EDITORA CONHECIMENTO LIVRE



ENGENHARIA:
A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XXI

Plínio Ferreira Pires

Engenharia: a máquina que constrói o futuro

21ª ed.

Goiânia-GO
Editora Conhecimento Livre

Copyright© 2026 por Editora Conhecimento Livre

21ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Pires, Plínio Ferreira
P638E Engenharia: a máquina que constrói o futuro

/ Plínio Ferreira Pires. – Goiâna-GO

Editora Conhecimento Livre, 2026

418 f.: il
DOI: 10.37423/2025.edcl1216
ISBN: 978-65-5367-729-6
Modo de acesso: World Wide Web
Incluir Bibliografia

1. desenvolvimento 2. projeto 3. construção I. Pires, Plínio Ferreira II. Título

CDU: 620

https://doi.org/10.37423/2025.edcl1216

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos

Editora Conhecimento Livre
Goiânia-GO
2026

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 8
A UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE BOMBEAMENTO EM UMA EMPRESA MINERADORA
Clarisse da Silva Vieira
Diego Henrique Lopes
Maria Fernanda Mendes Pantuza
Yara Silva Tomé
DOI 10.37423/251110420

CAPÍTULO 2 26
PROPOSIÇÃO DE INDICADORES COMO MEDIDAS DE DESEMPENHO DE UMA UNIDADE DE PRONTO ATENDIMENTO
Laryssa Carvalho de Amaral
Ana Paula Barbosa Sobral
Robisom Damasceno Calado
Harvey José Santos Ribeiro Cosenza
Luis Enrique Valdiviezo Viera
DOI 10.37423/251110422

CAPÍTULO 3 62
UM LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE A IMPORTÂNCIA DAS PUBLICAÇÕES ALUSIVAS AO GERENCIAMENTO DAS PARTES INTERESSADAS NA GESTÃO DE EVENTOS
Bruno da Fonseca Gonçalves
Silvana Chiaretto
Juliana Teodolino de Andrade
DOI 10.37423/251110425

CAPÍTULO 4 82
ANÁLISE TÉRMICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DIDÁTICO COM O REFRIGERANTE R-600A
Arthur Souza Lyra
Wertson da Silva Resende
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Thiago da Silva André
Edilson Marinho da Silva Júnior
Jair Palhares de Aquino
Elierton Evangelista das Neves
DOI 10.37423/251110431

CAPÍTULO 5 103
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DE UM HELIOSTATO PLANO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM FORNO SOLAR CONSTRUÍDO COM MATERIAIS REAPROVEITADOS
Arthur Souza Lyra
Luiz Guilherme Meira de Souza
Wertson da Silva Resende
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
DOI 10.37423/251110432

CAPÍTULO 6 116
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E POSSIBILIDADES SUSTENTÁVEIS E ARQUITETÔNICAS DE REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE PÓ DE TONER EM PAVERS
Vinícius de Santi Phelippe Nunes
Rebeca Delatore Simões
Aldo Eloizo Job
Silvio Rainho Teixeira
DOI 10.37423/251110433

CAPÍTULO 7 142
ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR EM VIATURAS DE COMBATE A INCÊNDIO COM AUXÍLIO DA PLATAFORMA ARDUINO
Elias Gonçalves Chaves Neto
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Wertson da Silva Resende
Rafael Matos de Souza
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
DOI 10.37423/251110435

CAPÍTULO 8 160
MAPEAMENTO TÉRMICO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE CÂMARA FRIGORÍFICA DIDÁTICA
Higor da Silva Regis
Wertson da Silva Resende
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Edilson Marinho da Silva Júnior
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
DOI 10.37423/251110436

CAPÍTULO 9 178
SIMULAÇÃO DE PROPRIEDADES COLIGATIVAS DE FLUIDOS SECUNDÁRIOS PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL COM TERMOACUMULAÇÃO
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Wertson da Silva Resende
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Edilson Marinho da Silva Júnior
Thiago da Silva André
DOI 10.37423/251110437

CAPÍTULO 10 193
ANÁLISE DAS EMISSÕES DE UM VEÍCULO TETRAFUEL OPERANDO COM GNV EM CICLO DE CONDUÇÃO ESTRADA SOB A ÓTICA DA EVOLUÇÃO REGULATÓRIA DO PROCONVE L5/L6
César Vital de Medeiros Silva
Raphael Araújo de Holanda
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Junior
Jonhattan Ferreira Rangel
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
DOI 10.37423/251110438

CAPÍTULO 11 205
DESENVOLVIMENTO, MONTAGEM E START-UP DE SISTEMA CHILLER E FANCOIL DIDÁTICO
Jair Palhares de Aquino
Wertson da Silva Resende
Rafael Matos de Souza
Higor da Silva Regis
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Arthur Souza Lyra
DOI 10.37423/251110439

CAPÍTULO 12 226
ESTUDO EXPERIMENTAL DA PERFORMANCE TERMODINÂMICA DE UM ULTRAFREEZER - PARTE I
Rafael Matos de Souza
Wertson da Silva Resende
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
CleitonRubens Formiga Barbosa Júnior
Thiago da Silva André
DOI 10.37423/251110440

CAPÍTULO 13 245
ESTUDO EXPERIMENTAL DA PERFORMANCE TERMODINÂMICA DE UM ULTRAFREEZER - PARTE 2
Rafael Matos de Souza
Wertson da Silva Resende
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Thiago da Silva André
DOI 10.37423/251110442

CAPÍTULO 14 265
EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA E PERSPECTIVAS FUTURAS DE NOVOS FLUIDOS REFRIGERANTES APLICADOS EM SISTEMAS DE HRVAC
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Ângelo Roncalli de Oliveira Guerra
Wertson da Silva Resende
Edilson Marinho da Silva Júnior
DOI 10.37423/251110448

CAPÍTULO 15 279
SIMULAÇÃO DE CICLO DE REFRIGERAÇÃO MULTIESTÁGIO COM R152A: INFLUÊNCIA DA PRESSÃO INTERMEDIÁRIA E INTERCOOLER
Luiz Antonio de Almeida Junior
Wertson da Silva Resende
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Higor da Silva Regis
DOI 10.37423/251110455

CAPÍTULO 16 295
EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYOLESTER OIL WITH ALUMINUM OXIDE NANOPARTICLES
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Edilson Marinho da Silva Júnior
Thiago da Silva André
Wertson da Silva Resende
DOI 10.37423/251110460

CAPÍTULO 17 307
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERFORMANCE EM REGIME TRANSIENTE DE GERADOR TERMOELÉTRICO DE EXAUSTÃO AUTOMOTIVA
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Carlos Antônio Cabral dos Santos
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Edilson Marinho da Silva Júnior
Elierton Evangelista das Neves
DOI 10.37423/251110461

CAPÍTULO 18 324
ANÁLISE EXPERIMENTAL DA PERFORMANCE TERMODINÂMICA DE UMA MÁQUINA DE GELO FUNCIONANDO COM FLUIDO REFRIGERANTE R437A
Naiara Nunes de Oliveira
Wertson da Silva Resende
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Rafael Matos de Souza
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
DOI 10.37423/251110462

CAPÍTULO 19 341
METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MÚLTIPLAS TRINCAS EM MATERIAIS FRÁGEIS
Renata de Oliveira Marinho
Gilberto Gomes
Vitor Manoel de Souza Pereira
Vitória Maria Aquino Rodrigues
DOI 10.37423/251110466

CAPÍTULO 20 351
ESTUDO SOBRE VARIÁVEIS DA LINHA DE SUCÇÃO DE UMA CÂMARA FRIGORÍFICA: EQUAÇÕES PARA ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL X SOFTWARE COOLPACK
Wertson da Silva Resende
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Kelyson da Silva Resende
Edilson Marinho da Silva Júnior
DOI 10.37423/251110469

CAPÍTULO 21 374
ESTUDO DA VIABILIDADE TÉRMICA DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO DIRETA FABRICADO COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO
Josenilton dos Santos Lopes
Raimundo Vicente Pereira Neto
Luiz Guilherme Meira de Souza
Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Arthur Souza Lyra
DOI 10.37423/251110470

CAPÍTULO 22 394
FRESADORA CNC DE BAIXO CUSTO PARA FINS ACADÊMICOS
Alesandro Macio Sousa Alves
Pietro Costa Almeida
Sacha Dupin Gade
Diógenes José Gusmão Coutinho
DOI 10.37423/251110475

CAPÍTULO 23 401
SELEÇÃO DE DISPOSITIVOS DE MONITORAMENTO DE GLICOSE COM O MÉTODO COCOSO: UM OLHAR INOVADOR NO GERENCIAMENTO DO DIABETES
Antonio Sergio da Silva
Fábio Henrique Martins Queiroz
Miguel Barrella Neto
Humberto Weber
Carlos Francisco Simões Gomes
Marcos dos Santos
DOI 10.37423/251110512

Capítulo 1

10.37423/251110420

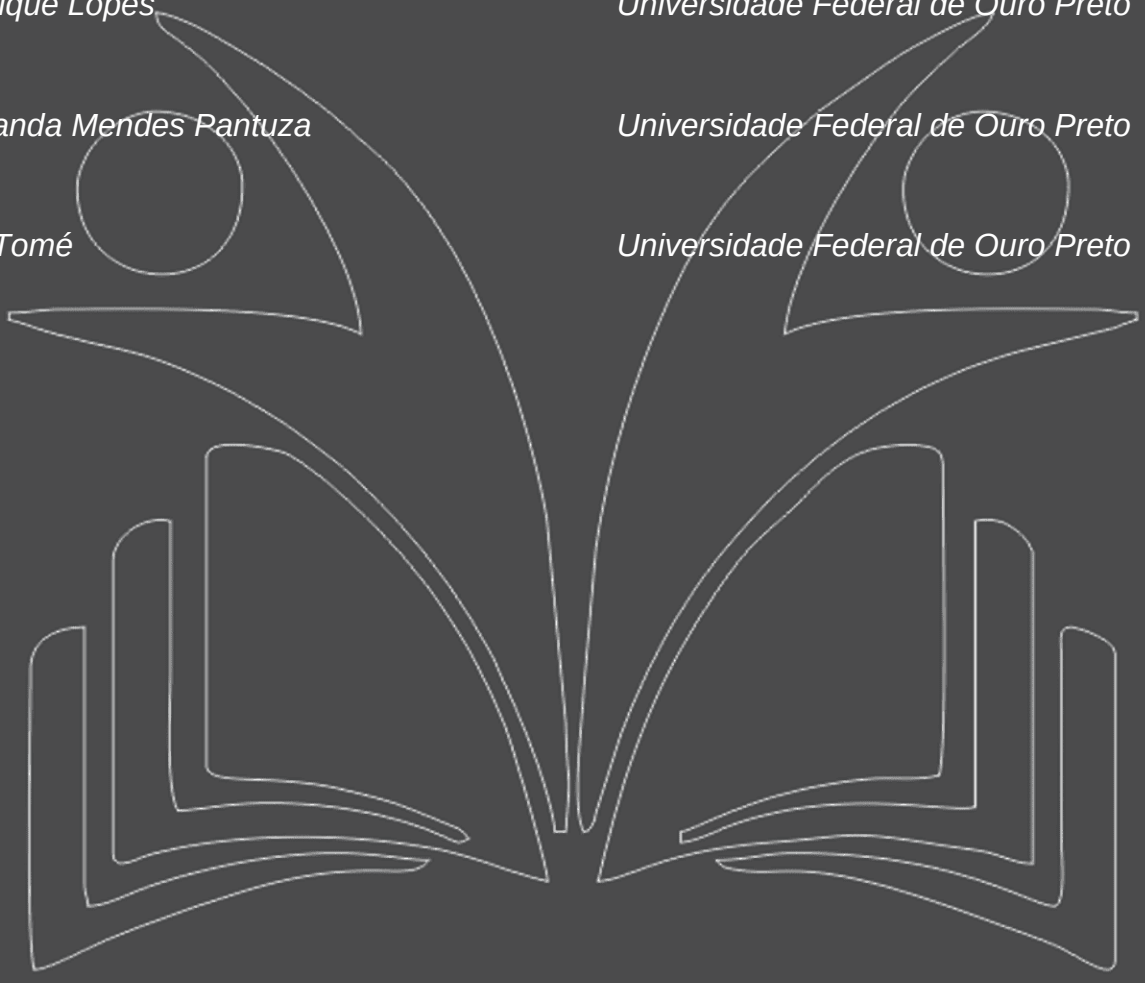
A UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE BOMBEAMENTO EM UMA EMPRESA MINERADORA

Clarisse da Silva Vieira — *Universidade Federal de Ouro Preto*

Diego Henrique Lopes — *Universidade Federal de Ouro Preto*

Maria Fernanda Mendes Pantuza — *Universidade Federal de Ouro Preto*

Yara Silva Tomé — *Universidade Federal de Ouro Preto*



RESUMO

Este artigo apresenta um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista, para o Problema de Sequenciamento de Projetos com Restrição de Recurso (PSPRR), como uma ferramenta de planejamento. Este modelo é utilizado na implementação da metodologia do 3S em uma estação de bombeamento de uma mineradora com o intuito de melhorar a sua eficiência operacional. A significativa redução do tempo total de execução do projeto sugere que as práticas de organização, arrumação e limpeza propostas pela metodologia 3S, quando aplicadas com base nos resultados da otimização computacional, possam resultar em ganhos substanciais de produtividade, aliados ao sequenciamento das atividades e alocação dos recursos.

Palavras-Chaves: Programação Matemática, Sequenciamento, Alocação de Recursos

1 INTRODUÇÃO

Segundo Merchant e Van Der Stede (2007), o planejamento é um dos principais elementos do sistema de controle gerencial de uma empresa e ajuda os gestores a pensarem em fatores importantes como, por exemplo, fraquezas, oportunidades, ameaças, forças e, fundamentalmente, o “pensar para frente”.

O planejamento eficiente de projeto nas empresas pode estar ligado à harmonização entre o Problema de Sequenciamento de Projeto com Restrição de Recurso (PSPRR) para implantar a metodologia 5S. Isso porque, a implementação dos princípios do 5S estabelece uma base sólida para a organização e otimização do ambiente de trabalho, promovendo a eliminação de desperdícios, a ordenação eficiente de recursos e a criação de padrões de trabalho. Essa cultura organizacional, fundamentada nos pilares do 5S, não apenas aprimora a eficiência operacional, mas também facilita o enfrentamento de desafios relacionados ao sequenciamento de tarefas, onde restrições de recursos como tempo, máquinas e pessoas são fatores críticos.

O 5S traz a melhoria da estrutura da empresa, sendo que, para tal, o método de abordagem adequado é a execução antes da teorização. Com a realização do 5S até o nível de uma crença, os resultados obtidos são extremamente grandes tanto em termos quantitativos quanto qualitativo (Habu et al., 1992).

A disciplina intrínseca ao 5S, representada pelo "Shitsuke", diz que todos na organização devem seguir e comprometer-se com as normas, os padrões e os procedimentos formais e informais, introduzindo os conceitos na empresa como um todo. Segundo Habu et al. (1992), “quando a disciplina Shitsuke se consolida, pode se dizer que o 5S como um todo também se consolida”. A consolidação deste senso determina que a mudança de valores está disseminada e enraizada em toda organização.

Sendo assim, para uma aplicação consistente do 5S podemos utilizar o PSPRR para facilitar e promover uma abordagem sistemática para a resolução de problemas e melhoria contínua, contribuindo para a consistência no planejamento e garantindo a adesão aos padrões estabelecidos. Logo, a integração do PSPRR ao 5S, no planejamento empresarial, não apenas promove uma cultura organizacional saudável, mas também fornece uma estrutura eficaz para lidar com questões complexas de sequenciamento, resultando em processos mais eficientes e alinhados aos objetivos estratégicos da empresa.

2 5S

No início da década de 1950 o Japão estava se recuperando da Segunda Guerra Mundial, e suas indústrias precisavam competir no mercado com as empresas europeias e americanas, que ofereciam produtos de alta qualidade e baixo custo. Com objetivo de aumentar a produtividade, melhorar a qualidade dos seus produtos e reduzir custos, as empresas japonesas desenvolveram e começaram a implementar a metodologia denominada 5S. Consiste em um conjunto de cinco princípios que visam organizar, limpar e padronizar o ambiente de trabalho, podendo ser aplicada em qualquer empresa, independentemente do seu tamanho ou setor (Ribeiro, 2015).

De acordo com Ollo-López et al. (2009), os 5S's são fundamentais para alcançar a excelência no ambiente de trabalho, visando minimizar o desperdício, aumentar a eficiência e a qualidade, através da organização física do espaço e do uso de sinais visuais para aprimorar a performance operacional. A prática dos 5Ss busca integrar valores como ordem, limpeza, padronização e disciplina no contexto laboral. Apesar de ser comumente associado à limpeza e organização, o 5S vai muito além, desempenhando um papel crucial na transformação cultural de uma empresa e servindo como alicerce para a implementação de outras ferramentas.

Toniazzo (2016) lista os cinco princípios fundamentais do 5S, cada um com seu significado específico, como se segue:

1. Seiri - Senso de Utilização, Seleção, Classificação: Envolve evitar o excesso. É a prática de separar o necessário do supérfluo, transferindo o que é essencial para o trabalho e descartando o que não é. Essa ação melhora a organização e abre espaço para o novo;

2. Seiton - Senso de Ordenação, Organização, Arrumação: Trata-se de manter tudo organizado. É o ato de arrumar, assegurando que os itens estejam em locais designados para serem facilmente encontrados quando necessários. Isso evita o desperdício de tempo e energia;

3. Seiso - Senso de Limpeza, Inspeção: Envolve a manutenção da limpeza. Após eliminar o desnecessário e organizar tudo, é crucial manter esse estado;

4. Seiketsu - Senso de Saúde e Higiene, Padronização: Diz respeito ao cuidado com a saúde e higiene. Não basta manter o ambiente de trabalho limpo; é igualmente importante zelar pela higiene pessoal;

5. Shitsuke - Senso de Autodisciplina, Autocontrole: Refere-se à disciplina. Vai além do cumprimento de normas; envolve a integridade, a educação e a manutenção de bons hábitos por parte do indivíduo.

A Figura 1 mostra os principais benefícios que são alcançados ao se implementar cada um dos sensos nas organizações.

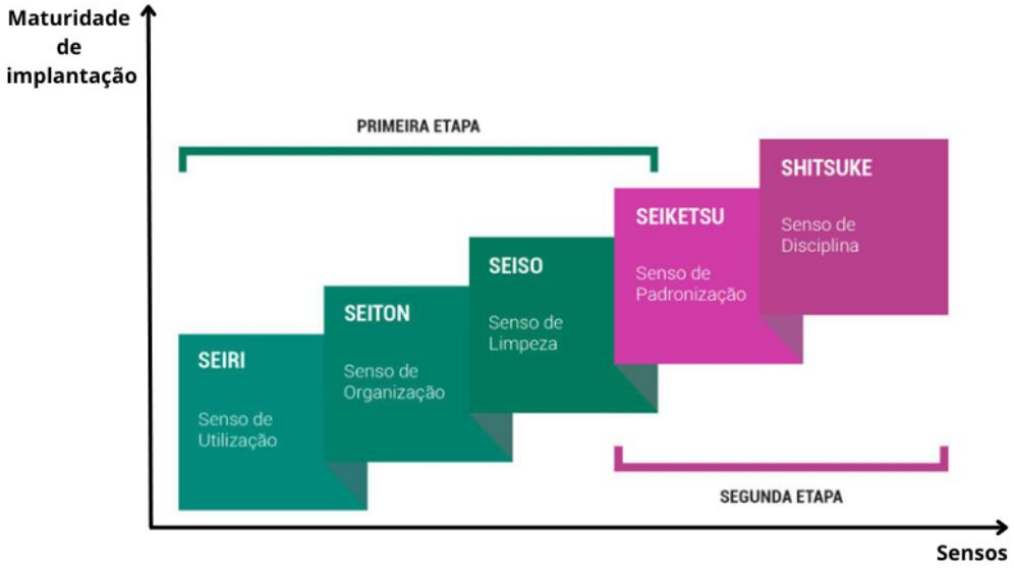
Figura 1 – Principais benefícios obtidos ao se implantar cada um dos cinco sensos

Senso	Significado	Benefícios
Seiri	Utilização, Seleção	Combate ao desperdício, redução de custos, liberação de espaço, economia de tempo, ambiente mais seguro (recursos adequados e em boas condições), redução de consumo de energia, água e recursos naturais (redução de impactos ambientais)
Seiton	Organização, Ordenação	Agilidade para localizar e acessar o que procura, ambiente mais seguro (ordem dos recursos), melhor planejamento, maior produtividade e melhor gestão visual
Seiso	Limpeza	Ambiente mais seguro e mais agradável, redução de impactos ambientais e detecção precoce de anormalidades durante a limpeza
Seiketsu	Padronização, Saúde, Higiene	Ambiente mais seguro e saudável, autoestima mais elevada, prevenção de doenças, combate à poluição, bons hábitos e consenso na definição de regras de convivência
Shitsuke	Autodisciplina, Manutenção	Hábito para a prática dos sensos anteriores, cumprimento de normas, regras e procedimentos sem necessidade de cobrança, pontualidade e cumprimento de prazos e proatividade

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2015)

A implementação da metodologia dos 5S's pode ser realizada nas organizações por meio de duas etapas. A Figura 2 mostra detalhadamente essas duas etapas citadas.

Figura 2 - As duas etapas propostas para implantação do 5S



Fonte: Adaptado de Napoleão (2018)

A primeira etapa corresponde àquela em que se almeja implementar o 3S (senso de utilização, senso de organização e senso de limpeza), e a segunda etapa a que busca, além dos 3S's, consolidar a implantação dos outros dois sensos restantes (senso de padronização e senso de disciplina). Dessa forma, tem-se a aplicação de todos os 5S's, em sua completude, o que representa também um grau mais elevado de maturidade de implantação dos conceitos e da metodologia.

Ribeiro (2018) estabelece que existe uma relação entre os benefícios de se implementar os 5S's e os indicadores de performance das empresas. Os indicadores de performance desempenham um papel fundamental no monitoramento e avaliação do desempenho organizacional, oferecendo valiosos insights para a eficácia operacional e a consecução dos objetivos estratégicos. Diversas empresas utilizam uma variedade de indicadores para medir diferentes aspectos de seus processos, incluindo eficiência, produtividade, qualidade, satisfação do cliente e rentabilidade. Esses indicadores frequentemente servem como ferramentas quantitativas que permitem às organizações avaliar o progresso em direção às metas estabelecidas, identificar áreas de melhoria e tomar decisões com base em informações obtidas através da análise de dados. Alguns exemplos comuns de indicadores de performance incluem taxa de retrabalho, tempo de ciclo, taxa de utilização de recursos, satisfação do cliente, e margens de lucro.

A Figura 3 mostra a relação existente entre alguns indicadores utilizados por diversas organizações para gerenciar os seus processos e os benefícios do 5S.

Figura 3 – Relação entre indicadores de performance e os benefícios do 5S

Benefícios	Custos	Otimização do tempo	Segurança	Qualidade	Confiabilidade dos equipamentos	Certificações
Redução de desperdícios	●	●				ISO 14001
Organização dos recursos	○	●	●	●		Todas
Limpeza com postura de inspeção	●		●	○	●	Todas
Higiene e saúde	●		●	○		OSHAS ISO 18001
Autodisciplina	●	●	●	●	●	Todas

Legenda: ● Indica forte relação;
○ Indica boa relação.

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2018)

A relação entre esses indicadores e a implementação dos 5S's, conforme demonstrado na Tabela 2, destaca a influência positiva que a metodologia 5S pode ter sobre esses aspectos-chave do desempenho empresarial.

Os indicadores relacionados ao 5S são cruciais para avaliar a eficácia da prática dessa metodologia. Natali (1995) e Ribeiro (1994) citam alguns exemplos de indicadores relacionados aos 5S's, são eles:

- Taxa de Utilização de Espaço: Relacionado ao Senso de Organização (Seiri). Mede a eficiência na utilização do espaço de trabalho. Pode ser calculado comparando a área total disponível com a área realmente utilizada após a implementação do Seiri. Uma alta taxa indica um espaço organizado e otimizado;

- Taxa de Manutenção da Limpeza: Relacionado ao Senso de Limpeza (Seiso). Avalia a regularidade com que a limpeza é realizada no ambiente de trabalho. Pode ser expressa como a porcentagem de dias em que a área de trabalho se mantém limpa e organizada. Uma alta taxa reflete a eficácia na manutenção da limpeza;

- Índice de Disponibilidade de Ferramentas: Relacionado ao Senso de Utilização (Seiton). Mensura a prontidão das ferramentas e equipamentos necessários para as operações diárias. Um índice alto sugere que as ferramentas estão facilmente acessíveis, contribuindo para a eficiência operacional;

- Taxa de Adesão às Normas Padronizadas: Relacionado ao Senso de Padronização (Seiketsu). Verifica o cumprimento das normas e procedimentos padronizados. Pode ser calculado observando a conformidade com as diretrizes estabelecidas. Uma alta taxa indica um ambiente de trabalho consistente e padronizado;

- Índice de Sustentabilidade do 5S: Relacionado ao Senso de Disciplina (Shitsuke). Avalia a continuidade e a incorporação do 5S na cultura organizacional ao longo do tempo. Pode ser medido pela consistência na aplicação dos princípios do 5S. Um índice alto reflete a disciplina e o comprometimento da equipe;

- Número de Sugestões de Melhoria Implementadas: Relacionado à melhoria contínua. Quantifica o impacto das sugestões de melhoria propostas pelos colaboradores. Um aumento no número de sugestões implementadas indica um compromisso com a melhoria contínua e a participação ativa da equipe;

- Taxa de Acidentes ou Incidentes: Relacionado à segurança no ambiente de trabalho. Mede a frequência e a gravidade de acidentes ou incidentes no local de trabalho. Uma diminuição nesse indicador reflete uma melhoria na segurança, sugerindo que as práticas do 5S estão contribuindo para um ambiente mais seguro.

Estes indicadores são essenciais para avaliar o progresso na implementação dos 5S's, fornecendo uma base quantitativa para a eficácia das práticas de organização, limpeza, utilização, padronização e disciplina dentro da empresa (Ribeiro, 1994; Natali, 1995).

Dessa forma, segundo Ribeiro (2018), se faz de extrema importância utilizar o 5S no planejamento de projetos em organizações, pois a implementação e integração bem-sucedida dos sensos certamente poderá resultar em melhorias tangíveis nos indicadores de performance da empresa e também de seus projetos, incluindo a otimização do sequenciamento de atividades do 5S dentro de projetos e redução de seu tempo de duração, promovendo uma cultura organizacional mais eficiente e eficaz.

Além disso, ainda, de acordo com Ribeiro (2018), o 5S constitui uma base comportamental e física para TPM (Manutenção Produtiva Total), qualidade total, Lean Manufacturing, entre diversas outras ferramentas e metodologias gerenciais, entre elas seis sigma, círculo de controle de qualidade, controle estatístico de processos, Kaizen, análise do valor, entre outras.

3 PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO EM PROJETO COM RESTRIÇÃO DE RECURSO (PSPRR)

De acordo com Tubino (2022), as organizações devem possuir competências essenciais em relação ao planejamento, programação, execução e controle dos projetos. Tais competências devem estar relacionadas ao sequenciamento das atividades e alocação dos recursos e devem ser executadas de maneira confiável com a finalidade de otimizar todo o processo (Penha, 2017). Dessa forma, de acordo com Hartmann (2013), o Problema de Sequenciamento de Projetos com Restrição de Recurso (PSPRR) é um problema crucial na gestão de projetos, envolvendo a alocação eficiente de recursos escassos para realizar as atividades, considerando as restrições de precedência entre elas.

Matematicamente, segundo Brucker (1999), o PSPRR consiste em um conjunto V de atividades, (i = 1, 2, ... , n), e um conjunto R de recursos renováveis, (r =1, . . . , m). Cada tipo de recurso está disponível em uma quantidade constante de unidades (Rk). Cada atividade i do projeto necessita de uma quantidade constante do recurso (rik) para ser executada. A atividade i é executada em pi unidades de tempo, sem ser interrompida. Os valores de Rk, rik e pi são valores positivos ou nulos. O objetivo então é minimizar a duração total do projeto, determinando a data de início de cada atividade do projeto, respeitando as limitações de recursos e atendendo todas as relações de precedência definidas a priori. Assim, o problema consiste em encontrar um cronograma de duração mínima de modo que todas as restrições do projeto sejam respeitadas.

O PSPRR é um problema de otimização combinatória, NP-difícil, definido por Artigues (2008). Por isso, devido à dificuldade na obtenção da solução ótima, vários autores propõem modelos e métodos de soluções para o problema, indicando a falta de um algoritmo único que possa resolver todos os casos em tempo polinomial. No entanto, existem, basicamente, duas classes de métodos de solução para o PSPRR: os heurísticos e os exatos.

Os métodos heurísticos, conforme definido por Nemhauser e Wolsey (1988), são métodos aproximados que não garantem encontrar a solução ótima de um problema de otimização. Eles são baseados em um algoritmo que explora o espaço de busca, buscando uma solução que seja

suficientemente boa, dentro de um determinado limite de tempo ou de recursos computacionais. Eles são mais eficientes em problemas de grande ordem, onde os métodos de solução exatos podem se tornar inviáveis (Dantzig, 1963). De acordo com Glover (1989), alguns exemplos de métodos heurísticos são Busca local, Construção e Mistificação.

Os métodos de solução exatos, como descritos por Dantzig (1963), são métodos que garantem encontrar a solução ótima de um problema de otimização, dentro do conjunto de soluções factíveis. Eles são baseados em um algoritmo que explora completamente o espaço de busca, até encontrar a solução ótima. Em problemas de grande ordem, eles podem se tornar inviáveis, devido ao alto custo computacional (Boyd e Vandenberghe, 2004). Alguns exemplos de métodos de solução exatos, de acordo com Boyd e Vandenberghe (2004), são: Método Simplex, Método Branch and Bound e Decomposição de Benders.

Os métodos heurísticos e exatos são utilizados para resolver problemas em diversos campos, como, por exemplo, planejamento da produção, sequenciamento, otimização de processos, programação de transporte, roteirização de veículos e construção civil.

4 MODELO MATEMÁTICO

Apresenta-se o modelo de Programação Linear Inteira Mista proposto para o Problema de Sequenciamento de Projeto com Restrição de Recurso, de acordo com a formulação proposta por Rola e Vieira (2022), onde:

$V = \{1, 2, ..., n\}$: conjunto das n atividades do projeto;

$R = \{1, 2, ..., m\}$: conjunto dos m recursos renováveis;

E: conjunto das atividades cuja relação de precedência é conhecida a priori, ou seja, a atividade j só será iniciada após a conclusão da atividade i;

R_k : quantidade total disponível do recurso tipo k;

s e t: atividades fictícias que representam, respectivamente, o início e o término do projeto;

r_{ik}: quantidade do recurso renovável k que a atividade i necessita para ser executada;

p_i: tempo de processamento da atividade *i*;

f_{ijk}: fluxo do recurso *k* da atividade *i* para a atividade *j*;

x_{ij}: variável binária que estabelece se a atividade *i* precede *j*;

S_i: data de início da atividade i;

S_t: data de início da atividade fictícia final *t*;

$$\min S_t \tag{1}$$

$$x_{ij} = 1 \qquad \forall\,(i,j) \in E \tag{2}$$

$$x_{ji} = 0 \qquad \forall\,(i,j) \in E \tag{3}$$

$$S_j - S_i - p_i - x_{ij}\left(\sum_{i \in V} p_i\right) + \left(\sum_{i \in V} p_i\right) \geq 0 \qquad \forall\, i \in V \cup \{s\}, \forall\, j \in V \cup \{t\}, i \neq j \tag{4}$$

$$f_{ijk} - (\max\{r_{ik}\}) \cdot x_{ij} \leq 0 \qquad \forall\, i \in V \cup \{s\}, \forall\, j \in V \cup \{t\}, \forall\, k \in R, i \neq j \tag{5}$$

$$\sum_{j \in V \cup \{t\}} f_{ijk} = r_{ik} \qquad \forall\, i \in V \cup \{s\}, \forall\, k \in R,\ i \neq j \tag{6}$$

$$\sum_{j \in V \cup \{s\}} f_{ijk} = r_{jk} \qquad \forall\, \mathrm{j} \in V \cup \{t\}, \forall\, k \in R,\ i \neq j \tag{7}$$

$$S_i \geq 0 \qquad \forall\, i \in V \cup \{s\} \cup \{t\} \tag{8}$$

$$f_{ijk} \geq 0 \qquad \forall\, i \in V \cup \{s\}, \forall\, j \in V \cup \{t\}, \forall\, k \in R \tag{9}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i \in V \cup \{s\}, \forall\, j \in V \cup \{t\} \tag{10}$$

A função objetivo (1) minimiza a data de início da atividade fictícia final t, ou seja, a duração total do projeto. As restrições (2) asseguram as relações de precedência estabelecidas a priori. O conjunto de restrições (3) fixam os valores das variáveis xji igual a zero quando existe a relação de precedência entre as atividades i e j. As restrições (4) representam as relações de sequenciamento entre as atividades. O conjunto de restrições (5) define a possibilidade de fluxo de um tipo de recurso entre duas atividades. As restrições (6) e (7) representam a conservação da quantidade de recursos utilizada por cada atividade. Por fim, as restrições (8), (9) e (10) representam os respectivos domínios das variáveis de decisão.

5 APLICAÇÃO EM UM ESTUDO DE CASO

O estudo de caso compreende o uso da modelagem matemática do Problema de Sequenciamento de Projetos com Restrição de Recurso para auxiliar no planejamento das atividades de implementação da metodologia do 5S em uma estação de bombeamento de polpa de minério de ferro, de uma empresa de grande porte, do setor de mineração.

A empresa reconhece a necessidade de aprimorar a gestão de seu espaço e de seus recursos, onde a manutenção regular dos equipamentos e a agilidade operacional são cruciais para garantir e aprimorar a eficiência operacional, a organização, a limpeza, a segurança do local de trabalho e a manutenção dos equipamentos. Diante disso, a mineradora optou, inicialmente, pela implementação do 3S, parte integrante da metodologia 5S, como um método estruturado para promover melhorias nesses aspectos e para que, posteriormente, seja possível a implementação de todos os 5S's na instalação.

Para tal, foi desenvolvido, pela equipe de manutenção, um planejamento, não otimizado computacionalmente, das atividades do processo que tem como objetivo a implementação do 3S. O primeiro passo visa garantir a maturidade da aplicação do Senso de Utilização e, no contexto da empresa, envolve uma revisão completa dos equipamentos, instalações, salas, ferramentas e materiais presentes na área industrial. Itens obsoletos, danificados ou desnecessários serão identificados e removidos, garantindo que apenas o essencial fique disponível para as atividades diárias. Isso irá contribuir para a garantia de um ambiente mais seguro e com uma melhor utilização do espaço, reduzindo drasticamente os riscos associados ao uso de materiais e equipamentos não conformes, inadequados e danificados.

O Senso de Organização é outro ponto-chave a ser alcançado pela empresa. São propostas atividades que visam otimizar a disposição dos equipamentos e materiais de forma lógica e eficiente, o que possibilitará maior fluidez operacional, facilitando acesso rápido aos equipamentos e peças, por exemplo, melhorando a visão do todo e simplificando as atividades, especialmente em situações de emergência, onde o tempo é crucial para garantir a segurança e a eficácia das operações.

O Senso de Limpeza também é uma prioridade, para o contexto da empresa, e a implementação de rotinas de limpeza regular e planejadas, a conscientização dos colaboradores sobre a importância das operações e da manutenção, bem como da garantia da qualidade resultam em um ambiente mais seguro e com redução de riscos, especialmente os riscos críticos. Isso não apenas preserva a vida útil

da instalação e dos equipamentos, mas também promove um ambiente de trabalho mais saudável e limpo para os colaboradores.

Sabe-se que a empresa enfrentará desafios durante o processo de implementação da metodologia, incluindo a necessidade de conscientização e treinamento dos funcionários para garantir a adesão contínua aos princípios do 3S. No entanto, o comprometimento da equipe e o apoio das lideranças e da gestão serão fundamentais para superar esses obstáculos e garantir o sucesso da iniciativa.

Dessa forma, foi elaborado, pela equipe de manutenção, um planejamento de sequenciamento das atividades a serem realizadas nas instalações da empresa para garantir a implantação dos 3S's (Senso de Utilização, Senso de Organização e Senso de Limpeza). Esse planejamento inicial foi elaborado sem o uso da otimização da programação. A Figura 4 mostra o planejamento não otimizado dessas atividades, com sua descrição, número, duração em dias, relações de dependência, quantidade de recursos necessária para execução de cada atividade e o total de recursos renováveis (nesse caso, cinco colaboradores) disponibilizados pela empresa para execução do projeto de implantação do 3S.

Figura 4 - Planejamento não otimizado das atividades do Projeto 3S

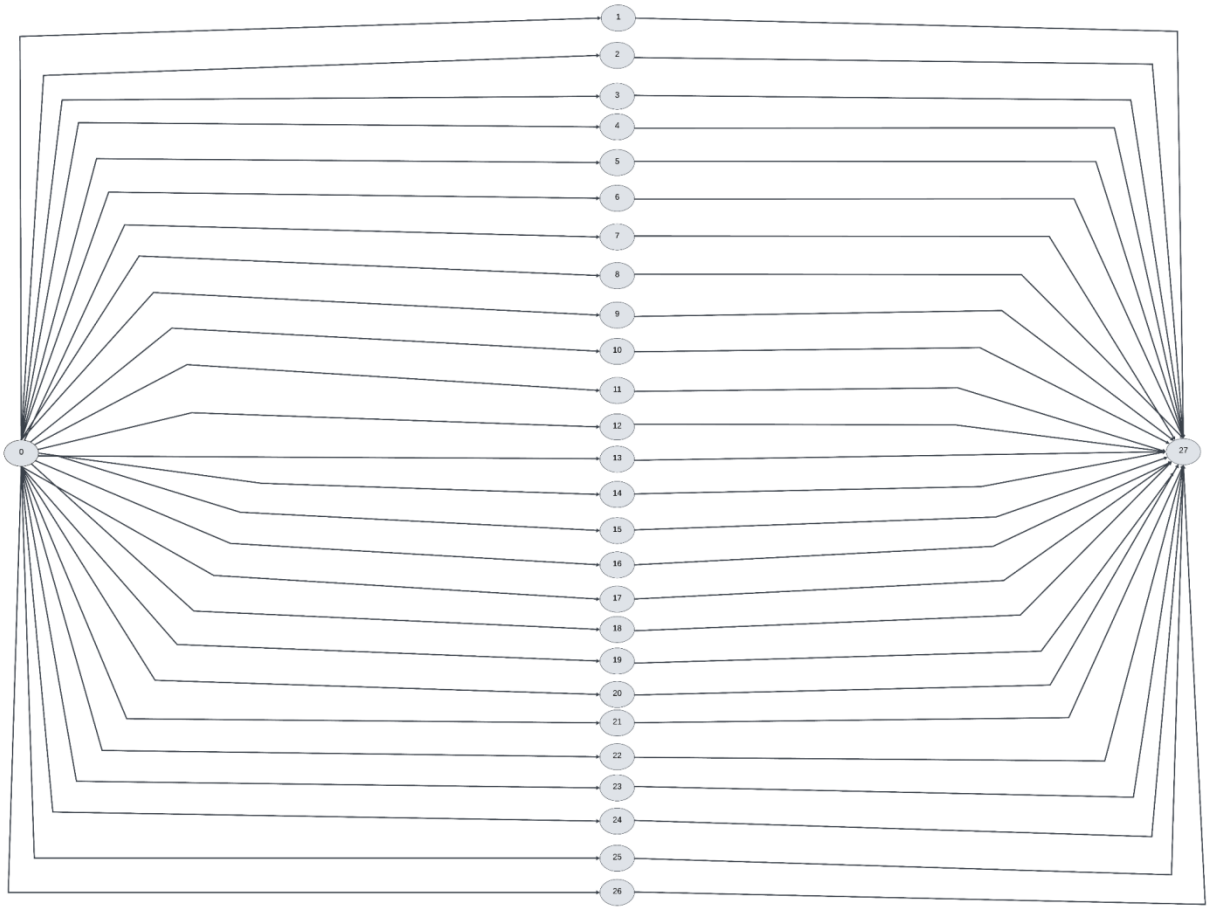
Descrição	Atividades	Duração	Recurso
Sala de Rack	1	12	3
Sala de Controle	2	12	2
Sala de Reunião	3	12	1
Sala de Descanso	4	12	1
Copa do 2º Andar	5	12	2
Vestiário Feminino	6	12	2
Vestiário Masculino	7	12	2
Recepção	8	14	1
Copa do 1º Andar	9	21	2
Sala de Limpeza	10	21	1
Sala SOI (Operações Integradas)	11	21	4
Sala da Elétrica	12	21	3
Oficina Mecânica	13	21	4
Sala da Mecânica	14	21	2
Sala de Cabos (14SE045)	15	21	4
Subestação (14SE045)	16	21	4
Sala Banco de Baterias	17	21	2
Sala de Lubrificantes	18	15	3
Sala de Geradores (14SE045)	19	15	2
Sala de Painel de Controle dos Geradores	20	15	2
Sala do Transformador (01XF001)	21	15	2
Sala do Transformador (01XF002)	22	15	2
Sala de Refrigeração	23	15	2
Depósito de Peças	24	15	4

Oficina de Solda	25	15	2
Depósito de Gases	26	15	2

Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

As relações entre todas as atividades que compõem o projeto podem ser visualizadas na Figura 5.

Figura 5 - Grafo do projeto



Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

No Grafo, pode-se perceber que as atividades não possuem relações de precedência entre elas, e que todas elas podem ser realizadas simultaneamente, ou seja, ao mesmo tempo. Neste caso, isso será possível desde que haja recursos disponíveis para executá-las.

Na prática, durante a implantação real das atividades do projeto na estação de bombeamento, mesmo com a atuação dos turnos ininterruptos de manutenção na execução das atividades, observou-se que a duração total do projeto foi de 28 dias corridos. É importante ressaltar que foi considerada a utilização de dias corridos, pois a empresa conta com turnos ininterruptos de manutenção, o que possibilita execução de atividades aos fins de semana e feriados.

Com essas informações, o problema apresentado foi analisado e modelado matematicamente como o Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recurso (PSPRR). Posteriormente, foi feita a implementação computacional utilizando o programa GLPK (GNU Linear Programming Kit) e a interface GUSEK (Under Scite Extended Kit) na versão 0.2 para otimizar tanto o sequenciamento das atividades, quanto a alocação dos recursos, visando a redução da duração total do projeto.

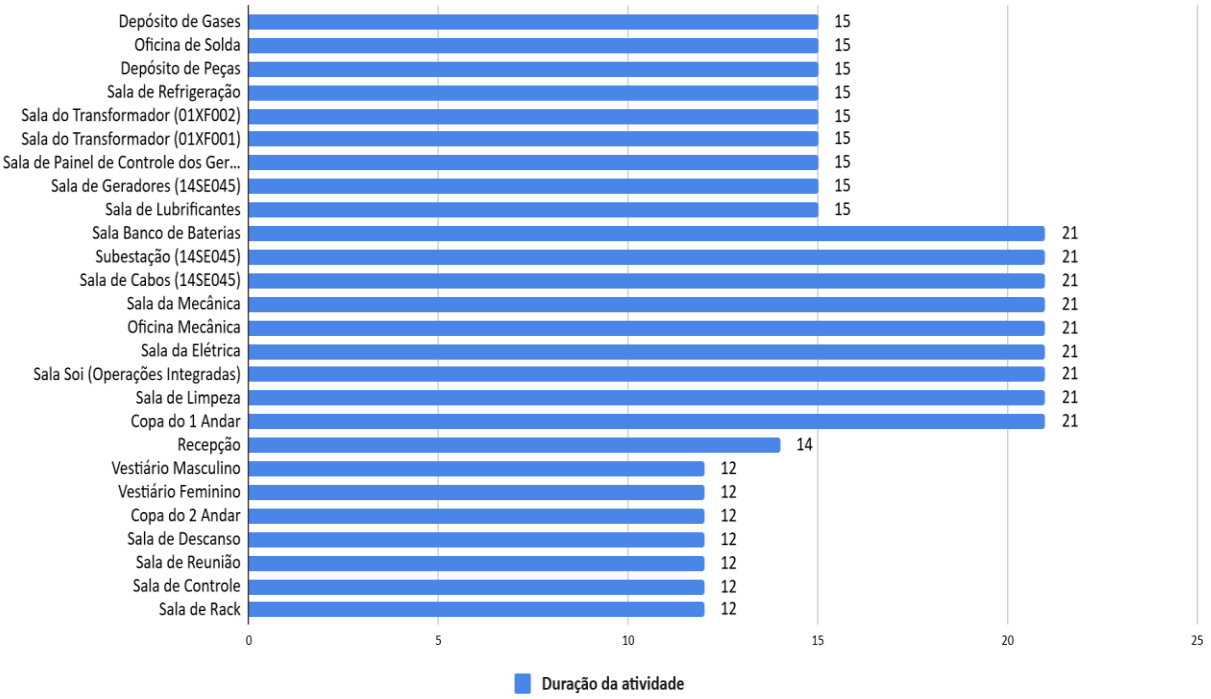
Como resultado da implementação do 3S, a equipe de manutenção da estação de bombeamento da empresa de mineração de ferro espera alcançar melhorias significativas de eficiência operacional, segurança do local de trabalho, organização e limpeza, utilização das instalações e manutenção dos equipamentos. Essa abordagem estruturada não apenas almeja beneficiar as operações diárias, mas também estabelecer uma base sólida para a continuidade do aprimoramento da metodologia do 5S e da excelência operacional no setor industrial em questão, considerando, principalmente, a disponibilidade total dos recursos.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados computacionais obtidos revelaram informações cruciais sobre a implementação da metodologia 3S na estação de bombas da mineradora, foco do estudo. O foco principal do estudo foi a otimização do planejamento inicial por meio da implementação da modelagem matemática, visando principalmente minimizar o tempo total de conclusão das atividades do projeto e melhorar a alocação dos recursos renováveis utilizados.

