	3,78	41,61	17,4	62,69	690	11,14	0,2536	10,2	0,0207
893	759,05	133,95	14,05	3,82	41,88	17,6	62,72	690	10,66	0,2539	10,08	0,0204
894	759,9	134,1	14,07	3,86	41,94	17,8	62,81	690	10,66	0,2525	9,973	0,0218
895	760,75	134,25	14,14	3,8	41,98	17,7	62,86	690	10,82	0,2556	10,3	0,0187
896	761,6	134,4	14,22	3,76	42,11	17,3	62,71	690	10,92	0,2585	10,23	0,0158
897	762,45	134,55	14,05	3,8	42,3	17,3	62,66	690	10,24	0,2581	9,923	0,0162
898	763,3	134,7	14,07	3,85	42,41	17,5	62,74	690	10,19	0,2566	9,729	0,0177
899	764,15	134,85	14,03	3,87	42,29	17,8	62,83	690	10,2	0,2548	9,817	0,0195
900	765	135	14,16	3,73	42,25	17,5	62,72	690	10,61	0,261	10,65	0,0133
901	765,85	135,15	14,27	3,74	42,27	17,1	62,68	690	10,9	0,2606	10,15	0,0137
902	766,7	135,3	14	3,77	42,44	17,2	62,72	690	9,961	0,2606	10,08	0,0137
903	767,55	135,45	13,99	3,82	42,37	17,7	62,87	690	10	0,2577	10,18	0,0166
904	768,4	135,6	14,04	3,87	42,03	18,1	63,11	690	10,49	0,2528	10,12	0,0215
905	769,25	135,75	14,06	3,84	41,78	18	63,14	690	10,79	0,2522	10,34	0,0221
906	770,1	135,9	14,14	3,74	41,85	17,5	62,87	690	10,95	0,2574	10,57	0,0169
907	770,95	136,05	14,26	3,77	42,02	17,4	62,77	690	11,13	0,2573	10,23	0,017
908	771,8	136,2	14,15	3,83	42,25	17,6	62,84	690	10,58	0,2563	9,982	0,018
909	772,65	136,35	13,97	3,86	42,24	17,8	62,94	690	10,07	0,2549	9,913	0,0194
910	773,5	136,5	14,13	3,82	42,19	17,8	63	690	10,58	0,2563	10,26	0,018
911	774,35	136,65	14,17	3,75	42,28	17,5	62,85	690	10,61	0,2603	10,47	0,014
912	775,2	136,8	14,08	3,81	42,39	17,5	62,77	690	10,24	0,2583	10,03	0,016
913	776,05	136,95	14,15	3,88	42,39	17,8	62,88	690	10,44	0,2551	9,801	0,0192
914	776,9	137,1	14,29	3,81	42,22	17,7	63,06	690	11,01	0,257	10,2	0,0173
915	777,75	137,25	14,32	3,72	42,24	17,3	62,9	690	11,08	0,2613	10,52	0,013
916	778,6	137,4	14,13	3,78	42,34	17,3	62,93	690	10,43	0,2593	10,08	0,015
917	779,45	137,55	14,08	3,85	42,4	17,6	62,99	690	10,23	0,2566	9,849	0,0177
918	780,3	137,7	14,05	3,89	42,13	17,9	63,19	690	10,41	0,2526	9,835	0,0217
919	781,15	137,85	14,31	3,82	41,92	18	63,1	690	11,37	0,2542	10,42	0,0201
920	782	138	14,39	3,73	42,06	17,5	62,84	690	11,45	0,2594	10,63	0,0149
921	782,85	138,15	14,29	3,79	42,35	17,4	62,82	690	10,88	0,2589	10,09	0,0154
922	783,7	138,3	14,22	3,85	42,52	17,8	62,9	690	10,51	0,2575	10	0,0168
923	784,55	138,45	14,15	3,89	42,38	18,1	63,08	690	10,45	0,2546	10,02	0,0197
924	785,4	138,6	14,25	3,83	42,36	18	63,17	690	10,76	0,2572	10,4	0,0171
925	786,25	138,75	14,22	3,76	42,36	17,8	62,99	690	10,67	0,2604	10,46	0,0139
926	787,1	138,9	14,15	3,81	42,54	17,7	63	690	10,29	0,2595	10,19	0,0148