O resultado foi à obtenção do tempo ótimo de conclusão das atividades do projeto em 21 dias. Esse dado representa uma melhoria considerável em relação ao cenário inicial, indicando que a implementação da metodologia 3S, aliada à modelagem matemática, pode reduzir consideravelmente o tempo necessário para alcançar os objetivos propostos. O que pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Gráfico de Gantt



Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

Outro aspecto relevante revelado pelos resultados é a garantia de se ter a quantidade total dos recursos renováveis necessários para atingir o resultado ótimo. A implementação computacional apontou que é necessário um total de 61 unidades dos recursos renováveis para executar as atividades do projeto de forma otimizada. Essa informação é crucial para a gestão de recursos, permitindo uma alocação mais precisa e econômica dos meios necessários para a implementação da metodologia 3S para o caso estudado.

A redução do tempo de conclusão do projeto e a otimização no uso de recursos renováveis têm implicações diretas na eficiência operacional da estação de bombas. A implementação bem-sucedida da metodologia 3S, baseada nos insights obtidos pela implementação computacional da ferramenta, pode resultar em uma operação mais fluida, redução de custos operacionais e de manutenção, bem como maior produtividade dos processos estratégicos da estação.

A alocação eficiente de 61 unidades dos recursos renováveis representa uma contribuição tangível para a gestão do projeto, fornecendo um embasamento robusto para a tomada de decisões. Adicionalmente, é importante reconhecer que um número menor de recursos renováveis disponíveis para a realização das atividades na implementação do 3S, implicará no aumento da duração total do

projeto. O que aconteceu na prática, devido à falta de gestão eficiente dos recursos no processo de planejamento inicial.

Ao analisar os resultados, é crucial considerar também outras condições práticas da implementação. Questões como treinamento da equipe, adaptação do ambiente de trabalho, obtenção de recursos não renováveis e possíveis obstáculos devem ser considerados e abordados para garantir a aplicação eficiente e eficaz do planejamento otimizado no chão de fábrica.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da simulação indicam que a combinação da metodologia 3S com a simulação computacional pode ser altamente benéfica para otimizar operações na indústria de mineração. A redução do tempo de conclusão do projeto e a utilização eficiente de recursos renováveis demonstram o potencial impacto positivo dessa abordagem, sugerindo caminhos promissores para aprimorar a gestão de processos industriais.

A implementação bem-sucedida da metodologia 3S, apoiada pela simulação computacional, emerge como uma perspectiva promissora para aprimorar a eficiência operacional. A significativa redução do tempo de execução do projeto sugere que as práticas de organização, arrumação e limpeza propostas pela metodologia 3S, quando aplicadas com base nos resultados da simulação, podem resultar em ganhos substanciais de produtividade.

Este trabalho contribui, assim, para a evolução do campo de PSPRR, fornecendo bons resultados que podem catalisar melhorias significativas na gestão de projetos com recursos escassos nas operações industriais. Percebe-se, também, seu potencial para utilização em projetos mais complexos, de maior magnitude e com maior quantidade de restrições.

Para trabalhos futuros, sugere-se, por exemplo, a utilização de algoritmos na linguagem de programação Python para também realizar as simulações computacionais e comparar seus resultados com os resultados obtidos através da utilização do programa GLPK com a interface GUSEK, na tentativa de aprimorar a precisão da simulação, considerando fatores, como por exemplo, indicadores de uso de memória computacional.

REFERÊNCIAS

BOYD, Stephen e VANDENBERGHE, Lieven. Convex Optimization. Cambridge University Press, Cambridge, 2004.

BRUCKER, Peter, DREXL, Andreas, MOHRING, Rolf, NEUMANN, Klaus; PESCH, Erwin. Resource-Constrained Project Scheduling: Notation, Classification, Models, and Methods. European Journal of Operational Research, 112, 3-41, 1999.

DANTZIG, George. Linear Programming and Extensions. Princeton University Press, Princeton, 1963.

GLOVER, Fred. Tabu Search. Handbook of combinatorial optimization (Vol. 1, pp. 289-338). Elsevier, 1989.

HARTMANN, Sonke. Project scheduling with resource capacities and requests varying with time: a case study. Flexible Services and Manufacturing Journal, 25(1-2), 74-93, 2013.

MERCHANT, Kenneth A. e VAN DER STEDE, Win A. Management Control Systems: Performance Measurement, Evaluation and Incentives, Prentice Hall, 2007.

NAPOLEÃO, Bianca Minetto. 5S. São Paulo: Ferramentas da Qualidade, 2018. Disponível em: <https://ferramentasdaqualidade.org/5s/> Acesso em: 25 nov. 2023.

NATALI, Marcos. Praticando o 5S: Na Indústria, Comércio e Vida pessoal. STS, São Paulo, v. 1, n.1, p. 101-102, 1995.

NEMHAUSER, George, e WOLSEY, Laurence. Integer and Combinatorial Optimization. Wiley, 1988.

OLLO-LÓPEZ, Andrea; BAYO-MORIONES, Alberto and LAZARRA-KINTANA, Martín. Perfil de Los Empleados Involucrados en Las Nuevas Prácticas de Organización del Trabajo. Cuadernos de Economía y Dirección de La Empresa. 2009, vol.12, n.39, pp.95-122. 2009.

PENHA, Renato; GUERRAZZI, Luiz; ANDRADE; Diego; CINTRA; Renato. Produção Científica Sobre Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Um Estudo Bibliométrico e Bibliográfico. Revista de Gestão e Projetos, v. 8, n. 2, p. 71-86, 2017.

RIBEIRO, Haroldo. 5S, Base Para a Qualidade Total: Um Roteiro para Uma Implantação Bem Sucedida. Casa da Qualidade, Salvador, v. 1, n. 13, p. 114-115. 1994..

RIBEIRO, Haroldo. 5S: Os 5 Passos Para Uma Implantação de Sucesso. PDCA, São Paulo, v.1, n. 1, p. 29-30. 2015.

RIBEIRO, Haroldo. Como Comprometer as Lideranças Para o 5S? São Paulo: PDCA, 2018. Disponível em: <https://www.pdca.com.br/index.php/artigos-haroldo-ribeiro/5s-para-liderancas> Acesso em: 25 nov. 2023.

TONIAZZO, Rubilar. 5S: Muito Além Da Limpeza e Organização (Lean para Pequenas Empresas). Producente, Caxias do Sul, v. 1, n. 1, p. 29-32. 2016.

TUBINO, Dalvio Ferrari. Planejamento e Controle da Produção - Teoria e Prática. Atlas , 2022.

Capítulo 2

10.37423/251110422

PROPOSIÇÃO DE INDICADORES COMO MEDIDAS DE DESEMPENHO DE UMA UNIDADE DE PRONTO ATENDIMENTO

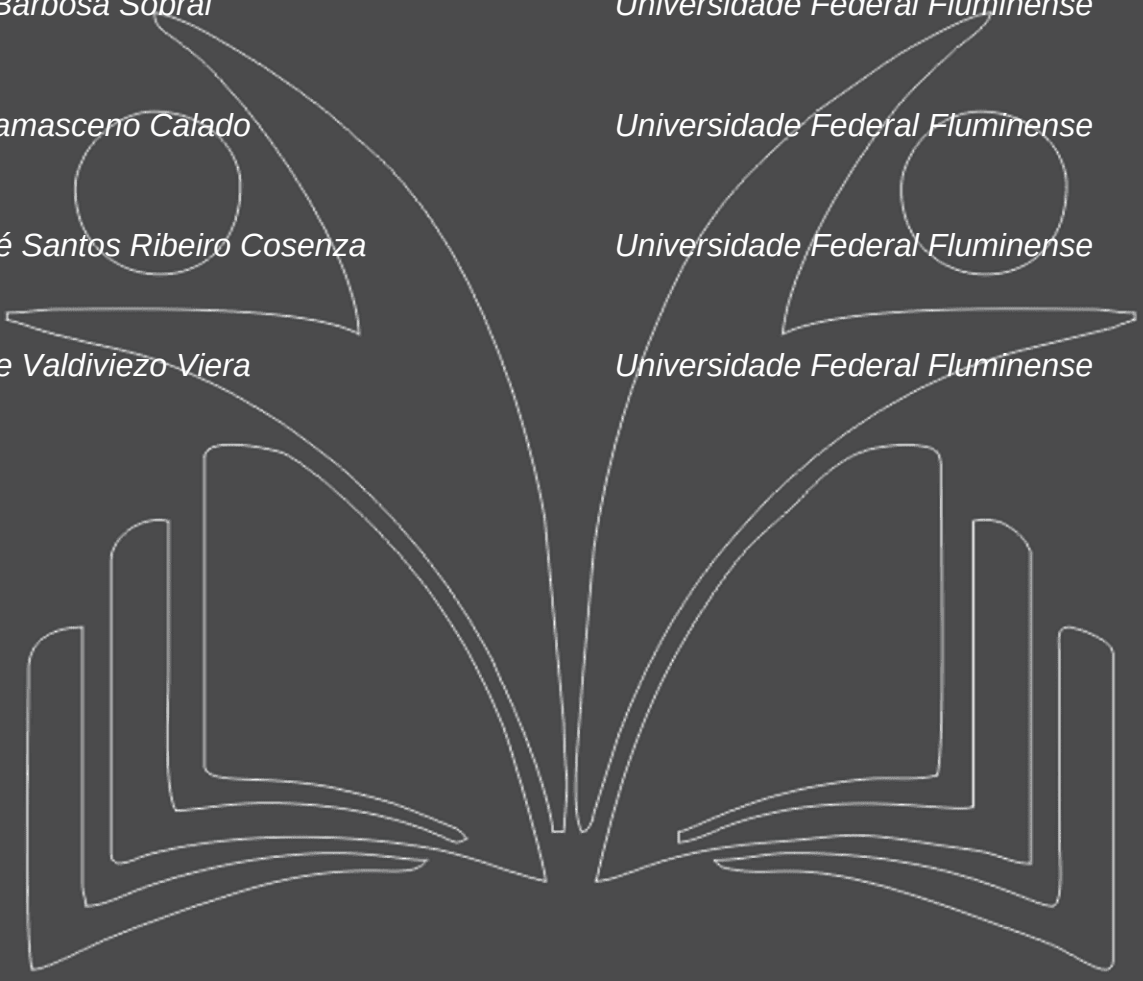
Laryssa Carvalho de Amaral — *Universidade Federal Fluminense*

Ana Paula Barbosa Sobral — *Universidade Federal Fluminense*

Robisom Damasceno Calado — *Universidade Federal Fluminense*

Harvey José Santos Ribeiro Cosenza — *Universidade Federal Fluminense*

Luis Enrique Valdiviezo Viera — *Universidade Federal Fluminense*



RESUMO

A abordagem Lean e a metodologia seis sigma na saúde, junto com suas ferramentas, buscam oferecer uma maior qualidade de serviço hospitalar. Para isto, faz-se necessário o uso de métricas a fim de avaliar e ajudar nas tomadas de decisões promovendo melhoria contínua nos processos. O método utilizado para alcançar esse objetivo foi o DMAIC, uma abordagem estruturada que consiste em Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar. A Análise Fatorial, uma técnica da Estatística Multivariada, foi escolhida para obtenção dos indicadores mais relevantes para avaliar o desempenho de uma Unidade de Pronto Atendimento (UPA). Ao final do estudo, foram identificados três indicadores de desempenho globais essenciais para a UPA estudada: Indicador de Eficiência Hospitalar, Indicador de Serviço Médico e Indicador de Ciclo de Triagem. Estes indicadores foram identificados após a aplicação da técnica estatística, o que promove sua relevância e capacidade de fornecer uma visão abrangente do desempenho da unidade, gerando informações cruciais para a tomada de decisões e aprimoramento dos processos. Com a Análise Fatorial, foi possível passar de nove variáveis para três indicadores de desempenho, e desta forma, a sua utilização foi fundamental para simplificar o extenso banco de dados, tornando-o mais acessível e compreensível para a gestão da Unidade de Pronto Atendimento (UPA). Embora tenha apresentado algumas limitações, os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que corresponderam aos objetivos definidos inicialmente. Isso proporcionou uma interpretação clara e útil dos dados, fornecendo informações concisas e valiosas para aprimorar a gestão e as tomadas de decisão na UPA devido a redução da dimensionalidade dos dados.

Palavras-Chaves: indicador; desempenho; análise fatorial; DMAIC; unidade de pronto atendimento.

1 INTRODUÇÃO

O Lean, junto com suas ferramentas, mostra uma grande eficiência, pois possibilita a identificação dos riscos relacionados à assistência à saúde, bem como a análise e implementação de barreiras para evitá-los. O Lean possui a capacidade de reduzir o tempo de espera no processo de admissão dos pacientes, assim como o despendido por eles dentro de uma unidade de atendimento, buscando mecanismos de controle do uso racional dos recursos, que possam promover uma melhor qualidade de vida para os pacientes e reduzir custos (Amaral et al., 2020). A metodologia Seis Sigma é uma abordagem para melhorar produtos, serviços e processos, reduzindo defeitos e variabilidade. O objetivo é tornar o processo 99,99996% livre de falhas. A união do Seis Sigma com o Lean forma o Lean Six Sigma, usado para coletar e analisar dados, melhorar o desempenho e eliminar desperdícios/erros nos processos operacionais. As ferramentas do Lean Six Sigma são usadas para tomada de decisão. (Couglin; Posencheg, 2019; Dellifraine et al., 2010).

Análogo a isso, os indicadores podem ser implementados ao longo de um projeto Lean Six Sigma como meio de mensurar e analisar os dados coletados. Os indicadores podem ser empregados, por exemplo, como uma ferramenta para quantificar como os resultados das Unidades de Pronto Atendimento (UPA) podem ser classificados, no que diz respeito à eficiência e qualidade dos serviços prestados aos seus usuários. Além disso, por meio desses indicadores, será possível comparar os valores assumidos “antes” e “depois” da implantação do projeto Lean nas UPA, acompanhado de uma tomada de ação gerencial (Sobral et al., 2021).

Desta maneira, o objetivo deste documento fomenta-se em propor um conjunto de indicadores de desempenho global para uma Unidade de Pronto Atendimento, por meio de ferramenta estatística.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Caracterização da upa – 24 horas

Os dados obtidos para realização deste trabalho são de uma Unidade de Pronto Atendimento (UPA). Essas unidades são responsáveis por concentrar os atendimentos de saúde de complexidade intermediária, compondo uma rede organizada em conjunto com a atenção básica e a atenção hospitalar pertencentes ao Sistema Único de Saúde – SUS (Ministério da Saúde, 2010).

A principal ênfase da Unidade de Pronto Atendimento (UPA) está na configuração de sua estrutura, no bem-estar proporcionado pelas instalações e na qualidade dos equipamentos. Esta é a primeira vez em que um elemento do SUS foi concebido com rigorosos critérios estruturais, o que não existia antes com os prontos-socorros e hospitais com emergências. De fato, a implantação das UPA evoluiu do modelo de pronto-socorro que não tinha resolutividade, espaço físico, equipe qualificada, material, medicamento e outras ineficiências (O'Dwyer et al., 2017).

As Unidades de Pronto Atendimento são classificadas a partir do seu porte, que é caracterizado pelo tamanho da população na região onde localiza-se a UPA. Os portes são caracterizados na Tabela 1:

Tabela 1: Definição dos Portes aplicáveis à UPA

Classificação das UPA	População da área de abrangência da UPA	Área física mínima	Número de atendimentos médicos em 24 horas	Número mínimo de médicos por plantão	Número mínimo de Leitos de observação
Porte I	50.000 a 100.000 habitantes	700 m^2	Até 150 pacientes	2 médicos	7 leitos
Porte II	100.001 a 200.000 habitantes	1000 m^2	Até 300 pacientes	4 médicos	11 leitos
Porte III	200.001 a 300.000 habitantes	1300 m^2	Até 450 pacientes	6 médicos	15 leitos

Fonte: Adaptado de Ministério da Saúde (2010).

2.2 Indicadores

A elaboração de indicadores tem como objetivo a compreensão dos movimentos internos que possam influenciar os resultados de acordo com as expectativas das partes interessadas, que são chamadas na literatura de Stakeholders. Além disso, os indicadores são influentes na tomada de decisões para as empresas, pois geram decisões mais acertadas com base em números concretos (Neely; Adams; Crowe, 2001).

Os indicadores de saúde são selecionados com base nos objetivos diários, visando a resolução de problemas enfrentados pelos gestores. Cada indicador possui uma meta a ser atingida em um período

específico, e a diferença entre o valor atual e a meta é denominada gap (lacuna). A detecção desse desvio deve motivar os gestores a identificar causas e implementar ações corretivas/preventivas para alcançar os resultados desejados (Sobral et al., 2023).

2.3 Estatística Multivariada

A Estatística Multivariada tem como objetivo tornar mais simples e fácil a interpretação da situação estudada por meio da construção de índices de maneira condensada das informações originais (Mingoti, 2005). Sendo assim, torna-se mais eficiente monitorar diversas variáveis através de uma única medida e não através de várias (Endo, 1986). A criação destas métricas pode ser realizada através da utilização da Análise Fatorial, ou seja, quando se possui um número considerável de variáveis, em que todas são importantes (Fachel, 1976). Assim como mencionado por Swisher, Beckstead e Bebeau (2004), a Análise Fatorial pode ser utilizada para aumentar e clarear o discernimento na realização dos projetos quando há o envolvimento de diversas variáveis.

2.3.1 Análise Fatorial

A Análise Fatorial (AF) é empregada na exploração de padrões ou relações subjacentes entre um extenso conjunto de variáveis, visando determinar a possibilidade de resumir a informação em um conjunto reduzido de fatores. Um fator pode ser descrito como uma composição linear das variáveis originais, portanto, a Análise Fatorial é usada para investigar as relações entre muitas variáveis e organizá-las em um conjunto menor de fatores (Matos; Rodrigues, 2019).

Modelo de Análise Fatorial via Matriz de Correlação

Mingoti (2005), mostra a Análise Fatorial construída via matriz de correlação teórica $Ppxp$. Sendo um modelo que associa linearmente as variáveis padronizadas e os m fatores comuns, desconhecidos inicialmente. As equações do modelo podem ser expressas por (1):

$$\begin{aligned} Z_1 &= l_{11}F_1 + l_{12}F_2 + \cdots + l_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\ Z_2 &= l_{21}F_1 + l_{22}F_2 + \cdots + l_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\ \vdots &= \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ Z_p &= l_{p1}F_1 + l_{p2}F_2 + \cdots + l_{pm}F_m + \varepsilon_p \end{aligned} \qquad (1)$$

Em notação matricial:

$$D(X - \mu) = LF + \varepsilon \qquad (2)$$

Onde:

D: Matriz de covariância dos dados de X; X: Vetor aleatório das variáveis originais; μ: Vetor média das variáveis de X;

p: número de variáveis estudadas

L: Matriz em que contém parâmetros (constantes) a qual indica a relação entre as variáveis originais em X e os fatores extraídos;

F: Matriz de fatores;

ε: Vetor de erros ou resíduos que não puderam ser explicados pelos fatores extraídos.

Segundo Mingoti (2005, p. 94) "o coeficiente l_{ij}, comumente chamado de *loading*, é o coeficiente da i-ésima variável padronizada Z_i no j-ésimo fator F_j e representa o grau de relacionamento linear entre $Z_i, i = 1,2, \dots p$ e $F_j, j = 1,2, \dots m$". [...] O objetivo desta etapa é "identificar as novas m variáveis, interpretá-las e calcular seus escores assim como foi feito na análise de componentes principais."

Estimação do número de fatores

Para determinar o número de fatores, destaca-se a Análise dos Componentes Principais e Análise dos Fatores Comuns, no qual possui os seguintes critérios:

Critério 1: A análise da proporção da variância total relacionada com cada autovalor. Permanecem autovalores que representam maiores proporções da variância total e, portanto, o valor de m será igual ao número de autovalores retidos.

Critério 2: A ideia básica desse critério é manter no sistema novas dimensões que representem pelo menos a informação de variância de uma variável original, sendo proposto por Kaiser (1958), o autovalor maior do que um será o escolhido.

Critério 3: Para este critério, procura-se no gráfico Scree Plot ou Diagrama de Inclinação um “ponto de salto”, que estaria representando um decréscimo de importância em relação à variância total.

Para Mingoti (2005), o método de Análise dos Componentes Principais é utilizado como técnica exploratória, tendo como propósito extrair os fatores e chegar em um grupo de fatores, os quais moldam uma combinação linear da matriz de correlações ou das variáveis originais. A autora acrescenta que o escore (pontuação fatorial) para cada fator, é calculado a fim de empregar valores numéricos em diversas outras análises. Logo, “para cada elemento amostral k, k = 1,2, … , n, o seu escore no fator Fj é calculado” (Mingoti, 2005, p. 107). Sendo expresso por (3):

$$F_{jk} = w_{j1}Z_{1k} + w_{j2}Z_{2k} + \cdots + w_{ji}Z_{pk} \qquad (3)$$

Tem-se que Zi, i = 1,2, … p são as variáveis padronizadas, Fj, j = 1,2, … m, os fatores e wji são os coeficientes dos escores fatoriais correspondentes, gerados por regressão (Mingoti, 2005).

Rotação de fatores

Neste trabalho, Segundo Mingoti (2005), tem-se dois métodos de rotação: ortogonal e não ortogonais (oblíquos).

No método da rotação ortogonal preserva a orientação original entre os fatores, mantendo-os perpendiculares após a rotação. Além disso, os fatores se tornam independentes e não estão correlacionados entre si. A estratégia adotada para interpretá-los na rotação ortogonal é examinar as variáveis que apresentam as maiores cargas fatoriais em cada fator, as quais são aquelas que estão fortemente associadas a esse fator, podendo assim, serem agrupadas e interpretadas em termos mais abrangentes do fator em questão. É estabelecido alguns critérios para encontrar a matriz ortogonal e evitar manipulações de soluções, sendo elas: Critério Varimax, Critério Quartimax e Critério Orthomax (Mingoti, 2005).

Diferentemente das rotações ortogonais, as rotações não ortogonais ou também chamadas de rotações oblíquas, não preservam a estrutura de ajuste original do modelo de Análise Fatorial. Além disso, os fatores são correlacionados entre si, sendo que a grandeza das correlações dependerá do tipo de rotação utilizada, ou seja, dos ângulos de rotação utilizados. Os métodos de rotações não ortogonais

dos fatores encontrados nos softwares estatísticos são: Quartmin, Covarimim, Oblimax e Promax (Mingoti, 2005).

Em resumo, a rotação de fatores segundo Mingoti (2005) é uma etapa importante na Análise Fatorial, que busca maximizar a interpretabilidade dos resultados obtidos na extração dos fatores. Existem diferentes métodos de rotação de fatores, e a escolha do mais adequado deve considerar a teoria subjacente ao conjunto de dados e o objetivo da Análise Fatorial.

Validação do Modelo de Análise Fatorial

Mingoti (2005) cita uma estratégia de 4 passos para validação do modelo de Análise Fatorial conforme proposto por Jonhson e Wiehern (2002), são eles:

Passo 1: Realizar a Análise Fatorial pelo Método de Componentes Principais, utilizando a rotação Varimax, a fim de verificar se existe alguma diferença em relação ao método inicialmente utilizado (sem rotação);

Passo 2: Realizar a Análise Fatorial por algum outro método alternativo como pelo método dos fatores principais ou pelo método de Mínimos Quadrados não Ponderados. Ademais, faz-se necessário comparar as soluções do passo 2 com as obtidas no passo 1;

Passo 3: Realizar os métodos anteriores com diferentes números próximos de fatores, a fim de encontrar a melhor solução;

Passo 4: Caso o conjunto de dados seja grande recomenda-se dividir em duas partes do banco de dados e realizar a Análise Fatorial, após isso, comparar as soluções obtidas em cada uma das partes.

Esses passos são importantes para garantir a confiabilidade e validade dos resultados da Análise Fatorial. Por meio da utilização dessas técnicas, é possível identificar a estrutura subjacente das variáveis observadas e examinar as relações entre elas de forma mais precisa e robusta (Mingoti, 2005).

3 METODOLOGIA

A pesquisa científica requer a adoção de métodos específicos para a obtenção de conhecimento. “Pode-se definir método como caminho para se chegar a um determinado fim. E método científico

como o conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos adotados para se atingir o conhecimento" (Gil, 2008, p. 8).

Desta forma, segue a classificação da pesquisa para este estudo, de acordo com Gil (2008):

Quanto à natureza, define-se por pesquisa aplicada, dado que tem como objetivo gerar conhecimento através de uma aplicação prática dirigida a soluções de problemas específicos. Quanto à abordagem, classifica-se por pesquisa quantitativa, visto que requer o uso de recursos e técnicas estatísticas. Quanto aos objetivos, pesquisa exploratória, porque visa proporcionar maior familiaridade com o problema tornando explícito ou a construir hipóteses. Quanto aos procedimentos, pesquisa ação, pois é um método de investigação social que se fundamenta na prática empírica, sendo desenvolvida em estreita conexão com uma ação específica ou a solução de um problema coletivo, em que os pesquisadores envolvidos na situação colaboram de forma cooperativa ou participativa. Desta maneira, realizou-se uma estreita associação a resolução de um problema coletivo com a aplicação do método DMAIC. Baseada no procedimento de pesquisa Define, Mesure, Analyse, Improve and Control (DMAIC).

4 PROPOSIÇÃO DE INDICADORES

Neste capítulo, são apresentados a caracterização da UPA estudada, os resultados do método DMAIC com Análise Fatorial, utilizando os softwares Minitab 19, SPSS 25 e Microsoft Excel. A execução das etapas do DMAIC também é detalhada.

4.1 Definir

Caracterização da UPA estudada neste Projeto

Os dados utilizados no projeto provêm de uma UPA em São Paulo, Brasil, que oferece atendimento médico de urgência e emergência de alta qualidade. A infraestrutura da UPA estudada, classificada como porte II, inclui áreas como recepção, consultórios, salas de exames e de emergência, proporcionando assistência médica 24 horas por dia, todos os dias da semana.

Escopo do projeto

Este projeto tem como objetivo propor indicadores de desempenho global para uma UPA com base em variáveis mensuradas. Os stakeholders incluem a equipe administrativa, médicos, enfermeiros, pacientes, professores participantes e a própria aluna responsável pelo projeto. As métricas de desempenho consideradas abrangem a identificação do paciente, número de atendimentos e diversos tempos de ciclo, como recepção, triagem, atendimento, medicação e exame. O método escolhido para obter indicadores significativos é a Análise Fatorial.

Voz do Cliente (VOC) e Crítico para a Qualidade (CTQ)

Para entender as necessidades, expectativas e opiniões do cliente em relação ao projeto, foram empregadas as ferramentas Voz do Cliente (VOC) e Crítico para a Qualidade (CTQ), esta última transformando o VOC em características mensuráveis essenciais para os clientes.

Dessa forma, foi constatado que os clientes querem melhorias no aspecto de identificação do desempenho global para ter processos mais confiáveis e satisfatórios. Portanto, é necessário a criação de um conjunto de indicadores de desempenho global analisando as variáveis já mensuradas. Fundamentado nisso, definiu-se o que é crítico para a qualidade (CTQ).

Declaração do problema

Formulou-se a pergunta norteadora para este projeto a partir do questionamento: Como pode ser estabelecido um critério geral para determinar o desempenho geral de uma Unidade de Pronto Atendimento (UPA), considerando que cada variável mensurada pode apontar um desempenho distinto?

4.2 Medir

Para esta etapa, é necessário empregar a técnica de Análise Fatorial para resolver a descrição do problema. Para isso, esta etapa tem como objetivo elaborar o conjunto de indicadores.

Inicialmente, foram coletados dados do mês de fevereiro do ano de 2021, fornecidos pela responsável da UPA em questão. Tendo, assim, variáveis do tipo contínuo, uma vez que podem assumir qualquer valor dentro do conjunto dos números reais. Antes de iniciar a Análise Fatorial e suas etapas,

recomenda-se realizar uma verificação de possíveis valores atípicos (outliers) e avaliar a distribuição de probabilidade dos dados quanto a qualquer viés. Para isso, as variáveis trabalhadas são: Tempo de Ciclo da recepção, Tempo de Ciclo da triagem, Tempo de Ciclo da medicação, Tempo de Ciclo do exame, LOS sem exame laboratorial, Lead Time, LOS com exame laboratorial, Tempo de atendimento até a alta.

Nesse sentido, foi necessário conduzir um teste estatístico para avaliar a normalidade dos dados. A Tabela 2 mostra o resultado do teste de normalidade, o qual é possível observar que as variáveis possuem distribuição normal para um nível de significância de 1% (p-valor ≥ 0,01

Tabela 2: Teste de Normalidade - Kolmogorov-Smirnov

Variáveis empregadas	P-Valor
Tempo de ciclo da recepção	0,01
Tempo de ciclo da triagem	0,01
Tempo de ciclo do atendimento	0,01
Tempo de ciclo da medicação	0,01
Tempo de ciclo do exame	0,01
LOS sem exame laboratorial	0,01
Lead time	0,01
LOS com exame laboratorial	0,01
Tempo de atendimento até a alta do paciente	0,01

$\boldsymbol{H0}$: Dados apresentam distribuição Normal.
$\boldsymbol{H1}$: Dados não apresentam distribuição Normal
Fonte: A autora (2023).

Como as variáveis têm distribuição Normal, pode-se empregar a técnica de Análise Fatorial. Realizou-se uma verificação de outliers com o teste de Grubbs, como colocado na Tabela 3, e então tais outliers foram investigados a fim de saber se estes não eram plausíveis de serem representativos da amostra aleatória.

Tabela 3: Outliers

Variável	Linha	Outlier
Tempo de ciclo da recepção	73	7
Tempo de ciclo da triagem	210	25
Tempo de ciclo do atendimento	217	25
Tempo de ciclo da medicação	275	180
Tempo de ciclo do exame	314	477
LOS sem exame laboratorial	142	7494
Lead time	142	7483
LOS com exame laboratorial	142	7494
Tempo de atend até a alta	92	-3331665

Fonte: A autora (2023).

Após a verificação dos outliers como mostra na Tabela 3, optou-se por remover os seguintes outliers com suas respectivas justificativas: Os outliers relacionado às variáveis de “Tempo de ciclo da recepção”, “Tempo de ciclo de triagem”, “Tempo de ciclo de exame” podem ser considerados anomalias ou eventos raros, pois não são representativos do comportamento típico dos dados; já os outliers relacionados às variáveis de “LOS sem exame laboratorial”, “Lead time” e “LOS com exame laboratorial” foram removidos por apresentarem uma distância maior dos clusters, com o valor do desvio padrão bem significativo conforme representado na Tabela 4; o outlier relacionado a variável “Tempo de atend até a alta” é negativo e não é possível quantificar o tempo dessa maneira, ou seja, dá-se a entender um possível erro de registro de dados.

Tabela 4: Teste de Grubbs

Variável	N	Média	DesvPad	Mín	Máx
Tempo de ciclo da recepção	383	1,472	0,761	0,000	7,000
Tempo de ciclo da triagem	383	3,561	2,025	0,000	25,00
Tempo de ciclo do atendimento	382	5,416	2,151	2,000	25,00
Tempo de ciclo da medicação	380	21,73	25,50	0,00	180,0
Tempo de ciclo do exame	366	69,54	105,17	0,00	477,0
LOS sem exame laboratorial	383	266,2	509,5	2,0	7494
Lead time	362	206,0	481,0	9,0	7483
LOS com exame laboratorial	362	306,8	588,7	3,0	7494
Tempo de atend até a alta	383	-8477	170252	-3331665	7460

Fonte: A autora (2023).

4.2.1 Análise da matriz de correlações e adequação da utilização da Análise Fatorial

Para verificar se há correlação significativa entre as variáveis, foi realizado o teste de correlação de Pearson para cada par de variáveis. Na Tabela 5, é observado que a maior correlação foi entre Lead Time e LOS sem exame laboratorial (0,996) e a menor foi entre tempo de ciclo de atendimento e Tempo de ciclo da recepção (-0,055). Analisando a matriz, observa-se que "LOS sem exame laboratorial", "Lead time", "LOS com exame laboratorial" e "Tempo de atendimento até a alta" têm altas correlações entre si. Isto sugere que essas variáveis podem estar refletindo uma construção subjacente comum.

Tabela 5: Correlações de Pearson pareadas

Amostra 1	Amostra 2	Correlaçã o	Valor-p
Tempo de ciclo da triagem	Tempo de ciclo da recepção	0,070	0,176
Tempo de ciclo do atendimento	Tempo de ciclo da recepção	-0,055	0,282
Tempo de ciclo da medicação	Tempo de ciclo da recepção	0,045	0,380
Tempo de ciclo do exame	Tempo de ciclo da recepção	0,131	0,012
LOS sem exame laboratorial	Tempo de ciclo da recepção	0,023	0,661
Lead time	Tempo de ciclo da recepção	0,037	0,482
LOS com exame laboratorial	Tempo de ciclo da recepção	0,077	0,143
Tempo de atend até a alta	Tempo de ciclo da recepção	-0,015	0,767
Tempo de ciclo do atendimento	Tempo de ciclo da triagem	-0,004	0,937
Tempo de ciclo da medicação	Tempo de ciclo da triagem	0,023	0,661
Tempo de ciclo do exame	Tempo de ciclo da triagem	-0,009	0,860
LOS sem exame laboratorial	Tempo de ciclo da triagem	-0,012	0,815
Lead time	Tempo de ciclo da triagem	-0,026	0,625

LOS com exame laboratorial	Tempo de ciclo da triagem	-0,013	0,809
Tempo de atend até a alta	Tempo de ciclo da triagem	-0,036	0,481
Tempo de ciclo da medicação	Tempo de ciclo do atendimento	0,024	0,638
Tempo de ciclo do exame	Tempo de ciclo do atendimento	0,022	0,678
LOS sem exame laboratorial	Tempo de ciclo do atendimento	0,080	0,119
Lead time	Tempo de ciclo do atendimento	0,120	0,022
LOS com exame laboratorial	Tempo de ciclo do atendimento	0,104	0,048
Tempo de atend até a alta	Tempo de ciclo do atendimento	0,087	0,088
Tempo de ciclo do exame	Tempo de ciclo da medicação	0,259	0,000
LOS sem exame laboratorial	Tempo de ciclo da medicação	0,240	0,000
Lead time	Tempo de ciclo da medicação	0,168	0,001
LOS com exame laboratorial	Tempo de ciclo da medicação	0,272	0,000
Tempo de atend até a alta	Tempo de ciclo da medicação	0,121	0,019
LOS sem exame laboratorial	Tempo de ciclo do exame	0,251	0,000

Lead time	Tempo de ciclo do exame	0,285	0,000
LOS com exame laboratorial	Tempo de ciclo do exame	0,495	0,000
Tempo de atend até a alta	Tempo de ciclo do exame	0,158	0,002
Lead time	LOS sem exame laboratorial	0,996	0,000
LOS com exame laboratorial	LOS sem exame laboratorial	0,804	0,000
Tempo de atend até a alta	LOS sem exame laboratorial	0,771	0,000
LOS com exame laboratorial	Lead time	0,901	0,000
Tempo de atend até a alta	Lead time	0,944	0,000
Tempo de atend até a alta	LOS com exame laboratorial	0,746	0,000

$H0$: Dados apresentam correlação.
$H1$: Dados não apresentam correlação.
Fonte: A autora (2023).

Foi realizada a estatística KMO e o Teste de esfericidade de Bartlett para verificar a adequabilidade da amostra para a Análise Fatorial. Na Tabela 6 são reportados estes resultados.

Tabela 6: Resultados Teste de KMO e Bartlett

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adequação de amostragem.		0,500
Teste de esfericidade de Bartlett	Aprox. Qui-quadrado	4680,227
	Graus de Liberdade	36
	p-valor.	0,000

$H0$: Não é apropriado realizar Análises Fatoriais
$H1$: Apropriado realizar Análises Fatoriais.
Fonte: A autora (2023).

Neste caso, o KMO calculado é de aproximadamente 0,500, valor que considera o mínimo aceitável para a Análise Fatorial, permitindo a continuidade desta análise. Além disso, com o teste de esfericidade de Bartlett, rejeita a hipótese nula em que a matriz de correlações seja a identidade, ou seja, existe correlação entre as variáveis. Com isso, este teste colaborou mais uma vez com a utilização da Análise Fatorial.

4.2.2 Extração dos fatores iniciais e determinação dos fatores

A Tabela 7 mostra as comunalidades, cuja representação é pela variância total explicada em cada variável. Inicialmente, as comunalidades são iguais a 1, e depois da extração, podem variar entre 0 e 1. Quanto mais próximas de 1, mais os fatores comuns explicam a alta variância, ou seja, toda variância é explicada por todos os fatores. Neste caso, a Tabela 7 mostra que cinco variáveis apresentam elevados índices de comunalidade, ou seja, a variância é explicada por estes fatores depois da extração.

Tabela 7: Comunalidades

Variáveis estudadas	Inicial	Extração
Tempo de ciclo da recepção	1,000	0,483
Tempo de ciclo da triagem	1,000	0,818
Tempo de ciclo do atendimento	1,000	0,253

Tempo de ciclo da medicação	1,000	0,363
Tempo de ciclo do exame	1,000	0,581
LOS sem exame laboratorial	1,000	0,968
Lead time	1,000	0,955
LOS com exame laboratorial	1,000	0,911
Tempo de atend até a alta	1,000	0,905

Método de Extração: Análise de Componente Principal.
Fonte: A autora (2023).

Como observado na Tabela 8, empregando-se o Critério de Kaiser, pode-se extrair até três fatores. Além disso, pelo Scree Plot, Figura 1 verifica-se que a partir do fator 3 tende a horizontalidade com uma queda abrupta. Por fim, pelo critério de porcentagem de variância acumulada, adota-se reter os fatores que explicam um nível aceitável da variância explicada de 69,30%, retendo assim três fatores, representados na Tabela 8. Com isso, a melhor escolha são três fatores.

Tabela 8: Autovalores e Percentuais de Variância Explicada

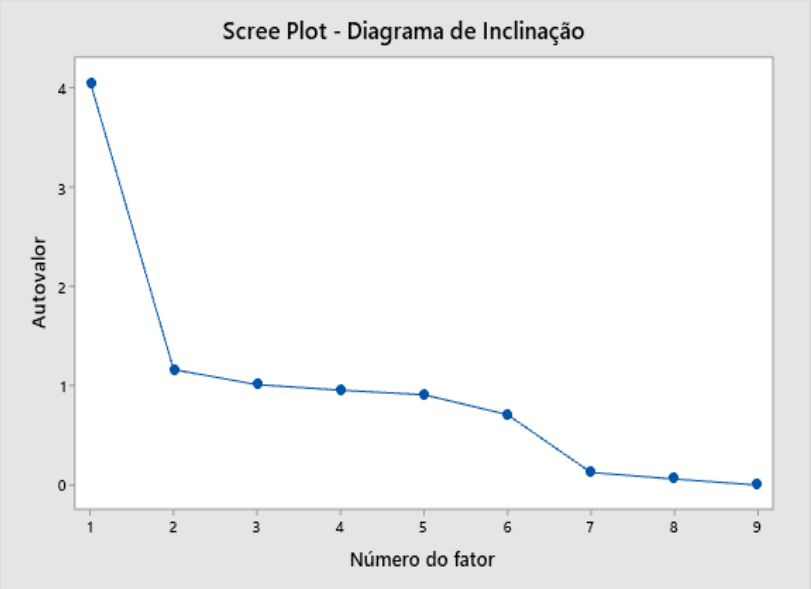
Variância total explicada

Componente	Autovalores iniciais			Somas de extração de carregamentos ao quadrado			Somas de rotação de carregamentos ao quadrado		
	Total	% de variância	% cumulativa	Total	% de variância	% cumulativa	Total	% de variância	% cumulativa
1	4,062	45,134	45,134	4,062	45,134	45,134	3,898	43,310	43,310

2	1,163	12,927	58,061	1,163	12,927	58,061	1,294	14,373	57,684
3	1,011	11,239	69,299	1,011	11,239	69,299	1,045	11,615	69,299
4	,956	10,621	79,920						
5	,910	10,111	90,030						
6	,710	7,885	97,915						
7	,127	1,409	99,324						
8	,061	,675	100,000						
9	4,119E-5	,000	100,000						

Método de Extração: análise de Componente Principal.
Fonte: A autora (2023).

Figura 1: Scree Plot (Diagrama de Inclinação)



Fonte: A autora (2023).

Após a definição do número de fatores, segue para a etapa de extração utilizando o método de Análise dos Componentes Principais da matriz de correlação. Sendo assim, na Tabela 9 tem-se as cargas fatoriais não rotacionadas, que possuem correlação com as variáveis originais.

Tabela 9: Cargas Fatoriais Não Rotacionadas

Variável	Fator1	Fator2	Fator3
Tempo de ciclo da recepção	0,105	0,661	-0,187
Tempo de ciclo da triagem	-0,041	0,315	-0,847
Tempo de ciclo do atendimento	0,172	-0,441	-0,169
Tempo de ciclo da medicação	0,378	0,377	0,278
Tempo de ciclo do exame	0,466	0,489	0,353
LOS sem exame laboratorial	0,973	-0,116	-0,091
Lead time	0,958	-0,156	-0,113
LOS com exame laboratorial	0,954	0,017	0,023
Tempo de atend até a alta	0,941	-0,112	-0,085
Variância	4,0620	1,1634	1,0115
% Variância explicada	0,451	0,129	0,112

Fonte: A autora (2023).

As "Cargas Fatoriais" representam as correlações entre cada variável e o fator subjacente. Em outras palavras, eles mostram o quanto cada variável contribui para cada fator. Assim, é possível que a UPA possa ter um valor numérico, para mensurar cada indicador proposto. Dito isso, tem- se que:

$$Indicador_1 = (0{,}973 \times LOS\ sem\ exame\ laboratorial) + (0{,}958 \times Lead\ Time) + (0{,}954 \times LOS\ com\ exame\ laboratorial) + (0{,}941 \times Tempo\ de\ atend\ até\ a\ alta)$$

$$Indicador_2 = (0{,}661 \times Tempo\ de\ Ciclo\ da\ recepção) + (-0{,}441 \times Tempo\ de\ Ciclo\ do\ atendimento) + (0{,}489 \times Tempo\ de\ Ciclo\ do\ exame)$$

$$Indicador_3 = (-0{,}847 \times Tempo\ de\ Ciclo\ de\ Triagem)$$

4.2.3 Rotação dos fatores

Com o objetivo de facilitar a interpretação dos fatores obtidos durante a fase de extração, é comum realizar a rotação dos fatores. Seguindo a abordagem proposta por Fávero et al. (2009), optou-se por realizar uma rotação ortogonal, na qual os fatores não estão correlacionados entre si, permitindo uma interpretação mais direta por meio de suas cargas. Para isso, foi empregado o método Varimax, que busca minimizar a quantidade de variáveis com cargas elevadas em cada fator, tornando a interpretação dos fatores mais simplificada. Com essa finalidade, observa-se na Tabela 10 as cargas fatoriais rotacionadas.

Tabela 10: Cargas Fatoriais Rotacionadas por Rotação Varimax

Variável	Fator1	Fator2	Fator3
Tempo de ciclo da recepção	-0,004	0,515	-0,467
Tempo de ciclo da triagem	0,008	-0,110	-0,898
Tempo de ciclo do atendimento	0,276	-0,417	0,056
Tempo de ciclo da medicação	0,257	0,539	0,084
Tempo de ciclo do exame	0,310	0,689	0,100
LOS sem exame laboratorial	0,980	0,087	-0,003
Lead time	0,977	0,040	-0,005

LOS com exame laboratorial	0,921	0,249	0,036
Tempo de atend até a alta	0,947	0,086	-0,001
Variância	3,8982	1,2934	1,0454
% Variância explicada	0,433	0,144	0,116

Fonte: A autora (2023).

A Tabela 11 mostra os escores fatoriais associados a cada fator. Esses números representam como cada fator se relaciona com as diferentes variáveis mensuradas neste estudo. A partir desses resultados, é possível utilizá-los em outras formas de analisar as informações.

Tabela 11: Coeficiente de Escore do Fator

Variável	Fator1	Fator2	Fator3
Tempo de ciclo da recepção	-0,063	0,417	-0,424
Tempo de ciclo da triagem	0,045	-0,137	-0,868
Tempo de ciclo do atendimento	0,138	-0,393	0,026
Tempo de ciclo da medicação	-0,009	0,424	0,098
Tempo de ciclo do exame	-0,017	0,545	0,120
LOS sem exame laboratorial	0,264	-0,070	-0,028
Lead time	0,270	-0,110	-0,032
LOS com exame laboratorial	0,222	0,078	0,019
Tempo de atend até a alta	0,255	-0,067	-0,025

Fonte: A autora (2023).

Como não houve mudança significativa entre as Cargas Fatoriais Não Rotacionadas e as Cargas Fatoriais Rotacionadas, os dados gerados na Tabela 9 são utilizados para construção da Tabela 12, mantendo a interpretação dos dados. Logo, pode-se dizer que as variáveis "LOS sem exame Laboratorial", "LOS com exame laboratorial", "Lead Time" e "Tempo de atendimento até a alta" predominam no Fator 1. Enquanto as variáveis "Tempo de Ciclo da recepção", "Tempo de Ciclo do atendimento" e "Tempo de Ciclo do exame" predominam no Fator 2. Por fim, o "Tempo de Ciclo de Triagem" predomina no Fator 3. Por essa razão, chama-se Indicador de "Eficiência Hospitalar" o Indicador 1, "Eficiência de Serviço Médico" o Indicador 2 e "Tempo de Ciclo de Triagem" o Indicador 3, sendo representado na Tabela 12 os indicadores associados às variáveis originais e as respectivas funções para cálculo dos indicadores.

Tabela 12: Indicadores associados às variáveis originais e aos cálculos

Indicadores	Variáveis Originais	Função para cálculo do indicador
Eficiência Hospitalar	LOS sem exame Laboratorial, LOS com exame laboratorial, Lead Time e Tempo de atendimento até a alta.	$Indicador_1$ = (0,973 × $LOS\ sem\ exame\ laboratorial$ + (0,958 × $Lead\ Time$) + (0,954 × $LOS\ com\ exame\ laboratorial$ + (0,941 × $Tempo\ de\ atend\ até\ a\ alta$)
Eficiência de Serviço Médico	Tempo de Ciclo da recepção, Tempo de Ciclo do atendimento e Tempo de Ciclo do exame	$Indicador_2$ = (0,661 × $Tempo\ de\ Ciclo\ da\ recepção$) + (−0,441 × $Tempo\ de\ Ciclo\ do\ atendime$ + (0,489 × $Tempo\ de\ Ciclo\ do\ exame$)

Tempo de Ciclo de Triagem	Tempo de Ciclo de Triagem	$Indicador_3$ = (−0,847 × $Tempo\ de\ Ciclo\ de\ Triagem$)

Fonte: A autora (2023).

O Indicador de Eficiência de Serviço Médico possui uma carga negativa na variável "Tempo de Ciclo do atendimento" o que pode impactar negativamente o indicador, ou seja, dependendo da enfermidade que o paciente possua, impacta no Tempo de Ciclo do Exame e no Tempo de Ciclo da Recepção.

4.3 Analisar

Esta etapa consiste na validação do modelo de Análise Fatorial. Para isso, foi realizado o método alternativo método dos Mínimos Quadrados não Ponderados.

4.3.1 Extração dos fatores iniciais e determinação dos fatores

A Tabela 13 mostra as comunalidades, neste caso, mostra que a maior parte das variáveis apresentam elevados índices de comunalidade, ou seja, a variância é explicada por estes fatores, depois da extração aplicado ao método alternativo de Mínimos Quadrados não Ponderados.

Tabela 13: Comunalidades

Variáveis estudadas	Inicial	Extração
Tempo de ciclo da recepção	0,097	0,999
Tempo de ciclo da triagem	0,367	0,007
Tempo de ciclo do atendimento	0,476	0,025
Tempo de ciclo da medicação	0,991	0,139

Tempo de ciclo do exame	0,422	0,619
LOS sem exame laboratorial	1,000	0,999
Lead time	1,000	0,996
LOS com exame laboratorial	0,886	0,917
Tempo de atend até a alta	0,875	0,870

Método de Extração: Quadrados Mínimos não Ponderados.
Fonte: A autora (2023).

Como observado na Tabela 14, empregando-se o Critério de Kaiser, pode-se extrair até três fatores. Além disso, pelo Scree Plot, Figura 2, verifica-se que a partir do fator 3 tende a horizontalidade com uma queda abrupta. Por fim, pelo critério de porcentagem de variância acumulada, adota-se reter os fatores que explicam um nível aceitável da variância explicada de 69,30%, retendo assim três fatores.

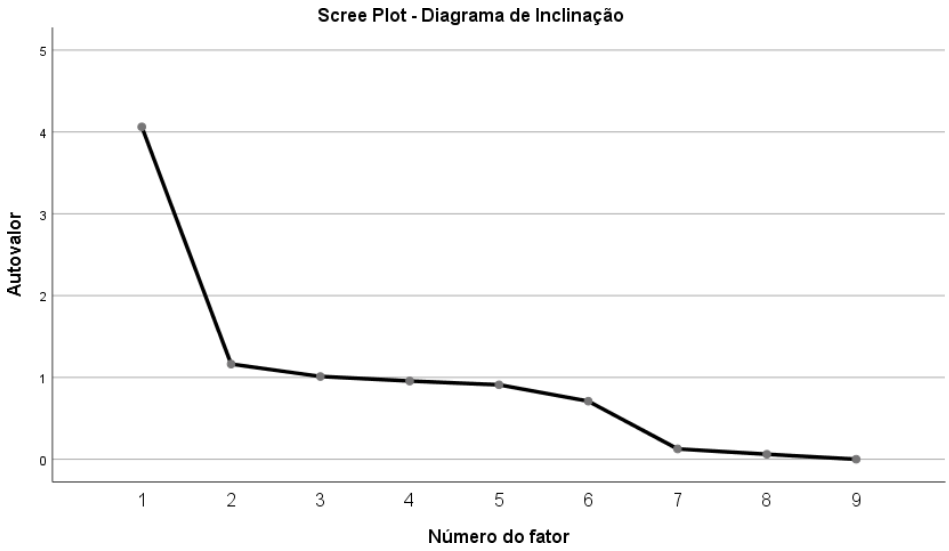
Tabela 14: Autovalores e Percentuais de Variância Explicada

Fator	Autovalores iniciais			Somas de extração de carregamentos ao quadrado			Somas de rotação de carregamentos ao quadrado		
	Total	% de variância	% cumulativa	Total	% de variância	% cumulativa	Total	% de variância	% cumulativa
1	4,062	45,134	45,134	3,965	44,060	44,060	3,384	37,603	37,603
2	1,163	12,927	58,061	1,030	11,450	55,510	1,210	13,444	51,047
3	1,011	11,239	69,299	,578	6,422	61,932	,980	10,885	61,932
4	,956	10,621	79,920						
5	,910	10,111	90,030						
6	,710	7,885	97,915						
7	,127	1,409	99,324						

8	,061	,675	100,000						
9	4,119E-5	,000	100,000						

Método de Extração: Quadrados Mínimos não Ponderados.
Fonte: A autora (2023).

Figura 2: Scree Plot (Diagrama de Inclinação)



Fonte: A autora (2023).

Após a definição do número de fatores, segue para a etapa de extração utilizando o método de Quadrados Mínimos não Ponderados. Sendo assim, na Tabela 15 tem-se as cargas fatoriais não rotacionadas, que possuem correlação com as variáveis originais.

Tabela 15: Cargas Fatoriais Não Rotacionadas

Variável	Fator1	Fator2	Fator3
Tempo de ciclo da recepção	0,106	0,975	-0,193
Tempo de ciclo da triagem	-0,031	0,064	-0,038
Tempo de ciclo do atendimento	0,133	-0,076	-0,035
Tempo de ciclo da medicação	0,299	0,052	0,216

Tempo de ciclo do exame	0,419	0,228	0,625
LOS sem exame laboratorial	0,987	-0,068	-0,151
Lead time	0,974	-0,080	-0,204
LOS com exame laboratorial	0,945	0,002	0,155
Tempo de atend até a alta	0,924	-0,065	-0,110

Métodode Extração: mínimos Quadrados não Ponderados.
a. 3 fatores extraídos. 9 iterações necessárias.
Fonte: A autora (2023).

O resultado da análise foi similar ao encontrado no método anterior, o que valida a solução encontrada anteriormente.

4.3.2 Rotação dos fatores

Observa-se na Tabela 16 as cargas fatoriais rotacionadas empregando o método Varimax.

Tabela 16: Cargas Fatoriais Rotacionadas e Itens Comuns por Rotação Varimax

Variável	Fator1	Fator2	Fator3
Tempo de ciclo da recepção	0,044	0,180	0,982
Tempo de ciclo da triagem	-0,022	-0,026	0,074
Tempo de ciclo do atendimento	0,145	0,002	-0,061
Tempo de ciclo da medicação	0,180	0,326	-0,026
Tempo de ciclo do exame	0,104	0,780	0,001

LOS sem exame laboratorial	0,966	0,262	-0,022
Lead time	0,976	0,207	-0,016
LOS com exame laboratorial	0,798	0,527	-0,058
Tempo de atend até a alta	0,892	0,271	-0,032

Método de Extração: mínimos Quadrados não Ponderados.
Método de Rotação: Varimax com Normalização de Kaiser.
a. Rotação convergida em 5 iterações.
Fonte: A autora (2023).

Após a aplicação de um método de estimação alternativo, é possível afirmar que não houve mudança significativa. A Tabela 17 mostra que as soluções encontradas são similares àquelas obtidas inicialmente, com poucas variações entres os fatores, não mudando o resultado.

Tabela 17: Matriz Comparativa das Cargas Fatoriais Não Rotacionadas

Variável	Método Componentes Principais			Mínimos Quadrados não Ponderados		
	Fator1	Fator2	Fator3	Fator1	Fator2	Fator3
Tempo de ciclo da recepção	0,105	0,661	-0,187	0,106	0,975	-0,193
Tempo de ciclo da triagem	-0,041	0,315	-0,847	-0,031	0,064	-0,038
Tempo de ciclo do atendimento	0,172	-0,441	-0,169	0,133	-0,076	-0,035
Tempo de ciclo da medicação	0,378	0,377	0,278	0,299	0,052	0,216
Tempo de ciclo do exame	0,466	0,489	0,353	0,419	0,228	0,625

LOS sem exame laboratorial	0,973	-0,116	-0,091	0,987	-0,068	-0,151
Lead time	0,958	-0,156	-0,113	0,974	-0,080	-0,204
LOS com exame laboratorial	0,954	0,017	0,023	0,945	0,002	0,155
Tempo de atend até a alta	0,941	-0,112	-0,085	0,924	-0,065	-0,110

Fonte: A autora (2023).

4.4 Melhorar

Nesta etapa, analisou-se a meta do trabalho, reflexão sobre a melhoria do processo e busca por resultados satisfatórios para os gestores das UPAs. Identificaram-se três indicadores de desempenho global para a UPA estudada, visando preencher a lacuna existente nesse aspecto. Os indicadores foram considerados adequados e validados. Pontos de melhoria contínua incluem validação pelos gestores, treinamento para manipulação e interpretação dos dados, além da apresentação visual clara com gráficos para facilitar a compreensão.

4.5 Controlar

Nessa última etapa, foi estabelecido um plano de ação utilizando a ferramenta 5W1H (What - O que, When - Quando, Who - Quem, Why – Por quê, Where - Onde e How - Como) para controlar os resultados obtidos e o monitoramento dos indicadores propostos. Desta forma, o plano de ação foi reportado no Quadro 1.

Quadro 1: Plano de Ação

O que?	Quando duração?	Quem?	Por quê?	Onde?	Como?
Criação da versão gráfica dos Indicadores	Período de um mês	Aluno pesquisador participante do projeto	Para visualização integrativa dos dados	UPA	Análise de Dados com o Power BI
Continuar alimentando a planilha das variáveis mensuradas de forma verídica	Durante todo o período de utilização dos indicadores propostos	Colaborador da UPA	Para evitar que os dados sejam manipulados	UPA	Analisando a partir do momento de entrada até a saída de cada paciente
Reuniões de acompanhamento dos indicadores e tomadas de decisões	Mensal	Todas as partes interessadas neste processo	Para que ideias e ações de melhoria sejam alavancadas	UPA	Através do Google Meet para reunir pesquisadores e colaboradores das UPA
Reuniões de Treinamento do Time	Mensal	Todas as partes interessadas neste processo	Para diminuir erros e falhas	UPA	Através do Google Meet para reunir pesquisadores e colaboradores das UPA

Fonte: A autora (2023).

5 CONCLUSÃO

Os resultados indicam que o objetivo deste trabalho, de propor indicadores de desempenho global para a UPA por meio de Análise Fatorial, foi alcançado. Três indicadores foram identificados: Eficiência

Hospitalar, Eficiência de Serviço Médico e Tempo de Ciclo de Triagem. A escolha da Análise Fatorial foi satisfatória, simplificando nove variáveis mensuradas em três dimensões para uma avaliação mais fácil. Isso facilita a tomada de decisões na gestão da UPA, permitindo avaliação de desempenho considerando várias variáveis simultaneamente. Conclui-se que a estatística multivariada é valiosa na criação de indicadores não diretamente observáveis, proporcionando uma interpretação abrangente das variáveis. Uma limitação é que os indicadores foram desenvolvidos para uma UPA específica, sendo recomendada sua aplicação em diferentes UPAs para validação prática e comparação ampliada entre unidades, aumentando a robustez dos resultados.

REFERÊNCIAS

ALIBERTI, Márlon JR et al. Validating intrinsic capacity to measure healthy aging in an upper middle-income country: Findings from the ELSI-Brazil. The Lancet Regional Health-Americas, v. 12, p. 100284, 2022.

AMARAL, L. C. de et al. Systematic review and meta-analysis of the use of lean methods and tools in healthcare services: an alternative to improve care during the pandemic. Research Square, p. 1 – 30, 2020. Disponível em: https://www.researchsquare.com/article/rs-53743/latest.pdf.

AMARAL, L. C. de et al. Lean Healthcare in Reducing HAI an Integrative Literature Review. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, v. 631 IFIP, p. 351 – 361, 2021. ISSN 18684238. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2- s2.0-85115231731&doi=10.1007%2F978-3-030-85902-2_38&partnerID=40&md5=75476f82436bdc5f0e496d58294c0760.

ASKARI, Roohollah et al. Designing Iranian model to assess the level of health system responsiveness. Iranian Red Crescent Medical Journal, v. 18, n. 3, 2016.

BARNABÈ, F. et al. Engaging professionals with serious games: the Lean Healthcare Lab at Siena University Hospital. Development and Learning in Organizations, v. 31, n. 3, p. 7–10, 2017.

BORONAT, F. et al. Application of Lean Healthcare methodology in a urology department of a tertiary hospital as a tool for improving efficiency [Aplicación de la metodología Lean healthcare en un servicio de urología de un hospital terciario como herramienta de mejora de la. Actas Urologicas Espanolas, v. 42, n. 1, p. 42–48, 2018.

BOND, E. Medição de desempenho para gestão da produção em um cenário da cadeia de suprimentos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em:https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-04022003- 160321/publico/bond.pdf. Acesso em: 15 nov. 2020.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. In: UPA 24h – Unidade de Pronto Atendimento. [S. l.], 2010. Disponível em:https://www.gov.br/saude/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/upa-24h-unidade-de-pronto- atendimento/upa-24h-2013-unidade-de-pronto-atendimento. Acesso em: 17 set. 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Histórico das Normativas: Unidade de Pronto Atendimento. 1ª edição Brasília, 2010. Extraído de: https://www.cosemssp.org.br/downloads/apresentacao-seminario-UPA.pdf.

BRASIL. Ministério da Saúde. Política Nacional de Humanização: HumanizaSUS. 4. ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2010.

CACIQUE, Denis Barbosa et al. Measurement properties of the questionnaire “Mosaic of opinions on induced abortion”: a multicenter study in seven Brazilian hospitals. Revista da Associação Médica Brasileira, v. 64, p. 1091-1102, 2018.

CALDEIRA, J. 100 Indicadores da Gestão. [s.l.] Actual Editora, 2012.

CARRILLO, A. M.; MUÑOZ, O. M.; PORTA, R. M. D. Application of the Lean Principles of the Toyota Production System for the Improvement of the Emergency Service Attention Times of a High Complexity Hospital*. Revista Gerencia y Politicas de Salud, v. 22, p. 1–13, 2023.

COSTA, L. B. M. et al. Lean healthcare in developing countries: evidence from Brazilian hospitals. International Journal of Health Planning and Management, v. 32, n. 1, p. e99–e120, 2017.

GIL, A. C. (ORG). Delineamento da Pesquisa. [s.l: s.n.]. v. 264

MATOS, D.; RODRIGUES, E. C. Análise fatorial Metodologias Coleção. Brasília - DF: Enap Fundação Escola Nacional de Administração Pública, 2019.

CONSELHO FEDERAL DE MEDICINA; ASSOCIAÇÃO PAULISTA DE MEDICINA. In: Datafolha revela:93% da população está insatisfeita com a Saúde no Brasil. [S. l.], 14 ago. 2014. Disponível em: https://www.sbcm.org.br/v2/index.php/not%C3%ADcias/3089-datafolha-revela-93-da-populacao-esta- insatisfeita-com-a-saude-no-brasil. Acesso em: 17 set. 2022.

COSEMS/SP - CONSELHO DE SECRETÁRIOS MUNICIPAIS DE SAÚDE DO ESTADO DE SÃO PAULO.Unidades de Pronto Atendimento - UPAs. São Paulo, 2018. Disponível em: http://www.cosemssp.org.br. Acesso em: 16 abril 2023.

COUGHLIN, K.; POSENCHEG, M. A. Quality improvement methods – Part II. Journal of Perinatology, Springer US, v. 39, n. 7, p. 1000 – 1007, 2019. ISSN 14765543. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1038/s41372-019-0382-1.

DELLIFRAINE, J.L. et al. Assessing the evidence of six sigma and lean in the health care industry. Quality Management in Health Care, v. 19, n. 3, p. 211 – 225, 2010. ISSN 10638628.

DI RISO, Daniela et al. Analysis of the interplay between depression, anxiety, and psychological resources in adolescence using self-report measures. International Journal of Psychiatry in Clinical Practice, v. 18, n. 2, p. 103-111, 2014.

DORAN, G. T. There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives. Management Review, São Paulo, v. 70, n. 11, p. 35-36, 1981.

ENDO, S. K. Métodos quantitativos: números índices. São Paulo, Atual Editora Ltda, 1986.

FACHEL, J. M. G. Análise Fatorial, São Paulo. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, 1976. FEKRI, O.; MANUKYAN, E.; KLAZINGA, N. Associations between hospital deaths (HSMR), readmission and length of stay (LOS): A longitudinal assessment of performance results and facility characteristics of teaching and large-sized hospitals in Canada between 2013-2014 and 2017-2018. BMJ Open, v. 11, n. 2, 2021.

GARDENER, H. et al. Adherence to Acute Care Measures Affects Mortality in Patients with Ischemic Stroke: The Florida Stroke Registry. Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases, v. 30, n. 3, 2021.

GIL, A. C. Metodologia do Ensino Superior. 3ª. Ed. São Paulo: Atlas S/A, 1997. GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4ª. Ed. São Paulo: Atlas S/A, 2002.

GOMES, A. M.; VIEIRA, P. S.; REIS, A. D. C. SIMULATION OF OPERATIONAL PROCESSES IN HOSPITAL EMERGENCY UNITS AS LEAN HEALTHCARE TOOL. INDEPENDENT JOURNAL OF MANAGEMENT & PRODUCTION, v. 8, n. 5, SI, p. 812–827, 2017.

JENSEN, Jakob D. et al. The cancer information overload (CIO) scale: Establishing predictive and discriminant validity. Patient education and counseling, v. 94, n. 1, p. 90-96, 2014.

KISALA, Pamela A. et al. Measuring anxiety after spinal cord injury: Development and psychometric characteristics of the SCI-QOL Anxiety item bank and linkage with GAD-7. The Journal of Spinal Cord Medicine, v. 38, n. 3, p. 315-325, 2015.

KLAUKE, Benedikt et al. Neuropeptide S receptor gene (NPSR) and life events: G× E effects on anxiety sensitivity and its subdimensions. The World Journal of Biological Psychiatry, v. 15, n. 1, p. 17-25, 2014.

LabDGE UFF. In: Sobreo projeto e soluções apresentadas. Disponível em: https://labdge.uff.br/page/2/?et_blog. Acesso em: 17 set. 2022.

LABORATÓRIO DESIGN THINKING, GESTÃO E ENGENHARIA INDUSTRIAL - LabDGE. Estudo e pesquisa para aprimoramento da rede e promoção do acesso aos serviços de saúde. [S.l.], 2023. Disponível em: http://www.labdge.uff.br/. Acesso em: 17 set. 2022.

LEOMBRUNI, Paolo et al. Confirmatory factor analysis of the Frommelt Attitude Toward Care of the Dying Scale (FATCOD–B) among Italian medical students. Palliative & supportive care, v. 13, n. 5, p. 1391-1398, 2015.

LI, Jialing et al. The Chinese version of the pediatric quality of life inventory™(PedsQL™) healthcare satisfaction generic module (version 3.0): psychometric evaluation. Health and Quality of Life Outcomes, v. 11, n. 1, p. 1- 8, 2013.

LUENGO-MARTÍNEZ, Carolina et al. Transcultural adaptation of the Karen Personal instrument to measure the nurses' perception of healthcare quality in hospitals. Enfermería Clínica (English Edition), v. 29, n. 3, p. 146- 154, 2019.

MALLAH, Narmeen et al. Validation of the Arabic and French versions of a knowledge, attitudes and practices (KAP) questionnaire on tranquilizer misuse. International journal of environmental research and public health, v. 18, n. 21, p. 11144, 2021.

MÁS, A. et al. Improving quality in healthcare: What makes a satisfied patient?. Revista de Calidad Asistencial, v. 31, n. 4, p. 196-203, 2016.

MHATRE, Shivani K.; SANSGIRY, Sujit S. Impact of Over-the-Counter Medication Use on Patients' Health- Related Quality of Life: Development and Psychometric Validation of Over-the-Counter Medication Impact Scale. Clinical drug investigation, v. 34, p. 277-286, 2014.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO. Constituição da República Federativa do Brasil. Texto constitucional promulgado em 5 de outubro de 1988, com as emendas adotadas pelas Emendas Constitucionais nº 1 a 6/94. Brasília: Subsecretário de Edições Técnicas do Senado Federal, 2007.

MINGOTI, S. A. Análise de Dados Através de Métodos de Estatística Multivariada: Uma abordagem aplicada. 1. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

NAIR, Satish Chandrasekhar et al. Assessing health literacy in the eastern and middle-eastern cultures. BMC Public Health, v. 16, p. 1-8, 2016.

NEELY, A.; ADAMS, C.; CROWE, P. The performance prism in practice. Measuring Business Excellence, v. 5, n. 2, p. 6–13, 2001.

NEVES, U. Projeto Lean agiliza atendimento em 39,5% nas UPAs 24h pelo país. [S. l.], 08 dez. 2020. Disponível em: https://pebmed.com.br/projeto-lean-agiliza-atendimento-em-395-nas-upas-24h-pelo- pais/?utm_source=artigoportal&utm_medium=copytext. Acesso em: 04 out. 2022.

NOESTE, Stefan et al. Involving patients in detecting quality gaps in a fragmented healthcare system: development of a questionnaire for Patients' Experiences Across Health Care Sectors (PEACS). International Journal for Quality in Health Care, v. 26, n. 3, p. 240-249, 2014.

O'DWYER, G. et al. O processo de implantação das unidades de pronto atendimento no Brasil. Revista de Saúde Pública, v. 51, p. 125, 2017.

OHNO, T. Toyota Production System. New York: Productivity Press, 1998.

OLIVEIRA, R. M.; PEREIRA, C. C. B. Organização do fluxo assistencial nas Unidades de Pronto Atendimento (UPAs): a utilização do Fast Track. Revista Brasileira de Enfermagem, Brasília, v. 70, n. 5, p. 1103-1110, set./out. 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-71672017000501103. Acesso em: 16 abril 2023.

PIRES, F. V. S.; Estudo do tempo de ciclo de uma fábrica de semicondutores. 2018. 66f. Dissertação de Mestrado - Universidade do Porto, Porto, 2018.

POLONSKY, William H. et al. Development of a new measure for assessing insulin delivery device satisfaction in patients with type 1 and type 2 diabetes. Diabetes technology & therapeutics, v. 17, n. 11, p. 773-779, 2015. Rodriguez DSS, Costa HG, Do Carmo LFRRS (2013) Métodos de auxílio multicritério à decisão aplicados a problemas de PCP: Mapeamento da produção em periódicos publicados no Brasil. Gest e Prod 20:134–146. https://doi.org/10.1590/S0104-530X2013000100010

SILVA, M. H. T. DA et al. Dialogues Between the National Humanization Policy and Lean Methodology. In: SATOLO, E. G.; CALADO, R. D. (Eds.). Igi-global. In Cases o ed. [s.l: s.n.]. p. 205–219.

SOBRAL, A. P. B. et al. Indicators for Emergency and Urgent Medical Services. In: SATOLO, E. G.; CALADO,

R. D. (Eds.). Igi-global. [s.l: s.n.]. p. 86–88.

SOBRAL, A. P. B. et al. Proposed Method for Identifying Emergency Unit Profiles from the Monthly Service Number. IFIP Advances in Information and Communication Technology, v. 631 IFIP, p. 342–350, 2021.

Sobre a solução Scopus. Elsevier, 2022. Disponível em: https://www.elsevier.com/pt-br/solutions/scopus#:~:text=Scopus%20%C3%A9%20o%20maior%20banco,congressos%20e%20publica%C3%A7%C3%B5es%20do%20setor. Acesso em: 15 de junho de 2023.

SWISHER, L. L.; BECKSTEAD, J. W.; BEBEAU, M. J. Factor Analysis as a Tool for Survey Analysis Using a Professional Role Orientation Inventory as an Example. Journal of Marketing Research, v. 84, n. 9, p. 784-799, 2004.

TRZECIAK, S. et al. Lean Six Sigma to Reduce Intensive Care Unit Length of Stay and Costs in Prolonged Mechanical Ventilation. Journal for Healthcare Quality, v. 40, n. 1, p. 36–43, 2016.

VAN EXEL, Job et al. Public views on principles for health care priority setting: Findings of a European cross- country study using Q methodology. Social science & medicine, v. 126, p. 128-137, 2015.

WALTERS, Glenn D. Does substance abuse fall exclusively along the externalizing spectrum?. Substance Use & Misuse, v. 49, n. 6, p. 724-734, 2014.

WEISS, S. J. et al. Relationship between the National ED Overcrowding Scale and the number of patients who leave without being seen in an academic ED. American Journal of Emergency Medicine, v. 23, n. 3, p. 288– 294, 2005.

WERKEMA, C. CRIANDO A CULTURA LEAN SEIS SIGMA. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012a. v. 1

WERKEMA, C. Lean seis sigma - Introdução às Ferramentas do Lean Manufacturing. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012b. v. 4

WERKEMA, C. Métodos PDCA e DMAIC e suas ferramentas analíticas. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012c.v. 1

WOMACK, J. P., D. T. JONES, e D. ROOS. The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production. 1ª. Ed. Philadelphia, PA: HarperCollins, 1990.

YEPES-BALDÓ, Montserrat; ROMEO, Marina; BERGER, Rita. H uman C apital Q uestionnaire: Assessment of E uropean nurses' perceptions as indicators of human capital quality. Nursing & Health Sciences, v. 15, n. 2, p. 229-234, 2013.

ZAHMATKESH, Hassan et al. Analysis of developmental level of counties of Fars in terms of health infrastructure indicators using standardized scores pattern approach and factor analysis. Global Journal of Health Science, v. 7, n. 1, p. 240, 2015.

ZHANG, Xinyu et al. Study on equity and efficiency of health resources and services based on key indicators in China. PLoS One, v. 10, n. 12, p. e0144809, 2015.

ZHOU, Xuan et al. Development and preliminary validation of the questionnaire (the First Edition) based on TCM for detecting health status in China. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, v. 2015, 201

Capítulo 3

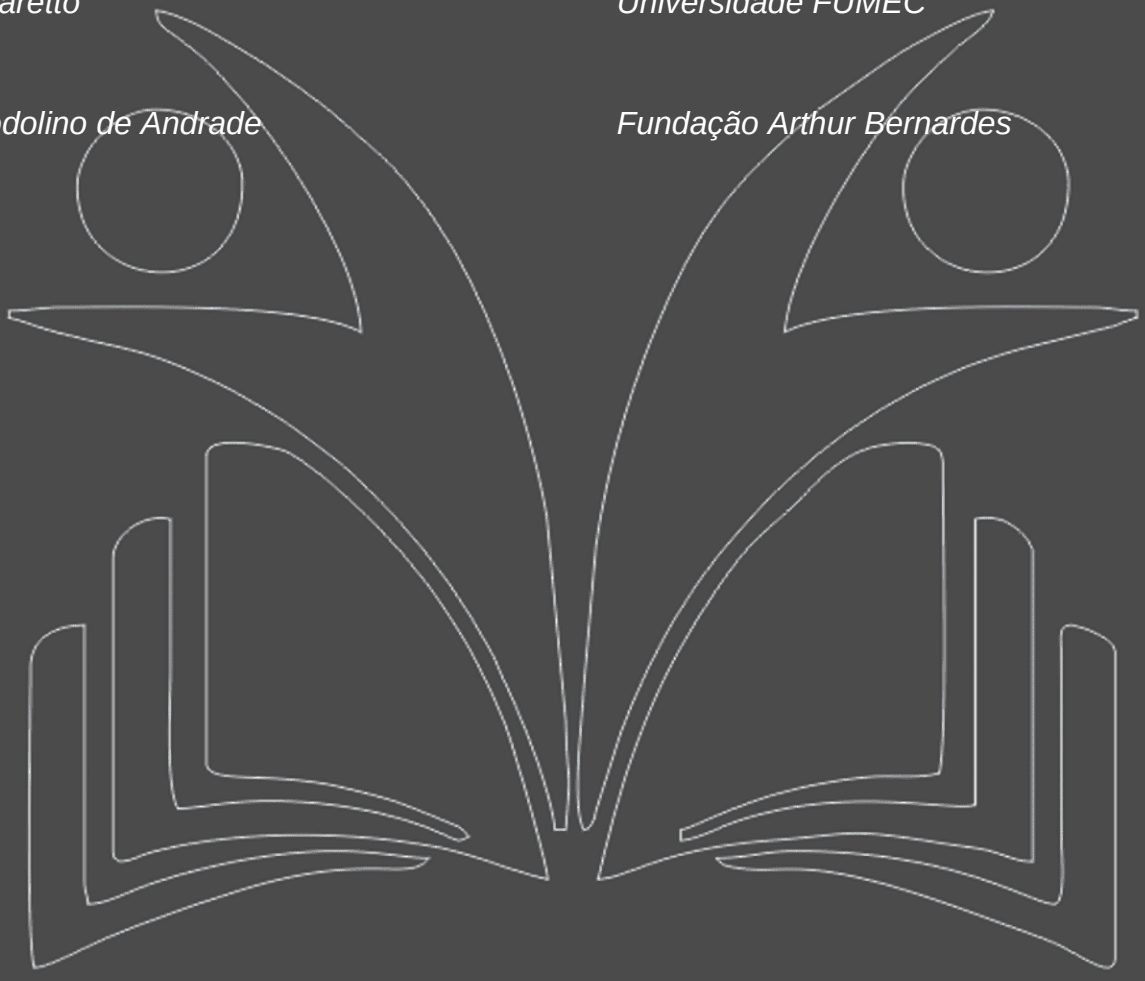
10.37423/251110425

UM LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE A IMPORTÂNCIA DAS PUBLICAÇÕES ALUSIVAS AO GERENCIAMENTO DAS PARTES INTERESSADAS NA GESTÃO DE EVENTOS

Bruno da Fonseca Gonçalves — *Instituto Federal de Minas Gerais*

Silvana Chiaretto — *Universidade FUMEC*

Juliana Teodolino de Andrade — *Fundação Arthur Bernardes*



RESUMO

Devido a suas características, pode-se considerar que um evento é um projeto pas- sível de ser gerido pelas técnicas de gerenciamento de projetos. Considerando a importância das partes interessadas para o sucesso de um evento, este trabalho buscou identificar como as publicações de gestão de eventos utilizando técnicas de gestão de projetos abordam as partes interessadas. Através do levantamento bibliográfico em artigos e outras publicações, foi verificada que apenas após a quinta edição do PMBOK aparecem processos envolvendo o gerenciamento das partes interessadas, mas com abordagens muitas vezes superficial ou incompleta.

Palavras-chaves: Gestão de projetos. Eventos. Partes interessadas. Stakeholders.

1 INTRODUÇÃO

Devido às suas características, a organização de um evento pode ser caracterizada como um projeto (GOHR et al., 2013). Por outro lado, a metodologia de gestão de projetos pode ser aplicada a qualquer conjunto de atividades inclusive às atividades de gestão de eventos. Neste contexto, a gestão das partes interessadas encontra várias técnicas e orientações expressas o Guia PMBOK de gestão de projetos.

A identificação e o correto gerenciamento das partes interessadas, também chamados de "stakeholders" são preocupações que aparecem no ambiente da gestão de projetos. Isso porque existe um ponto crítico em compreender as partes que intervêm diretamente no sucesso do projeto (FONSECA et al., 2016).

Além de identificar os stakeholders, o entendimento de seu grau de influência, necessidades e o equilíbrio de suas exigências são essenciais para um projeto bem-sucedido. Este processo de identificação é constante em todo o ciclo de vida do projeto (PMI, 2018). Na gestão de um evento existem diferentes tipos de stakeholders, por exemplo: trabalhadores, voluntários, patrocinadores, fornecedores, espectadores, entre outros (GOHR et al., 2013). Gerenciá-los de maneira adequada desde o planejamento do evento pode auxiliar no sucesso deste ou condená- lo ao fracasso.

Nas diversas publicações analisadas, especialmente as publicações de gestão de eventos usando a gestão de projetos como referência, há pouco espaço dedicado ao gerenciamento das partes interessadas.

Considerando a importância das partes interessadas para o sucesso de um evento, este trabalho buscou identificar como as publicações de gestão de eventos abordam as partes inte- ressadas sob o aspecto do gerenciamento.

No entanto, quando se avalia algumas publicações envolvendo a utilização das técnicas e orientações do PMI (Projetc Management Institute), verifica-se que poucos trabalhos dão ên- fase ao gerenciamento das Partes Interessadas. É provável que o motivo seja a inclusão do ge- renciamento das partes interessadas como uma das áreas de conhecimento da gestão de projetos constar no Guia PMBOK somente a partir da quinta edição (PMI, 2014).

Assim, este trabalho tem como objetivo geral identificar como as publicações de gestão de eventos abordam as partes interessadas sob o aspecto do gerenciamento. Os objetivos espe- cíficos serão fazer um levantamento de publicações de gestão de eventos, identificar pontos onde são abordadas as partes interessadas e analisar os processos dedicados às partes interessa- das.

A metodologia empregada foi o levantamento bibliográfico em artigos e outras publica- ções sobre a gestão de eventos usando técnicas de gerenciamento de projetos.

O presente artigo foi estruturado da seguinte forma: Seção 1: Introdução, Seção 2: Referencial Teórico contendo 3 subtítulos: 2.1 Eventos; 2.2 O PMBOK; 2.3 Gerenciamento das Partes Interessadas, Seção 3: Metodologia, Seção 4: Análise e Resultados e Seção 5: Considerações Finais.

Deste modo, pode-se questionar: Como as publicações de gestão de eventos abordam o gerenciamento das partes interessadas?

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção se faz uma breve revisão sobre eventos, sobre o PMBOK e de maneira mais específica sobre o gerenciamento das partes interessadas.

2.1 O que são eventos?

Eventos são todos os acontecimentos previamente planejados, organizados e coordenados de forma a contemplar o maior número de pessoas em um mesmo espaço físico e temporal, com informações, medidas e projetos sobre uma ideia, ação ou produto, apresentando os diagnósti- cos de resultados e os meios mais eficazes para se atingir determinado objetivo (MARTIN, 2008).

Evento é definido como uma ferramenta administrativa, uma forma de comunicação e até mesmo um instrumento de marketing. Melo Neto (2001, p. 13, apud LOPES; GHISLENI, 2008, p. 2) generaliza dizendo que “Evento é um conceito de domínio amplo. Na verdade, tudo é evento. De cursos e palestras até shows, jogos e competições esportivas, exposições, festivais, festas, mostras de arte e mesmo campanhas publicitárias criativas”.

Já Dias (1996, p. 15, apud MARQUES, 2002, p. 31) afirma que evento é uma "estratégia gerencial da modernidade que tem o objetivo de conquistar os públicos de interesse de uma organização persuadindo-os e atraindo-os através do exercício do poder que a legitima".

Ainda neste contexto, Cesca (1997, p. 163, apud MARQUES, 2002, p. 32) diz que "os eventos são, também, uma atividade que contribui para manter a opinião pública favorável, o objetivo de toda organização que deseja se manter ativa no mercado".

Baseando-se nestas três definições pode-se dizer que os conceitos de Eventos são amplos e complementares, e também corroboram que se trata de uma relação importante da organização com o público.

Nesse sentido, Zanella (2003, p. 14, apud LOPES; GHISLENI, 2008, p. 3) também des- taca a importância do evento para a instituição e para o público. "Organizar um evento com eficiência significa demonstrar arte e competência para corresponder a todos esses anseios, com a prestação de serviços eficientes que supere a expectativa dos participantes".

Para o evento conseguir atingir seu público de interesse, ele precisa passar pelo processo de planejamento, execução e avaliação do evento, sendo ele de pequeno ou grande porte. O profissional que cumpre essas etapas se baseia em medidas concretas, consegue diminuir riscos e exalta os pontos positivos (MENDES; GONÇALVES, 2011).

O evento precisa ser planejado por ser uma grande oportunidade da organização se promover no mercado e interagir com o público. Melo Neto (2001, p. 20) indica também que "para os comunicadores, evento é qualquer fato que pode gerar sensações e, por isso, ser motivo de notícia" (apud LOPES; GHISLENI, 2008, p. 2).

O planejamento e a visão profissional são essenciais para realização de um evento, sendo este uma das ferramentas principal e antiga que cria envolvimento com doadores, voluntários e beneficiários (MURAD; COSTA, 2006).

A organização e a realização do evento trazem benefícios para os envolvidos como promover a instituição, valorização dos profissionais da empresa, detectar pontos positivos e negativos a serem melhorados, entre outros (LOPES; GHISLENI, 2008).

Kotler e Keller (2007, p. 561) elucidam porque o evento é importante para as instituições: “Fazer parte de um momento relevante na vida pessoal dos consumidores por meio de eventos e experiências pode ampliar e aprofundar o relacionamento de uma empresa ou marca com o mercado-alvo.” Além de estreitar o relacionamento com o público-alvo, outros benefícios como criar experiências positivas, provocar sensações e aperfeiçoar a imagem institucional são evi- denciados em eventos.

Os eventos devem ser, criteriosamente, bem planejados, divulgados e executados para atingir seus objetivos. Por este motivo, faz-se necessário buscar e usar ferramentas administrativas que auxiliem na gestão de eventos.

Como um evento possui as mesmas etapas do ciclo de vida de um projeto, sua gestão segue o procedimento natural da gestão de projetos. A organização de um evento pode ser entendida e tratada como um projeto (GOHR et al., 2013).

2.2. O Guia PMBOK

O Project Management Institute (PMI) organizou o conhecimento em gestão de projetos no Project Management Body of Knowledge (PMBOK). Este guia identifica “um subconjunto de conhecimentos em gerenciamento de projetos geralmente reconhecidos como boas práticas” (PMI, 2018). Estas práticas são um conjunto de conhecimentos em gerenciamento de projetos reconhecido internacionalmente e em diversas áreas de trabalho. O PMBOK também permite a utilização de um vocabulário comum, para a discussão e aplicação do gerenciamento de proje- tos (PMI, 2021).

O Project Management Institute (PMI) foi estabelecido na Filadélfia (EUA) em 1969 e é uma das principais associações mundiais em gerenciamento de projetos com mais de 700 mil associados em todo o mundo. Uma de suas primeiras publicações foi o Project Management Quaterly (PMQ), nos anos 1980 um código de ética foi adotado para a profissão, a chamada certificação Project Management Professional (PMP), contando com mais de 370 mil certifi- cados (PMI, 2021).

O guia PMBOK (PMI, 2018) defende que o gerenciamento de projetos é a aplicação de conhecimentos, habilidades e ferramentas às atividades do projeto a fim de atender seus requi- sitos por meio da aplicação e integração apropriadas de processos abrangendo as etapas do projeto (Início, Planejamento ou Desenvolvimento, Execução, Monitoramento e Controle, Conclusão).

O gerenciamento de projetos traz inúmeras vantagens, e é eficaz em atingir os objetivos desejados dentro do prazo e do orçamento definido pelas organizações (LORENZI, 2013). A principal vantagem é que não é restrito a projetos gigantescos e de alta complexidade e custo, pode ser aplicado em empreendimentos de qualquer complexidade, orçamento e tamanho, e em qualquer linha de negócios. Os principais benefícios do gerenciamento de projetos, para os autores, são:

> a) Evita surpresas durante a execução do projeto;
> b) Uma vez que toda metodologia está sendo estruturada, permite que novas técnicas e diferenciais sejam desenvolvidos;
> c) Antecipa situações desfavoráveis, para que ações preventivas e corretivas possam ser tomadas, antes que essas situações se tornem problemas;
> d) Adapta os trabalhos ao mercado consumidor e ao cliente;
> e) Disponibiliza os orçamentos antes dos gastos;
> f) Aperfeiçoa a alocação de pessoas, equipamentos e materiais necessários;
> g) Documenta e facilita as estimativas para futuros projetos;
> h) Agiliza as decisões, já que as informações estão estruturadas e disponibili- zadas;
> i) Aumenta o controle gerencial devido ao detalhamento ter sido realizado. (LORENZI, 2013, p. 10).

Mesmo com a grande quantidade de benefícios gerados pelo gerenciamento de projetos, Lorenzi (2013) garante que boa parte deles falha, ou não atinge o resultado esperado, e muitas dessas falhas são decorrentes de fatores que fogem ao controle das organizações, mas que muitas vezes podem ser evitados ou minimizados com um gerenciamento de riscos eficiente.

No PMBOK (PMI, 2018), o gerenciamento de projetos é realizado a partir da aplicação e integração apropriadas dos 47 processos de gerenciamento de projetos, agrupados em cinco grupos de processos e 10 áreas de conhecimento, a saber: integração, tempo, custo, prazo, co- municação, risco, qualidade, aquisição, recursos humanos e partes interessadas.

Segundo Dias (2016), um processo é um conjunto de ações e atividades interrelacionadas que são executadas para criar um produto, serviço ou resultado previamente especificado. Cada processo é caracterizado por suas entradas, ferramentas e técnicas que podem ser aplicadas, e as saídas resultantes.

Ainda segundo Dias (2016), os processos são considerados como coleções de pessoas, equipamentos, esforços, procedimentos e ações, informações e conhecimentos inter-relaciona- dos para atingir determinado objetivo, envolvem adequada gestão, visando à melhoria contínua do desenvolvimento de projetos para atender às necessidades e expectativas dos clientes (DIAS, 2016).

Já o ciclo de vida do projeto é definido pelo PMBOK (PMI, 2018) em cinco grupos de processos:

1. Iniciação: Os processos realizados para definir um novo projeto ou uma nova fase de um projeto existente, através da obtenção de autorização para iniciar o projeto ou fase.
2. Planejamento: Os processos realizados para definir um novo projeto ou uma nova fase de um projeto existente, através da obtenção de autorização para iniciar o projeto ou fase.
3. Execução: Processos realizados para concluir o trabalho definido no plano de gerenciamento do projeto para satisfazer os requisitos do projeto.
4. Monitoramento e controle: Os processos exigidos para acompanhar, analisar e controlar o progresso e desempenho do projeto, identificar quaisquer áreas nas quais serão necessárias mudanças no plano, e iniciar as mudanças corresponden- tes.
5. Encerramento: Os processos realizados para concluir ou fechar formalmente um projeto, fase ou contrato.

2.2 Gerenciamento das Partes Interessadas

A área Gerenciamento das partes interessadas surge a partir da quinta edição do PMBOK. Embora o gerenciamento das partes interessadas já estivesse presente nas versões anteriores, não era tratado como uma área própria. Segundo o PMBOK, “uma parte interessada é um indi- víduo, grupo ou organização que pode afetar, ser afetada ou sentir-se afetada por uma decisão, atividade ou resultado de um projeto” (PMI, 2014, p. 30). As partes interessadas são conhecidas também por seu termo do inglês: stakeholder.

Ainda segundo o PMBOK, as partes interessadas podem estar ativamente envolvidas no projeto ou ter interesses que possam ser afetados pelo desempenho ou término do projeto, po- dem ter expectativas antagônicas que podem criar conflitos, podem exercer influência sobre o projeto, suas entregas e sobre a equipe do projeto a fim de atingir um conjunto de resultados que atenda objetivos de negócios estratégicos.

Segundo Fonseca et al (2016) a partir da identificação, análises adicionais devem buscar mensurar o envolvimento e priorizar os stakeholders. Esta abordagem é imprescindível, pois só deste modo é possível manter do começo ao fim os stakeholders internos cientes dos objetivos esperados e monitorar possíveis mudanças nos externos, reduzindo os riscos de insucesso. Held- man apud Dias (2016) afirma que é interessante conhecer as partes interessadas o mais cedo possível no projeto. Para gerir os stakeholders, é necessário identificar suas influências no pro- jeto e compreender suas expectativas, necessidades e aspirações.

Conforme o PMBOK (PMI, 2018), o gerenciamento das partes interessadas do projeto inclui os processos exigidos para identificar todas as pessoas, grupos ou organizações que po- dem impactar ou serem impactados pelo projeto, analisar as expectativas das partes interessadas e seu impacto no

projeto e desenvolver estratégias de gerenciamento apropriadas para o enga- jamento eficaz das partes interessadas nas decisões e execução do projeto.

Todos os projetos têm partes interessadas que são afetadas ou podem afetar o projeto de maneira positiva ou negativa. Segundo o PMBOK os processos de gerenciamento das partes interessadas do projeto são:

> a) Identificar as Partes Interessadas — O processo de identificar regularmente as partes interessadas do projeto e analisar e documentar informações relevan- tes sobre seus interesses, envolvimento, interdependências, influência e im- pacto potencial no sucesso do projeto.
> b) Planejar o Engajamento das Partes Interessadas — O processo de desen- volvimento de abordagens para envolver as partes interessadas do projeto, com base em suas necessidades, expectativas, interesses e potencial impacto no mesmo.
> c) Gerenciar o Engajamento das Partes Interessadas — O processo de se co- municar e trabalhar com as partes interessadas para atender suas necessidades e expectativas, lidar com questões e promover o engajamento das partes inte- ressadas adequadas.
> d) Monitorar o Engajamento das Partes Interessadas — O processo de moni- torar as relações das partes interessadas do projeto e adaptação de estratégias para engajar as partes interessadas através da modificação de planos e estraté- gias de engajamento (PMI, 2018, p. 503).

A Figura 1 fornece uma visão geral dos processos de Gerenciamento das Partes Interessadas do Projeto. Os processos de Gerenciamento das Partes Interessadas do Projeto são apresentados como processos individuais com abrangência definida. Na prática, eles se sobrepõem de formas que não podem ser completamente detalhadas.

Figura 1 - Visão geral do gerenciamento das partes interessadas do projeto



Fonte: (PMI, 2018, p. 504)

As partes interessadas constituem-se, assim, na principal finalidade de um projeto do tipo evento. Assim, o sucesso do projeto se constituirá a partir da satisfação dos stakeholders envol- vidos, sendo possível alcançar apenas através de bom gerenciamento das partes interessadas.