2) gerar regressão estabelecer carga mh,0 e mls,0

Descrição	valor	Como foi obtido		
Mhs,0	693,62	Regressão- Coeficiente linear	Lado de pressão alta	*massa para Tsub=0
K_sc	9,06	Regressão- Coeficiente angular do subesfriamento		*Depende da geometria do condensador
Mls,0	122,39	Regressão- Coeficiente linear	Lado de pressão baixa	*massa para Tsup=0
Ksh	0,68	Regressão- Coeficiente angular do supaquecimento		*Depende da geometria do evaporador
Kx	543,70	Regressão- Coeficiente angular do título		*constante específica do sistema

Justificativas:

6) a regressão para o lado de alta é dado por

$$m_{hs} = K_{sc} \cdot T_{sc} + m_{hs,0} \quad (6)$$

Coeficientes	
Interseção	693,62
T_sub	9,06

EixoHorizontal (Valor)

7) a regressão para o lado de baixa é dado por

$$m_{ls} = m_{ls,0} - K_{sh} \cdot T_{sh} + K_x \cdot (x_{sc,0} - x_{evap,in}) \quad (7)$$

Coeficientes	
Interseção	122,39
T_sup	0,68
X-X_evap	543,70

8) Equações montadas

$$m_{hs} = 9,05844358774336 \cdot T_{sc} + 693,515 \quad (6)$$

$$m_{ls} = 122,385 + 0,684524138739552 \cdot T_{sh} + 543,698585881797 \cdot (Delta X) \quad (7)$$

9) Verificando os dados para condição padrão e erros

$$m_{hs,rated} = K_{sc} \cdot T_{sc,rated} + m_{hs,0} \quad (8)$$

$$m_{ls,rated} = m_{ls,0} - K_{sh} \cdot T_{sh,rated} + K_x \cdot (x_{sc,0} - x_{evap,in,rated}) \quad (9)$$

Carga	Real	Calculada
Alta	837,25	858,6704
Baixa	147,75	150,5678
Total	985	1009,238

10) Ao subtrair de massa atual pelo valor nominal temos a carga pedida

$$K_{sc} \cdot (T_{sc} - T_{sc,rated}) = (m_{hs} - m_{hs,rated}) \quad (10)$$

$$-K_{sh} \cdot (T_{sh} - T_{sh,rated}) + K_x \cdot (x_{evap,in} - x_{evap,in,rated}) = (m_{ls} - m_{ls,rated}) \quad (11)$$

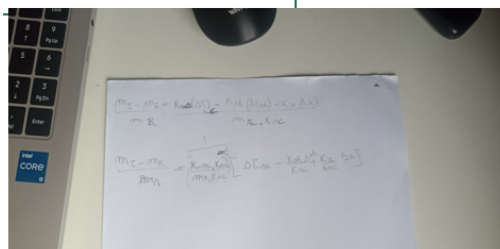
$$(m_{total} - m_{total,rated}) = K_{sc} \cdot (T_{sc} - T_{sc,rated}) - K_{sh} \cdot (T_{sh} - T_{sh,rated})$$

) gerar regressão estabelecer carga mh,0 e mls,0

ch^-1	0,01	Dividindo pela massa
sh/sc	0,08	*Divide pela constante de Ksc
x/sc	60,02	

Justificativas:

2) a reorganização da equação



3) a regressão para o lado de alta é dado por

$$\frac{(m_{total} - m_{total,rated})}{m_{total,rated}} = \frac{1}{K_{ch}} \{ (T_{sc} - T_{sc,rated}) - K_{sh/sc} (T_{sh} - T_{sh,rated}) + K_{x/sc} (x_{evap,in} - x_{evap,in,rated}) \} \quad (13)$$

3) a equação final ficou

$$\frac{(M_{ponto} - 1009,23820368457)}{1009,24} = 0,00898 \cdot [(T_{sc} - 18,2322) + 0,0755675224015035 \cdot (T_{sh} - 10,3092) + 60,021192450484 \cdot (x_{sc,0} - x_{evap}) - 0,038856]$$