3 METODOLOGIA

O método de pesquisa escolhido foi o levantamento bibliográfico:

> Entende-se que a pesquisa bibliográfica, em termos genéricos, é um conjunto de conhecimentos reunidos em obras de toda natureza. Tem como finalidade conduzir o leitor à pesquisa de determinado assunto, proporcionando o saber. Ela se fundamenta em vários procedimentos metodológicos, desde a leitura até como selecionar, fichar, organizar, arquivar, resumir o texto; ela é a base para as demais pesquisas. (FACHIN, 2003, p. 120).

O levantamento bibliográfico recupera o conhecimento científico acumulado sobre um problema. Ou seja, é uma pesquisa em cima de outras pesquisas. Para tanto é necessário analisar livros, artigos, dissertações, teses, autores, blogs, sites, etc. (GIL, 2002).

O levantamento pode ser bibliográfico ou documental. Neste caso, especificamente, foi bibliográfico. Sendo assim, foram levantados conteúdos já publicados sobre a gestão de eventos utilizando o PMBOK ou alguma adaptação.

Sobre a pesquisa descritiva Gil (2002, p. 42) chama a atenção para o fato de que a mesma "tem como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis". Salienta-se que, são quase sempre utilizadas por pesquisadores que se preocupam com a atuação prática do problema proposto.

A forma de coleta de dados adotada foi a análise bibliográfica que tem como principal vantagem oferecer maior gama de fenômenos ao pesquisador em vista daqueles que poderia pesquisar diretamente o que se mostra importante quando o problema de pesquisa se relaciona a dados muito dispersos no espaço. Em muitas situações, não há outra maneira de conhecer os fatos se não com base em análises de bibliográficas (GIL, 2002).

Quadro 1 – Métodos e técnicas utilizados na pesquisa.

Método	**Abordagem**	**Coleta de Dados**	**Tratamento dos Dados**
Levantamento bibliográfico	Qualitativa	Análise bibliográfica	Análise de Conteúdo

Nesse levantamento, se fez a pesquisa nas bases de dados Scielo, no Portal de Periódicos da CAPES e no Google Scholar, restritos ao período de 2012 a 2021. Os termos de pesquisa utilizados foram as palavras "evento" ou "eventos" e "projeto" ou "projetos" no título dos arti- gos. A escolha das bases de dados se deve a serem as bases mais conhecidas no meio acadêmico e o período foi um recorte dos últimos dez anos.

O tratamento de dados foi feito por meio de análise de conteúdo que é uma técnica de pesquisa para a descrição objetiva, sistemática e qualitativa do conteúdo evidente da comunicação (LAKATOS; MARCONI, 1996).

4 ANÁLISE E RESULTADOS

4.1 Categoria de análise única: levantamento de publicações de gestão de eventos

Na base de dados da Scielo, foi encontrado apenas um resultado, mas que não se associava ao tema de gestão de projetos ou a eventos no sentido utilizado neste trabalho. Já na base de dados Portal de Periódicos da CAPES, foram encontrados oito resultados, sendo apenas um deles relacionado à gestão de projetos. Este trabalho está indicado na Quadro 2.

A alternativa foi então fazer a busca no Google Scholar, onde se encontrou um número significativo de resultados para estes termos de pesquisa. Foram encontrados cento e três resultados, sendo oitenta e três resultados descartados por não se relacionarem à gestão de projetos, três descartados por duplicidade e dois por não estarem dentro da janela temporal estabelecida nessa proposta, embora tenham aparecido nos resultados com a aplicação dos filtros correspondentes.

Foram então analisadas as quinze publicações restantes que utilizam técnicas de gestão de projetos na gestão de eventos, buscando verificar as citações ao gerenciamento das partes interessadas e qual a importância relativa o artigo apresentou. Os resultados estão compilados na Quadro 2. Logo após são analisados todos os artigos que abordam processos relacionados às partes interessadas, indicando resumidamente o conteúdo. A Figura 2 mostra ainda os dados plotados em um gráfico.

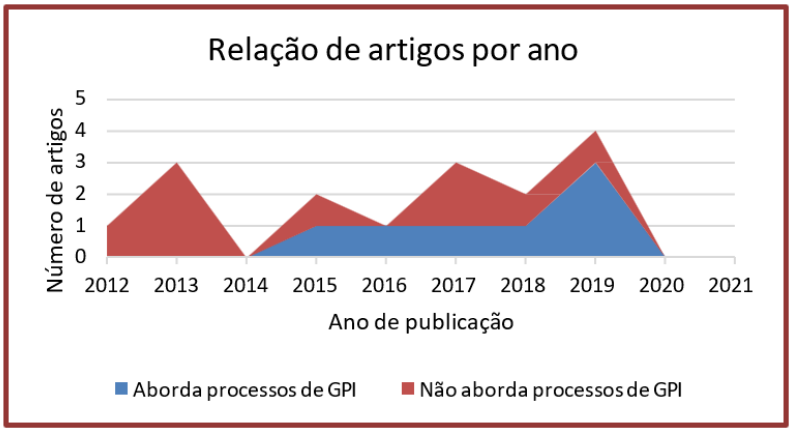
Quadro 2 – Resumo da abordagem de processos de gerenciamento das partes interessadas nas produções analisadas.

Autores	**Apresenta processos voltados às partes interessadas?**
Teixeira, Maccari e Kniess* (2012)	Não
Gohr *et al* (2013)	Não
Andrade e Dufour (2013)	Não
Teixeira e Patah (2013)	Não
Rinaldi *et al* (2015)	Não
Mata (2015)	Sim
Silva e Ferreira (2016)	Sim
Gouget (2017)	Sim
Batalha e Leal (2017)	Não
Alencar (2017)	Não
Amaral, Bastos e Carvalho (2018)	Sim
Peron e Gasques (2018)	Não

Dias Júnior (2019)	Não
Malfa e Glória Júnior (2019)	Sim
Costeira, Gomes e Correia (2019)	Sim
Faxina (2019)	Sim

* Este artigo aparece tanto na base da Capes quanto no Google Scholar.

Figura 2 – Relação de artigos usados neste estudo por ano que abordam ou não o gerenciamento das partes interessadas (GPI).



O estudo de caso apresentado por Mata (2015) “Implantação do escritório de gerencia- mento de projetos em uma empresa de gestão de eventos” fala dos processos desenvolvidos, desde o levantamento das informações até a apresentação de um plano de implantação do escritório de gerenciamento de projetos. Embora a empresa analisada seja de eventos, não apresentam processos relacionados às partes interessadas. Como sugestão, Mata (2015) aponta a necessidade de implementar a gestão das partes interessadas, pois, segundo ele

> A gestão das partes interessadas dos projetos é primordial, de forma que todas as pessoas envolvidas, direta ou indiretamente com o projeto, tenham suas necessidades mapeadas e satisfeitas.
> Os seguintes processos deverão ser cumpridos:
> - Identificar as partes interessadas;
> - Planejar o gerenciamento das partes interessadas;
> - Gerenciar o engajamento das partes interessadas;
> - Controlar o engajamento das partes interessadas.
>
> O gerenciamento das partes interessadas do projeto será feito através da elaboração, implantação e monitoramento de procedimentos e formulários padrão, de forma a ter-se o total controle das fases do projeto e resultados (MATA, 2015, p.35).

No trabalho o autor ainda apresenta a formulação de várias ferramentas, modelos de planos de gerenciamento, e embora indique que as partes interessadas seriam gerenciadas por procedimentos e formulários, não apresenta nenhum modelo ou premissa para sua formulação.

No trabalho “A importância do gerenciamento da comunicação com os stakeholders em projetos de eventos” de Silva e Ferreira (2016), a comunicação com as partes interessadas é o principal enfoque. Utilizando a quarta edição do Guia PMBOK (PMI, 2008) como referência, tratam as partes interessadas dentro da área de gerenciamento das comunicações. Através do estudo de caso “Corredor da Folia”, analisam as ferramentas utilizadas pela organização do evento, que utilizam um efetivo gerenciamento das partes interessadas, fazendo uma estruturação implícita dos processos de gerenciamento das partes interessadas contidas nas versões mais recentes do PMBOK, quinta e sexta edições.

Gouget (2017) aborda um plano de gerenciamento de projetos para gerenciamento das partes interessadas em grandes eventos. Ele aborda com detalhe a descrição de muitos dos pos- síveis stakeholders em grandes eventos, chamando a atenção para especificidades de cada um e ao final do trabalho, propõe um modelo do plano de gerenciamento das partes interessadas, anexo ao trabalho, como ilustrado na Figura 3. No corpo do texto se discute pouco os processos de gerenciamento das partes interessadas, mas no anexo, são detalhados os processos e fluxos a serem utilizados nesse gerenciamento.

Amaral, Bastos e Carvalho (2018) em seu trabalho “Mapeamento de stakeholders em projetos de eventos esportivos: estudo de caso” abordam o processo de mapeamento dos stakeholders de um evento de corrida de rua. Focado no mapeamento dos stakeholders, não há outros processos relacionados ao gerenciamento dos mesmos.

Malfa e Glória Júnior (2019) em seu trabalho “Identificação dos riscos em projetos de eventos” fizeram uma abordagem bem direcionada à área de gerenciamento dos riscos. Ainda assim abordaram as partes interessadas, identificando riscos relacionados à gerenciamento das partes interessadas nas entrevistas realizadas, onde podemos citar “falta de engajamento, falha ao analisar as expectativas das partes interessadas e falta de patrocinadores e apoiadores”.

Figura 3 – Plano de gerenciamento das partes interessadas.

Plano de Gerenciamento das Partes Interessadas *(Stakeholder Management Plan)*

PREPARADO POR	APROVADO POR	VERSÃO	DATA
[Nome do responsável pelo documento]	[Nome do responsável pela aprovação]	[Versão]	[Data]

3.1. Descrição dos processos de gerenciamento das partes interessadas

- O gerenciamento será realizado através de reuniões bilaterais, a fim de manter um diálogo sobre a satisfação das expectativa e cumprimento dos requisitos.
- As reuniões bilaterais serão realizadas pelo representante da área funcional de segurança e com cada um dos representantes das demais instituições.

3.2. Identificação das partes interessadas

As partes interessadas serão selecionadas a partir do mapeamento dos possíveis *stakeholders* – unidade 3.4 do trabalho - que atuarão no projeto.

3.3. Priorização das partes interessadas

Os critérios de priorizações serão para os *stakeholders* que realizam atividades de escolta e batedor de autoridades.

3.4. Comunicação com as partes interessadas

As informações relativas ao desenvolvimento dos planos de segurança serão repassadas às partes interessadas através de reuniões e e-mail.

3.5. Solicitação de mudanças

As solicitações de mudanças deverão ser realizadas em reuniões bilaterais – instituição organizadora do grande evento e uma das instituições mapeadas - e registrada em ata. Após aprovação na reunião bilateral, a solicitação deverá ser repassada e aprovada em sessão plenária, a qual reúne todos os *stakeholders* responsáveis pela confecção do plano integrado de segurança.

3.6. Frequência de avaliação das partes interessadas

A frequência de avaliação será mensal, no intuito de verificar se os requisitos estão sendo cumpridos de maneira satisfatória. Além disso, será avaliada se as expectativas das partes interessadas deverão virar requisitos propriamente dito.

3.7. Alocação financeira para o gerenciamento das partes interessadas

Não haverá custo direto.

3.8. Administração do plano de gerenciamento de partes interessadas

4. Responsável pelo plano

- Representante da área funcional de segurança da instituição organizadora do grande evento.

5. Frequência de atualização do plano de gerenciamento de escopo

- Mensal, caso se verifique a necessidade de as expectativas das partes interessadas virarem requisitos.

5.1. Outros assuntos relacionados ao gerenciamento do escopo do projeto não previstos neste plano

Gestão dos recursos humanos de empresa de segurança privada.

Fonte: Gouget (2017, p. 160-161)

No trabalho “A projeção de uma estrutura organizativa utilizando a ferramenta de gestão de projetos um estudo de caso sobre o evento executive”, Costeira, Gomes e Correia (2019) narram a implementação da gestão de projetos usando o Guia PMBOK na organização de um evento acadêmico do curso dos autores. Após analisar vários processos, narram a implementação de apenas um processo voltado ao gerenciamento das partes interessadas, Identificação das partes interessadas. Embora citem em outros momentos as partes interessadas, não há processos voltados ao gerenciamento das mesmas.

Faxina (2019) em seu trabalho “Proposta de tutorial para eventos acadêmicos com aplicabilidade da gestão de projetos” traz a discussão dos eventos acadêmicos sob as boas práticas do PMBOK. Após fazer uma revisão sobre eventos e projetos, faz uma entrevista com estudantes que organizam eventos acadêmicos e depois faz um guia para a organização desses eventos. No guia, elabora discussões sobre cada uma das áreas do conhecimento. Na área do gerenciamento das partes interessadas, discorre sobre várias situações, como manter bom relacionamento, busca de patrocinadores e palestrantes, engajamento dos estudantes. Não há uma clareza dos processos a serem executados. São dicas que podem ajudar a organização de um evento acadêmico, mas deveria conter um melhor fluxo de informações, de modo a auxiliar na tomada de decisões.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Agora, pode-se tentar responder à pergunta de pesquisa: Como as publicações de gestão de eventos abordam o gerenciamento das partes interessadas?

Pode-se perceber uma clara modificação do padrão das publicações antes e depois da inclusão do gerenciamento das partes interessadas como uma área do conhecimento no Guia PMBOK em 2014, conforme Quadro 2. Mesmo essa assimilação não acontecendo de maneira imediata, as produções mais recentes apresentam processos relacionados à área. Mesmo apresentando alguns processos, a abordagem talvez não seja a mais adequada. Como se pode perceber nos trabalhos, embora o gerenciamento das partes interessadas em um evento seja um dos mais significativos, esta importância não se encontra traduzida em dedicação à gestão, sendo muitas vezes delegada à margem da organização do evento.

Como sequência deste trabalho, ou seja, uma sugetão para trabalhos futuros, se propõe a ampliação da análise das publicações de organização de eventos e uma comparativa às técnicas de gerenciamento

das partes interessadas. Com isso espera-se verificar como fazer o melhor gerenciamento das partes interessadas em um evento, tanto aplicando as técnicas de gestão de projetos quanto adaptando e criando novos processos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao IFMG - Campus Itabirito pelo apoio à relização das atividades.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, Iracema Gonçalves de. A gestão de projetos apoiando a polícia federal nos grandes eventos: um estudo de caso. Dissertação de Mestrado (Segurança Pública). Faculdade de Direito – Universidade Federal da Bahia (UFBA). 2017. 111 f.

AMARAL, Cacilda Mendes dos Santos; BASTOS, Flávia da Cunha; CARVALHO, Marly Monteiro. Mapeamento de stakeholders em projetos de eventos esportivos: estudo de caso. PODIUM Sport, Leisure and Tourism Re- view, v. 7, n. 1, p. 22-45, 2018.

ANDRADE, Cacilda; DUFOUR, Christian. GERENCIAMENTO DE PROJETOS APLICÁVEL A EVENTOS

DE DANÇA: SUCESSO, QUALIDADE E DISCIPLINA. In: Proceedings of World Congress on Communication and Arts. 2013. p. 165-168.

BATALHA, Karine Ampessan; LEAL, Gislaine Camila Lapasini. UMA METODOLOGIA HÍBRIDA PARA GESTÃO DE PROJETOS EM UMA AGÊNCIA DE EVENTOS. Trabalhos de Conclusão de Curso do DEP, v. 12, n. 1, 2017.

COSTEIRA, I.B. de S; GOMES, V.V.B; CORREIA, M. de S. A projeção de uma estrutura organizativa utilizando a ferramenta de gestão de projetos um estudo de caso sobre o evento executive. Brazilian Journal Of Development, [s.l.], v. 5, n. 9, p.14168-14190, 2019. Brazilian Journal of Development. http://dx.doi.org/10.34117/bjdv5n9-036.

DIAS, A.M.M. Gestão das Expectativas das Partes Interessadas em Projetos: um estudo da percepção dos profissionais em gestão de projetos. Dissertação (Mestrado Profissional em Administração) – Fundação Pedro Leopoldo (FPL), Pedro Leopoldo, 2016.

DIAS JÚNIOR, Wagner. Aplicação de ferramentas e conceitos da gestão de projetos em um evento esportivo universitário. 2019. 66 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) - Instituto de Ciências Exatas e aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2019.

FACHIN, O. Fundamentos de metodologia. 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2005.

FAXINA, Nathália. Proposta de tutorial para eventos acadêmicos com aplicabilidade da gestão de projetos. 2019. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

FONSECA, P., et al. Gerenciamento de Stakeholders em Projetos: Um Estudo em uma Empresa de Serviços. Anais do V SINGEP - Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade. São Paulo, 2016.

GIL, A.C. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2002. 4ª edição.

GOHR, C.F. et al. Gestão de projetos de eventos culturais em uma universidade pública federal: análise de práticas e proposições de melhoria. Revista de Administração da UFSM, [S.l.], v. 6, n. 3, p. 511-526, set. 2013. ISSN 1983-4659. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reaufsm/article/view/6590>. Acesso em: 14 abr. 2021 às 20h44min.

GOUGET, Guilherme Luis Dantas. Uma proposta de um plano de gerenciamento de projetos em recursos humanos e stakeholders para a área de segurança em grandes eventos. (Pós-Graduação Em Gestão E Geren- ciamento De Projetos) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO – ESCOLA POLITÉCNICA. 2017.

KOTLER, P.; KELLER, K.L. Administração de Marketing. 12.ed. São Paulo: Pearson, 2007.

LAKATOS, E.; MARCONI, M. Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragem e técnicas de pesquisa, elaboração, análise e interpretação de dados. 3 ed. São Paulo: Atlas, 1996.

LOPES, G.; GHISLENI, T.S.; Comunicação Estratégica em Eventos: Case do Fórum de Comunicação do Cen- tro Universitário Franciscano. In: IX Congresso de Ciências da Comunicação na Região Sul, Guarapuava - PR, 2008.

LORENZI, B.C. Gerenciamento de Projetos em uma Consultoria Industrial - Aplicando a Metodologia PMBOK. Monografia (Bacharel em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2013.

MALFA, Rosemeire de Fátima Peixoto; JÚNIOR, Irapuan Glória. IDENTIFICAÇÃO DOS RISCOS EM PROJETOS DE EVENTOS. Iberoamerican Journal of Project Management, v. 10, n. 2, p. 18-34, 2019.

MARQUES, C.A.; Relações Públicas: Administrando a Comunicação Integrada na Promoção de Eventos. Tra- balho de Conclusão de Curso, Faculdade de Comunicação Social Habilitação em Relações Públicas, Pontifica Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

MARTIN, V.; Manual Prático de Eventos. São Paulo: Elsevier, 2017.

MATA, Jônatas Franco Campos da. IMPLANTAÇÃO DO ESCRITÓRIO DE GERENCIAMENTO DE PROJETOS EM UMA EMPRESA DE GESTÃO DE EVENTOS. 2015. 49 f. Tese de Doutorado. Fundação Getúlio Vargas.

MENDES, G. P.; GONÇALVES, D.F.; PLANEJAMENTO E ORGANIZAÇÃO DE EVENTOS NA

FORMAÇÃO ACADÊMICA. Pró-reitoria de Extensão. Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. Doura- dos, 2011.

MURAD, E.G.; COSTA, E. A. H. Evento e entidade Sociais: o olhar da sustentabilidade. In: Anais do XXIII Congresso Nacional de Empresas e Profissionais de Eventos, Rio de Janeiro, 2006.

PERON, D., GASQUES, A.. PROPOSTA DE VALIDAÇÃO DE NOVOS PROJETOS EM UMA EMPRESA DE

EVENTOS COM CONCEITOS DE LEAN STARTUP. Trabalhos de Conclusão de Curso do DEP, Maringá: Paraná, v. 13, n. 1, mar. 2018. Disponível em: <http://www.dep.uem.br/gdct/index.php/dep_tcc/article/view/324>. Acesso em: 03 Mai. 2021 às 20h50min.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI), disponível em <https://www.pmi.org/brasil> Acesso em: 03 abr. 2021.

Um guia do conjunto de conhecimentos em gerenciamento de projetos - Guia PMBOK. 4. ed. Newtown Square: Project Management Institute, 2008. 459 p.

Um guia do conjunto de conhecimentos em gerenciamento de projetos - Guia PMBOK. 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2014. 616 p.

Um guia do conjunto de conhecimentos em gerenciamento de projetos – Guia PMBOK. 6. ed. Newtown Square: Project Management Institute, 2018. 756 p.

RINALDI, Rafael Spigariol et al. A avaliação da maturidade em Gerenciamento de Projetos em empresas organizadoras de eventos: estudos de casos múltiplos. Anais IV SINGEP, São Paulo, 2015. Disponível em: <https://singep.org.br/4singep/resultado/250.pdf>. Acesso em 08 mai. 2021às 22h30min.

SILVA, Raphael; FERREIRA, Ana Paula. A IMPORTÂNCIA DO GERENCIAMENTO DA COMUNICAÇÃO COM OS STAKEHOLDERS EM PROJETOS DE EVENTOS: UM ESTUDO DE CASO DA FESTIVIDADE

CORREDOR DA FOLIA. In: Congresso Nacional de Excelência em Gestão, XII, Rio de Janeiro. 2016.

TEIXEIRA, G.C. dos S.; MACCARI, E.A.; KNIESS, C.T.. Impactos do Uso de Técnicas de Gerenciamento de Projetos na Realização de um Evento Educacional. Revista de Gestão e Secretariado, [S.l.], v. 3, n. 2, p. 67-86, dez. 2012. Disponível em: <https://www.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/135>. Acesso em: 15 abr. 2021. doi:https://doi.org/10.7769/gesec.v3i2.135. às 20h, 45min.

TEIXEIRA, Laura Ribeiro; PATAH, Leandro Alves. Avaliação do desempenho de um projeto de evento para a cultura da qualidade e segurança de alimentos de uma empresa multinacional brasileira. In: XVI SEMEAD

Seminários em Administração. Out. 2013. Disponível em: <http://sistema.semead.com.br/16semead/resul- tado/trabalhosPDF/322.pdf>. Acesso em 08 mai. 2021 às 23h30min.

Capítulo 4

10.37423/251110431

ANÁLISE TÉRMICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DIDÁTICO COM O REFRIGERANTE R-600A

Arthur Souza Lyra — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Wertson da Silva Resende — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Thiago da Silva André — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)*

Edilson Marinho da Silva Júnior — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)*

Jair Palhares de Aquino — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Elierton Evangelista das Neves — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

RESUMO

Diante das crescentes exigências ambientais e da necessidade de substituir fluidos refrigerantes com alto impacto climático, como o R-22 (HCFC), torna-se essencial buscar alternativas que combinem eficiência energética e sustentabilidade. O isobutano (R- 600a), classificado como fluido A3 pela ASHRAE, apresenta zero Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP) e baixo Potencial de Aquecimento Global (GWP), sendo uma opção promissora para sistemas de pequeno porte. No entanto, sua aplicação exige avaliação técnica cuidadosa, principalmente em retrofits de sistemas originalmente projetados para fluidos halogenados. Neste contexto, este estudo realizou uma análise comparativa do desempenho termodinâmico de um sistema de refrigeração didático operando com R-22 e R-600a, por meio de simulações no software CoolPack. A modelagem foi baseada em uma câmara frigorífica real, considerando parâmetros como pressões, temperaturas, entalpias, trabalho do compressor e coeficiente de performance (COP). Os resultados mostraram que o R-600a obteve um COP 2,52% superior ao do R- 22 e menores temperaturas de descarga, o que pode contribuir para maior durabilidade do sistema. Contudo, a substituição direta (drop-in) não se mostrou viável sem adaptações técnicas, sendo necessárias modificações em componentes como o compressor e a válvula de expansão. Conclui-se que o R-600a é uma alternativa viável e ambientalmente vantajosa, desde que utilizado com critérios técnicos adequados de retrofit e projeto.

Palavras-chave: Refrigeração, R-600a, Simulação, CoolPack, Eficiência Energética

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a sustentabilidade nas práticas de refrigeração e climatização têm estimulado o desenvolvimento de soluções mais ecológicas, especialmente no que se refere à escolha dos fluidos refrigerantes.

Entre os diversos tipos de sistemas existentes e praticados atualmente, os que aplicam a compressão de vapor se destacam por sua ampla implementação nos setores doméstico, comercial e industrial, representando uma parcela expressiva do consumo energético mundial.

Nesse cenário, a seleção adequada de um fluido refrigerante é decisiva, não apenas pelo desempenho térmico que proporciona, mas também por seu impacto ambiental, particularmente em relação ao Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential - GWP) e ao Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (Ozone Depletion Potential - ODP).

A partir das restrições impostas pelo Protocolo de Montreal (1987) ao uso de substâncias que destroem a camada de ozônio, como os CFCs e HCFCs, e considerando os compromissos assumidos pelo Protocolo de Quioto (1997) no controle de gases de efeito estufa, hidrocarbonetos como o isobutano, denominado R-600a, tem ganhado destaque como alternativa ambientalmente segura.

Com GWP-AR4 extremamente baixo, igual a 3, e ODP igual a zero, o R-600a atende às exigências da Emenda de Kigali ao Protocolo de Montreal (2016), que introduziu metas progressivas de redução do consumo e produção dos HFCs — com cortes de até 85% previstos para as próximas décadas.

Países desenvolvidos, Grupo 1, já estão com congelamento do consumo determinado desde 2019 e devem atingir esse patamar de 85% de redução com base nos níveis médios de consumo entre 2011 e 2013.

Para o Brasil, que integra o grupo dos Países em desenvolvimento, Grupo 2, o congelamento se deu em 2024 e a meta de redução à 85% deve cumprir cronograma de até 2047.

Além de sua eficiência energética em sistemas de pequeno porte, como refrigeradores domésticos e bancadas didáticas, o isobutano representa uma alternativa viável frente às demandas globais por sustentabilidade e eficiência.

Durante a 13ª Reunião das Partes da Emenda de Kigali (MOP13), realizada em Bangcoc em outubro de 2024, reforçou-se a necessidade de acelerar a substituição dos HFCs e fortalecer iniciativas regionais de capacitação e inovação em tecnologias de refrigeração de baixo impacto ambiental (UNEP, 2024).

Para compreender e otimizar o desempenho dos sistemas que utilizam esses novos fluidos refrigerantes, torna-se essencial o estudo detalhado do seu comportamento por meio de ferramentas digitais. O estudo do comportamento dos sistemas, com a introdução de diferentes fluidos refrigerantes e suas composições, precede o dimensionamento e a projeção dos sistemas de refrigeração e climatização.

Nesse sentido, a implementação das equações que modelam esse comportamento pode ser simplificada por meio do uso de ferramentas digitais, como aplicativos e softwares. Tradicionalmente, softwares de simulação, como o CoolPack, permitem a modelagem de ciclos de refrigeração com precisão satisfatória, bem como a obtenção de dados e parâmetros essenciais para a avaliação do desempenho térmico do sistema.

Esse tipo de abordagem é especialmente relevante, tanto no ambiente acadêmico quanto em campo, pois possibilita que estudantes e profissionais compreendam, de forma prática, os conceitos termodinâmicos envolvidos, além de entender e prever o comportamento de cada etapa dos diversos ciclos de refrigeração simulados e implementados.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral é analisar e comparar o desempenho termodinâmico de um sistema de refrigeração aplicado a uma câmara frigorífica operando com o fluido R-22, a partir de dados previamente levantados, e simular, sob as mesmas condições, o comportamento do sistema com o uso do R-600a, avaliando sua viabilidade técnica e impacto ambiental como alternativa ao refrigerante convencional.

Considerando o objetivo geral, são listados os seguintes objetivos específicos:

a) utilizar os dados previamente levantados de uma câmara frigorífica operando com R-22 como base para modelagem e análise termodinâmica do sistema no software CoolPack;

b) simular o desempenho do sistema sob as mesmas condições utilizando o fluido refrigerante R-600a, a fim de obter parâmetros operacionais comparáveis, como temperaturas, pressões, entalpias e Coeficiente de Performance (COP);

c) comparar os resultados obtidos para os dois fluidos refrigerantes, avaliando a eficiência energética, a viabilidade técnica e os impactos ambientais do R-600a em relação ao R-22, com foco nos indicadores GWP e ODP.

1.2 JUSTIFICATIVAS

A escolha do R-600a como fluido refrigerante neste estudo se justifica por seu crescente uso na indústria de refrigeração, doméstica, comercial e até industrial, e por suas propriedades ambientais vantajosas, como o baixo GWP, extremamente baixo, e ODP nulo.

Diante das metas estabelecidas por acordos internacionais para a redução do impacto ambiental dos fluidos refrigerantes, torna-se essencial compreender o desempenho de sistemas que utilizam o R-600a, especialmente em comparação com fluidos, há algum tempo, tradicionalmente empregados, como o R-22.

Nesse contexto, a simulação computacional representa uma ferramenta eficaz e segura para a análise de diferentes configurações do ciclo de compressão por vapor, permitindo não apenas a avaliação técnica e ambiental das alternativas, mas também contribuindo para a formação acadêmica de engenheiros e para a tomada de decisões no setor.

A abordagem adotada neste trabalho reforça, portanto, sua relevância tanto no campo da pesquisa quanto na aplicação prática da engenharia térmica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A evolução dos sistemas de refrigeração está diretamente ligada às demandas ambientais e à busca por maior eficiência energética. Desde a assinatura do Protocolo de Montreal (1987), que estabeleceu restrições ao uso de substâncias com alto Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP), e da Emenda de Kigali (2016), que propôs metas de redução dos hidrofluorocarbonetos (HFCs), o setor tem sido pressionado a adotar fluidos refrigerantes com menor impacto climático (UNEP, 2024).

Nesse cenário, o isobutano (R-600a) desponta como uma alternativa viável e ambientalmente responsável. Classificado como fluido A3 pela ASHRAE, o R-600a possui ODP igual a zero e GWP extremamente baixo (≈3), o que o torna compatível com os compromissos internacionais de mitigação das mudanças climáticas.

Além disso, sua aplicação em sistemas de pequeno porte, como refrigeradores domésticos e bancadas didáticas, tem demonstrado desempenho termodinâmico superior em relação a fluidos halogenados como o R-22 (Kumar et al., 2022).

Estudos recentes indicam que o R-600a proporciona menor temperatura de descarga e maior coeficiente de performance (COP), contribuindo para a durabilidade dos componentes e a redução do consumo energético (Zhou et al., 2021).

No entanto, sua inflamabilidade exige cuidados técnicos específicos, principalmente em retrofits de sistemas originalmente projetados para fluidos não inflamáveis.

A substituição direta (drop-in) não é recomendada sem adaptações em componentes como o compressor, a válvula de expansão e os sistemas de segurança (Almeida et al., 2023).

A modelagem computacional tem se mostrado uma ferramenta indispensável para a análise de desempenho de sistemas de refrigeração com novos fluidos. Softwares como o CoolPack permitem simular ciclos de compressão de vapor com elevada precisão, fornecendo dados essenciais como entalpias, pressões, temperaturas e COP.

Essa abordagem é especialmente relevante no ambiente acadêmico, pois facilita a compreensão dos conceitos termodinâmicos e permite a avaliação prática do comportamento dos sistemas (Papadopoulos et al., 2023).

Além disso, a adoção de refrigerantes naturais como o R-600a está alinhada com as tendências globais de descarbonização e eficiência energética.

Segundo SANTOS et al. (2024), a substituição de HFCs por hidrocarbonetos representa uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, desde que acompanhada por capacitação técnica e inovação em projeto.

Portanto, o uso do R-600a em sistemas didáticos não apenas atende às exigências ambientais, como também promove o desenvolvimento de competências técnicas em engenharia térmica, contribuindo para a formação de profissionais alinhados com os desafios contemporâneos da sustentabilidade.

3 METODOLOGIA

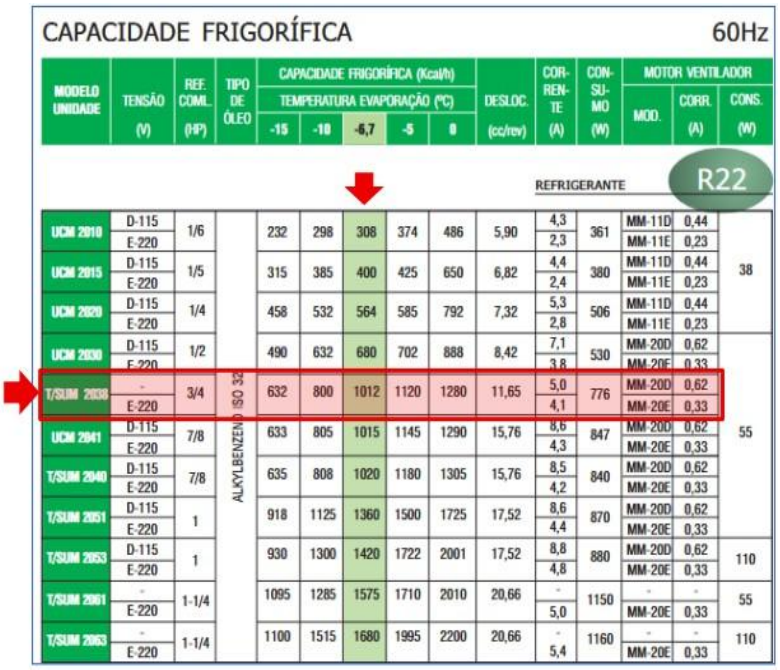
Este estudo foi conduzido baseando-se na simulação da substituição do fluido R- 22 pelo R-600a em um sistema de refrigeração por compressão de vapor simples realizada com a utilização do software CoolPack, amplamente utilizado para análise de ciclos frigoríficos.

Nesse contexto, visando avaliar o desempenho térmico dos sistemas em condições controladas, a avalição parte das condições operacionais de uma câmara frigorífica real de capacidade nominal 1012,0 kcal/h.

A câmara em questão utiliza uma unidade condensadora, para fluido refrigerante R22, aplicada em média pressão de retorno, cuja faixa de temperatura de evaporação da aplicação é de -15°C a 0°C, sob referência comercial de ¾ HP, intensidade de corrente nominal 4,1A sob tensão elétrica de 220V em corrente alternada de frequência 60Hz, consumo elétrico declarado pelo fabricante em 776Wh mais forçador de ar de 55Wh.

O diagrama frigorífico do sistema de refrigeração didático objeto desse estudo é apresentado na Figura 2.

Figura 1. Recorte do catálogo da unidade condensadora da câmara frigorífica em estudo.

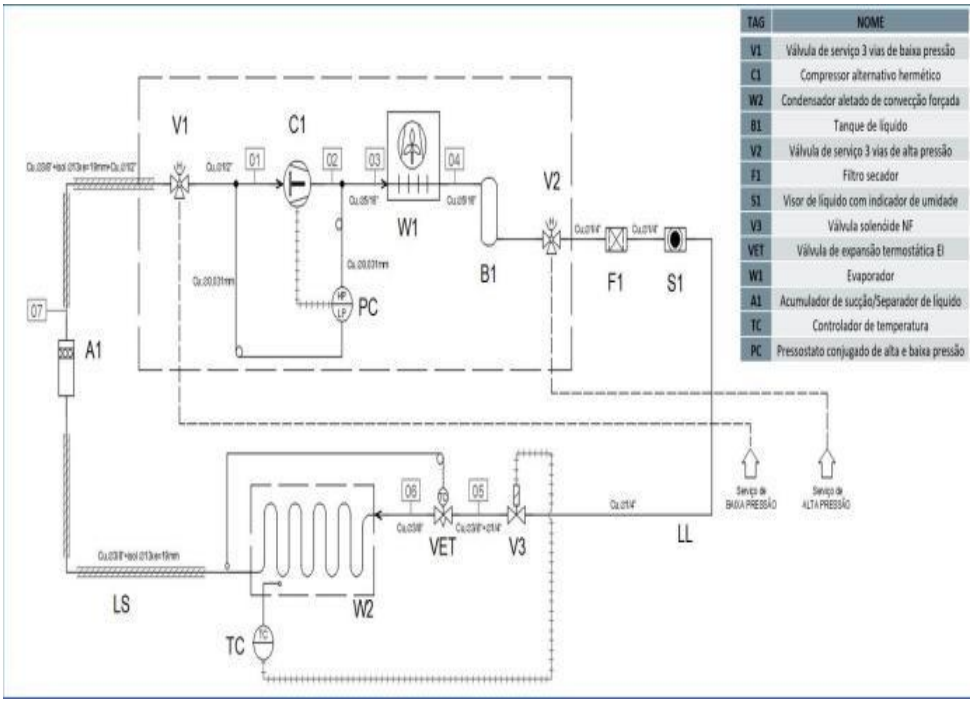


CAPACIDADE FRIGORÍFICA 60Hz

MODELO UNIDADE	TENSÃO (V)	REF. COML. (HP)	TIPO DE ÓLEO	CAPACIDADE FRIGORÍFICA (Kcal/h) TEMPERATURA EVAPORAÇÃO (°C) -15	-10	-6,7	-5	0	DESLOC. (cc/rev)	COR-REN-TE (A)	CON-SU-MO (W)	MOTOR VENTILADOR MOD.	CORR. (A)	CONS. (W)
										REFRIGERANTE R22				
UCM 2010	D-115	1/6	ALKYLBENZENO ISO 32	232	298	308	374	486	5,90	4,3	361	MM-11D	0,44	38
	E-220									2,3		MM-11E	0,23	
UCM 2015	D-115	1/5		315	385	400	425	650	6,82	4,4	380	MM-11D	0,44	
	E-220									2,4		MM-11E	0,23	
UCM 2020	D-115	1/4		458	532	564	585	792	7,32	5,3	506	MM-11D	0,44	
	E-220									2,8		MM-11E	0,23	
UCM 2030	D-115	1/2		490	632	680	702	888	8,42	7,1	530	MM-20D	0,62	55
	E-220									3,8		MM-20E	0,33	
T/SUM 2035	-	3/4		632	800	1012	1120	1280	11,65	5,0	776	MM-20D	0,62	
	E-220									4,1		MM-20E	0,33	
UCM 2041	D-115	7/8		633	805	1015	1145	1290	15,76	8,6	847	MM-20D	0,62	
	E-220									4,3		MM-20E	0,33	
T/SUM 2040	D-115	7/8		635	808	1020	1180	1305	15,76	8,5	840	MM-20D	0,62	
	E-220									4,2		MM-20E	0,33	
T/SUM 2051	D-115	1		918	1125	1360	1500	1725	17,52	8,6	870	MM-20D	0,62	
	E-220									4,4		MM-20E	0,33	
T/SUM 2053	D-115	1		930	1300	1420	1722	2001	17,52	8,8	880	MM-20D	0,62	110
	E-220									4,8		MM-20E	0,33	
T/SUM 2061	-	1-1/4		1095	1285	1575	1710	2010	20,66	-	1150	-	-	55
	E-220									5,0		MM-20E	0,33	
T/SUM 2063	-	1-1/4		1100	1515	1680	1995	2200	20,66	-	1160	-	-	110
	E-220									5,4		MM-20E	0,33	

Fonte: Fabricante Elgin (2025).

Figura 2. Diagrama frigorífico do sistema de refrigeração didático.



Fonte : Elaborado pelos autores.

Para este estudo, consideramos que o sistema da câmara se encontra perfeitamente dimensionado, com carga de fluido balanceada e operando com válvula de expansão termostática perfeitamente compatível, em seu ponto de máxima eficiência para as temperaturas locais.

Desta forma, a modelagem via CoolPack irá considerar os parâmetros obtidos pelas medições como entrada modelando o sistema da forma mais próxima possível das condições de operação, são elas:

a) Temperatura ambiente externa: 28,8°C

b) Temperatura de evaporação: -6,7°C

c) Temperatura de condensação: 41,3°C

d) Temperatura de descarga: 91,3°C

e) Superaquecimento: ~16K

f) Subresfriamento: ~6K

g) Queda de pressão no evaporador: ~7psig/0,5 bar (~21,7psia/~1,496 bar abs)

h) Queda de pressão no condensador: ~10,15psig/0,7 bar (24,66 psia/1,7 bar abs)

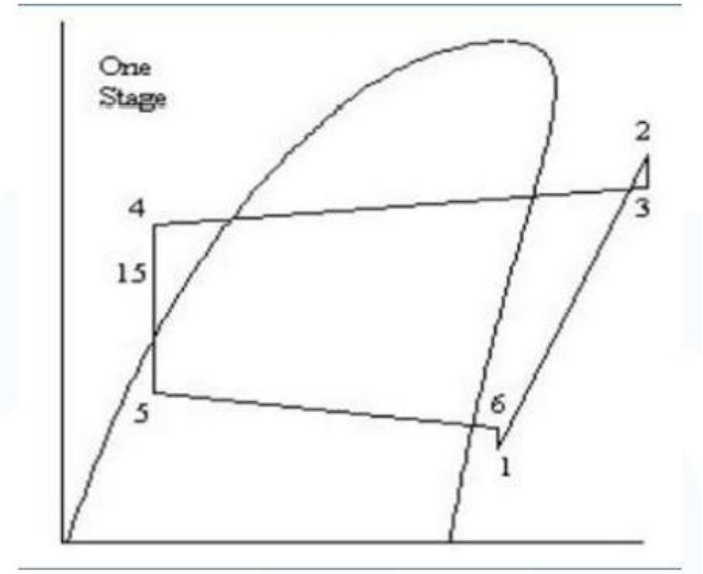
i) Eficiência isentrópica do compressor: 0,95 (adimensional)

j) Queda de pressão na linha de sucção: 0,13 bar

A partir desses dados, lançando-os no CoolPack, é possível determinar importantes variáveis do sistema, como todos os estados do fluido refrigerante R22 nos principais pontos do sistema a compressão de vapor simples de um estágio.

São eles: entrada do compressor (1), descarga do compressor (2), linha de entrada do condensador (3), entrada da válvula de expansão (4), entrada do evaporador (5), e saída do evaporador (6), descritos no diagrama pressão x entalpia, conhecido como diagrama de Mollier.

Figura 3. Pontos de referência de um ciclo a compressão de vapor simples no diagrama Pxh.



Fonte: Software CoolPack (2025).

Após a plotagem do ciclo podemos ainda obter variáveis calculadas em termos específicos para o fluido selecionado, tais como: Calor absorvido no evaporador - Qe – em KJ/Kg, Calor dissipado no condensador – Qc em KJ/Kg, COP, trabalho realizado sobre o fluido Wc em KJ/Kg, e a razão de compressão “Pressure Ratio”.

Adicionalmente, é possível obter valores de dimensionamento do sistema inserindo o valor da carga térmica do sistema ou fluxo de calor no lado de baixa temperatura, em kW.

Desprezando a quantidade de calor absorvida na linha de sucção do sistema, inserimos o valor da carga no espaço destinado “Dimensionig” que contém “Qe [kW]”, automaticamente obteremos os valores nominais de projeto para; calor rejeitado no condensador - Qc em kW, vazão mássica necessária - m em kg/s, vazão volumétrica do fluido – V em m³/h, trabalho do compressor sobre o fluido – W em kW e a quantidade de calor perdida – Q loss em kW.

Uma vez obtidos todos esses parâmetros, plotado o ciclo com R-22, podemos simular sob mesmas condições a aplicação do R-600a reiniciando o software com a seleção do fluido e inserção dos dados característicos de operação do sistema.

Essa simulação possibilitará a plotagem de um novo gráfico Pxh e por conseguinte obtenção de todos os dados de estado do fluido para o ciclo a compressão de vapor, bem como os parâmetros específicos

por unidade de massa e de dimensionamento a partir do fluxo de calor determinado para o mesmo evaporador constante no sistema.

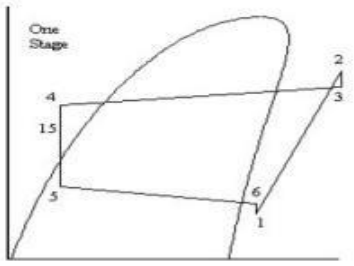
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos parâmetros inseridos na simulação realizada com o software CoolPack, foi possível obter os estados termodinâmicos do fluido refrigerante em cada ponto do ciclo de compressão de vapor, conforme estabelecido na metodologia.

Os dados calculados contemplam, sequencialmente, as temperaturas, pressões, volumes específicos, entalpias e entropias, que estão sintetizados nas Figuras 3 a 5, correspondentes ao ciclo com R-22.

Figura 4. Estados termodinâmicos plotados pelo software CoolPack para o ciclo com fluido R-22

Cycle: Ciclo R22
Refrigerant: R22
Values at points 1-6,15 for the selected one stage cycle



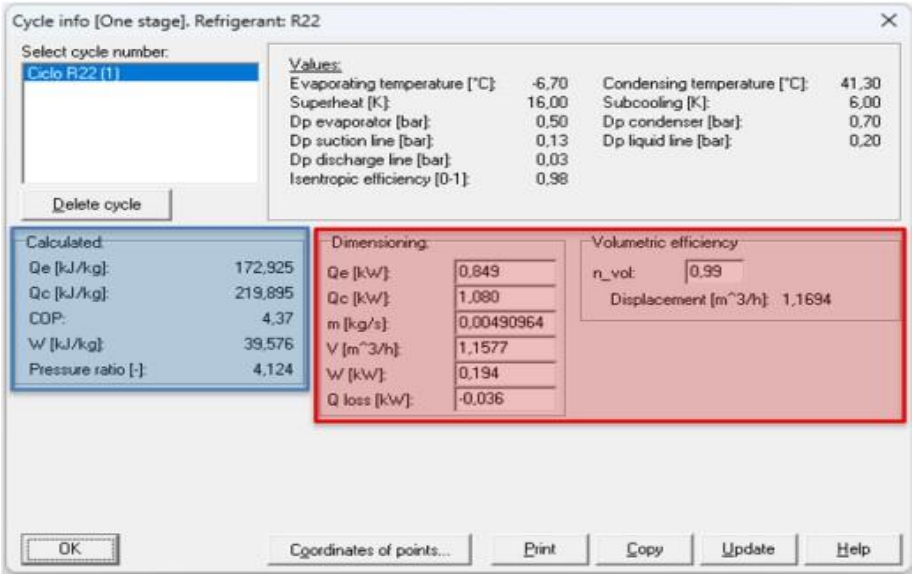
Point	T [°C]	P [bar]	v [m^3/kg]	h [kJ/kg]	s [kJ/(kg K)]
1	8,947	3,846	0,065502	414,002	1,8056
2	91,300	15,861	0,019315	460,971	1,8283
3	91,254	15,827	0,019361	460,971	1,8285
4	33,440	15,127	N/A	241,077	N/A
5	N/A	4,476	N/A	241,077	N/A
6	9,300	3,976	0,063284	414,002	1,8026
15	N/A	14,927	N/A	241,077	N/A

****

Fonte: Software CoolPack (2025).

A partir dessa plotagem, considerando a carga térmica inicialmente definida em 759Kcal/h (0,849 kW) e Eficiência volumétrica de 0,99, ao acessar as informações do ciclo obtivemos os valores indicados em destaque na Figura 5.

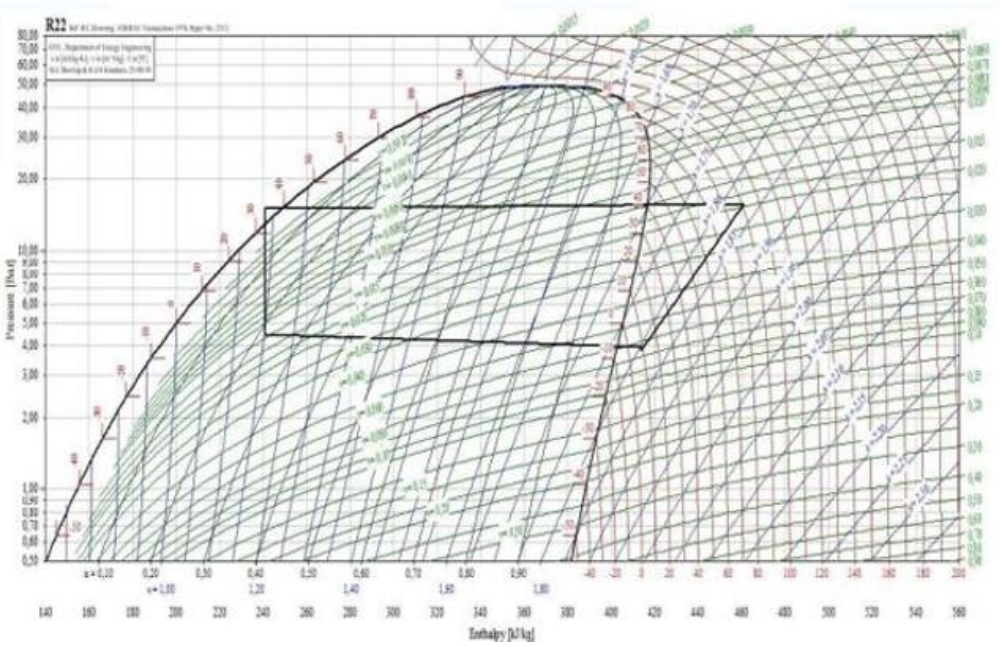
Figura 5. Destaque dos parâmetros específicos e de dimensionamento do ciclo com fluido R-22.



Fonte: Software CoolPack (2025).

O diagrama Pxh para o sistema operando nas condições indicadas é mostrado na Figura 6.

Figura 6. Diagrama Pxh plotado para câmara frigorífica operando com R-22.

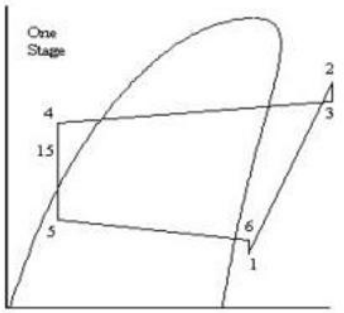


Fonte: Software CoolPack (2025)

Em sequência, foi realizada a simulação com o fluido R-600a, mantendo-se as condições operacionais, com o objetivo de comparar seu desempenho ao R-22. Os resultados obtidos estão representados nas Figuras 7 a 9.

Figura 7. Estados termodinâmicos plotados pelo software CoolPack do ciclo com fluido R-600a.

Cycle: CICLO R-600a
Refrigerant: R600a
Values at points 1-6,15 for the selected one stage cycle



Point	T [°C]	P [bar]	v [m^3/kg]	h [kJ/kg]	s [kJ/(kg K)]
1	8,971	1,105	0,352772	572,183	2,4103
2	62,800	5,580	0,077205	653,131	2,4556
3	62,745	5,546	0,077726	653,131	2,4564
4	30,230	4,846	N/A	270,938	N/A
5	2,713	1,735	N/A	270,938	N/A
6	9,300	1,235	0,314714	572,183	2,3949
15	N/A	4,646	N/A	270,938	N/A

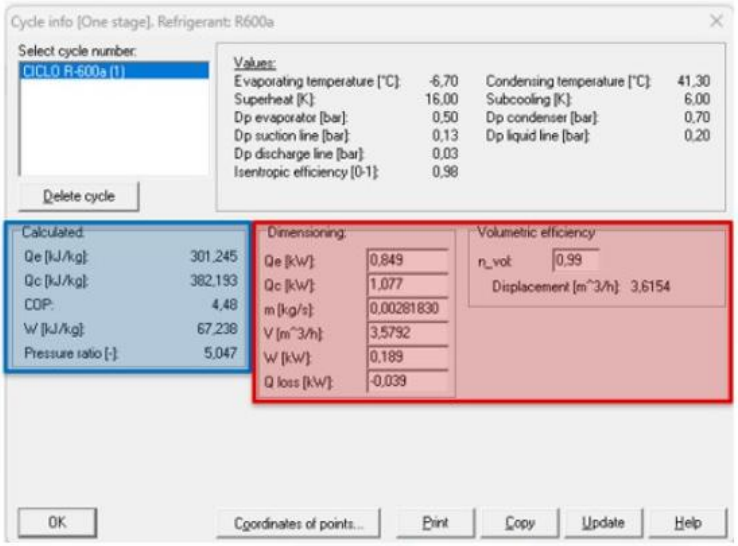
****

Fonte: Software CoolPack (2025).

Seguindo o mesmo procedimento adotado para o R22, obtivemos os dados relativos os parâmetros específicos do fluido R-600a por unidade de massa e de dimensionamento em função da carga térmica padronizada em 759Kcal/h (0,849 kW) e Eficiência volumétrica de 0,99.

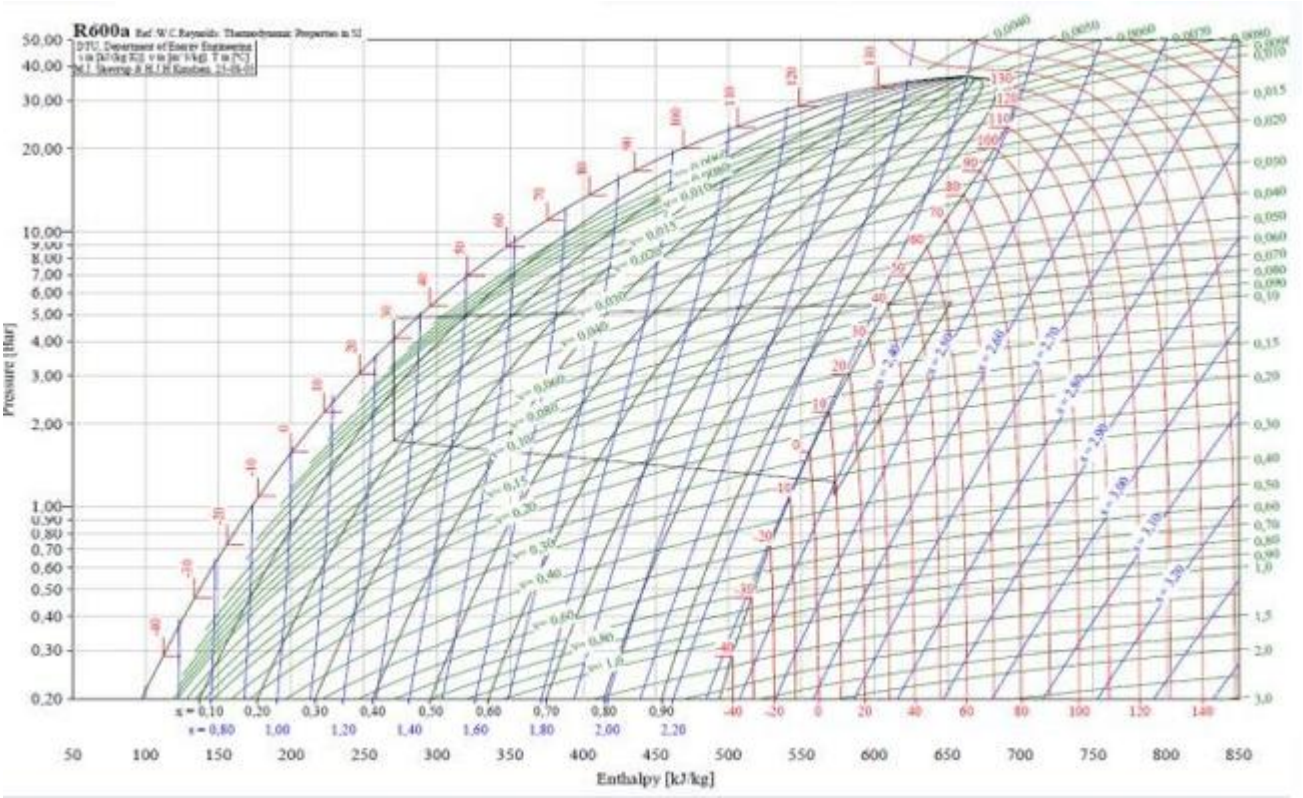
O diagrama Pxh para o sistema operando nas condições iniciais indicadas para o R-600a é mostrado na Figura 8:

Figura 8. Destaque dos parâmetros específicos e de dimensionamento do ciclo com fluido R-600ª



Fonte : Software CoolPack (2025).

Figura 9. Diagrama Pxh plotado para câmara frigorífica operando com R-600a.



Fonte: Software CoolPack (2025).

Tabela 1. Análise comparativa de desempenho do sistema com diferentes fluidos R-22 e R-600a.

PARÂMETRO	FLUIDO		ANÁLISE	
	R-22	R-600A	RESULTADO	CONCLUSÃO
Temperatura de Condensação	***41,3°C***	***41,3°C***	-	***Condição inicial***
Pressão de Condensação - Manométrica	*214,9psig*	*65,01psig*	U	*A pressão de condensação é menor, o exigindo menores esforços mecânicos dos componentes do lado de alta.*
Pressão de Condensação - Absoluta	*229,6psia*	*79,71psia*		
Temperatura de Evaporação	***-6,70°C***	***-6,70°C***	-	***Condição inicial***
Pressão de Evaporação - Manométrica	*57,73psig*	*3,14psig*	U	*O sistema com R-600a trabalha em uma faixa de pressão bem inferior ao R-22. Deve-se despender atenção especial a pressões negativas quando em operação.*
Pressão de Evaporação - Absoluta	*57,73psia*	*17,83psia*		
Temperatura da linha de líquido (entrada da VET)	*33,44°C*	*30,23°C*	U	*O R-600a apresenta temperatura ligeiramente menor, indicando menor perda de calor na linha líquida.*
Temperatura da entrada no evaporador (Saída da VET)	*-3,40°C*	*2,71°C*	⇑	*O R-600a tem temperatura mais alta, o que caracteriza um volume específico menor e por conseguinte irá impor a necessidade de maior vazão volumétrica para suprir a mesma carga térmica.*
Temperatura da linha de Sucção (entrada do compressor)	*8,947°C*	*8,971°C*	~	*Apresentam valores similares com diferença praticamente desprezível, nesse sentido o comportamento térmico após a evaporação é equivalente.*
Temperatura de descarga (Saída do Compressor)	*91,3°C*	*62,8°C*	U	*O R-600a apresenta temperatura bem mais baixa o que imprime vantagem na sua aplicação, pois implica em baixa degradação do lubrificante, menores desgastes mecânicos, não há necessidade de resfriamento adicional, e confere longevidade ao compressor.*
Eficiência Isentrópica	***0,98***	***0,98***	-	***Condição inicial***
Dessuperaquecimento da descarga	*50,00°C*	*21,50°C*	U	*Um dessuperaquecimento menor, verificado para o R-600a indicará menor necessidade de área de troca para liberação de calor no condensador, indica que a condensação irá ocorrer de forma facilitada com maior desempenho térmico e redução de perdas de carga e energia.*
Fluxo de calor no lado de baixa (Carga Térmica)	***0,849kW***	***0,849KW***	-	***Condição inicial***

Fluxo de calor no lado de alta	*1,080KW*	*1,077 KW*	U	*Menor para o R-600a, porém não tão significativo, indica menor rejeição térmica no condensador, o que pode ser considerado benéfico ao meio ambiente e decorrente de menor necessidade de trabalho do compressor.*
Trabalho sobre o fluido	*0,194KW*	*0,189 KW*	U	*Menor para R-600a, isso comprova o menor consumo energético do compressor, que contribuirá para elevação do COP.*
Calor perdido [Q loss]	*0,036KW*	*0,039KW*	⇑	*O R-600a apresenta um leve aumento (~8%) no calor perdido, dentro de uma faixa baixa e aceitável, indica perdas térmicas adicionais nos componentes, especialmente no processo de compressão que apresenta maior deslocamento volumétrico.*
COP	*4,37*	*4,48*	⇑	*O sistema operando com R-600a apresenta COP superior ao R-22, com ganho de 2,52%, o que mesmo parecendo pouco, pode ser significativo ao longo do tempo já que o sistema tem operação contínua.*
Vazão mássica	*0,00491Kg /s*	*0,00282Kg/ s*	U	*A vazão mássica de R-600a representa apenas 20,9% da vazão mássica do R-22, ou seja, uma redução de aproximadamente 79%.*
Vazão volumétrica	*1,1577m³/ h*	*3,5792m³/h*	⇑	*A vazão volumétrica do R-600a apresenta-se cerca 3,1 vezes maior que a do R-22, isso decorre de sua menor densidade na sucção (devido a pressões mais baixas e propriedades físicas do fluido). Isso pode indicar a necessidade de aplicação de compressores com maior capacidade de deslocamento volumétrico.*
Razão de compressão	*4,124*	*5,047*	⇑	*O R-600a tem uma razão de compressão mais alta. Apesar de operar com pressões absolutas mais baixas, a diferença entre sucção e descarga é mais acentuada. Pode haver maior exigência energética específica na compressão, mesmo com menor trabalho total (graças à menor densidade e entalpia envolvida).*
Deslocamento volumétrico	*1,1694m³/ h*	*3,6154m³/h*	⇑	*R-600a exige aproximadamente 3,1 vezes mais deslocamento volumétrico do que com R-22 para operar com a mesma carga térmica. Para manter o mesmo fluxo de energia (Q), a menor vazão mássica do R-600a precisa ser compensada por uma maior movimentação de volume de fluido.*

Com base nas entalpias de entrada e saída em cada componente, foram calculados os parâmetros fundamentais de desempenho, como: vazão mássica, trabalho requerido pelo compressor e coeficiente de performance (COP).

A análise comparativa entre os dois fluidos foi sintetizada na Tabela 1, permitindo a avaliação dos impactos da substituição do R-22 pelo R-600a. Os resultados indicaram que, apesar das diferenças significativas nos parâmetros de operação, o sistema com R- 600a apresentou estabilidade funcional e desempenho coerente com a literatura técnica.

Dentre os destaques, observa-se que o R-600a opera com pressões de sucção e descarga significativamente menores que o R-22, o que implica menores esforços mecânicos nos componentes e reduzida exigência térmica no compressor. A temperatura de descarga, por exemplo, caiu de 91,3 °C (R-22) para 62,8 °C (R-600a), o que é favorável à preservação do lubrificante, reduz o desgaste dos componentes mecânicos e dispensa o uso de dispositivos adicionais de resfriamento.

Outro aspecto relevante é o menor trabalho específico requerido pelo compressor com R-600a (0,189 kW), contra 0,194 kW com R-22, o que contribui diretamente para o aumento do COP, que passou de 4,37 para 4,48, representando um ganho de 2,52%. Apesar de parecer modesto, tal incremento pode ser significativo em aplicações de operação contínua. Entretanto, a substituição direta não está isenta de desafios.

O R-600a apresenta vazão mássica cerca de 79% menor, o que acarreta uma vazão volumétrica mais de três vezes maior, devido à sua baixa densidade. Tal característica impõe a necessidade de compressores com maior capacidade de deslocamento volumétrico, o que pode inviabilizar a substituição direta (drop-in) sem alterações no sistema.

Adicionalmente, o calor perdido no sistema com R-600a foi ligeiramente superior (0,039 kW vs. 0,036 kW), o que pode ser explicado pela maior razão de compressão (5,047 contra 4,124), e pela maior movimentação de fluido, refletindo em perdas térmicas adicionais, ainda que dentro de uma faixa operacional aceitável.

Por fim, a simulação permitiu identificar que variações em parâmetros como superaquecimento e subresfriamento afetam diretamente o desempenho térmico do sistema. Tais observações reforçam a importância do controle adequado das condições operacionais no projeto e ajuste de sistemas que venham a utilizar o R-600a como fluido alternativo.

Em síntese, os resultados demonstram que o R-600a apresenta vantagens operacionais importantes frente ao R-22, especialmente em termos de eficiência energética, redução de esforço mecânico e menor impacto ambiental. Contudo, seu uso requer adaptações técnicas, especialmente no dimensionamento dos compressores e na gestão das características volumétricas do fluido, sendo necessária uma análise criteriosa antes de sua adoção em projetos existentes.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo indicam que o R-600a é tecnicamente viável como substituto ao R-22 em sistemas de refrigeração. Contudo, a substituição direta, sem modificações no sistema (drop-in), não é recomendada, uma vez que o R-600a apresenta características operacionais específicas que exigem adaptações no projeto e nos componentes do sistema.

Dentre as principais modificações necessárias, destacam-se:

a) Substituição do compressor por outro com maior deslocamento volumétrico, devido à menor densidade do R-600a;

b) Utilização de filtro secador compatível com hidrocarbonetos;

c) Ajuste ou troca da válvula de expansão termostática, de modo a adequá-la às baixas pressões de operação;

d) Reavaliação da tubulação do sistema, a fim de evitar quedas de pressão excessivas decorrentes do aumento da vazão volumétrica.

Adicionalmente, por se tratar de um fluido da classe ASHRAE A3, o R-600a possui baixa toxicidade e alta inflamabilidade. Apesar de ser uma alternativa ambientalmente favorável, sua aplicação requer elevados padrões de segurança.

O processo de retrofitting deve ser conduzido com responsabilidade técnica, não podendo ser tratado como uma simples substituição. É indispensável uma análise criteriosa e a adoção de modificações estruturais específicas.

Nesse sentido, devem ser considerados os seguintes aspectos técnicos:

a) O compressor deve ser hermético e compatível com hidrocarbonetos, preferencialmente com proteção antiexplosão;

b) O óleo lubrificante deve ser adequado a HCs (geralmente POE), garantindo boa solubilidade e miscibilidade;

c) Os trocadores de calor (evaporador e condensador) devem ser compatíveis com o fluido e ter volumes internos adequados, a fim de evitar a formação de bolsões de fluido inflamável;

d) O filtro secador deve ser apropriado para uso com hidrocarbonetos;

e) A válvula de expansão deve ser capaz de operar com pressões de evaporação reduzidas, assegurando o controle eficiente do superaquecimento e subresfriamento.

Além dessas adequações técnicas, medidas adicionais de bloqueio de riscos e segurança operacional são fortemente recomendadas, como:

a) Instalação de sensores de vazamento de gás próximos às unidades condensadora e evaporadora;

b) Garantia de ventilação forçada (natural ou mecânica) para evitar o acúmulo de gases inflamáveis em áreas confinadas;

c) Emprego de componentes elétricos blindados nas proximidades do compressor;

d) Limitação da carga de refrigerante a, no máximo, 500g por circuito, conforme preveem as normas ISO 5149 e IEC 60335-2-40.

Dessa forma, é essencial que os profissionais envolvidos com sistemas que utilizam o R-600a estejam devidamente capacitados. É necessário que tenham pleno conhecimento sobre:

a) As propriedades físico-químicas do fluido;

b) Os riscos de inflamabilidade e os procedimentos de prevenção de acidentes;

c) O uso de ferramentas antifaísca, Equipamentos de Proteção Individual –

EPIs - e Equipamentos de Proteção Coletivas – EPCs - adequados;

d) As normas técnicas vigentes, como as NRs 10 e 20, ISO 5149, ABNT, ASHRAE 15/34, entre outras aplicáveis.

O R-600a apresenta-se como um fluido altamente eficiente e sustentável, com zero ODP e baixo GWP. No entanto, seu uso seguro depende da adaptação técnica do sistema e da qualificação rigorosa dos profissionais que o operam.

A negligência nesse sentido pode resultar em sérios riscos à integridade física de operadores e pessoas nas proximidades das instalações.

A simulação computacional realizada neste estudo, por meio do software CoolPack, demonstrou que o ciclo de compressão por vapor operando com R-600a proporciona um coeficiente de performance superior ao do R-22, aliado a uma menor exigência de trabalho do compressor, o que se traduz em melhor eficiência energética.

Além disso, as análises confirmam que o R-600a atende aos critérios técnicos de eficiência e sustentabilidade, destacando-se como uma alternativa promissora para aplicações em sistemas de refrigeração de pequeno porte. As simulações também evidenciaram a sensibilidade do desempenho

do sistema às variações de superaquecimento e subresfriamento, reforçando a necessidade de um dimensionamento e controle precisos.

Por fim, a comparação direta com o R-22 confirmou que o R-600a pode substituí- lo de maneira eficaz, especialmente por utilizar óleos minerais compatíveis e demandar menor esforço do compressor. Tais resultados justificam o uso crescente do isobutano em sistemas de refrigeração modernos, evidenciando seu potencial tanto para aplicações industriais quanto para pesquisas acadêmicas.

AGRADECIMENTOS

Ao PPGEM – Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Norte (IFRN)

A CAPES – A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do do Ministério da Educação do Brasil (MEC).

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. ASHRAE Handbook: Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 2017.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. Standard 15: Safety standard for refrigeration systems; Standard 34: Designation and safety classification of refrigerants. Atlanta: ASHRAE, 2019.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC. IEC 60335-2-40: Household and similar electrical appliances – Safety – Part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, airconditioners and dehumidifiers. Geneva: IEC, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. ISO 5149: Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements. Geneva: ISO, 2014. 4 v.

LEE, Y. B. Studies on the growth of the frost layer based on heat and mass transfer through porous media. 2003. Tese (Doutorado) – Seoul National University, Seoul, 2003.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO (Brasil). NR-10: Segurança em instalações e serviços em eletricidade. Brasília: MTE, 2022.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO (Brasil). NR-20: Segurança e saúde no trabalho com inflamáveis e combustíveis. Brasília: MTE, 2022.

MULTIFRIO. Cálculo de carga térmica: por que é tão importante? [S. l.]: Multifrio, 2018.

SOVIERO, P. A. O.; LAVAGNA, L. G. M. A numerical model for thin airfoils in unsteady motion. Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 332–340, 1997.

SPARROW, E. M. Forced convection heat transfer in a duct having spanwise- periodic rectangular protuberances. Numerical Heat Transfer, v. 3, p. 149–167, 1980.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. The Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer. Nairobi: UNEP, 2022

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. Kigali Amendment to the Montreal Protocol: status of ratification and implementation. Nairobi: UNEP, 2024a.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. Report of the Thirteenth Meeting of the Parties to the Kigali Amendment (MOP-13), Bangkok, October 2024. Nairobi: UNEP, 2024b.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Bonn: UNFCCC, 1998

RESENDE, W. S., BARBOSA, C. R. F., SCHAFER, S. I., LIMA, Á. A., BARBOSA JR.,

C. R. F. E GUERRA, A. R. O. “Projeto De Sistema de Refrigeração Didático para Geração de uma Pista de Gelo- Ice Rink: Parte 1”. In Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. ABCM, Natal, Brasil. Vol. 1, 2024.

RESENDE, W. S., BARBOSA, C. R. F., SCHAFER, S. I., LIMA, Á. A., BARBOSA JR.,

C. R. F. E GUERRA, A. R. O. “Projeto De Sistema de Refrigeração Didático para Geração de uma Pista de Gelo- Ice Rink: Parte 2”. In Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. ABCM, Natal, Brasil. Vol. 1, 2024.

Capítulo 5

10.37423/251110432

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DE UM HELIOSTATO PLANO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM FORNO SOLAR CONSTRUÍDO COM MATERIAIS REAPROVEITADOS

Arthur Souza Lyra — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Luiz Guilherme Meira de Souza — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Wertson da Silva Resende — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise experimental do comportamento térmico de um forno solar construído com materiais reutilizados, com foco na comparação entre os modos de operação com e sem o uso de um espelho plano como heliostato refletor. O estudo foi conduzido a partir da montagem e instrumentação de um protótipo em escala real, utilizando sensores de temperatura e um sistema de aquisição de dados, data logger, para registrar os parâmetros de aquecimento interno ao longo do tempo. Os testes foram realizados em condições de céu limpo, durante o horário de maior incidência solar. Os resultados mostraram que o uso do heliostato contribuiu significativamente para a elevação da temperatura máxima atingida e para a aceleração do aquecimento do forno, demonstrando seu impacto positivo no desempenho térmico. A utilização de materiais recicláveis mostrou-se viável e eficaz para aplicações de baixo custo, reforçando o potencial do forno solar como tecnologia sustentável e acessível.

PALAVRAS-CHAVE: Energia solar, Forno solar, Heliostato, Materiais recicláveis, Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes alternativas de energia tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionada por preocupações ambientais, esgotamento de recursos não renováveis e crescente demanda por soluções sustentáveis (KALOGIROU, 2004).

Dessa forma, a energia solar se destaca como uma das mais promissoras, por ser limpa, abundante e acessível em diversas regiões do planeta, especialmente em países de clima tropical como o Brasil.

Segundo Duffie e Beckman (2013), o dimensionamento e a análise do desempenho de sistemas solares térmicos requerem o entendimento das variáveis meteorológicas, das propriedades ópticas dos coletores e das condições de operação, aspectos fundamentais para o desenvolvimento de tecnologias de aquecimento eficientes.

Dentre as aplicações diretas da energia solar, a cocção de alimentos por meio de fornos solares apresenta-se como uma alternativa viável ao uso de combustíveis fósseis ou biomassa, sobretudo em comunidades de baixa renda ou áreas remotas sem acesso regular à energia elétrica ou ao gás de cozinha (MÜLLER; KALTSCHMITT, 2012).

Além disso, Teske et al. (2019) apontam que a transição para 100% de energias renováveis é essencial para o cumprimento das metas do Acordo de Paris, sendo a energia solar um elemento- chave nesse processo, o que reforça a importância de estudos que ampliem sua aplicabilidade em soluções de baixo custo e fácil implementação.

Estudar o comportamento térmico desses sistemas em diferentes condições contribui para a difusão dessa tecnologia e seu aperfeiçoamento prático. O foco do estudo está na comparação entre esses dois modos de operação, avaliando a influência direta da reflexão solar sobre o comportamento térmico do sistema.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar experimentalmente, em escala real e sob condições de radiação solar natural, o desempenho térmico de um forno solar construído com materiais reutilizados, comparando sua operação com e sem o uso de um espelho plano atuando como heliostato. Busca-se quantificar o impacto da concentração solar sobre a elevação da temperatura interna, o tempo de

aquecimento, a uniformidade térmica e a eficiência do sistema, contribuindo para a avaliação de soluções de baixo custo e alta viabilidade para aplicações domésticas, comunitárias e educacionais em regiões de elevada disponibilidade solar.

1.2 Justificativa

A motivação para este trabalho está associada à crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis e acessíveis, principalmente em contextos de vulnerabilidade social e regiões com baixa infraestrutura energética.

A energia solar, por ser abundante e gratuita, representa uma alternativa promissora para aplicações domésticas e educativas, como a cocção de alimentos por meio de fornos solares. A utilização de materiais recicláveis na construção do forno reforça o caráter sustentável do projeto, permitindo a disseminação da tecnologia com baixo custo e baixo impacto ambiental.

De acordo com Lovegrove e Stein (2020), heliostatos planos, mesmo sendo mais simples que sistemas de concentração de grande porte, podem oferecer ganhos significativos de radiação incidente em superfícies receptoras, aumentando a eficiência térmica de sistemas solares em pequena escala.

Além disso, o estudo busca contribuir para a popularização dos fornos solares ao demonstrar, de forma prática, os benefícios da inserção de elementos simples como espelhos planos para aumentar sua eficiência térmica em condições reais de uso.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O forno solar avaliado neste estudo foi construído com materiais recicláveis de baixo custo, incluindo madeira reaproveitada de uma estante de computador para a estrutura, papelão prensado para o isolamento térmico, e vidro temperado transparente de 4 mm como cobertura superior.

Os pedaços de madeira foram unidos por pregos e formaram uma caixa de 2cm de espessura, dentro do caixa tem a medida de 93cm de comprimento e 63cm de altura com 15cm de profundidade. A câmara interna foi revestida com 60 latas de alumínio cortadas, pregadas e pintadas tinta preta fosca, favorecendo a absorção da radiação solar incidente.

Para potencializar o aquecimento, foi acoplado ao sistema um espelho plano (heliostato), foi unido vários pedaços de espelho e colados numa superfície de madeira para poder refletir os raios solares, a dimensão do refletor é 87cm de comprimento x 65cm de altura, ligeiramente menor que a área do forno.

Esse refletor estava numa estrutura onde é possível inclinar para aproveitar melhor a incidência solar.

O monitoramento da temperatura foi feito com sensores de temperatura posicionados no interior do forno e no ambiente externo. As leituras foram realizadas visualmente pelo visor. Os valores de temperatura foram registrados a cada 5 minutos, permitindo análise detalhada do comportamento térmico ao longo do tempo.

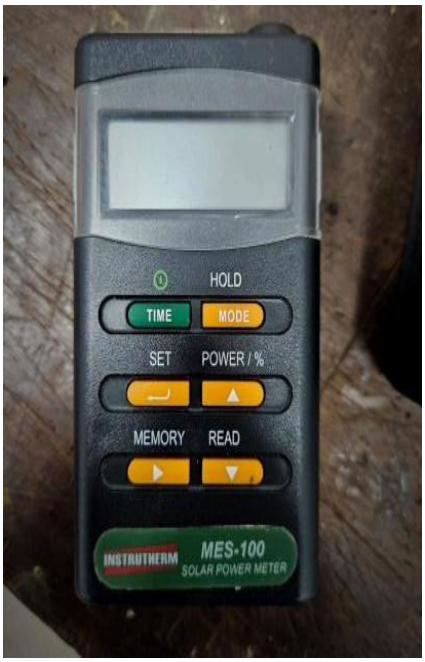
Foram conduzidos dois ensaios experimentais em dias de céu limpo: um com o forno operando sem o espelho e outro com o espelho refletor posicionado. Em ambos os casos, o forno foi exposto diretamente à radiação solar durante o período de maior irradiância durante aproximadamente 1 hora e 15 minutos.

As temperaturas máximas atingidas e o tempo de aquecimento foram analisados para avaliar o efeito da reflexão solar no desempenho térmico do sistema.

3 RESULTADOS

Os testes experimentais foram conduzidos em dois cenários distintos: com o forno solar operando sem o espelho refletor e, posteriormente, com o espelho plano posicionado manualmente para refletir a radiação solar diretamente sobre a tampa envidraçada do equipamento. Ambos os ensaios ocorreram em dias de céu limpo, no mesmo intervalo de tempo sob irradiância solar medida em torno de 900 W/m² por um medidor de irradiância solar global que será mostrado na Figura 1 a seguir.

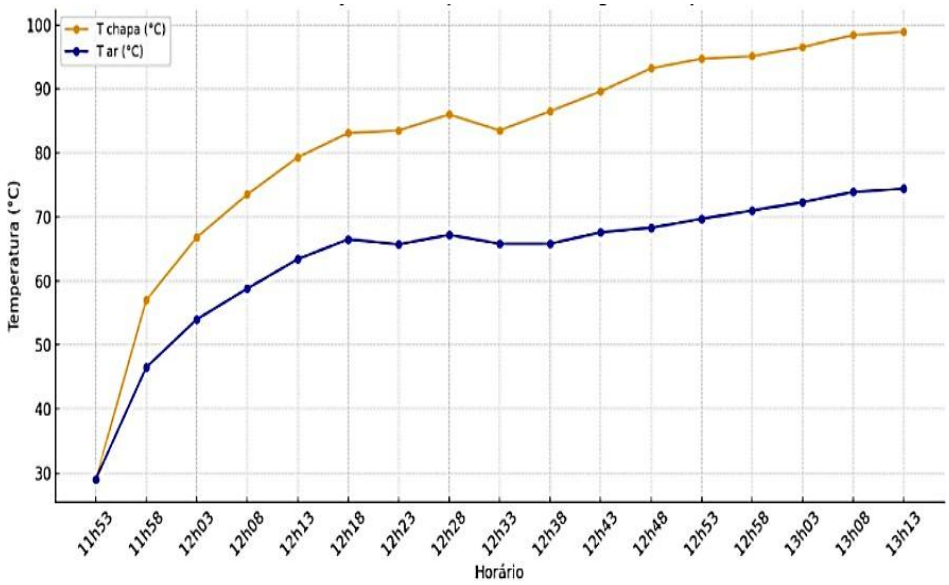
Figura 1. Medidor de irradiância solar.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 2 apresenta o gráfico da temperatura interna do forno ao longo do tempo, sem o uso do heliostato. Observa-se que o aquecimento ocorre de forma gradual, atingindo cerca de 100 °C ao final de uma hora e 15 minutos de exposição solar. Apesar da estabilidade térmica, o tempo necessário para alcançar temperaturas acima de 80 °C foi superior a uma hora.

Figura 2. Evolução da temperatura do forno sem heliostato.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 1 apresenta os registros experimentais das temperaturas internas do forno solar, obtidos durante os ensaios. Foram monitoradas duas variáveis distintas: a temperatura da chapa e a temperatura do ar. A temperatura da chapa corresponde à leitura feita pelo termopar fixado no centro da base interna do forno, diretamente sobre a superfície metálica. Já a temperatura do ar foi medida por um segundo sensor, suspenso no interior da câmara térmica, de forma que não tocasse em nenhuma superfície sólida, registrando assim a temperatura média do ar confinado no interior do forno.

Essa diferenciação entre as medições permite uma análise mais precisa do comportamento térmico do sistema, separando os efeitos da condução térmica direta na superfície da chapa daqueles da convecção natural e do aquecimento volumétrico do ar interno.

Tabela 1. Temperaturas e irradiâncias medidas sem heliostato.

Horário	T_{chapa} (ºC)	T_{ar} (ºC)	Irradiância (W/m^2)
11h53	29,0	29,0	860,0
11h58	57,0	46,5	860,0
12h03	66,8	54,0	850,0
12h08	73,5	58,8	850,0
12h13	79,3	63,4	860,0
12h18	83,1	66,5	865,0
12h23	83,5	65,7	865,0
12h28	86,0	67,2	870,0
12h33	83,5	65,8	870,0
12h38	86,5	65,8	875,0
12h43	89,6	67,6	875,0
12h48	93,2	68,3	880,0
12h53	94,7	69,7	885,0
12h58	95,1	71,0	897,0
13h03	96,5	72,3	897,0
13h08	98,4	73,9	890,0
13h13	98,9	74,4	880,0

Fonte: Autor (2025).

A Figura 3 mostra o forno solar durante o teste realizado com o uso do heliostato. Nessa configuração, foram utilizados quatro termopares para monitoramento da temperatura, enquanto no teste sem o heliostato a medição foi realizada em apenas dois pontos: no ar interno e na chapa central da base do forno.

Figura 3. Forno exposto ao sol com heliostato.



Fonte: Autor (2025).

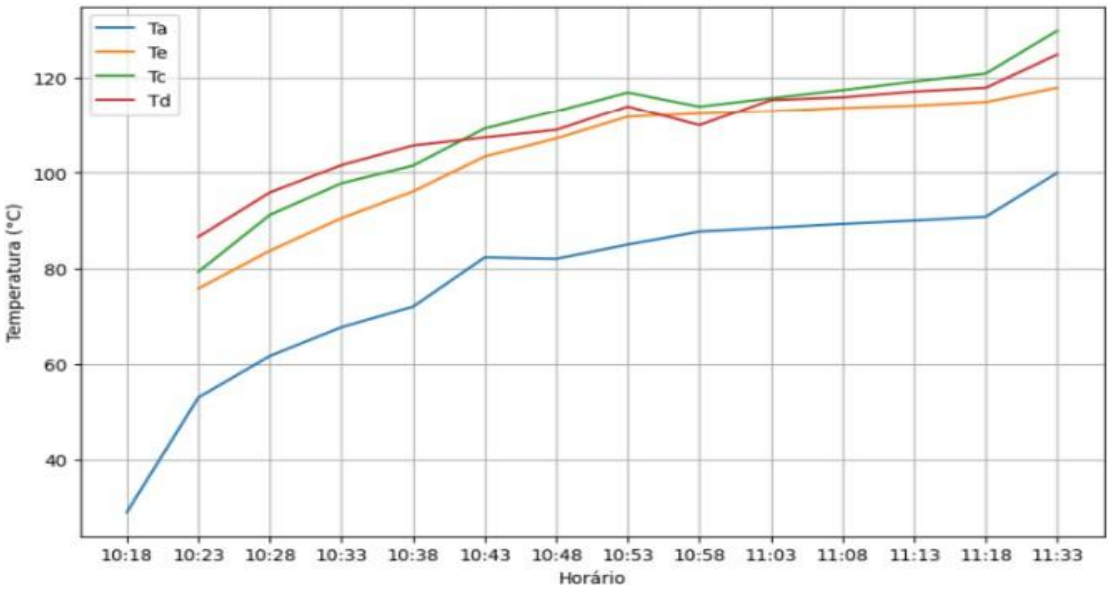
Na Figura 4, é exibido o comportamento térmico do forno sob as mesmas condições, mas com o espelho plano refletindo a radiação solar para o interior do sistema. Nota-se uma elevação mais rápida da temperatura, que chegou a marcar 130 °C em aproximadamente 70 minutos.

Foram monitorados quatro pontos distintos no interior do forno: Ta, correspondente à temperatura do ar, medida com o sensor suspenso no centro da câmara; Te, temperatura da base do forno no lado esquerdo; Tc, temperatura no centro da base metálica; e Td, temperatura do lado direito da base.

Essa distribuição de sensores permitiu analisar a uniformidade térmica no interior do forno durante o experimento.

O ganho térmico foi evidente desde os primeiros minutos de exposição, demonstrando que a concentração solar promovida pelo espelho contribuiu significativamente para acelerar o aquecimento e elevar o pico térmico do forno.

Figura 4. Evolução das temperaturas do forno com heliostato.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 2 a seguir apresenta os valores registrados durante o teste com o uso do heliostato, correspondentes às temperaturas medidas nos quatro pontos distintos do forno solar.

Tabela 2. Medida das temperaturas com heliostato.

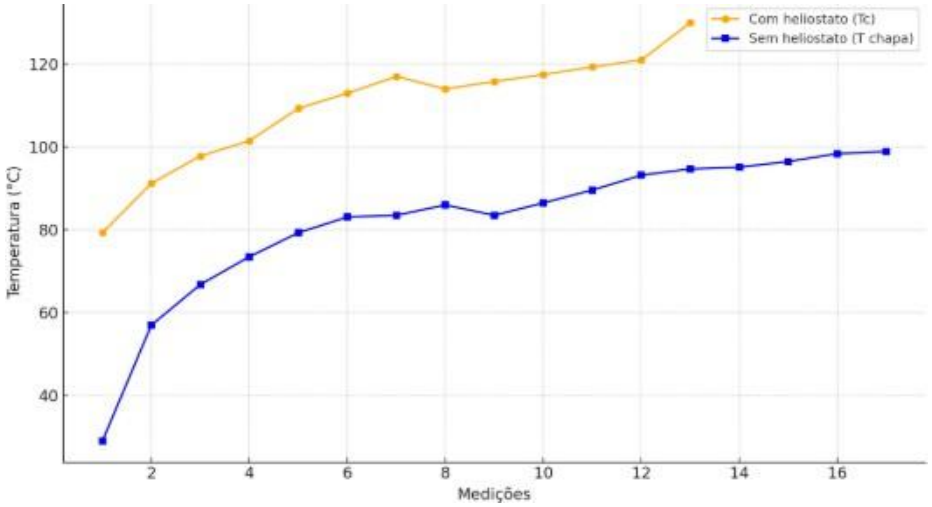
Horário	Ta (°C)	Te (°C)	Tc (°C)	Td (°C)
10h18	29.0	—	—	—
10h23	53.0	75.8	79.3	89.6
10h28	61.7	83.7	91.2	95.9
10h33	67.7	90.5	97.8	101.6
10h38	72.0	96.1	101.5	105.7
10h43	82.3	103.4	109.3	107.4
10h48	82.0	107.2	113.0	109.0
10h53	85.0	111.8	117.0	114.0
10h58	87.7	112.5	114.0	114.7
11h03	88.5	113.0	115.8	115.4
11h08	89.3	113.7	117.5	116.0
11h13	90.0	114.2	119.3	117.2
11h18	90.8	115.0	121.0	118.0
11h33	100	118.0	130.0	125.0

Fonte: Autor (2025).

A Figura 5 apresenta a comparação entre os dados de temperatura registrados nos testes com e sem o uso do heliostato. A curva laranja refere-se à temperatura central da base do forno Tc durante o teste com heliostato, enquanto a curva azul representa a temperatura da chapa inferior Tchapa no teste sem o espelho refletor.

Observa-se que o uso do heliostato resultou em um aquecimento mais rápido e em temperaturas máximas mais elevadas ao longo do tempo.

Figura 5. Comparação entre os gráficos de temperatura.



Fonte: Autor (2025).

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo experimental demonstram que a utilização de um heliostato plano contribuiu de forma significativa para o desempenho térmico de fornos solares construídos com materiais recicláveis, elevando a temperatura máxima interna de aproximadamente 100 °C para cerca de 130 °C e reduzindo o tempo necessário para atingir 80 °C de mais de 60 minutos para menos de 45 minutos.

Esses ganhos confirmam as observações teóricas de Kalogirou (2004) sobre o papel da concentração solar no aumento da eficiência térmica e corroboram o potencial dos sistemas de baixo custo discutidos por Müller e Kaltschmitt (2012) para aplicações domésticas e comunitárias.

A medição da temperatura em múltiplos pontos da base do forno permitiu verificar uma distribuição térmica relativamente uniforme, com variação máxima de 7 °C entre as extremidades, reforçando a

eficácia do isolamento e da absorção interna. Do ponto de vista prático, o uso de materiais reaproveitados e de baixo custo, associado a um elemento simples de concentração solar, apresenta potencial de aplicação em comunidades de baixa renda e em projetos educacionais voltados para energias renováveis, alinhando-se às perspectivas de transição energética propostas por Teske et al. (2019).

Recomenda-se, para trabalhos futuros, investigar a influência de diferentes ângulos de inclinação do heliostato, a utilização de revestimentos internos com maior absorvidade e a avaliação do desempenho em períodos de menor irradiância ou sob condições climáticas variáveis, ampliando assim a aplicabilidade, a robustez e a eficiência desta tecnologia.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, v. 30, n. 3, p. 231–295, 2004.

LOVEGROVE, K.; STEIN, W. Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications. 2. ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2020.

MÜLLER, J.; KALTSCHMITT, M. Solar thermal energy: fundamentals, technologies and systems. In: KALTSCHMITT, M.; THEMELIS, N. J. (Ed.). Renewable Energy: Technology, Economics and Environment. Berlin: Springer, 2012. p. 287–322.

TESKE, S. et al. Achieving the Paris Climate Agreement Goals: Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for 1.5°C and 2°C. Cham: Springer, 2019.