Pelo lado esquerdo da equação				Pelo lado esquerdo da equação				Pelo lado esquerdo da equação				Pelo lado esquerdo da equação			
Carpa [g]	T. sup.	T. sup.	z	Carpa [g]	T. sup.	T. sup.	z	Carpa [g]	T. sup.	T. sup.	z	Carpa [g]	T. sup.	T. sup.	z
890	-95	-95	-95	890	-95	-95	-95	890	-95	-95	-95	890	-95	-95	-95
891	-94	-94	-94	891	-94	-94	-94	891	-94	-94	-94	891	-94	-94	-94
892	-93	-93	-93	892	-93	-93	-93	892	-93	-93	-93	892	-93	-93	-93
893	-92	-92	-92	893	-92	-92	-92	893	-92	-92	-92	893	-92	-92	-92
894	-91	-91	-91	894	-91	-91	-91	894	-91	-91	-91	894	-91	-91	-91
895	-90	-90	-90	895	-90	-90	-90	895	-90	-90	-90	895	-90	-90	-90
896	-89	-89	-89	896	-89	-89	-89	896	-89	-89	-89	896	-89	-89	-89
897	-88	-88	-88	897	-88	-88	-88	897	-88	-88	-88	897	-88	-88	-88
898	-87	-87	-87	898	-87	-87	-87	898	-87	-87	-87	898	-87	-87	-87
899	-86	-86	-86	899	-86	-86	-86	899	-86	-86	-86	899	-86	-86	-86
900	-85	-85	-85	900	-85	-85	-85	900	-85	-85	-85	900	-85	-85	-85
901	-84	-84	-84	901	-84	-84	-84	901	-84	-84	-84	901	-84	-84	-84
902	-83	-83	-83	902	-83	-83	-83	902	-83	-83	-83	902	-83	-83	-83
903	-82	-82	-82	903	-82	-82	-82	903	-82	-82	-82	903	-82	-82	-82
904	-81	-81	-81	904	-81	-81	-81	904	-81	-81	-81	904	-81	-81	-81
905	-80	-80	-80	905	-80	-80	-80	905	-80	-80	-80	905	-80	-80	-80
906	-79	-79	-79	906	-79	-79	-79	906	-79	-79	-79	906	-79	-79	-79
907	-78	-78	-78	907	-78	-78	-78	907	-78	-78	-78	907	-78	-78	-78
908	-77	-77	-77	908	-77	-77	-77	908	-77	-77	-77	908	-77	-77	-77
909	-76	-76	-76	909	-76	-76	-76	909	-76	-76	-76	909	-76	-76	-76
910	-75	-75	-75	910	-75	-75	-75	910	-75	-75	-75	910	-75	-75	-75
911	-74	-74	-74	911	-74	-74	-74	911	-74	-74	-74	911	-74	-74	-74
912	-73	-73	-73	912	-73	-73	-73	912	-73	-73	-73	912	-73	-73	-73
913	-72	-72	-72	913	-72	-72	-72	913	-72	-72	-72	913	-72	-72	-72
914	-71	-71	-71	914	-71	-71	-71	914	-71	-71	-71	914	-71	-71	-71
915	-70	-70	-70	915	-70	-70	-70	915	-70	-70	-70	915	-70	-70	-70
916	-69	-69	-69	916	-69	-69	-69	916	-69	-69	-69	916	-69	-69	-69
917	-68	-68	-68	917	-68	-68	-68	917	-68	-68	-68	917	-68	-68	-68
918	-67	-67	-67	918	-67	-67	-67	918	-67	-67	-67	918	-67	-67	-67
919	-66	-66	-66	919	-66	-66	-66	919	-66	-66	-66	919	-66	-66	-66
920	-65	-65	-65	920	-65	-65	-65	920	-65	-65	-65	920	-65	-65	-65
921	-64	-64	-64	921	-64	-64	-64	921	-64	-64	-64	921	-64	-64	-64
922	-63	-63	-63	922	-63	-63	-63	922	-63	-63	-63	922	-63	-63	-63
923	-62	-62	-62	923	-62	-62	-62	923	-62	-62	-62	923	-62	-62	-62
924	-61	-61	-61	924	-61	-61	-61	924	-61	-61	-61	924	-61	-61	-61
925	-60	-60	-60	925	-60	-60	-60	925	-60	-60	-60	925	-60	-60	-60
926	-59	-59	-59	926	-59	-59	-59	926	-59	-59	-59	926	-59	-59	-59
927	-58	-58	-58	927	-58	-58	-58	927	-58	-58	-58	927	-58	-58	-58
928	-57	-57	-57	928	-57	-57	-57	928	-57	-57	-57	928	-57	-57	-57
929	-56	-56	-56	929	-56	-56	-56	929	-56	-56	-56	929	-56	-56	-56
930	-55	-55	-55	930	-55	-55	-55	930	-55	-55	-55	930	-55	-55	-55
931	-54	-54	-54	931	-54	-54	-54	931	-54	-54	-54	931	-54	-54	-54
932	-53	-53	-53	932	-53	-53	-53	932	-53	-53	-53	932	-53	-53	-53
933	-52	-52	-52	933	-52	-52	-52	933	-52	-52	-52	933	-52	-52	-52
934	-51	-51	-51	934	-51	-51	-51	934	-51	-51	-51	934	-51	-51	-51
935	-50	-50	-50	935	-50	-50	-50	935	-50	-50	-50	935	-50	-50	-50
936	-49	-49	-49	936	-49	-49	-49	936	-49	-49	-49	936	-49	-49	-49
937	-48	-48	-48	937	-48	-48	-48	937	-48	-48	-48	937	-48	-48	-48
938	-47	-47	-47	938	-47	-47	-47	938	-47	-47	-47	938	-47	-47	-47
939	-46	-46	-46	939	-46	-46	-46	939	-46	-46	-46	939	-46	-46	-46