Capítulo 6

10.37423/251110433

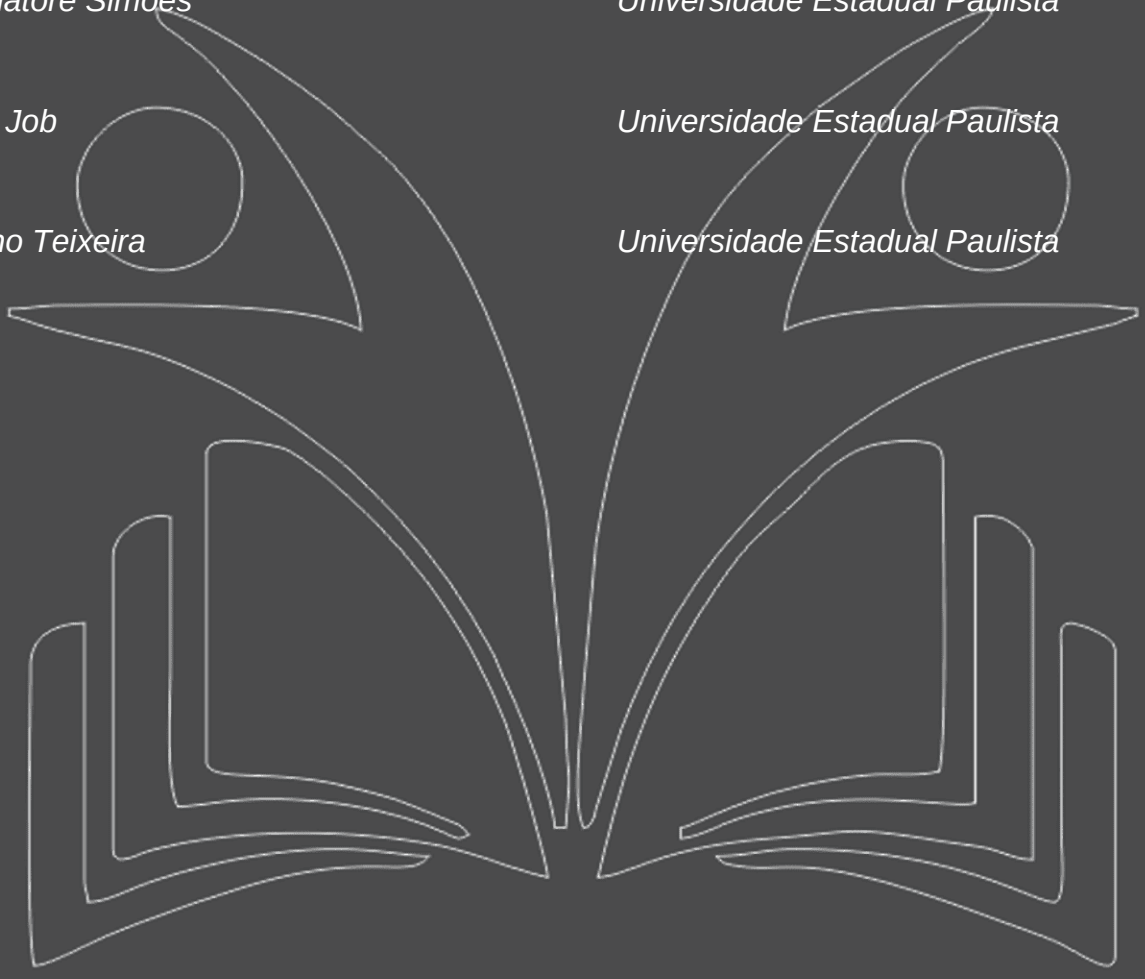
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E POSSIBILIDADES SUSTENTÁVEIS E ARQUITETÔNICAS DE REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE PÓ DE TONER EM PAVERS

Vinícius de Santi Phelippe Nunes — *Universidade Estadual Paulista*

Rebeca Delatore Simões — *Universidade Estadual Paulista*

Aldo Eloizo Job — *Universidade Estadual Paulista*

Silvio Rainho Teixeira — *Universidade Estadual Paulista*



RESUMO

Devido ao seu complexo processo de reciclagem, milhares de cartuchos de impressoras a laser, contendo resíduos de pó de toner, são descartados anualmente em aterros sanitários, uma alternativa ambientalmente inviável. A caracterização química, mineralógica e morfológica foi realizada para o pó de toner, sendo avaliado o seu potencial de aplicação em blocos de concreto intertravados, também conhecidos como pavers. A caracterização do resíduo pó de toner foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios X, FTIR e análise por microscopia eletrônica de varredura. Com as informações obtidas, produziu-se corpos de prova a partir da dosagem em 1:2:3 (cimento:areia:brita), onde substituiu-se a areia por resíduos de pó de toner em três diferentes porcentagens (0, 3 e 7%). Propriedades tecnológicas como absorção de água, resistência à compressão, lixiviação e microestrutura óptica foram determinadas. Uma simulação arquitetônica em 3D foi realizada, de modo a verificar a influência destes resíduos em diferentes cenários urbanos. Os resultados mostram que a presença de resíduos de pó de toner resultou em alterações nas características do paver. Com valores de propriedade de compressão mecânica de 35,73 MPa, o traço com 3% de pó de toner demonstrou ser uma opção viável para a produção de pavers, proporcionando um aspecto arquitetônico diferenciado aos blocos. Portanto, representa uma alternativa sustentável para a destinação deste resíduo e fortalece práticas ambientalmente responsáveis na indústria da construção civil.

Palavras-chave: Arquitetura; Construção; Paver; Pavimentos; Pó de Toner; Resíduos.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por infraestrutura, impulsionada pelo aumento populacional e pelo desenvolvimento econômico, tem se intensificado tanto em países desenvolvidos quanto em nações em desenvolvimento [1]. Esse crescimento na indústria da construção civil pode impactar as mudanças climáticas globais, o consumo de energia e os domínios econômico e social [2]. Além disso, esse aumento leva a um esgotamento dos recursos naturais não renováveis, gerando preocupações sobre o desenvolvimento sustentável [3].

Atualmente, vários estudos são conduzidos e usados para inspirar o desenvolvimento de novos materiais através da utilização de diversos tipos de resíduos. Impressoras a laser, por exemplo, contribuem para a geração de resíduos, devido ao descarte incorreto de cartuchos de toner [4]. Dados revelam que mais de 500 milhões de cartuchos de toner são descartados mundialmente todos os anos em aterros sanitários, e os resíduos de pó de toner, presentes nesses cartuchos, representam uma ameaça ambiental, uma vez que são potencialmente tóxicas e não degradáveis [5], [6].

Com cerca de 10 µm de diâmetro, as partículas de pó de toner contaminam o meio ambiente por conta da presença de elementos como negro de fumo e dióxido de titânio em sua composição [7], considerados como “possivelmente cancerígenos para humanos” pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) [8]. Além disso, apresenta desafios para a reciclagem, sendo classificado como um resíduo de difícil e perigoso manuseio devido à sua elevada resistência à água, ao calor e a esforços mecânicos, bem como à presença de grupos funcionais orgânicos — como carboxilas, hidroxilas e carbonilas — que contribuem para sua inflamabilidade e aumentam o risco de explosões durante o processamento [4]. Sua composição química complexa varia significativamente entre diferentes marcas e fabricantes, o que impede a homogeneização dos resíduos e demanda processos rigorosos de triagem para qualquer tentativa de reaproveitamento [9].

Informações provenientes de cooperativas e associações voltadas à coleta de resíduos eletrônicos apontam para um desinteresse comercial na separação adequada desse material, uma vez que o pó de toner geralmente é recebido misturado a impurezas e resíduos de múltiplos fabricantes, o que inviabiliza tecnicamente sua reciclagem [10]. Como resultado, a combinação entre os elevados custos operacionais e a complexidade técnica envolvida faz com que o descarte em aterros sanitários continue sendo a prática predominante, agravando os impactos ambientais associados [6].

Nesse cenário, o resíduo de pó de toner, embora ainda pouco explorado na literatura, revela-se uma alternativa promissora para aplicações materiais da construção civil [11]. Uma opção são os blocos de concreto intertravado, também chamados de pavers, que têm se consolidado como uma alternativa construtiva sustentável frente aos materiais convencionais, sobretudo pela possibilidade de incorporar em sua matriz resíduos em proporção parcial ou total [12]. A substituição de insumos como a areia por resíduos sólidos tem sido investigada, visando à redução dos impactos ambientais ao longo da cadeia produtiva da construção civil [13], [14].

Para além das vantagens técnicas e ambientais, a aplicação de pavers também pode ser otimizada por meio de simulações visuais, que se configuram como uma ferramenta estratégica no planejamento urbano e arquitetônico [15]. Essas representações permitem antever o resultado estético final, selecionar cores, texturas e padrões de assentamento adequados, além de facilitar a comunicação entre projetistas, clientes e executores [16].

O presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial de aplicação do resíduo de pó de toner na produção de blocos de concreto intertravado, com ênfase em seus aspectos arquitetônicos e sustentáveis. Foram fabricadas e analisadas as propriedades física, química e mecânica de amostras com diferentes teores de pó de toner (0%, 3% e 7%), visando compreender suas implicações estéticas, estruturais e ambientais. Este trabalho buscou contribuir para a inovação de materiais na construção civil, aliando funcionalidade, estética e responsabilidade ambiental.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

2.1.1 Cimento

Foi utilizado o cimento CPV-ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), da marca Votorantim Cimentos. O CPV-ARI possui propriedades que proporcionam maior resistência mecânica nas primeiras idades, o que é fundamental para a produção de pavers, que requerem desforma rápida [20].

2.1.2 Agregados

Como agregado miúdo, utilizou-se areia média de origem natural, classificada como quartzosa, com diâmetro máximo de 2,36 mm, em conformidade com os limites granulométricos estabelecidos pela norma NBR 7211/2022 [21]. O agregado graúdo empregado foi a brita 0, com dimensão nominal de 9,5 mm, também atendendo aos requisitos granulométricos da mesma norma.

2.1.3 Resíduos de Pó de Toner

O resíduo de pó de toner utilizado foi fornecido por uma empresa de assistência técnica de cartuchos, localizadas no município de Presidente Prudente, estado de São Paulo, Brasil. Para a produção dos blocos de concreto intertravado, esse material foi previamente caracterizado quimicamente no Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos (LCGRS) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), por meio de ensaio de Fluorescência de Raios X, realizado com o equipamento Shimadzu, modelo XRF–700. A Tabela 1 apresenta a composição química do material, revelando ser composto majoritariamente por Fe_2O_3 (73,007%) e SiO_2 (19,526%). Destaca-se também a presença de óxido de cromo (Cr_2O_3), com 0,228%.

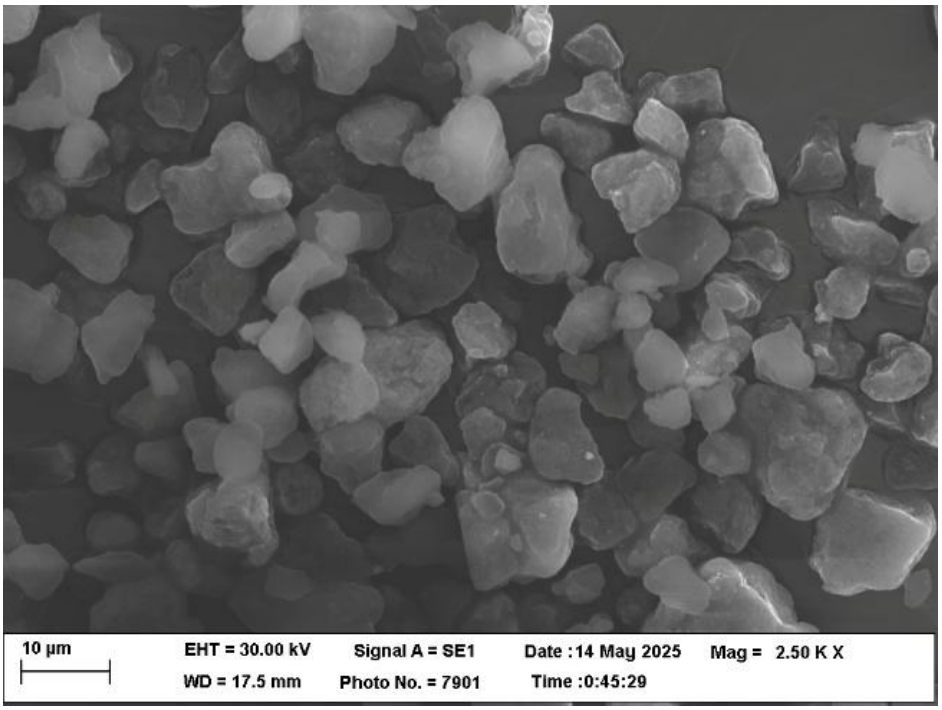
Tabela 1 – Fluorescência de Raios X do pó de toner (%)

Composição química	Pó de Toner
Fe_2O_3	73,007
SiO_2	19,526
SrO	2,501
TiO_2	1,836
SO_3	1,344
CaO	0,916
Cr_2O_3	0,228
Outros	1,642

Fonte: os autores

A Figura 1 apresenta a micrografia de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos resíduos de pó de toner obtida com aumento de 1000x. Os resultados confirmam os dados relatados na literatura, evidenciando partículas com diâmetro médio em torno de 10 µm [4]. As imagens obtidas são semelhantes às registradas por Santos (2019) [10], que identificou a predominância de resinas poliméricas nas partículas de toner, compostas principalmente por carbono (C), Oxigênio (O), Titânio (Ti) e Sílica (Si). Além disso, observa-se uma morfologia superficial irregular, característica também descrita por Hammani et al. (2019) [17].

Figura 1 – Microscopia Eletrônica de Varredura de Resíduos de Pó de Toner

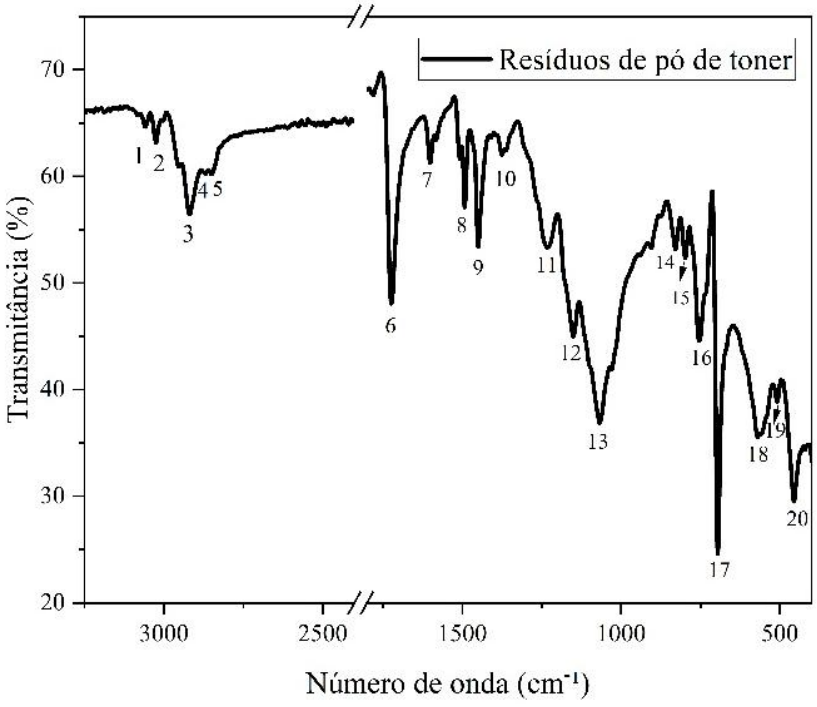


Fonte: Os autores (2025).

Outro fator relevante foi visualizado no ensaio de Espectroscopia Vibracional de Absorção no Infravermelho por Transformada de Fourier no modo ATR-FTIR, com um equipamento modelo Frontier, da marca PerkinElmer, equipado com módulo ATR de cristal de diamante. A Figura 2 apresenta o ensaio de FTIR/ATR para o resíduo de pó de toner. Através de medidas feitas no intervalo de 400 a 4000 cm-1 com resolução de 2 cm-1 e 120 scans, revelou-se uma banda importante em 2918 cm-1, referente às ligações C-H dos grupos metila e CH2 presentes na cadeia carbônica do negro de fumo, substância que está presente na composição do pó de toner, como relatado também por Pirela et al. (2015) [18]. Como a molécula de negro de fumo contém muitos anéis benzênicos, bandas em 1723, 1601 e 1492 cm-1 referentes aos estiramentos da ligação C=O e vibrações de C=C, respectivamente, são encontradas no

espectro do pó de toner, comuns em compostos aromáticos. A presença de cromo no material foi evidenciada pelo aparecimento da banda em 456 cm^{-1} (banda 20) referente a ligação Cr-C [19].

Figura 2 – Espectros Vibracionais de Absorção no Infravermelho para as amostras de resíduo de pó de Toner



Fonte: Os autores (2025).

Nota: 1 = 3059; 2 = 3025; 3 = 2918; 4 = 2869; 5 = 2847; 6 = 1723; 7 = 1601; 8 = 1492; 9 = 1450; 10 = 1376; 11 = 1233; 12 = 1151; 13 = 1067; 14 = 829; 15 = 798; 16 = 754; 17 = 695; 18 = 571; 19 = 508; e 20 = 456.

2.2 Métodos

2.2.1 Produção dos blocos de concreto intertravado

A produção de blocos de concreto intertravado consistiu na substituição da areia média por diferentes porcentagens de resíduos de pó de toner (0, 3 e 7%), com uma dosagem em massa de 1 : 2,66 : 4,74 : 0,48 (cimento : areia : brita : água). A Tabela 2 apresenta os traços desenvolvidos.

Tabela 2 –Traços com resíduo de pó de toner

Traço	Resíduo de pó de toner (%)	Massa (kg) (C : A : B : R : Água)
CP1	0%	1 : 2,66 : 4,74 : 0 : 0,64
CP2	3%	1 : 2,58 : 4,74 : 0,08 : 0,64
CP3	7%	1 : 2,47 : 4,74 : 0,19 : 0,64

Fonte: Os autores (2025).
Nota: C = cimento; A = areia; B = brita; R = resíduo

Os corpos de prova (CP) foram moldados artesanalmente, com os materiais homogeneizados em betoneira por 5 minutos e despejados em fôrmas de PVC previamente lubrificadas com óleo mineral. Em seguida, as fôrmas foram colocadas em mesa vibratória por 2 minutos para eliminar bolhas de ar. Após 3 dias, os CPs foram desenformados e armazenados em ambiente seco, arejado e protegido de sol e chuva, a 30 ± 2 °C, pelos períodos de cura de 28 e 90 dias, conforme apresenta a Figura 3.

Figura 3 – Pavers produzidos



Fonte: Os autores (2025).

Ao todo, foram produzidos 54 corpos de prova, 18 de cada traço. Cada bloco possui as dimensões de 20x10x6 cm (comprimento x largura x espessura), resultando em um volume interno de concreto de 1200 cm³.

2.2.2 Resistência a Compressão Mecânica

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme a norma NBR 9781/2013 [22], norma que estabelece os critérios de aprovação dos blocos. Os corpos de prova foram previamente saturados em água a (23 ± 5) °C por 24 horas. A compressão foi aplicada com carga constante de 550 N/s, utilizando a prensa EMIC CCE 1MN, no Laboratório de Materiais de Construção da Toledo Prudente Centro

Universitário. A resistência à compressão (MPa) foi calculada dividindo-se a carga de ruptura (N) pela área do paver (mm²), multiplicada pelo fator de correção p = 0,95, conforme especificado na norma. A resistência estimada foi obtida pela média dos valores individuais, conforme indicado na Equação 1.

$$fpk,est = fp - t * \sqrt{\frac{\Sigma(fp-fpi)^2}{n-1}} \quad \text{(Equação 01)}$$

Onde,

fp é a resistência média das peças (MPa);

fpi é a resistência individual das peças (MPa);

fpk,est é a resistência característica estimada à compressão (MPa);

n é o número de peças da amostra;

t é o coeficiente de Student, em função do tamanho da amostra [22].

O ensaio foi realizado aos 28 e 90 dias de cura, utilizando seis corpos de prova por traço em cada período de ruptura.

2.2.3 Absorção de Água

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme a norma NBR 9781/2013 [22], sendo o segundo e último exigido para aprovação dos blocos. Os testes foram realizados aos 28 e 90 dias de cura, com três corpos de prova por traço em cada período. As amostras foram submersas em água por 24h, com pesagem posterior a cada 2h até que duas medições consecutivas apresentassem variação inferior a 0,5%. Em seguida, os corpos de prova foram secos em estufa a 110 ± 5 °C por 24h, repetindo-se a pesagem nas mesmas condições. O ensaio foi conduzido no Laboratório de Análises de Resíduos de Agrotóxicos (LARA) – FCT/UNESP, em Presidente Prudente. Os valores individuais de absorção de água, expressos em porcentagem, foram obtidos pela Equação 2.

$$A = \frac{(M2 - M1)}{(M1 * 100)} \quad \text{(Equação 02)}$$

Onde:

A é a absorção de água em porcentagem (%),

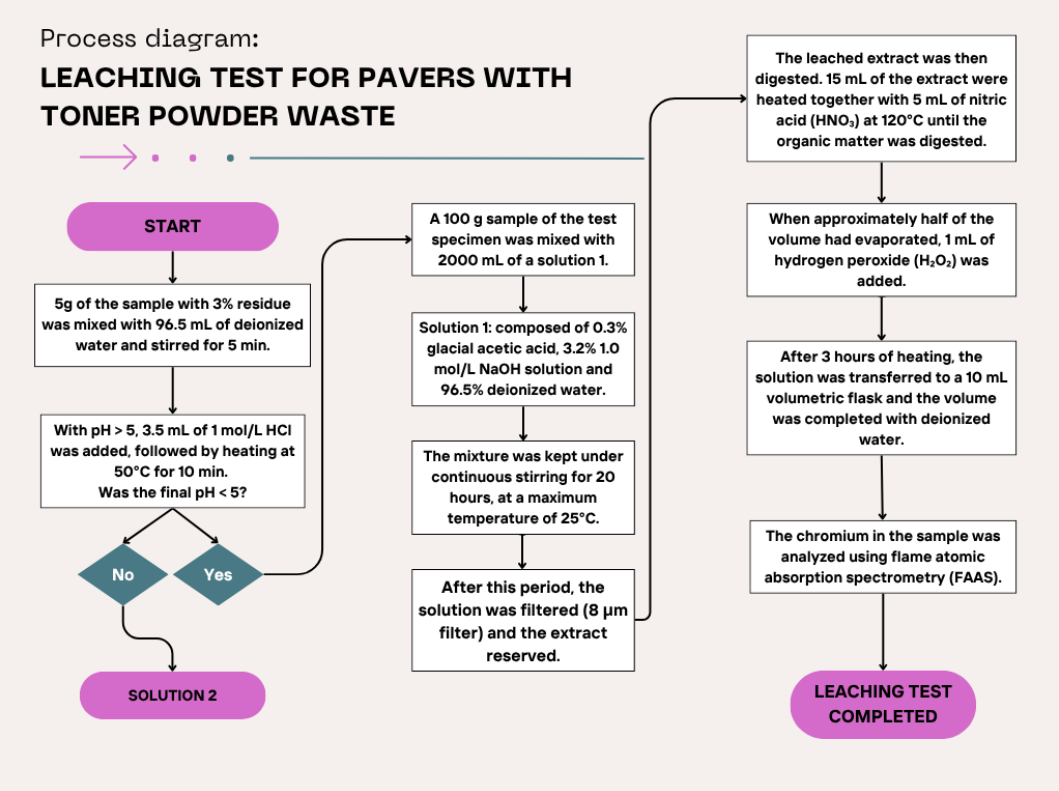
M1 é a massa do tijolo seco em estufa (kg) e

M2 é a massa do tijolo saturado (kg).

2.2.4 Ensaio de Lixiviação

Para avaliar a toxicidade dos pavers com resíduo de pó de toner, foi realizado o Ensaio de Lixiviação conforme a norma NBR 10005/2004 [23] e o método USEPA SW 846 (1311) [24]. A Figura 4 apresenta o diagrama dos ensaios que foram conduzidos no LTBA (UNESP – Presidente Prudente) e no Laboratório Multiusuário da UNESP, campus Tupã.

Figura 4 – Diagrama do ensaio de lixiviação



Fonte: Os autores (2025).

2.2.5 Microscopia Óptica (MO)

Utilizando-se um microscópio digital modelo DM7, da marca Shiri, com pixel máximo do vídeo de 960P e tamanho óptico da lente de 1/6, realizou-se o ensaio de Microscopia Óptica (MO) em fragmentos

das peças após o ensaio de compressão mecânica. O ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Borrachas e Aplicações (LTBA) localizado no Núcleo Morumbi da Universidade Estadual Paulista, em Presidente Prudente – SP, para todos os traços curados com 28 dias, com aproximações de 10x na parte interna e externa do material.

2.2.6 Simulação arquitetônica

Para simular a aplicação dos pavers na prática, utilizou-se softwares de modelagem de informações de construção que permitem projetar, construir e gerenciar edificações. Para modelar os ambientes em que os pavers seriam inseridos, utilizou-se o software Revit 2020, da marca Autodesk. Para realizar a renderização destes cenários modelados, utilizou-se o software Lumion 13, da empresa Lumion. Por fim, detalhes foram realçados com o auxílio da versão 2025 do Photoshop, da marca Adobe.

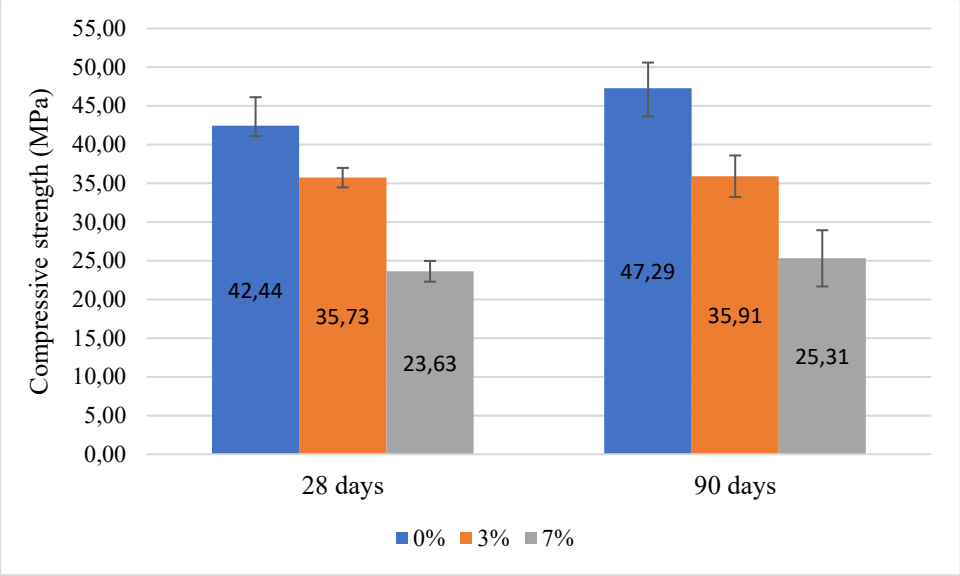
Os softwares utilizados foram de acesso restrito, adquiridos com recurso próprio, para desenvolver quatro diferentes possibilidades de aplicação do material. Em cada possibilidade, uma imagem em 3D foi renderizada para apresentar a visão de uma obra concluída com este material.

3 RESULTADOS

3.1 Resistência a Compressão Mecânica

A Figura 5 apresenta os resultados de resistência à compressão mecânica (fpk) dos pavers com diferentes teores de substituição de areia por resíduo de pó de toner. Observa-se que essa substituição influenciou o desempenho mecânico do concreto. Os traços modificados com 3% e 7% de resíduo apresentaram resistências inferiores ao traço de referência (0%), indicando que a presença do pó de toner interfere na formação da matriz cimentícia. Segundo Zhao et al. (2022) [25], o pó de toner dificulta a formação dos géis C-S-H (silicatos de cálcio hidratados), responsáveis por grande parte da resistência e durabilidade do cimento hidratado, o que retarda o processo de hidratação e compromete o desempenho do concreto.

Figura 5 – Resistência a compressão mecânica (fpk)



Fonte: Os autores (2025).

A norma NBR 9781/2013 [22] estabelece que pavers com 6 cm de espessura devem apresentar resistência à compressão mínima de 35 MPa após 28 dias de cura. Entre os traços analisados, apenas os blocos sem resíduo (0%) e com 3% de pó de toner atenderam a esse requisito, alcançando, respectivamente, 42,44±3,69 MPa e 35,73±1,26 MPa. Aos 90 dias, o traço de referência (0%) obteve 47,29±3,31 MPa, o traço com 3% registrou 35,91±2,69 MPa, enquanto o traço com 7% atingiu apenas 25,31±3,63 MPa, apresentando uma queda de aproximadamente 46% em relação ao controle. Esses dados indicam que teores mais elevados de pó de toner comprometem a formação da matriz cimentícia e o ganho de resistência ao longo do tempo.

Para verificar a possibilidade de resultados superiores aos apresentados pelo traço com 3% de resíduo, foi produzido um traço com 4% de resíduo de pó de toner. Aos 28 dias, o traço apresentou resultado de 30,35±0,93 MPa. Já aos 90 dias, o resultado foi de 33,77±2,68 MPa. Ambos os resultados ficaram abaixo de mínimo estabelecido pela NBR 9781/2013.

3.2 Absorção de água

A Tabela 3 apresenta os índices de absorção de água dos pavers com diferentes teores de resíduo de pó de toner, analisados após 28 e 90 dias de cura. Em todos os traços avaliados, observou-se uma tendência de redução da absorção com o avanço do tempo. Esse comportamento está associado à diminuição da porosidade da matriz cimentícia, promovida pelo prolongamento da cura, o que

favorece a continuidade das reações de hidratação do cimento e resulta em uma estrutura mais densa e com menor permeabilidade à água [26].

Tabela 3 – Valores da absorção de água em % (média ±dp)

Traço	28 Dias	90 Dias
CP1	4,84±0,04	4,75±0,58
CP2	5,95±0,10	4,28±0,27
CP3	6,38±0,22	5,12±0,22

Fonte: Os autores (2025).

Entre todas as dosagens estudadas, somente o traço com 7% de resíduos não atendeu aos requisitos normativos da norma NBR 9781/2013 [22], ficando acima do limite máximo de 6% aos 28 dias (6,38±0,23%). Contudo, com um prazo maior de cura, o traço conseguiu atingir a meta aos 90 dias, apresentando absorção de água de 5,12±0,22%.

No entanto, o traço com 3% de resíduo destacou-se por apresentar o menor índice de absorção aos 90 dias de cura, com valor de 4,28 ± 0,27%. Esse mesmo traço também registrou a maior redução no teor de absorção ao longo do tempo, com uma queda de 28,07% entre os 28 e 90 dias, demonstrando um aprimoramento na compactação da matriz cimentícia com o avanço da cura.

O padrão de absorção de água observado nos blocos pode ser explicado pela presença de estearatos metálicos no resíduo de pó de toner, que formam uma película fina ao redor das partículas. Essa camada atua como uma barreira física, limitando a penetração de água e influenciando diretamente a porosidade e a capacidade de absorção do material [27]. Esse comportamento afeta a interação com a matriz cimentícia, prejudicando a coesão do sistema e aumentando a porosidade. Melnjak et al. (2019) destacam que substâncias com propriedades hidrofóbicas, como as resinas, representam ao menos 80% da composição do pó de toner. Essa alta concentração contribui para o comportamento hidrofóbico do concreto confeccionado [28].

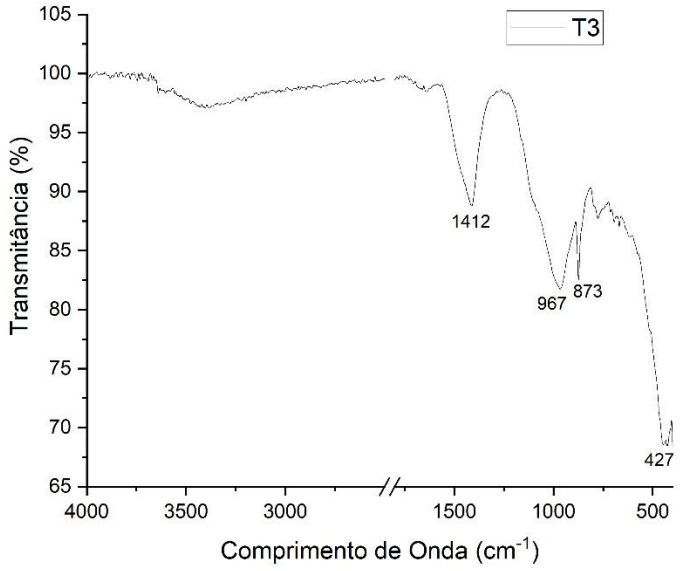
3.3 Ensaio de Lixiviação

As amostras do ensaio de lixiviação foram analisadas por espectrometria de absorção atômica para quantificar o cromo total liberado. No entanto, nenhuma das amostras apresentou presença detectável do metal, com valores inferiores ao limite de detecção do equipamento (< 0,05 mg/L),

resultado semelhante ao de Peralta, Priano e Ortega (2020), que encontraram 0,01 mg/L [11]. O ensaio foi repetido para confirmação, e os resultados permaneceram inalterados.

Esses dados indicam que apenas água e os ácidos utilizados passaram pelas amostras, com concentrações abaixo do limite de 5 mg/L estabelecido pela norma NBR 10004/2004, o que classifica os blocos como não perigosos e seguros para uso na construção civil [29]. Este resultado pode ser confirmado pelo ensaio de FTIR da amostra com 3% de resíduo, na Figura 6, onde não foi possível visualizar a banda 456 cm-1 referente ao cromo.

Figura 6 – FTIR do CP2



Fonte: Os autores (2025).

Dessa forma, confirma-se a eficácia da matriz cimentícia na imobilização do cromo, mesmo sem pré-tratamento do resíduo de toner. Conforme Newlands, Csetenyi e Zheng (2019) destacam, não há liberação de pó de toner ao longo do tempo, já que a matriz do concreto encapsula os metais, retendo substâncias potencialmente tóxicas dentro do material endurecido [30].

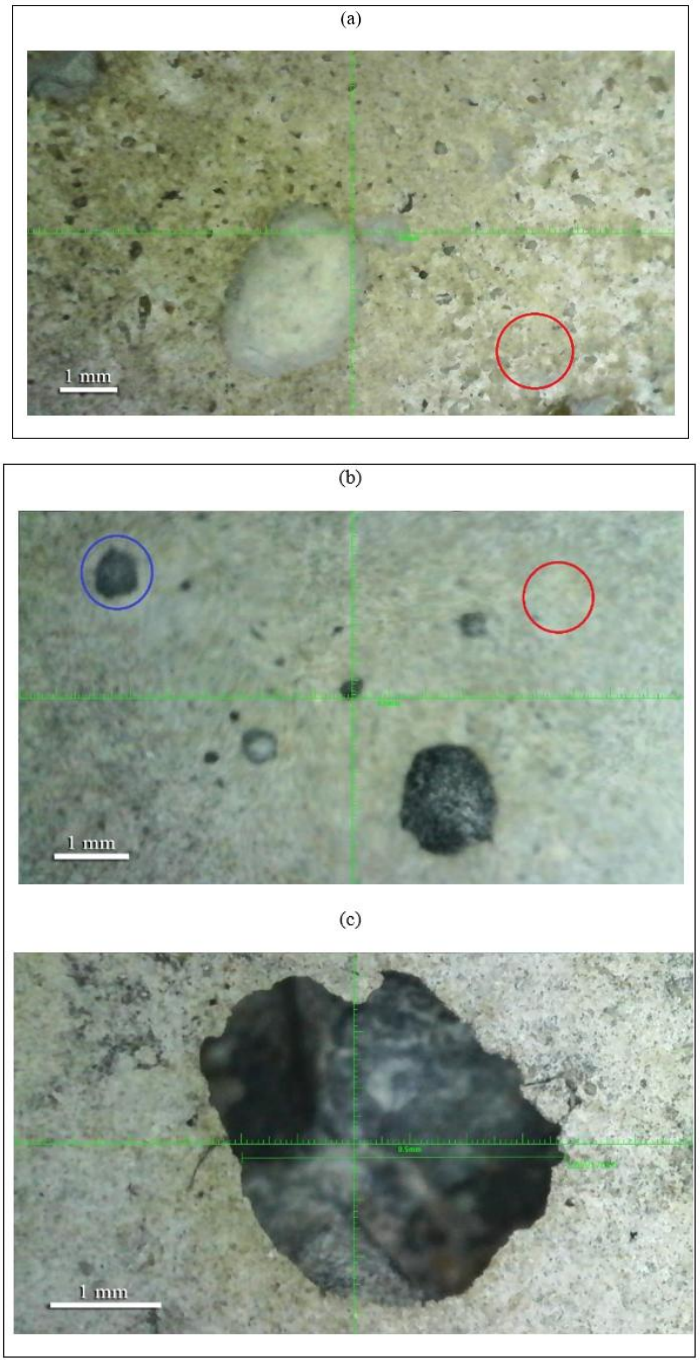
3.4 Microscopia Óptica (MO)

A análise por microscopia óptica é fundamental para avaliar a microestrutura do concreto, permitindo a identificação de defeitos, características dos agregados, qualidade da pasta de cimento e possíveis processos de deterioração. Essa técnica possibilita a observação de porosidade, fissuras, segregação

de materiais e a presença de reações como a reação álcali-agregado. Além disso, auxilia na verificação da adesão entre a matriz cimentícia e os agregados, influenciando diretamente a resistência mecânica e a durabilidade do concreto [31].

Para cada traço produzido, procedeu-se as análises de microscópica ótica do concreto com idade de 28 dias. A Figura 7 apresenta imagens dos aspectos morfológicos das superfícies externas dos seguintes traços: (a) 0% de resíduo; (b) 3%; (c) 7%, todos com 10x de ampliação.

Figura 7 – MO digital da face externa das amostras com ampliação de 10 vezes



Fonte: Os autores (2025). Nota: (a) 0%; (b) 3%; (c) 7%.

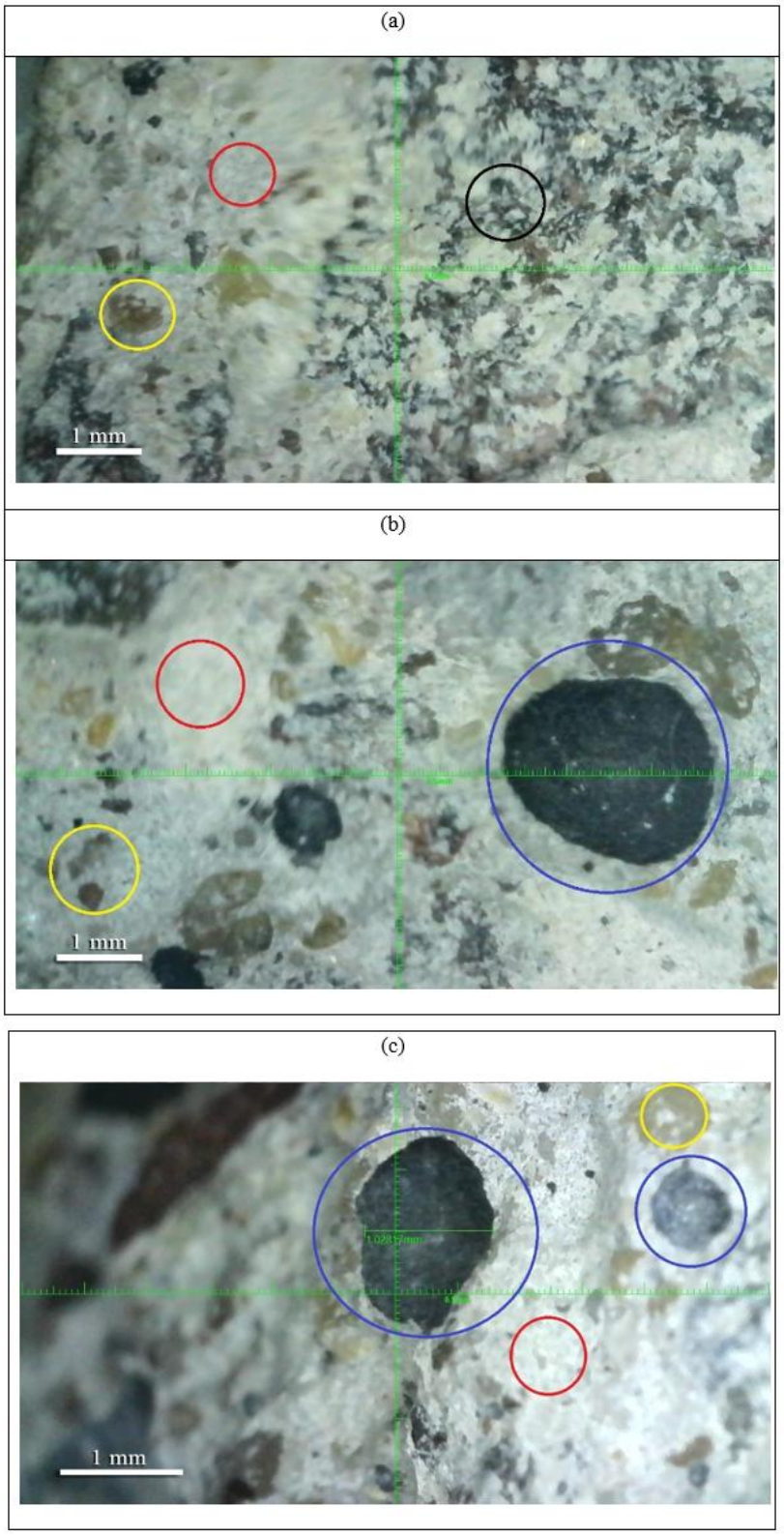
Analisando as imagens da parede externa das amostras da Figura 7 (a,b,c), a amostra de referência (Figura 7a) apresentou uma superfície regular onde não é possível identificar os agregados na matriz de cimento. Nas amostras com resíduo de toner, Figura 7 b,c, verificou-se uma pasta de concreto homogênea com aglomerações dispersas de resíduo de pó de toner.

As superfícies externas com 3 e 7% (Figura 7) apresentaram pequenas aglomerações escuras (preto) com contornos bem definidos (circulados em azul), devido ao acúmulo de resíduos de pó de toner que se formaram na superfície. O traço com 3% apresentou aglomerações com até 1,31 mm. Já na Figura 7c, encontrou-se uma aglomeração com cerca de 2,86 mm.

A Figura 7 demonstra que à medida que aumenta a porcentagem de resíduos de pó de toner no traço de concreto, é possível visualizar mudança de coloração em todo o campo visual. Inicialmente na Figura 7a, com 0% de toner, o campo visual possui uma coloração caramelo. Conforme se insere o resíduo em substituição a areia, verifica-se uma tendência para campos visuais cada vez mais acinzentados. Isto significa que apesar de existir as aglomerações de toner nas imagens da Figura 7 (b-c), existe uma dispersão física generalizada do toner na matriz cimentícia.

A Figura 8 demonstra os aspectos morfológicos das superfícies internas dos seguintes traços: (a) 0% de resíduo; (b) 3%; e (c) 7%, com 10x de ampliação.

Figura 8 – MO digital interna das amostras com ampliação de 10 vezes



Fonte: Os autores (2025). Nota: (a) 0%; (b) 3%; (c) 7%.

Através da Figura 8 é possível observar estruturas homogêneas e bem definidas entre os materiais constituintes. As microscopias possibilitaram identificar a pasta de cimento, região mais clara, como um cinza claro, circuladas em vermelho, nas imagens, bem como a areia, grãos de cor caramelo e

circuladas em amarelo, e a brita, agregado de cor mais escura, circulado em preto. O traço controle apresentou compatibilidade entre seus componentes, proporcionando matriz homogênea sem a presença vazios. É possível ver no círculo preto, que abrange uma porção da superfície da brita, demonstra que este material possui dimensões superiores às dos demais.

Assim como visualizado na parede externas das amostras dos traços com resíduo de pó de toner, é possível observar na parte interna que o resíduo adere na composição do concreto, formando aglomerações na matriz cimentícia (círculo azul), não sendo observadas regiões com trincas nesta interface. Ainda, as imagens de MO da parte interna das amostras demonstra que, como esperado, à medida que o percentual de substituição da areia por resíduos de pó de toner aumenta, há uma tendência ao aumento da quantidade de aglomerações. Em todas as imagens de MO dos traços estudados, o maior aglomerado de resíduo de toner pode ser visualizado no traço com 3% de resíduo (Figura 8b), circulado por azul, com dimensão de 2,44 mm.

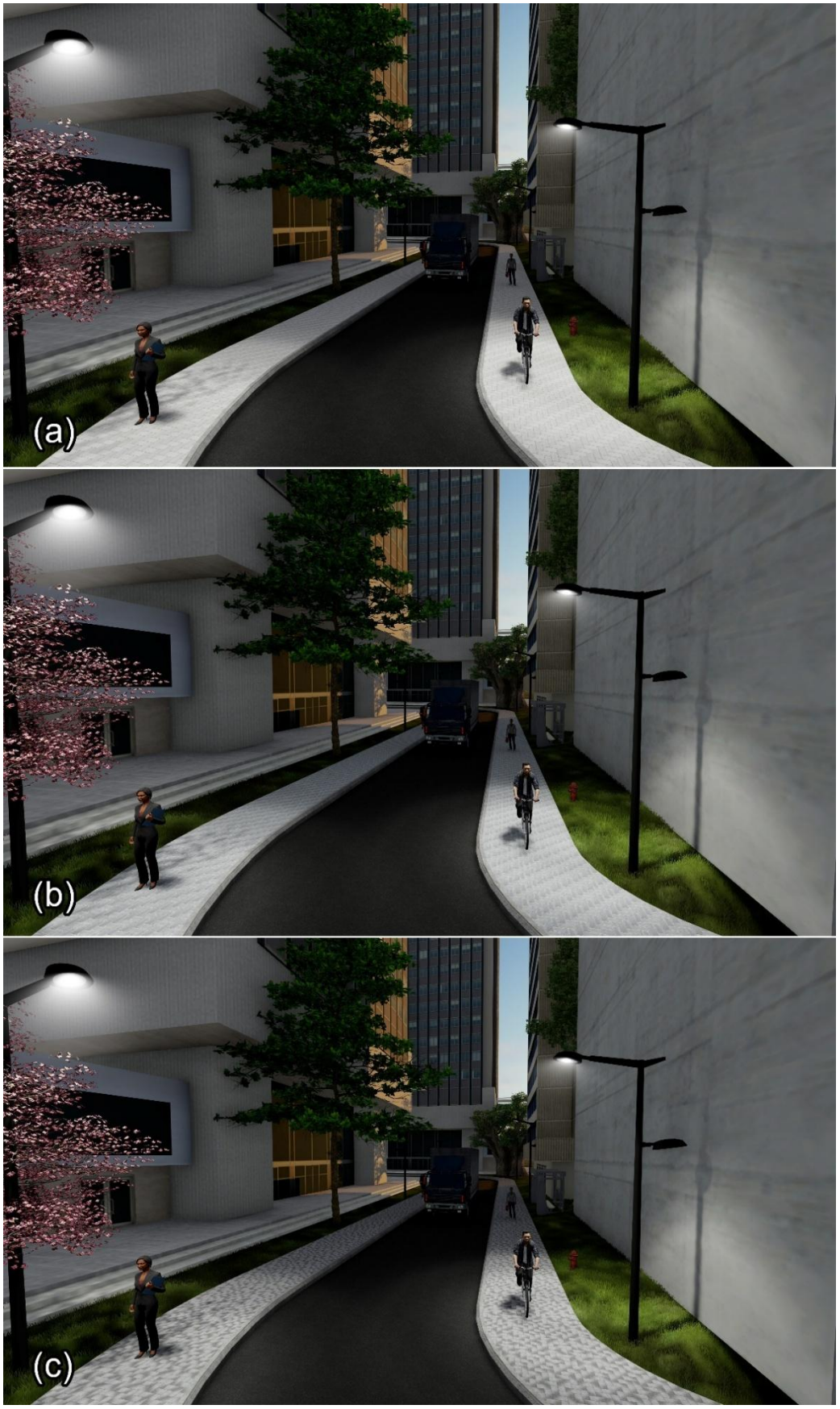
3.5 Simulação Arquitetônica

As Figuras 9, 10, 11 e 12 apresentam a simulação visual dos pavers com resíduo de pó de toner, assentados em uma calçada, casa, parque e rua, respectivamente. Em cada Figura, (a) representa os blocos controle; (b) representa os blocos com 3% de resíduo; e (c) representa os blocos com 7% de resíduo.