Vazamento [g]	Vazamento pela massa verdadeira [g]	% carga verdadeira	delta-Ts	delta-Tch	delta-X	Pela formula
73.98052528	-49.74	5%	-7.2522	0.0908	-0.015356	7%
70.90520711	-46.67	5%	-6.7522	0.1908	-0.018156	7%
74.19043517	-49.95	5%	-7.0922	-0.1092	-0.018156	7%
78.78374057	-54.55	6%	-7.5722	-0.2292	-0.018456	8%
78.09580663	-53.86	5%	-7.5722	-0.3362	-0.017056	8%
78.10808188	-53.87	5%	-7.4122	-0.0092	-0.020156	8%
78.82688011	-54.59	6%	-7.3122	-0.0792	-0.023056	8%
84.97929123	-60.74	6%	-7.9922	-0.3862	-0.022656	8%
84.74946321	-60.51	6%	-8.0422	-0.5802	-0.021156	8%
83.61998319	-59.38	6%	-8.0322	-0.4922	-0.019356	8%
82.70674395	-58.47	6%	-7.6222	0.3408	-0.025556	8%
80.20457794	-55.97	7%	-7.3322	-0.1592	-0.025156	8%
88.75837316	-64.52	7%	-8.2712	-0.2292	-0.025156	9%
86.75991555	-62.52	6%	-8.2322	-0.1292	-0.022256	9%
79.69822657	-56.46	6%	-7.7422	-0.1892	-0.017356	8%
76.50387903	-52.27	5%	-7.4422	0.0308	-0.016756	8%
77.72432015	-53.49	5%	-7.2822	0.2608	-0.021956	8%
76.27216865	-52.03	5%	-7.1022	-0.0792	-0.021856	8%
80.88037603	-56.64	6%	-7.6522	-0.3272	-0.020856	8%
84.7862364	-60.55	6%	-8.1622	-0.3962	-0.019456	8%
80.69007832	-56.45	6%	-7.6522	-0.0492	-0.020856	8%
82.44936928	-58.21	6%	-7.6222	0.1608	-0.024856	8%
85.01478686	-60.78	6%	-7.9922	-0.2792	-0.022856	8%
81.6200187	-57.38	6%	-7.7922	-0.5082	-0.019656	8%
77.21660803	-52.98	5%	-7.2222	-0.1092	-0.021556	8%
78.70137318	-54.46	6%	-7.1522	0.2108	-0.025856	8%
83.80315496	-59.56	6%	-7.8022	-0.2292	-0.023856	8%
84.30498257	-60.07	6%	-8.0022	-0.4602	-0.021156	8%
80.50925172	-56.27	6%	-7.8222	-0.4742	-0.017156	8%
72.28261699	-48.04	5%	-6.8622	0.1108	-0.018756	7%
74.24142408	-50.00	5%	-6.7822	0.3208	-0.023956	7%
79.50253067	-55.26	6%	-7.3522	-0.2192	-0.023456	8%
82.15458395	-57.92	6%	-7.7222	-0.3092	-0.022056	8%
81.10767418	-56.87	6%	-7.7822	-0.2892	-0.019156	8%
79.45305382	-55.21	6%	-7.4722	0.0908	-0.021756	8%
81.96707777	-57.73	6%	-7.5622	0.1508	-0.024956	8%
85.10477912	-60.87	6%	-7.9422	-0.1192	-0.024056	8%