Observa-se pelas Figuras que a estética da paisagem é diretamente afetada à medida que se aumenta a quantidade de resíduos de pó de toner na matriz do concreto. Conforme maiores porcentagens são adicionadas, mechas com tons mais escuros aparecem nos blocos. Contudo, em nenhum momento o mesmo passa a ser 100% preto, sempre mantendo seu perfil com textura de concreto.

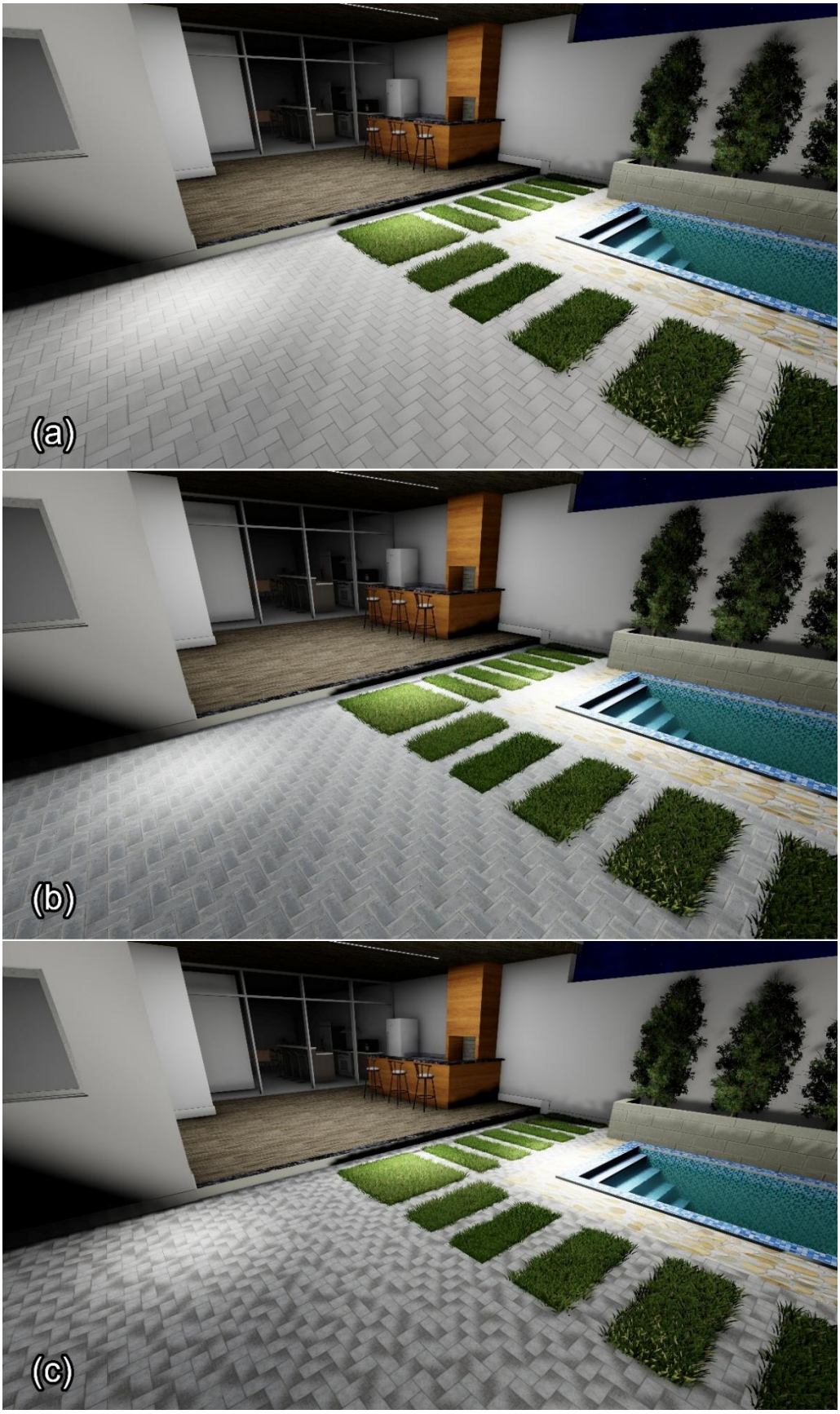
As variadas texturas dos pavimentos oferecem aos arquitetos uma ampla gama de possibilidades na concepção de projetos, permitindo a criação de espaços mais dinâmicos e personalizados. Superfícies rugosas podem proporcionar maior aderência e segurança, enquanto acabamentos lisos conferem um aspecto moderno e sofisticado [32]. Além disso, os tons mais escuros podem ser estrategicamente aplicados para criar contrastes visuais, delimitar áreas ou harmonizar com elementos arquitetônicos existentes. A escolha adequada da textura e da cor contribui para a estética do ambiente, reforçando sua identidade e funcionalidade. Dessa forma, o pavimento deixa de ser apenas um elemento estrutural e passa a desempenhar um papel fundamental no design e na experiência dos usuários [33].

Figura 9 – Simulação arquitetônica de Pavers em pavimento para calçadas representados pelos traços: (a) 0%; (b) 3%; e (c) 7%



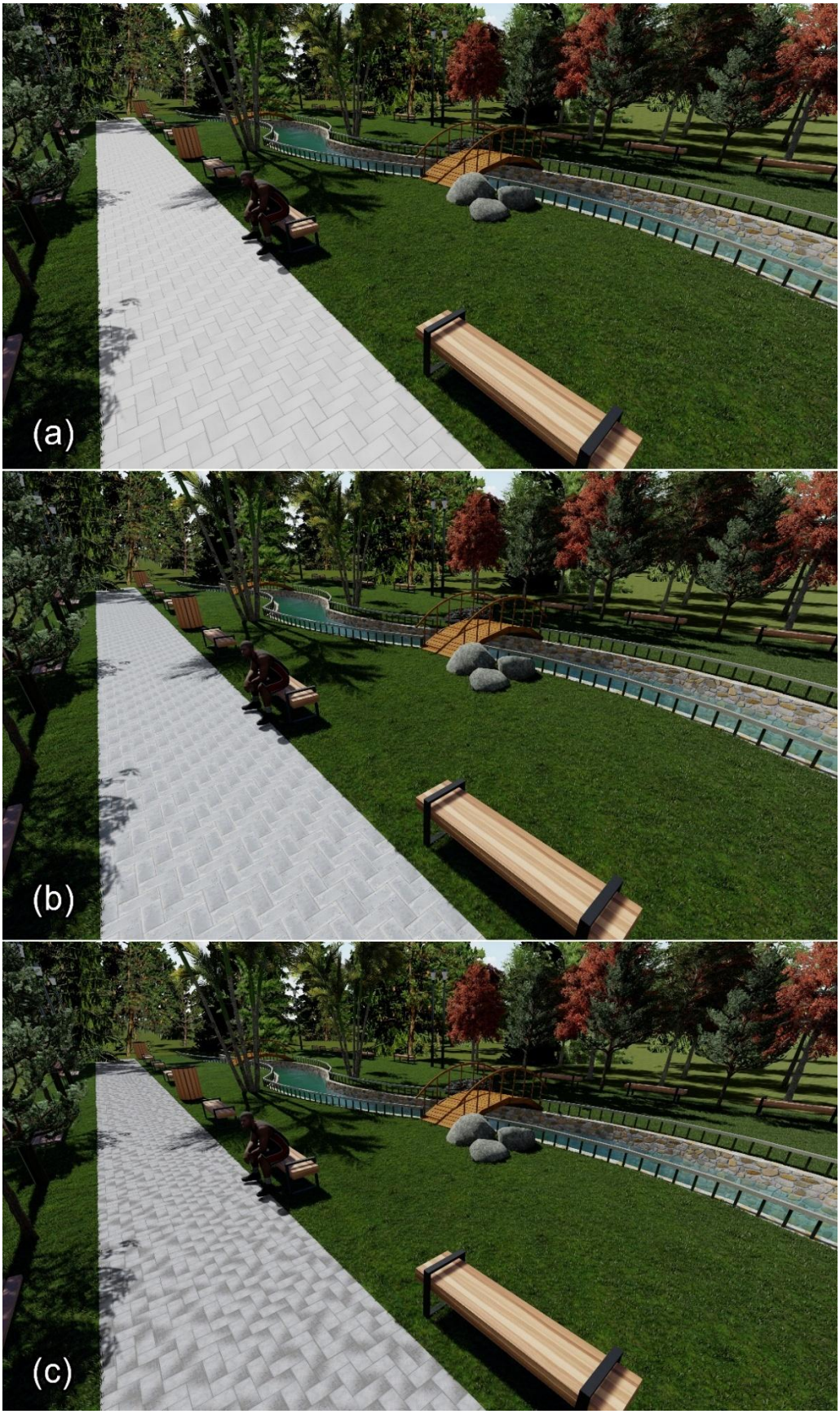
Fonte: Os autores (2025).

Figura 10 – Simulação arquitetônica de Pavers em pavimento para casas representados pelos traços: (a) 0%; (b) 3%; e (c) 7%



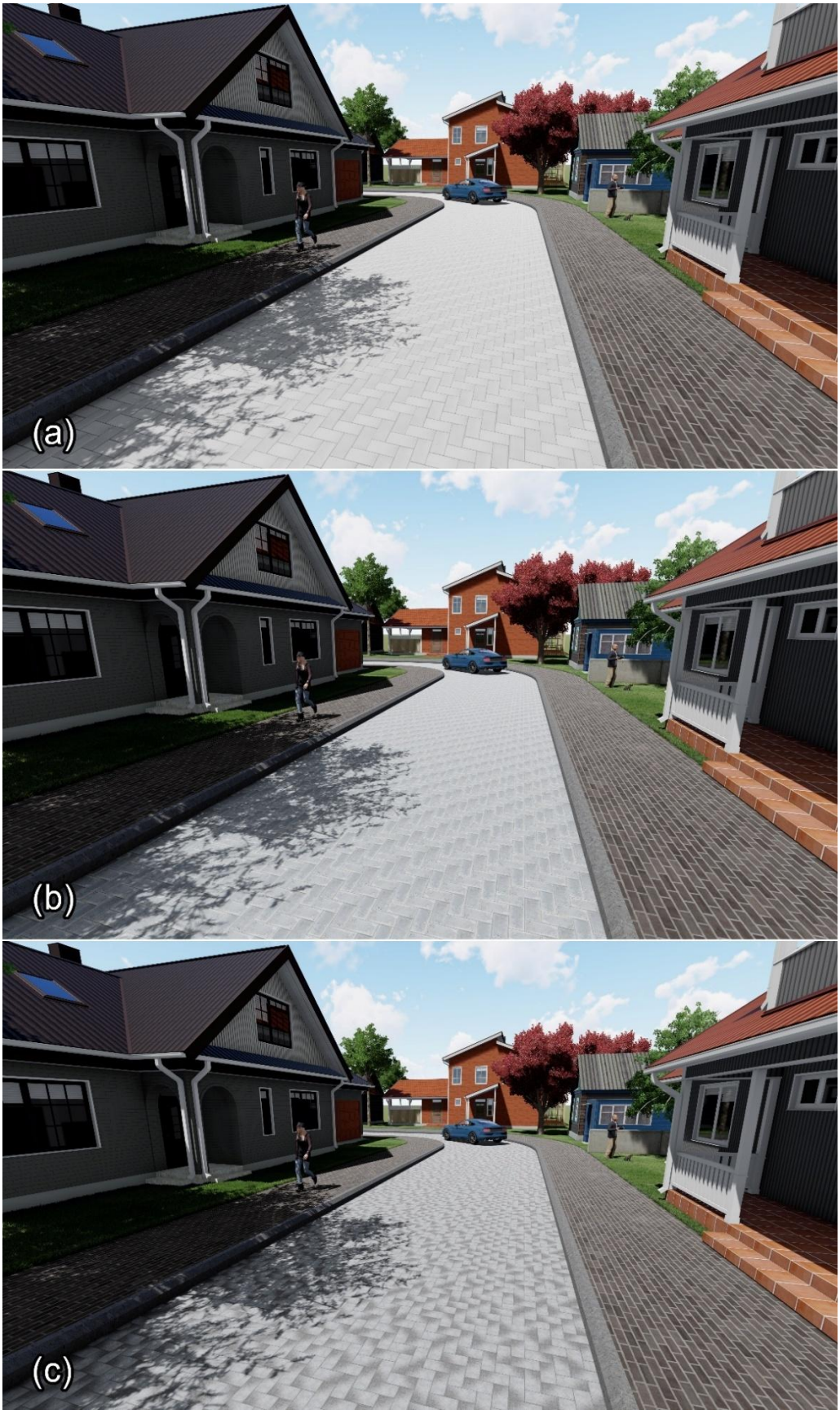
Fonte: Os autores (2025).

Figura 11 – Simulação arquitetônica de Pavers em pavimento para parques representados pelos traços: (a) 0%; (b) 3%; e (c) 7%



Fonte: Os autores (2025).

Figura 12 – Simulação arquitetônica de Pavers em pavimento para ruas representados pelos traços: (a) 0%; (b) 3%; e (c) 7%



Fonte: Os autores (2025).

4 CONCLUSÃO

Através da literatura, foi observada a ausência de estudos sobre a utilização de resíduos de pó de toner na fabricação de blocos de concreto intertravados (pavers), demonstrando ser uma visão inédita e potencialmente sustentável para essa pesquisa. Dessa maneira, através do estudo da composição química e morfológica do resíduo, definiu-se o traço controle em 1:2:3 (cimento:areia:brita). Com base nesse traço, foram produzidos pavers com três diferentes teores de substituição da areia pelo resíduo (0, 3 e 7%), os quais foram submetidos a ensaios para verificar a conformidade com as normas da ABNT e sua aplicação arquitetônica.

Em termos de resistência mecânica, observou-se um comportamento de queda conforme a quantidade de resíduos era aumentada. Entre os blocos com resíduos, somente o traço com 3% alcançou o mínimo de 35,0 MPa exigido por norma, apresentando 35,73±1,26 MPa de resistência aos 28 dias, cerca de 2,09% acima do mínimo estabelecido. No quesito de absorção de água, todos os três traços apresentaram resultados abaixo do limite estabelecido pela norma NBR 9781/2013 aos 90 dias, com o traço com 3% apresentando o menor resultado (4,28 ± 0,27%).

Os ensaios de lixiviação e absorção atômica demonstraram que a quantidade de cromo total liberado para o meio ambiente pelos blocos está abaixo do limite permitido pela NBR 10004/2004, de modo que o uso de pavers com resíduos de pó de toner possa ser viabilizado sem causar impactos ambientais. Já a simulação arquitetônica demonstrou uma visão diferenciada aos blocos propostos, de modo que sua utilização pode proporcionar aspecto únicos e designs diferentes para uma construção.

Portanto, conclui-se que a substituição de 3% da areia por resíduo de pó de toner na produção de blocos de concreto intertravado não apenas atende aos requisitos normativos e apresenta desempenho técnico satisfatório, como também demonstra segurança ambiental. Essa solução desponta como uma alternativa sustentável e esteticamente viável, com grande potencial arquitetônico, ao aliar funcionalidade, reaproveitamento de resíduos sólidos e responsabilidade ambiental na construção civil.

REFERÊNCIAS

[1] C. Maraveas, “Production of Sustainable Construction Materials Using Agro-Wastes,” Materials, vol. 13, no. 2, p. 262, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13020262.

[2] L. Chen et al., “Conversion of waste into sustainable construction materials: A review of recent developments and prospects,” Materials Today Sustainability, vol. 27, p. 100930, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.mtsust.2024.100930.

[3] F. I. Aneke and C. Shabangu, “Green-efficient masonry bricks produced from scrap plastic waste and foundry sand,” Case Studies in Construction Materials, vol. 14, p. e00515, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00515.

[4] M. Parthasarathy, “Challenges and emerging trends in toner waste recycling: A review,” Sep. 01, 2021, MDPI. doi: 10.3390/recycling6030057.

[5] J. Huang, G. S. Kumar, and Y. Sun, “Evaluation of workability and mechanical properties of asphalt binder and mixture modified with waste toner,” Constr Build Mater, vol. 276, p. 122230, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122230.

[6] B. Fernández, J. Ayala, E. Del Valle, D. Martínez-blanco, A. M. Castañón-garcía, and J. M. Menéndez-aguado, “Recycling of Waste Toner Powder as Adsorbent to Remove Aqueous Heavy Metals,” Materials, vol. 15, no. 12, Jun. 2022, doi: 10.3390/ma15124150.

[7] P. I. Itoua, D. Sun, P. Li, and S. Shen, “Influence of Waste Toner on Asphalt Binder: Chemical and Rheological Characterization,” Molecules, vol. 28, no. 6, Mar. 2023, doi: 10.3390/molecules28062794.

[8] D. Yordanova, S. Angelova, and I. Dombalov, “Utilisation Options for Waste Toner Powder,” Sófia, Bulgaria, 2014. [Online]. Available: http://environment.scientific-journal.com/articles/3/23.pdf

[9] D. E. Tsatsis, K. A. Valta, A. G. Vlyssides, and D. G. Economides, “Assessment of the impact of toner composition, printing processes and pulping conditions on the deinking of office waste paper,” J Environ Chem Eng, vol. 7, no. 4, p. 103258, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.103258.

[10] J. W. dos Santos, “Caracterização E Separação Dos Materiais Presentes Em Cartuchos De Toner Pós Consumo - Avaliando O Potencial Econômico Para Reciclagem,” Porto Alegre - RS, 2019.

[11] P. Ring, G. Cordoba, N. Delbianco, C. Priano, and V. Rahhal, “Circular Economy Approach: Recycling Toner Waste in Cement-Based Construction Materials,” Sustainability, vol. 16, no. 11, p. 4707, May 2024, doi: 10.3390/su16114707.

[12] L. S. Batista, “Efeitos Da Incorporação De Resíduos Da Mineração Nas Propriedades Físicas, Mecânicas E De Durabilidade Em Pavimentos Intertravados,” Universidade Federal De Campina Grande, Campina Grande, 2022.

[13] L. H. L. D. de Matos, “Pavimentos Intertravados de Concreto Utilizando Resíduos de PET,” Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2019.

[14] H. Chaib, A. Kriker, and A. Mekhermeche, “Thermal Study of Earth Bricks Reinforced by Date palm Fibers,” Energy Procedia, vol. 74, pp. 919–925, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.827.

[15] J. L. Higuera-Trujillo, J. López-Tarruella Maldonado, N. Castilla, and C. Llinares, “Architectonic Design Supported by Visual Environmental Simulation—A Comparison of Displays and Formats,” Buildings, vol. 14, no. 1, p. 216, Jan. 2024, doi: 10.3390/buildings14010216.

[16] Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Manual de Pavimento Intertravado, 1a. São Paulo - SP, 2010.

[17] S. Hammani, A. Barhoum, S. Nagarajan, and M. Bechelany, “Toner waste powder (twp) as a filler for polymer blends (LDPE/HIPS) for enhanced electrical conductivity,” Materials, vol. 12, no. 19, Oct. 2019, doi: 10.3390/ma12193062.

[18] S. V. Pirela et al., “Consumer exposures to laser printer-emitted engineered nanoparticles: A case study of life-cycle implications from nano-enabled products,” Nanotoxicology, vol. 9, no. 6, pp. 760–768, Aug. 2015, doi: 10.3109/17435390.2014.976602.

[19] G. Socrates, Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies, 3rd ed. John Wiley & Sons Ltd, 2001.

[20] D. Choudhary et al., “Recycling of waste toner derived from exhausted printer cartridges as adsorbent for defluoridation of water,” Environ Technol Innov, vol. 34, p. 103572, May 2024, doi: 10.1016/j.eti.2024.103572.

[21] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 7211 - Agregados para concreto - Requisitos. 2022.

[22] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “ABNT NBR 9781 - Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio,” Rio de Janeiro - RJ, Brasil, Jan. 2013.

[23] Associação Brasileira De Normas Técnicas, ABNT NBR 10005 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro - RJ, 2004.

[24] USEPA, SW 846 - Test methods for evaluating solid waste; Physical/Chemical methods (METHOD 1311). 1992.

[25] Z. Zhao et al., “Effect Mechanisms of Toner and Nano-SiO2 on Early Strength of Cement Grouting Materials for Repair of Reinforced Concrete,” Buildings, vol. 12, no. 9, p. 1320, Aug. 2022, doi: 10.3390/buildings12091320.

[26] F. Xu, S. Wang, T. Li, B. Liu, B. Li, and Y. Zhou, “The mechanical properties of tailing recycled aggregate concrete and its resistance to the coupled deterioration of sulfate attack and wetting–drying cycles,” Structures, vol. 27, pp. 2208–2216, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.07.052.

[27] P. A. Shawnim and F. Mohammad, “Toner Used In The Development Of Foamed Concrete For Structural Use,” 2018.

[28] I. Melnjak, A. A. Vučinić, L. Radetić, and I. Grčić, “Waste Toner Powder In Concrete Industry: An Approach Towards Circular Economy,” Environ Eng Manag J, vol. 18, no. 9, pp. 1897–1906, 2019, [Online]. Available: http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/;http://www.eemj.eu

[29] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 10004 - Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro - RJ, 2004.

[30] M. Newlands, L. Csetenyi, and L. Zheng, “Feasibility of recovered toner powder as an integral pigment in concrete,” Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials, vol. 172, no. 4, pp. 201–212, Aug. 2019, doi: 10.1680/jcoma.18.00023.

[31] L. A.-S. Santana, “Estudo da Aderência Entre Concretos de Diferentes Idades,” Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes - RJ, 2004.

[32] D. P. Godinho, “Pavimento Intertravado: Uma Reflexão Sob a Ótica da Durabilidade e Sustentabilidade,” Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

[33] P. S. X. de Alcantara, “Blocos Intertravados Coloridos Para Pavimentação com incorporação de Resíduos de Cerâmica Vermelha em Prol da Redução de Pigmentos,” Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2015.

Capítulo 7

10.37423/251110435

ANÁLISE DA QUALIDADE DO AR EM VIATURAS DE COMBATE A INCÊNDIO COM AUXÍLIO DA PLATAFORMA ARDUINO

Elias Gonçalves Chaves Neto — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN); Departamento de Engenharia Mecânica*

Wertson da Silva Resende — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN); Departamento de Engenharia Mecânica*

Rafael Matos de Souza — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN); Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN); Departamento de Engenharia Mecânica*

RESUMO

Este estudo avaliou a qualidade do ar e o conforto térmico no interior de uma viatura de combate a incêndio, utilizando plataforma Arduino para monitorar temperatura, umidade relativa e dióxido de carbono (CO_2) durante uma ocorrência real de fogo em vegetação. O objetivo foi verificar se resíduos provenientes da operação afetariam o ambiente interno da cabine e, consequentemente, a saúde e o desempenho dos bombeiros militares. A metodologia consistiu em medições não invasivas, com janelas fechadas e ar-condicionado ligado, comparando os resultados com limites estabelecidos por normas nacionais e internacionais. Os parâmetros monitorados permaneceram dentro de faixas aceitáveis: temperatura média de 26,68 °C, umidade de 52,44% e CO_2 de 418,57 ppm. Pelo método de Fanger, o Voto Médio Predito (PMV) foi de 0,56 (“neutro”) e o Percentual de Pessoas Desconfortáveis (PPD) de 12%, indicando alto nível de conforto térmico. Conclui-se que, nas condições avaliadas, não houve degradação relevante da qualidade do ar ou impacto no conforto térmico. Recomenda-se, contudo, a realização de estudos complementares com sensores calibrados e medições adicionais para maior precisão.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade do ar, conforto térmico, bombeiros militares, CO_2, arduino.

1 INTRODUÇÃO

Conforto térmico, de acordo com a ASHRAE Standard 55, é a “condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico” (ASHRAE, 2017).

A umidade relativa, quando inadequadamente controlada, pode favorecer o crescimento de fungos e bactérias, especialmente em ambientes com alta umidade. Em contrapartida, níveis baixos podem causar ressecamento das mucosas e desconforto acentuado (ABNT, 2008). A temperatura, por sua vez, é um dos fatores que mais afetam o conforto térmico, influenciando diretamente a percepção de bem-estar dos ocupantes.

Em relação à concentração de dióxido de carbono (CO_2) no ambiente, estudos apontam que níveis elevados, sobretudo em locais com ventilação insuficiente, podem prejudicar funções cognitivas como memória, concentração e tomada de decisões, reduzindo a eficiência dos indivíduos (UNIVERSITY COLLEGE LONDON, 2022; O GLOBO, 2024). Esse efeito está relacionado à redução do fluxo sanguíneo e da oxigenação cerebral, tornando essencial o monitoramento e o controle da qualidade do ar interno (ENGEPRED, 2023).

A norma ABNT NBR 16401:2008 estabelece que, para garantir conforto térmico a pelo menos 80% das pessoas, a temperatura deve estar entre 22,5 °C e 25,5 °C no verão, e entre 21 °C e 23,5 °C no inverno, com umidade relativa entre 40% e 65%. A concentração máxima recomendada de CO_2 é de 1000 ppm (partes por milhão) ou, alternativamente, não ultrapassar em mais de 700 ppm a concentração do ar exterior. O não atendimento a esses limites pode indicar ventilação insuficiente ou sobrecarga térmica, com impactos negativos sobre o conforto, a saúde e o desempenho cognitivo.

Já a ABNT NBR 17037:2023, que trata da qualidade do ar interior em ambientes não residenciais climatizados artificialmente, adota como padrão referencial para o CO_2 a diferença entre a concentração interna e a do ar externo. Para conforto e bem-estar, essa diferença não deve ultrapassar 700 ppm, o que, considerando uma concentração externa de 400 ppm, estabelece um limite de 1100 ppm para o ambiente interno.

A avaliação de conforto térmico é comumente realizada conforme a norma americana ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2017) e a norma internacional ISO 7730:2005, que utiliza o modelo de Fanger (1970) para calcular o Voto Médio Predito (VMP) e o Percentual de Pessoas Insatisfeitas (PPI). O VMP expressa a sensação térmica média de um grupo, enquanto o PPI estima a porcentagem de indivíduos

que provavelmente se sentirão insatisfeitos. A Tabela 1 apresenta a escala de VMP conforme a ISO 7730 (ISO, 1994).

Figura 1. Recorte da tabela de Escala VMP.



Fonte: ISO 7730 (1994).

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a qualidade do ar e o conforto térmico no interior de uma viatura de combate a incêndio, por meio do monitoramento de temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono (CO_2), verificando se resíduos provenientes de ocorrências comprometem esses parâmetros e podem afetar a atenção, a saúde e o bem-estar dos bombeiros militares.

1.2 Objetivo Específicos

- Levantar informações sobre a expectativa de vida e os principais riscos ocupacionais que afetam bombeiros militares, destacando a relevância da qualidade do ar no ambiente de trabalho.

- Realizar medições de temperatura, umidade relativa e concentração de CO_2 no interior da viatura durante condições operacionais reais.

- Comparar os resultados obtidos com os limites recomendados por normas técnicas nacionais e internacionais (ABNT NBR 16401, ABNT NBR 17037, ASHRAE 55 e ISO 7730).

- Avaliar se a presença de resíduos provenientes de incêndios provoca alterações relevantes na qualidade do ar interno da cabine.

- Analisar possíveis impactos da qualidade do ar e do conforto térmico sobre o desempenho e a segurança dos bombeiros.

1.3 Justificativa

Profissionais bombeiros militares enfrentam diariamente condições adversas que podem comprometer sua saúde e segurança a longo prazo. A exposição repetitiva a ambientes com altas temperaturas, fumaça, substâncias químicas tóxicas e esforço físico intenso está associada a efeitos agudos e crônicos, inclusive a um risco aumentado de doenças cardiovasculares e câncer.

Reconhecer e prevenir essas ameaças torna-se, portanto, missão prioritária para preservar a saúde ocupacional dos combatentes.

Além disso, a utilização contínua de viaturas de combate a incêndio implica em exposição prolongada ao ar interno possivelmente contaminado pelos resíduos de fogo. Isso pode comprometer significativamente a qualidade do ar nas cabines, prejudicando a atenção, a performance e o estado psicofisiológico dos bombeiros durante e após o atendimento às ocorrências — um aspecto ainda pouco explorado em pesquisas técnicas.

O aumento consistente no número de operações de combate a incêndios reforça a relevância do tema: nos últimos anos, o Corpo de Bombeiros Militar do Paraná registrou aumento de 10% no total de atendimentos em 2024 em relação ao ano anterior, com ocorrências de incêndio crescendo mais de 50%. Ademais, em Alagoas, foram reportados 3.717 atendimentos envolvendo veículos em 2024, um aumento superior a 52% em relação a 2023. Esses dados indicam uma sobrecarga operacional crescente, que torna ainda mais crítica a avaliação dos riscos internos, como a qualidade do ar na cabine.

Este estudo também contribui cientificamente ao propor um método prático de monitoramento ambiental em viaturas de combate a incêndios identificando pontos críticos e comparando dados com normas técnicas vigentes. Assim, oferece subsídios concretos para intervenções eficazes, visando reduzir riscos ocupacionais, promover políticas de saúde e melhorar o desempenho operacional da corporação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em uma viatura de combate a incêndio do modelo Mercedes- Benz Atego 1729, pertencente ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio Grande do Norte. O

monitoramento ocorreu durante uma ocorrência real, em trajeto completo, desde o embarque da guarnição até o retorno à unidade.

Os dados foram coletados de forma não invasiva, utilizando instrumentos portáteis alimentados pela plataforma Arduino, sem interferir no funcionamento da viatura ou nas rotinas operacionais. Todas as etapas seguiram os protocolos de segurança e as normas internas da corporação.

A guarnição era composta por três tripulantes. Durante o deslocamento, todas as janelas permaneceram fechadas, com o ar-condicionado ativado na posição 4 e a recirculação interna de ar ligada. As portas foram abertas apenas no momento do embarque e do desembarque.

As medições foram registradas em quatro etapas distintas:

- Embarque
- Deslocamento até a ocorrência
- Resolução da ocorrência
- Retorno à base

Essa divisão visou identificar variações na qualidade do ar interno e possíveis contaminações resultantes da exposição a resíduos durante a operação de combate.

Os dados coletados foram analisados com base nas especificações da ABNT NBR 16401- 2:2008 (Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 2: Parâmetros de conforto térmico) e da ABNT NBR 17037:2023 (Qualidade do ar interior em ambientes não residenciais climatizados artificialmente). Adicionalmente, foi aplicado o método de Fanger, conforme a ISO 7730:2005, para cálculo do Voto Médio Predito (VMP) e do Percentual de Pessoas Insatisfeitas (PPI), com auxílio do CBE Thermal Comfort Tool.

Devido à natureza exploratória deste trabalho, algumas variáveis foram obtidas por estimativa, em função das limitações dos sensores empregados. Não foram utilizados sensores anemométricos nem de estresse térmico, sendo esses valores inferidos com base em condições operacionais típicas. Para um estudo conclusivo, recomenda-se o uso de instrumentos calibrados e certificados.

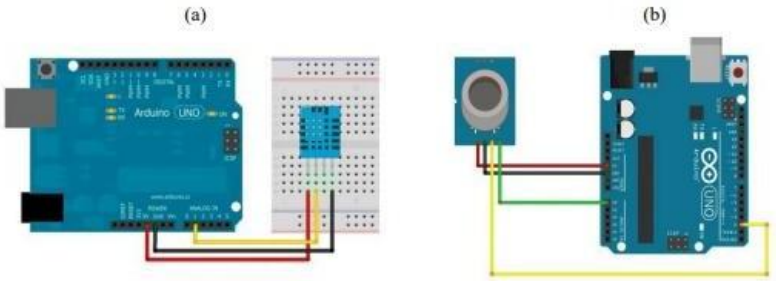
2.1 Materiais

O sistema de monitoramento foi composto pelos seguintes elementos:

- Placa controladora Arduino UNO R3;
- Cabo USB tipo A–B para comunicação com computador;
- Protoboard para montagem do circuito eletrônico;
- Sensor DHT11 para medição de temperatura (0°C a 50°C) e umidade relativa (20% a 90%);
- Sensor MQ135 para detecção de gases, incluindo CO_2, amônia, benzeno, óxidos nítricos, fumaça e vapores de álcool;
- Conjunto de cabos para conexões na protoboard;
- Computador tipo notebook para aquisição, armazenamento e análise de dados.

A montagem seguiu diagramas de referência disponíveis em plataformas de instrução do Arduino. O sensor DHT11 foi destinado à medição de temperatura e umidade relativa, enquanto o MQ135 foi utilizado para estimar a concentração de CO_2 e outros gases presentes no ar interno da cabine. Todos os componentes foram instalados de forma a não interferir na operação do veículo nem na segurança da tripulação.

FIGURA 2. (a) Conexões do sensor de temperatura e umidade DHT11, (b) Conexões do sensor de gases MQ135.



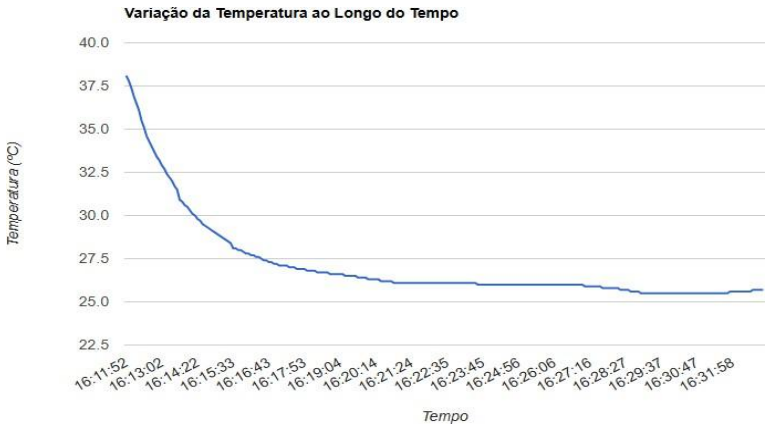
Fonte: MakerHero (2013/2022).

3 RESULTADOS

Primeiro resultado a ser obtido é o teste em bancada, com a finalidade de observar quando o sistema entra em regime com um ambiente relativamente controlado e com variáveis conhecidas em um ambiente livre com temperatura de aproximadamente 25ºC, esse teste foi realizado por 30 minutos com amostragem a cada 5 segundos e obtivemos os seguintes resultados:

Na Figura 2 observa-se o comportamento da temperatura ao longo do tempo durante o teste em bancada. No início do experimento, a temperatura registrada foi de aproximadamente 38 °C, apresentando uma queda acentuada nos primeiros minutos de monitoramento. Essa redução rápida indica que o sistema foi capaz de promover a troca térmica de maneira eficiente logo após a sua ativação. Após esse período inicial de decréscimo, a curva apresenta uma tendência de estabilização, com valores variando entre 25 °C e 26 °C, caracterizando o ponto de regime térmico. Essa estabilização ocorreu por volta dos 12 minutos de experimento, mantendo-se praticamente constante até o final do período de 30 minutos de coleta de dados.

FIGURA 3. Variação de Temperatura X Tempo em bancada.



Fonte: Autor (2025).

O comportamento observado é consistente com o esperado para um sistema de climatização em ambiente controlado, no qual a maior variação térmica ocorre no início da operação, seguida por uma fase de equilíbrio térmico.

Na Figura 3 observa-se a evolução da umidade relativa durante o teste em bancada. No início do experimento, a umidade registrada foi de aproximadamente 41%, apresentando uma elevação acentuada nos primeiros minutos. Esse aumento inicial demonstra que, à medida que a temperatura do ambiente reduziu, houve incremento na capacidade do ar de reter umidade, promovendo a elevação dos índices medidos.

FIGURA 4. Variação de Umidade X Tempo em bancada.



Fonte: Autor (2025).

A curva apresenta variações pontuais, caracterizadas por oscilações abruptas entre determinados intervalos, possivelmente decorrentes de ajustes momentâneos no sistema ou pequenas interferências ambientais. Após aproximadamente 15 minutos de teste, a umidade atinge valores próximos a 75%, estabilizando-se nesse patamar até o final do período de monitoramento.

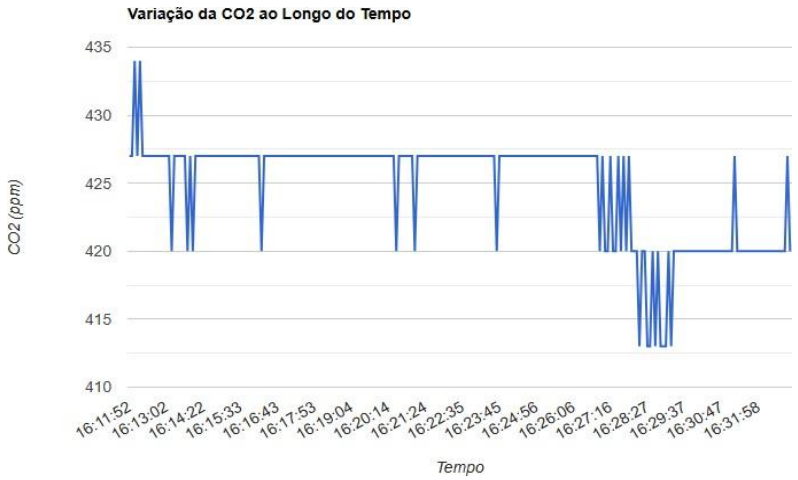
Esse comportamento é coerente com a relação inversa entre temperatura e umidade relativa em ambientes controlados, indicando que o sistema promoveu condições mais úmidas à medida que a temperatura foi reduzida.

Na Figura 4 observa-se a variação da concentração de dióxido de carbono (CO_2) durante o teste em bancada. No início do experimento, os valores registrados situavam-se em torno de 430ppm, apresentando pequenas oscilações ao longo do período monitorado.

A curva indica momentos de queda abrupta e breve recuperação, variando entre 413ppm e 434ppm. Essas oscilações podem estar associadas a pequenas interferências ambientais, como abertura ou fechamento de portas, movimentação de pessoas nas proximidades ou variações na circulação de ar no ambiente.

Apesar dessas flutuações pontuais, a concentração de CO_2 manteve-se, na maior parte do tempo, dentro da faixa considerada adequada para ambientes internos ocupados, de acordo com recomendações técnicas e normas de qualidade do ar interior.

FIGURA 5. Variação de CO2 X Tempo em bancada.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 1 resume os valores médios, desvios padrão e limites máximos e mínimos obtidos para cada variável monitorada.

Tabela 1. Dados obtidos no primeiro experimento.

Variável	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo
Temperatura [°C]	27,23	3,23	38,10	25,50
Umidade [%]	67,53	9,38	74,60	40,50
CO_2 [ppm]	423	4,88	434	413

Fonte: Autor (2025).

De forma geral, os resultados indicam que o sistema apresentou boa capacidade de estabilizar a temperatura e a umidade relativa dentro de valores adequados para o conforto térmico e que os níveis de CO_2 permaneceram dentro de padrões aceitáveis para a qualidade do ar interior, considerando as condições experimentais e as referências técnicas.

Em seguida foi realizado o teste no caminhão, onde por volta da 11h da manhã com os 4 vidros fechados e após o sistema está a mais de 20 minutos em funcionamento, com tempo de amostragem de 30 segundos, onde o caminhão percorreu aproximadamente 39 km , obtemos os seguintes dados nos momentos em que a cabine estava ocupada por bombeiros, ou seja, o tempo de resolução da ocorrência, antes do embarque e após o desembarque não foram levados em consideração para a tabela abaixo:

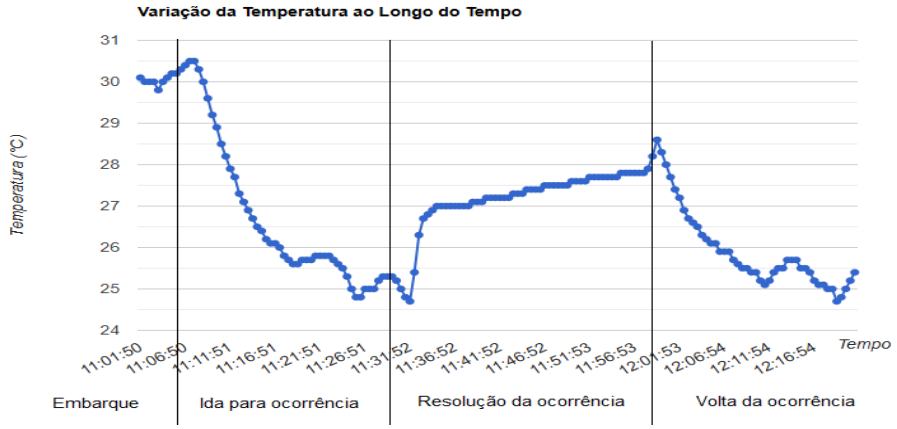
Tabela 2. Dados obtidos na ocorrência.

Variável	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo
Umidade (%)	52,44	2,92	56,60	48,30
Temperatura (°C)	26,68	1,83	30,50	24,70
CO_2 (ppm)	418,57	11,23	432	396

Fonte: Autor (2025).

Foi exportado os dados gerando os gráficos que seguem.

FIGURA 6. Variação de Temperatura X Tempo na ocorrência.

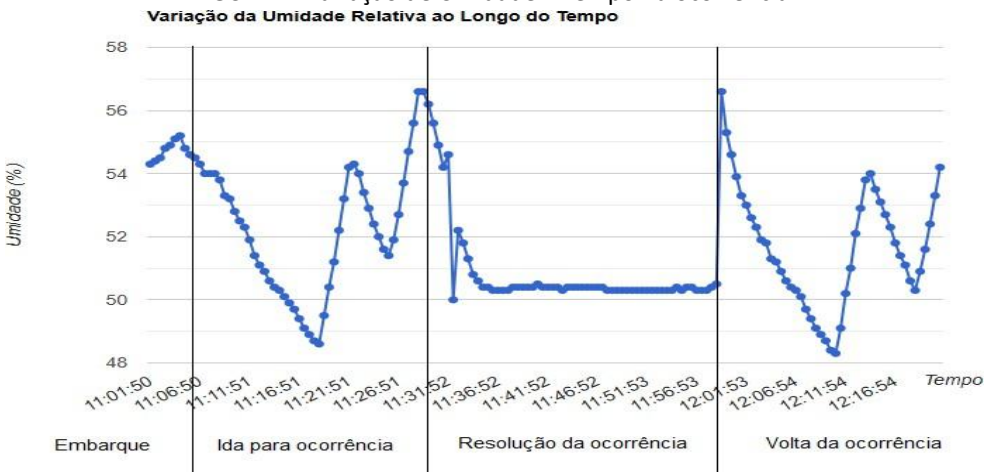


Fonte: Autor (2025).

A análise dos dados revela que a temperatura média foi de 26,68 °C, apresentando desvio padrão de 1,83 °C, o que indica relativa estabilidade térmica durante o experimento. O valor máximo registrado foi de 30,50 °C, enquanto o mínimo foi de 24,70 °C. Essa variação moderada sugere que o sistema conseguiu manter o controle térmico, ainda que sujeito a pequenas oscilações decorrentes das condições externas.

Observamos que a queda verificada durante os percursos de ida e volta, com valor médio de 26,68°C, aproximadamente 27°C será utilizada para fins de cálculos no decorrer do artigo. Durante o período de resolução da ocorrência podemos considerar que esse valor se manteve praticamente constante, com pequena oscilação de elevação inferior a 1°C quando o veículo foi desligado, mostrando a boa isolação da viatura com relação a temperatura externa.

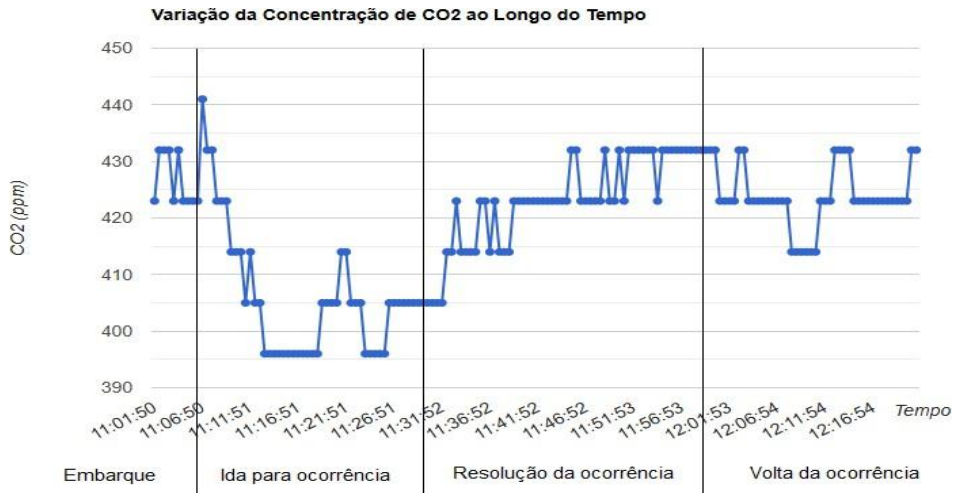
FIGURA 7. Variação de Umidade X Tempo na ocorrência.



Fonte: Autor (2025).

Na umidade, observamos que devido ao uso do ar-condicionado do veículo percebemos uma tendência de queda, o que não acontece quando o carro permanece fechado sem uso do ar durante a resolução da ocorrência. Podemos observar também que no abrir das portas, no momento do embarque, no momento da descida para resolução da ocorrência e após a resolução da ocorrência a umidade sofre um distúrbio com acentuada elevação decorrente da renovação de ar, troca do volume de ar frio pelo de ar quente.

FIGURA 8. Variação de CO2 X Tempo na ocorrência



Fonte: Autor (2025).

Quanto à concentração de CO_2, a média foi de 418,57 ppm, com desvio padrão de 11,23 ppm, indicando pequenas oscilações ao longo do tempo. O valor máximo registrado foi de 432 ppm e o mínimo de 396 ppm. Mesmo no pico registrado, os valores permaneceram dentro de parâmetros adequados para ambientes internos, segundo recomendações técnicas de qualidade do ar.

Observou-se que, durante o trajeto de ida e volta da ocorrência, houve pouca variação nos parâmetros medidos. Comparando-se os resultados com as normas ABNT NBR 17037:2023 e ABNT NBR 16401:2008, verifica-se que as variáveis permaneceram dentro dos limites estabelecidos, não representando risco aos tripulantes em relação à concentração de CO_2.

Já com relação ao conforto térmico, será utilizado o método Fanger para quantificar o conforto térmico dos tripulantes. Para isso iremos utilizar as tabelas da ISO 7730:1994 para estimar a taxa metabólica, e isolamento térmico para peças de roupa.