85.17085922	-60.93	6%	-8.0522	-0.2692	-0.022156	8%
79.31821347	-55.08	6%	-7.5622	-0.1892	-0.019656	8%
76.33200743	-52.09	5%	-7.0422	0.2308	-0.023356	8%
78.39537379	-54.16	5%	-7.2322	-0.2692	-0.023356	8%
83.18161986	-58.94	6%	-7.8022	-0.4332	-0.022456	8%
84.5256003	-60.29	6%	-8.1222	-0.6242	-0.019356	8%
78.29856429	-54.06	5%	-7.2922	0.0308	-0.022556	8%
84.74748209	-60.51	6%	-7.7122	-0.0992	-0.027256	8%
85.58008514	-61.34	6%	-7.7822	-0.3892	-0.027256	8%
87.03880483	-62.80	6%	-8.1422	-0.5362	-0.023756	9%
80.61644494	-56.38	6%	-7.6222	-0.2592	-0.020956	8%
79.4928368	-55.25	6%	-7.2622	0.4308	-0.025756	8%
79.63776309	-55.40	6%	-7.2622	-0.0192	-0.025456	8%
4.113429587	20.12	2%	-0.6322	-0.2992	0.003344	0%
-5.781878134	30.02	3%	0.7178	0.5808	-0.002056	1%
-2.407766052	26.65	3%	0.4678	0.2308	-0.003656	0%
2.48576198	21.75	2%	-0.1922	-0.2492	-0.001056	0%
6.61852394	17.62	2%	-0.7422	-0.2792	0.000544	1%
1.497398914	22.74	2%	-0.3322	-0.2092	0.003044	0%
-2.266064199	26.50	3%	0.3178	0.3408	-0.001556	0%
-2.686364601	26.92	3%	0.4978	0.2408	-0.003656	0%
0.062506305	24.18	2%	0.0678	-0.2292	-0.000956	0%
1.071849569	23.17	2%	-0.1622	-0.1692	0.000944	0%
0.115524238	24.12	2%	-0.2322	-0.1492	0.003844	0%
-8.883384787	33.12	3%	0.9778	0.3208	-0.000356	1%
-2.920919084	27.16	3%	0.4578	0.0008	-0.002256	0%

Soma %erro	4,62
------------	------

Xhs_rated	Soma %erro
0,6	4,788085191
0,63	4,750994751
0,65	4,730794194
0,67	4,711879626
0,69	4,694472951
0,7	4,686270307
0,71	4,678505606
0,72	4,671374848
0,73	4,665101404
0,74	4,659336546
0,75	4,653864234
0,76	4,648393956
0,77	4,643258331
0,78	4,638631549
0,79	4,634210044
0,8	4,629789288
0,81	4,625739388
0,82	4,622391904
0,83	4,619342108
0,84	4,617401456
0,85	4,616252639
0,86	4,617751487
0,87	4,620289905
0,88	4,622848123
0,89	4,625405912
0,9	4,628274013
0,91	4,631813984
0,92	4,636623127
0,93	4,641597545
0,94	4,646827197
0,95	4,653078791
0,96	4,660298493
0,97	4,668459807
0,98	4,677435189
0,99	4,687109837
1	4,698246373

Xhs_rated	Soma %erro
0,85	4,616252639