TABELA 3. Taxas metabólicas.

Atividade	Metabolismo (W/m²)	(met)
Reclinado	46	0,8
Sentado, relaxado	58	1,0
Atividade sedentária (escritório, residência, escola, laboratório)	70	1,2
Em pé, atividade leve (compras, laboratório, indústria leve)	93	1,6
Em pé, atividade média (trabalho com máquina, doméstico)	116	2,0
Andando em superfície nivelada		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Fonte: ISO 7730 (1994).

TABELA 4. Isolamento térmico para peças de roupas 1.

Peças de roupa	Isolamento térmico **clo**
Alto isolamento, fibra-pele	
Calça	0,35
paletó	0,40
colete	0,20
Roupa para ambientes externos	
casaco	0,60
jaqueta	0,55
casaco com capuz	0,70
macacão, fibra-pele	0,55
Diversas	
meias	0,02
meias grossas, altura do tornozelo	0,05
meias grossas, longas	0,10
meias femininas de nylon	0,03
sapatos (sola fina)	0,02
sapatos (sola grossa)	0,04
botas	0,10
luvas	0,05

Fonte: ISO 7730 (1994).

TABELA 5. Isolamento térmico para peças de roupas 2.

Peças de roupa	Isolamento térmico **clo**
Roupa de baixo	
calcinha	0,03
ceroula longa	0,10
camiseta sem manga	0,04
camiseta com manga curta	0,09
camiseta com manga longa	0,12
calcinha e sutiã	0,03
Camisa-blusa	
mangas curtas	0,15
leve, mangas longas	0,20
normal, mangas longas	0,25
camisa de flanela, mangas longas	0,30
blusa leve, mangas longas	0,15
Calça	
shorts	0,06
leve	0,20
normal	0,25
flanela	0,28
Vestido-saia	
saia leve (verão)	0,15
saia pesada (inverno)	0,25
vestido leve, mangas curtas	0,20
vestido de inverno, mangas longas	0,40
Sueter	
colete sem manga	0,12
sueter leve	0,20
sueter	0,28
sueter pesado	0,35
Paletó	
leve, paletó de verão	0,25
paletó	0,35
guarda-pó	0,30

Fonte: ISO 7730 (1994).

Para o cálculo do isolamento térmico da roupa utilizada durante o trajeto, não foi identificada literatura específica que determine esses valores para o uniforme completo de combate a incêndio florestal empregado nas ocorrências. Assim, adotou-se uma aproximação com base em valores típicos para peças de vestuário similares:

- Calça: 0,35 clo
- Jaqueta: 0,55 clo
- Botas: 0,10 clo
- Luvas: 0,05 clo
- Total: 1,05 clo

O valor clo é uma unidade que expressa a resistência térmica do vestuário, conforme definido na ISO 9920:2007, sendo 1 clo equivalente à resistência térmica necessária para manter o equilíbrio térmico de uma pessoa sedentária a 21 °C, em condições ambientais padrão.

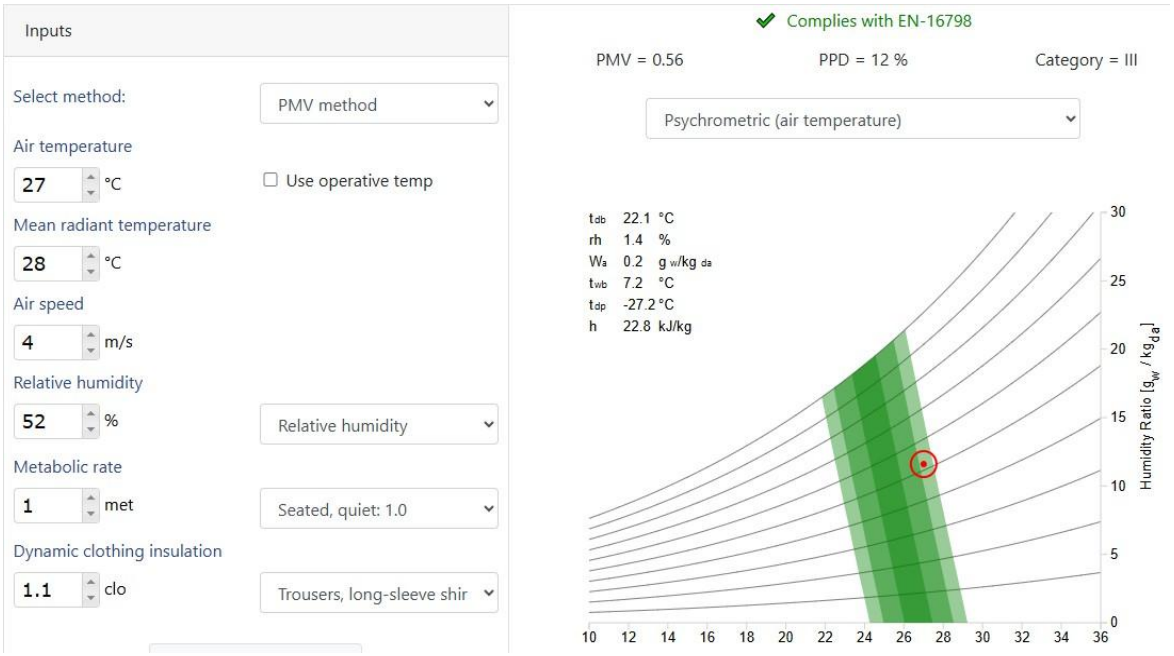
Quanto à taxa metabólica, considerou-se o valor correspondente à condição "sentado relaxado", resultando em 1,0 met. A unidade met representa a taxa metabólica de uma pessoa sentada em repouso (≈ 58 W/m²), conforme estabelecido na ISO 8996:2021. Embora o bombeiro exerça elevada atividade metabólica durante a ocorrência, no interior do caminhão permanece em posição sentada, com baixo esforço físico.

A velocidade do ar é usualmente medida em metros por segundo (m/s) e, na maioria dos casos, situa-se entre 5 e 7 m/s, dependendo de diversos fatores (EASYKLIMA, 2025). Como não foi utilizado anemômetro para obtenção desse parâmetro, adotou-se o valor de 4 m/s, correspondente ao limite máximo disponível no aplicativo utilizado para a simulação.

Para a temperatura global, considerou-se o valor de 28 °C.

Utilizando o software CBE Thermal Comfort Tool obtemos o seguinte resultado:

FIGURA 9. CBE Thermal Comfort Tool.



Fonte: Autor (2025).

Analisando resultados, obteve-se um PMV de 0,56 o que está dentro da subdivisão neutro, muito próximo do totalmente neutro. Já a taxa de rejeição foi de 12%, o que é um valor extremamente satisfatório.

4 CONCLUSÕES

Em síntese, a manutenção do conforto térmico e da qualidade do ar é essencial para a saúde e o bem-estar humano em qualquer ambiente. Para bombeiros militares, essa questão ganha ainda mais relevância, dada a natureza de sua profissão, que os expõe a condições extremas e, na maioria das vezes, insalubres. A expectativa de vida reduzida desses profissionais reforça a urgência em mitigar os riscos associados à sua rotina.

O estudo demonstrou que, durante uma ocorrência de combate a incêndio em vegetação, os parâmetros de temperatura, umidade relativa e concentração de CO_2 no interior da cabine permaneceram dentro dos limites estabelecidos por normas nacionais e internacionais, não apresentando alterações significativas sob as condições específicas do teste. Consequentemente, o impacto operacional na saúde e no desempenho dos bombeiros foi considerado não significativo.

Em relação ao conforto térmico, a aplicação do método de Fanger (PMV/PPD) resultou em um PMV de 0,56, enquadrado na categoria “neutro” e muito próximo do ideal, e em um PPD de 12%, valor considerado extremamente satisfatório. Esses resultados indicam que, mesmo durante a resolução da ocorrência e sob possível exposição a resíduos provenientes do incêndio, não houve degradação perceptível do conforto térmico ou da qualidade do ar interno.

Embora os achados sejam positivos, é fundamental considerar as limitações metodológicas. O estudo utilizou sensores conectados à plataforma Arduino, sem calibração certificada, e estimou valores de isolamento térmico das roupas e de taxa metabólica, além de não realizar medições da velocidade do ar com anemômetro. Esses aspectos devem ser aprimorados em estudos futuros, visando maior precisão e confiabilidade dos resultados.

A conclusão reforça a necessidade de mitigar continuamente os riscos associados à profissão de bombeiro, que, segundo estudos, apresenta expectativa de vida inferior à média da população. Assim, recomenda-se o aperfeiçoamento constante das tecnologias e dos procedimentos operacionais, de forma a preservar a saúde, o bem-estar e a qualidade de vida desses profissionais.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS.

ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16401-2:2008 – Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16401-3:2008 – Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17037:2023 – Qualidade do ar interior em ambientes não residenciais climatizados artificialmente. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

CADAMINUTO. Com aumento de mais de 52% em relação a 2023, bombeiros registram 3.700 ocorrências envolvendo veículos em 2024. 28 nov. 2024. Disponível em: https://www.cadaminuto.com.br. Acesso em: 10 ago. 2025.

EASYKLIMA. Velocidade do ar. Disponível em: https://www.easyklima.pt/. Acesso em: 10 ago.2025.

ENGEPRED. Excesso de CO_2 no ar traz riscos à saúde e aos negócios. 8 jul. 2021. Disponível em: https://engepred.com.br/noticias/engepred/excesso-de-co2-no-ar-traz-riscos-a-saude-e-aos-negocios/. Acesso em: 31 jul. 2025.

ESPAÇO MILITAR. Policiais e bombeiros militares morrem em média aos 58 anos. 17 mar. 2019. Disponível em: https://www.espacomilitar.com/2019/03/policiais-e-bombeiros-militares-morrem.html. Acesso em: 30 jul. 2025.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). Painting, firefighting, and shiftwork.

IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon: IARC, 2010.

MAKERHERO. Como funciona o sensor de gás MQ-135? 2022. Disponível em: https://www.makerhero.com/blog/como-funciona-o-sensor-de-gas-mq-135/. Acesso em: 30 jul. 2025.

MAKERHERO. Monitorando temperatura e umidade com o sensor DHT11. 5 ago. 2013. Disponível em: https://www.makerhero.com/blog/monitorando-temperatura-e-umidade-com-o-sensor- dht11/. Acesso em: 30 jul. 2025.

O GLOBO. Aumento da emissão de carbono pode reduzir capacidades cognitivas, afirma pesquisa. 12 dez. 2018. Disponível em: https://oglobo.globo.com/brasil/sustentabilidade/aumento-da-emissao-de-carbono-pode-reduzir-capacidades-cognitivas-afirma-pesquisa-23294132. Acesso em: 31 jul. 2025.

SECRETARIA DE SEGURANÇA PÚBLICA – PARANÁ. Com incêndios, bombeiros registraram aumento de 10% no total de ocorrências em 2024. Nota 08 jan. 2025. Disponível em: https://www.seguranca.pr.gov.br. Acesso em: 10 ago. 2025.

TNH1. Incêndio em veículos: bombeiros já atenderam 147 ocorrências em 2023, 32% a mais que no ano passado. 17 ago. 2023. Disponível em: https://www.tnh1.com.br. Acesso em: 10 ago. 2025.
UNIVERSITY COLLEGE LONDON. Impact of indoor CO_2 on cognitive performance. London: UCL, 2022. Disponível em: https://www.ucl.ac.uk. Acesso em: 10 ago. 2025.

ISO. ISO 7730: Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Geneva: International Organization for Standardization, 2005.

Capítulo 8

10.37423/251110436

MAPEAMENTO TÉRMICO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE CÂMARA FRIGORÍFICA DIDÁTICA

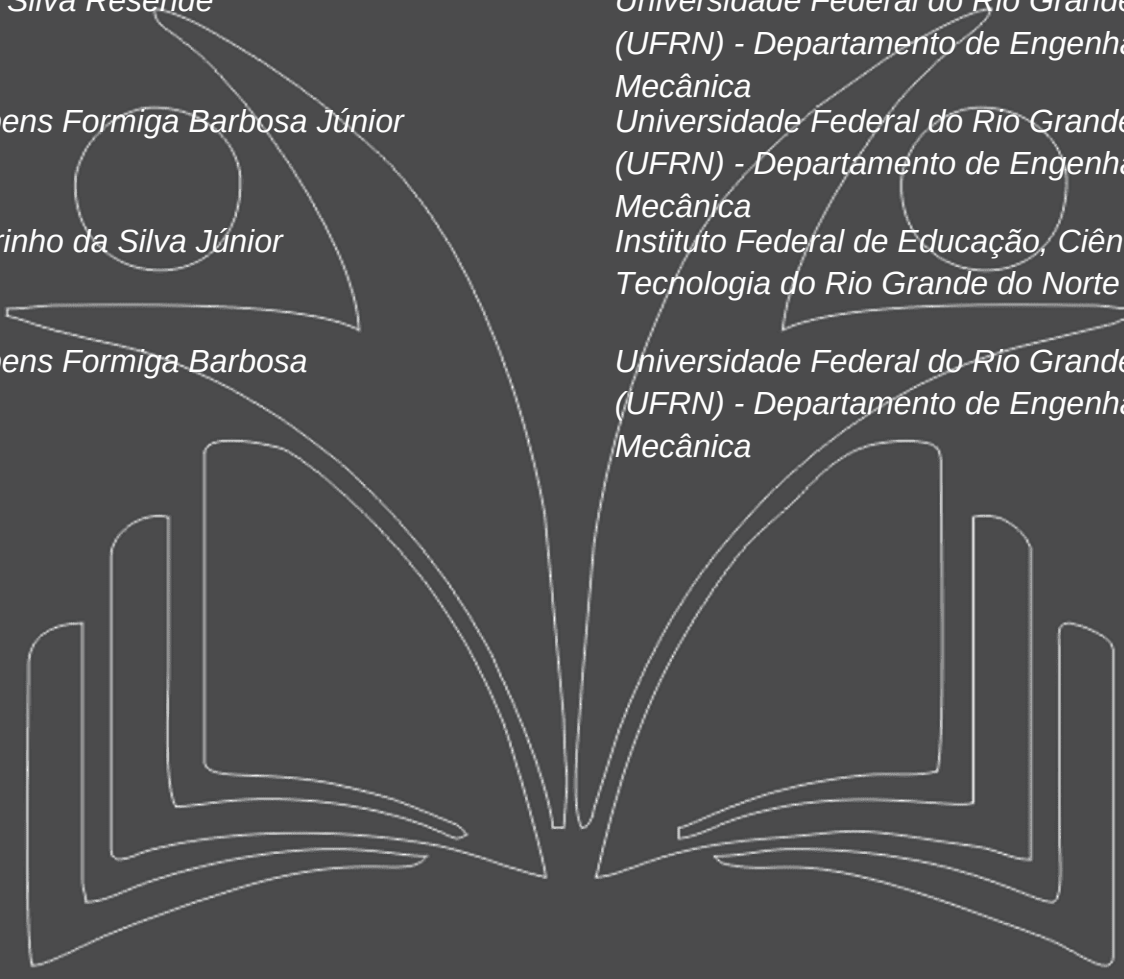
Higor da Silva Regis — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Wertson da Silva Resende — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Edilson Marinho da Silva Júnior — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*



RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre o mapeamento térmico de uma câmara frigorífica didática, buscando a aquisição de dados e a análise comparativa entre o desempenho prático do equipamento e os princípios teóricos da termodinâmica de refrigeração. Para isso, a metodologia empregada consistiu no uso do Sistens National Instruments NI cDAQ - 9172, com termopares dispostos em pontos estratégicos para o registro contínuo das temperaturas de trabalho. Os resultados obtidos indicaram uma temperatura de estabilização interna da câmara em torno de 14 ºC, diferindo dos valores teóricos esperados. As divergências foram atribuídas à carga de gás refrigerante menor que a especificada e ao tempo de coleta de dados insuficiente para alcançar a estabilidade térmica completa. Conclui-se que o experimento foi eficaz na aplicação prática dos conceitos teóricos, evidenciando a importância da verificação experimental para a compreensão das variáveis que afetam o desempenho de sistemas de refrigeração.

PALAVRAS-CHAVE: CÂMARA FRIGORÍFICA, MAPEAMENTO TÉRMICO, SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO, TERMODINÂMICA, ANÁLISE EXPERIMENTAL

1 INTRODUÇÃO

A refrigeração, processo de remoção de calor de um ambiente ou substância para redução e manutenção de sua temperatura, é uma das tecnologias mais importantes para o desenvolvimento industrial e a qualidade de vida moderna. Sua aplicação abrange setores críticos como a indústria alimentícia, farmacêutica, hospitais, laboratórios e sistemas de climatização, onde o controle preciso da temperatura é vital para a conservação de produtos e a segurança biológica (Baasch et al., 2009). Os princípios que regem os sistemas de refrigeração são alicerçados na termodinâmica e na transferência de calor, sendo o ciclo de compressão de vapor o modelo mais amplamente utilizado. Neste ciclo, um fluido refrigerante é submetido a uma série de transformações de estado, absorvendo calor de um ambiente e liberando-o em outro, garantindo a manutenção da temperatura desejada.

O ciclo de refrigeração por compressão de vapor é composto por quatro componentes principais: compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador. O compressor eleva a pressão e a temperatura do fluido refrigerante na fase de vapor, que segue para o condensador, onde perde calor para o ambiente externo e se condensa para o estado líquido.

Em seguida, o fluido passa pelo dispositivo de expansão, que reduz bruscamente sua pressão e temperatura. Por fim, o fluido chega ao evaporador, onde absorve calor do ambiente a ser resfriado e vaporiza, completando o ciclo. A eficiência e o desempenho desse ciclo são diretamente influenciados pelas propriedades do fluido refrigerante e pelas condições operacionais de cada componente.

O presente estudo se concentra na análise experimental e no mapeamento térmico de uma câmara frigorífica didática, um equipamento fundamental para a compreensão dos fenômenos termodinâmicos em um ambiente controlado. A câmara frigorífica utilizada, com dimensões de 0,6 x 0,6 x 0,6 metros, é um sistema de refrigeração por compressão de vapor projetado especificamente para fins didáticos. Seu principal objetivo é permitir a visualização e a medição das variáveis de temperatura e pressão em cada etapa do ciclo, proporcionando uma ponte entre a teoria e a prática para estudantes de engenharia e áreas afins.

A câmara opera com o fluido refrigerante R134a. O R134a (1,1,1,2-tetrafluoroetano) é um fluido da família dos hidrofluorocarbonos (HFCs), amplamente utilizado na indústria da refrigeração, especialmente como substituto do R-12, um clorofluorocarboneto (CFC) que foi descontinuado devido ao seu alto potencial de destruição da camada de ozônio (Rosa, 2009).

Embora o R134a não danifique a camada de ozônio, ele ainda possui um potencial de aquecimento global (GWP) considerável, o que tem levado a novas pesquisas e o desenvolvimento de refrigerantes de nova geração com menor impacto ambiental.

A técnica de mapeamento térmico é uma ferramenta essencial para a validação e qualificação de equipamentos de controle de temperatura. Ela consiste no monitoramento contínuo da temperatura em diversos pontos de um ambiente, permitindo identificar as áreas mais quentes e mais frias, avaliar a uniformidade térmica e garantir que as condições de armazenamento estejam em conformidade com as normas e regulamentos técnicos (ANVISA, RDC 430/2020; ABNT NBR 16328:2014).

Em uma câmara frigorífica, o mapeamento térmico é crucial para assegurar a integridade de produtos sensíveis à temperatura e otimizar o posicionamento de sensores de monitoramento. Ao realizar o mapeamento térmico, este trabalho não apenas avalia o desempenho do equipamento, mas também ilustra a importância dessa técnica na garantia de qualidade e na validação de processos em diversas indústrias.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é realizar o mapeamento térmico de uma câmara frigorífica didática, a fim de:

- Determinar o perfil térmico e o comportamento da temperatura interna da câmara durante a operação.
- Analisar e registrar os dados de pressão e temperatura em pontos-chave do ciclo de refrigeração por compressão de vapor.
- Comparar os dados experimentais obtidos com a teoria termodinâmica de refrigeração e os diagramas de Pressão x Entalpia (Pxh).
- Identificar possíveis desvios entre o desempenho prático do equipamento e o seu funcionamento ideal, investigando as possíveis causas.

1.2 Justificativa

A pesquisa justifica-se pela necessidade de consolidar o conhecimento teórico da termodinâmica de refrigeração com a prática experimental. A utilização de uma câmara frigorífica didática permite um ambiente controlado e seguro para a aquisição de dados, que por sua vez, contribuem para o aprofundamento do entendimento sobre os fenômenos de transferência de calor e as variáveis operacionais do ciclo frigorífico.

O estudo do fluido refrigerante R134a, de ampla utilização, adiciona relevância prática ao trabalho. Dessa forma, o presente artigo serve como uma ferramenta educativa valiosa, auxiliando na formação de profissionais mais capacitados para projetar, operar e manter sistemas de refrigeração de forma eficiente, segura e em conformidade com as normas técnicas vigentes.

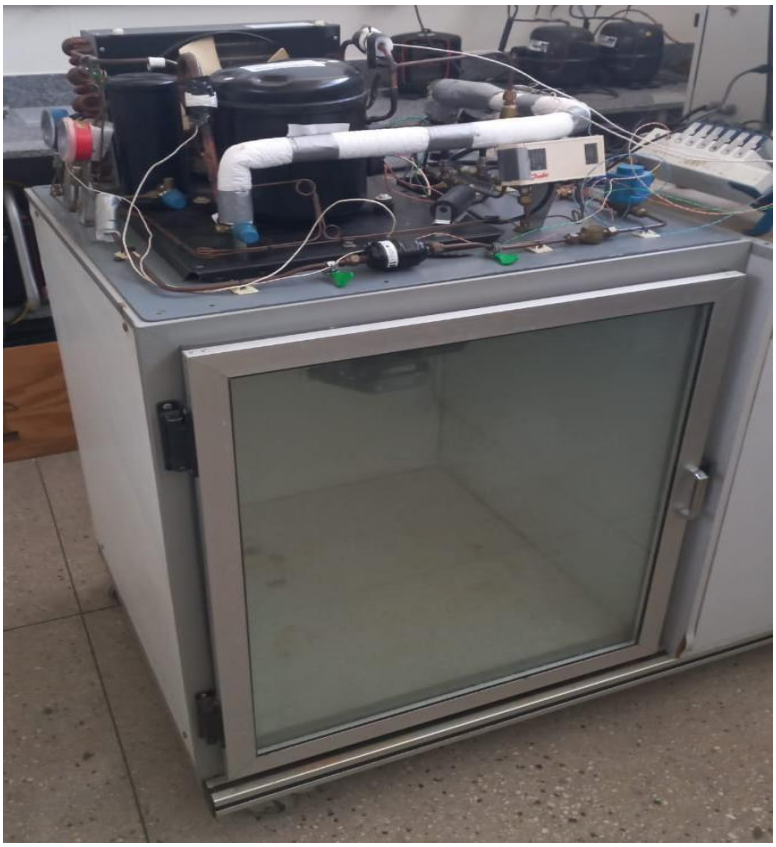
2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida a partir de um estudo experimental, utilizando como equipamento principal uma câmara frigorífica didática. A câmara, apresentada na Figura 1, foi utilizada em condições normais de operação, funcionando com o fluido refrigerante R22.

Este equipamento foi projetado para simular o ciclo frigorífico em um ambiente controlado, permitindo uma análise prática do seu desempenho e funcionamento. Para facilitar a compreensão e estudo do ciclo, foi elaborado um esquema representado na Figura 2, no qual todos os componentes do sistema, como o compressor, o condensador, a válvula de expansão e o evaporador, foram claramente identificados.

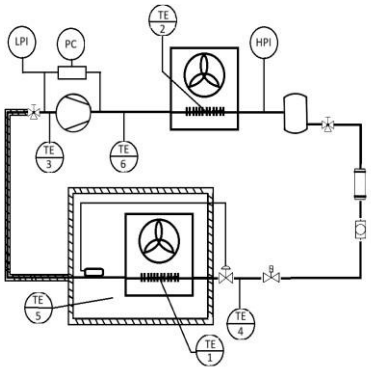
Além disso, os pontos críticos para o levantamento das temperaturas em diferentes estágios do ciclo foram marcados, o que possibilitou uma análise detalhada das variações térmicas e a avaliação da eficiência do sistema. Este levantamento das temperaturas é fundamental para entender o comportamento do fluido refrigerante e as condições operacionais do ciclo, sendo essencial para o estudo e discussão atual.

FIGURA 1. Foto da câmara frigorífica didática.



Fonte: Autor (2025).

FIGURA 2. Fluxograma do ciclo simples da câmara fria.



Nº	IDENTIFICAÇÃO	LEITURA
1	TE	TEMPERATURA NO EVAPORADOR
2	TE	TEMPERATURA NO CONDENSADOR
3	TE	TEMPERATURA DE SUCÇÃO
4	TE	TEMPERATURA DA LINHA DE LIQUIDO
5	TE	TEMPERATURA AMBIENTE INTERNO
6	TE	TEMPERATURA DE DESCARGA
–	HPI	PRESSÃO DE ALTA
–	LPI	PRESSÃO DE BAIXA

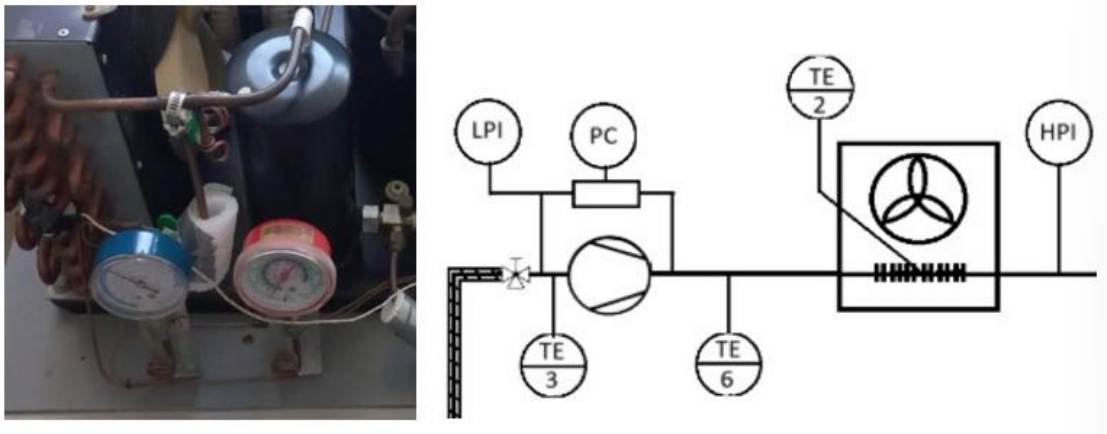
Fonte: Autor (2025).

Para a medição da pressão no sistema, a bancada didática da câmara frigorífica está equipada com dois manômetros, interligados às linhas de baixa e alta pressão, conforme ilustrado na Figura 3.

O manômetro de baixa pressão está instalado na tubulação antes do compressor para medir a pressão de sucção. Já o manômetro de alta pressão está posicionado logo após o condensador, aferindo a pressão de descarga.

As interligações para os manômetros também estão conectadas a um pressostato, que possibilita o registro e controle da diferença de pressão entre as linhas de alta e baixa.

FIGURA 3. Indicadores de Pressão



Fonte: Autor (2025).

A aquisição de dados de temperatura foi realizada em seis pontos específicos do ciclo de refrigeração. As medições foram feitas nos seguintes pontos: temperatura de evaporação, temperatura de condensação, temperatura de sucção do compressor, temperatura de descarga do compressor, temperatura da linha de líquido e temperatura do ambiente refrigerado.

Para isso, foi utilizado um sistema de medição e aquisição de dados do tipo National Instruments NI cDAQ - 9172. O mapeamento térmico foi realizado através de termopares tipo J, devidamente isolados e fixados nas tubulações nos respectivos pontos de medição.

A Figura 4 à Figura 9 mostram a localização de cada um desses sensores no sistema. A coleta de dados foi feita com um software apropriado, permitindo visualizar e monitorar o desempenho do sistema de refrigeração de maneira eficiente.

Figura 4. Sensor de temperatura do evaporador TE_ 1.



Fonte: Autor (2025).

Figura 5. Sensor de temperatura do condensador, TE_ 2.



Fonte: Autor (2025).

Figura 6. Sensor de temperatura na sucção do compressor, TE_ 3.



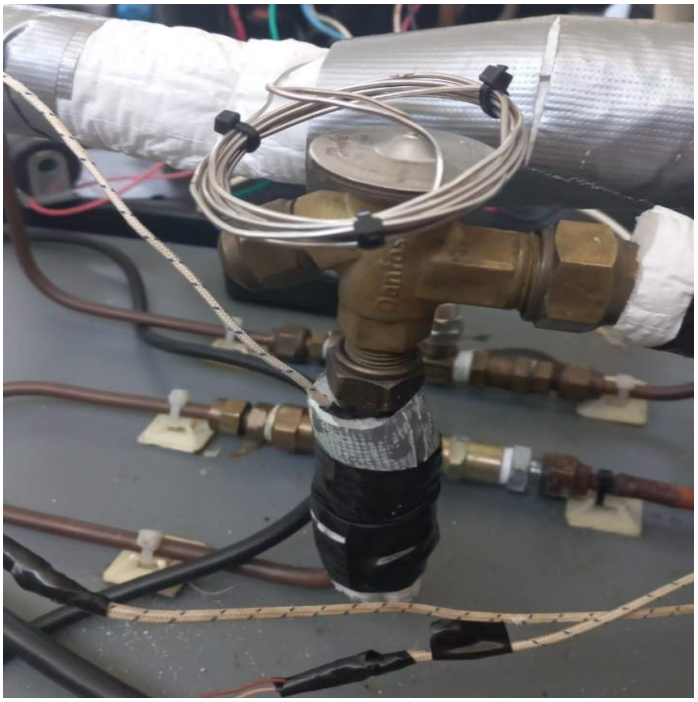
Fonte: Autor (2025).

Figura 7. Sensor de temperatura do ambiente interno, TE_ 4.



Fonte: Autor (2025).

Figura 8. Sensor de temperatura na linha de líquido, TE_ 5.



Fonte: Autor (2025).

Figura 9: Sensor de temperatura na descarga do compressor, TE_ 6.



Fonte: Autor (2025).

A metodologia adotada incluiu:

1. Levantamento de Dados: Antes de ligar a câmara, foram registradas a temperatura ambiente e a pressão inicial do sistema.

2. Operação do Equipamento: A câmara frigorífica foi ligada e os dados de temperatura e pressão foram coletados em intervalos regulares.

3. Análise do Ciclo de Refrigeração: Com o equipamento em operação, as temperaturas e pressões foram registradas nos pontos de entrada e saída de cada componente principal do ciclo (compressor, condensador, dispositivo de expansão e evaporador).

4. Mapeamento Térmico: Os termopares foram dispostos no interior da câmara para monitorar a variação espacial da temperatura e identificar as zonas de maior e menor resfriamento.

Os dados coletados foram processados e analisados em um software para a criação de gráficos de temperatura em função do tempo, além do diagrama de pressão-entalpia (Pxh), que permitiu a avaliação do desempenho termodinâmico do ciclo de refrigeração.

3 RESULTADOS

A análise dos dados experimentais permitiu a compreensão do desempenho da câmara frigorífica didática e a comparação com os princípios teóricos da termodinâmica de refrigeração. A experiência, baseada no levantamento de dados de temperatura e pressão, revelou postos-chaves para a avaliação da eficiência e do comportamento do sistema.

3.1 Simulação do ciclo teórico (Coolpack)

Para a análise teórica do ciclo de refrigeração, foi utilizado o software Coolpack. Este programa permitiu simular o ciclo ideal do fluido refrigerante R22 com base nos valores de temperatura de evaporação e condensação medidos na bancada didática. Os valores utilizados para a simulação foram:

- Temperatura de Evaporação: -15ºC
- Temperatura de Condensação: 43ºC
- Superaquecimento: 16ºK
- Sub-resfriamento: 8ºK
- Eficiência Isentrópica: 100%

Valores inseridos no coolpack demonstrados na Figura 10 a seguir:

Figura 10. Dados inseridos no coolpack

Values:

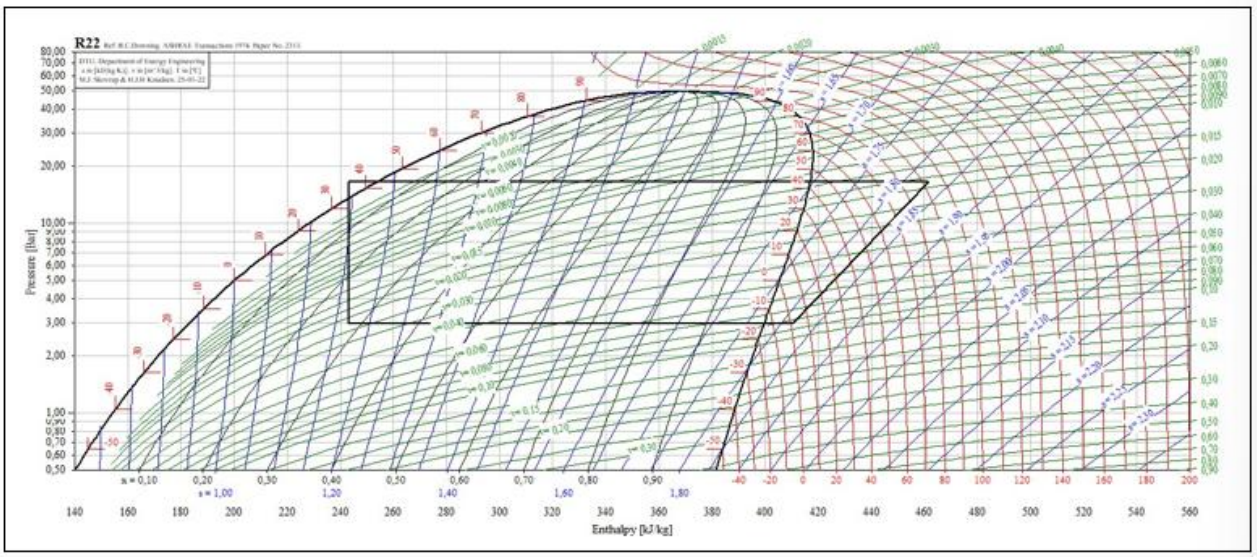
Evaporating temperature [°C]:	-15,00	Condensing temperature [°C]:	43,00
Superheat [K]:	16,00	Subcooling [K]:	8,00
Dp evaporator [bar]:	0,00	Dp condenser [bar]:	0,00
Dp suction line [bar]:	0,00	Dp liquid line [bar]:	0,00
Dp discharge line [bar]:	0,00		
Isentropic efficiency [0-1]:	1,00		

Fonte: Software coolpack

A partir desses dados, o software traçou o ciclo ideal no diagrama de pressão-entalpia (P-h), como ilustrado na Figura 11, e gerou os valores teóricos de temperatura para os principais pontos do ciclo, conforme a Figura 12.

A simulação é uma ferramenta valiosa para estabelecer uma referência teórica e permitir a comparação direta com os resultados obtidos experimentalmente.

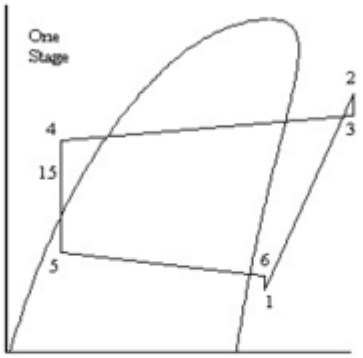
Figura 11. Diagrama P-h para o R22



Fonte: Software coolpack

Figura 12. Valores de temperaturas do ciclo teórico

Cycle: Câmara Fria
Refrigerant: R22
Values at points 1-6,15 for the selected one stage cycle



Point	T [°C]	P [bar]	v [m^3/kg]	h [kJ/kg]	s [kJ/(kg K)]
1	1,000	2,957	0,083798	410,284	1,8158
2	93,000	16,487	0,018600	461,729	1,8271
3	92,998	16,487	0,018602	461,729	1,8272
4	35,000	16,487	N/A	243,101	N/A
5	N/A	2,957	N/A	243,101	N/A
6	1,000	2,957	0,083796	410,284	1,8158
15	N/A	16,487	N/A	243,101	N/A

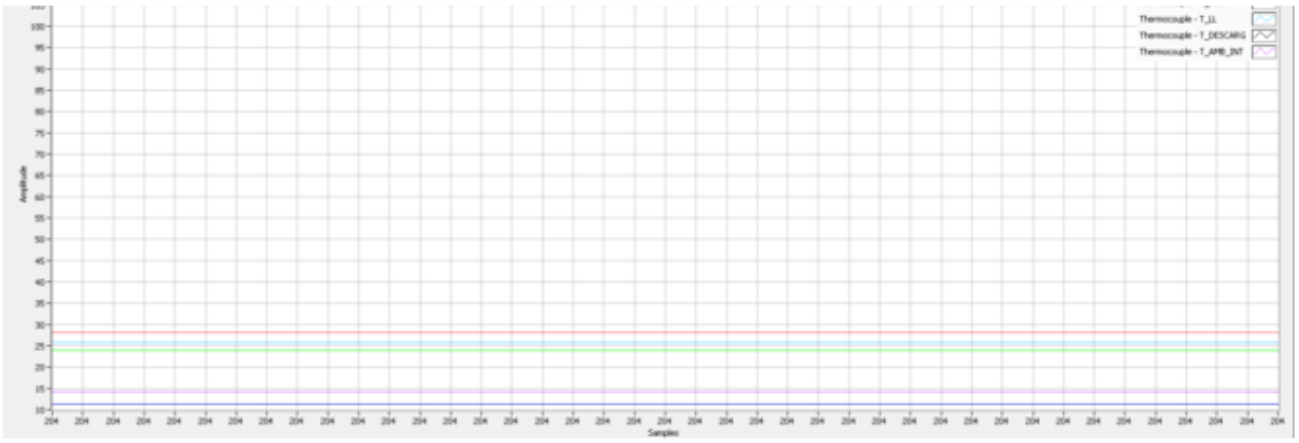
****

Fonte: Software coolpack

3.2 Análise dos dados experimentais

Após a estabilização das temperaturas, o registro dos valores foi realizado para uma análise detalhada das condições reais de operação da câmara frigorífica didática. As temperaturas foram coletadas em seis pontos específicos, utilizando termopares devidamente isolados, conforme ilustrado nas Figuras 4 a 9, e os resultados foram registrados, possibilitando a criação do gráfico da Figura 13 e da tabela da Figura 14.

Figura 13. Gráfico dos valores de temperaturas medidos.



Fonte: Software LabVIEW Real-Time Module

Figura 14. Tabela de identificação e valores das medidas de temperaturas.

Channel	Value
T_EVA	11,387551
T_COND	28,120095
T_SUC	23,948768
T_LL	26,00743
T_DESCARG	110,660457
T_AMB_INT	14,29405

Fonte: Software LabVIEW Real-Time Module

As temperaturas aproximadas medidas durante a operação revelaram as seguintes variações ao longo do ciclo:

- A temperatura de sucção do compressor foi registrada em 24 ºC.
- Após a compressão, o fluido refrigerante atingiu a temperatura de 110 ºC.
- No condensador, o fluido perdeu calor, resultando em uma temperatura média de 28 ºC, e continuou a perder calor até chegar a 26 ºC antes da válvula de expansão.
- No evaporador, o fluido alcançou uma temperatura média de 11 ºC, promovendo a troca de calor com o ambiente interno.

- Como resultado, a temperatura do ambiente dentro da câmara frigorífica estabilizou em torno de 14 ºC.

Esses resultados estão de acordo com os efeitos típicos dos processos de compressão e expansão, bem como as perdas de energia que ocorrem nos trocadores de calor. As medições de temperatura na linha de sucção e na linha de líquido, logo antes da válvula de expansão, foram fundamentais para calcular as diferenças de superaquecimento e sub-resfriamento, permitindo uma análise mais precisa da eficiência térmica e das condições operacionais do ciclo frigorífico.

3.3 Comparação e discussão

A comparação entre os valores teóricos, simulados no Coolpack, e os valores experimentais revelou a não idealidade do ciclo real. A temperatura de evaporação medida, por exemplo, de 11 °C, é significativamente maior do que a temperatura de evaporação ideal de -15 °C. Essa divergência entre os valores práticos e os teóricos é um indicador de ineficiências no sistema, como perdas de carga ou uma carga de gás refrigerante (R22) insuficiente para as condições do experimento.

Como mencionado por (Squair, 2024), a vedação da porta, a carga de refrigerante e a manutenção são fatores críticos que afetam a eficiência e a estabilidade da temperatura em câmaras frigoríficas.

O cálculo do superaquecimento e do sub-resfriamento a partir dos dados experimentais também se mostrou essencial. O superaquecimento, que garante que o fluido chegue ao compressor no estado de vapor, e o sub-resfriamento, que assegura que apenas líquido chegue à válvula de expansão, são parâmetros vitais para o bom funcionamento do sistema (Frigocenter, 2020).

As medições do experimento confirmaram a presença desses fenômenos, evidenciando que o ciclo de refrigeração didático se desvia do modelo teórico ideal, mas opera dentro de um comportamento fisicamente esperado para um sistema real.

4 CONCLUSÕES

Este estudo experimental, focado no mapeamento térmico e na análise do ciclo de refrigeração de uma câmara frigorífica didática, permitiu uma compreensão aprofundada do funcionamento prático de um sistema de refrigeração por compressão de vapor.

A comparação entre os dados experimentais e a simulação teórica realizada com o software Coolpack evidenciou a importância da abordagem prática para a consolidação dos conceitos termodinâmicos.

A pesquisa demonstrou que, apesar dos desvios em relação à teoria, a câmara frigorífica didática opera de maneira fisicamente coerente com os princípios de funcionamento de um sistema de refrigeração. No entanto, as diferenças nos resultados indicam problemas inerentes ao modelo didático.

Causas das diferenças entre resultados teóricos e práticos:

A discrepância entre os valores simulados e os dados experimentais pode ser atribuída a diversas causas, que são comuns em sistemas de refrigeração reais e que se tornam ainda mais evidentes em um modelo didático, onde as condições ideais são difíceis de replicar. As possíveis causas incluem:

- Vazamentos de Fluido Refrigerante: A carga de fluido refrigerante (R22) pode não ser a ideal para o sistema, ou pode haver vazamentos que comprometem a eficiência e a capacidade de resfriamento. Um sistema com carga insuficiente tem uma menor capacidade de absorção de calor no evaporador, o que resulta em temperaturas internas mais altas do que o esperado (Squair, 2024).

- Vedação Ineficiente: Uma vedação deficiente da porta da câmara frigorífica permite a entrada constante de ar quente do ambiente externo. Isso aumenta a carga térmica do sistema, fazendo com que o compressor trabalhe mais e, ainda assim, resulte em temperaturas internas mais elevadas, como a temperatura de 14 ºC observada no experimento (Inovadoor, 2024).

- Perdas de Carga e Ineficiências do Compressor: O modelo teórico do ciclo não considera as perdas de carga por atrito nas tubulações e as ineficiências mecânicas e volumétricas do compressor. Em um sistema real, essas perdas reduzem o desempenho geral e podem levar a desvios significativos nas pressões e temperaturas medidas em comparação com os valores ideais.

- Condições de Operação não Estáveis: Embora tenha sido esperado que a temperatura se estabilizasse, variações nas condições ambientais do laboratório ou a natureza didática do equipamento podem impedir um regime de operação completamente estável, gerando flutuações nos dados.

Essas diferenças ressaltam a importância da análise prática e da compreensão de que a teoria é um ponto de partida, mas a aplicação em sistemas reais requer a consideração de fatores que influenciam a eficiência e o desempenho.

Principais pontos conclusivos:

- Validação da Teoria: A experiência prática demonstrou que o ciclo de refrigeração real se desvia do modelo teórico ideal. A câmara frigorífica didática, ao operar com o fluido refrigerante R22, apresentou superaquecimento e sub-resfriamento, confirmando que esses fenômenos são inerentes aos sistemas reais e são essenciais para o seu bom desempenho e proteção do compressor.

- Mapeamento Térmico: O mapeamento térmico revelou a distribuição de temperatura no interior da câmara. A temperatura de 14 ºC obtida, embora acima do ideal para câmaras frigoríficas comerciais, é um resultado plausível para uma bancada didática. A análise da estabilização da temperatura e a identificação de possíveis ineficiências, como perda de carga ou carga de refrigerante insuficiente, reforçam a necessidade de verificação periódica e manutenção.

- Análise do Desempenho: A medição das pressões e temperaturas em pontos-chave do ciclo, como na sucção e descarga do compressor, no condensador e no evaporador, foi fundamental para avaliar o desempenho do sistema. A diferença entre os valores práticos e teóricos sublinha a importância de considerar fatores reais como a eficiência isentrópica do compressor e as perdas de carga.

- Contribuição Educacional: A bancada didática se mostrou uma ferramenta valiosa para o aprendizado, pois permitiu aos alunos visualizar e quantificar as transformações do fluido refrigerante, conectando a teoria do diagrama P-h à realidade das medições. Este estudo serve como um guia para futuros experimentos, destacando a metodologia necessária para uma análise robusta e a interpretação crítica dos resultados.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

BAASCH, C. A.; HASSE, C. R.; ALEXANDRINI, F. Monitoração do Controle de Temperaturas de Frigorífico Conforme Circular 175 do MAPA. In: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (SEGeT). Disponível em: https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos09/151_frigorifico.pdf. Acesso em: 02 ago. 2025.

BRASIL. Norma ABNT NBR 16328:2014 - Esterilização de produtos para saúde — Procedimento de ensaios para medição de temperatura, pressão e umidade em equipamentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ELGIN. Superaquecimento no sistema de refrigeração. [S.l.]: Elgin, 2022. Disponível em: https://blog.elgin.com.br/refrigeracao/superaquecimento-no-sistema-de-refrigeracao/. Acesso em: 02 ago. 2025.

FRIGOCENTER. Superaquecimento e sub-resfriamento no sistema de refrigeração. [S.l.]: Frigocenter, 2020. Disponível em: https://frigocenter.com.br/2020/02/26/superaquecimento-e-sub-resfriamento-no-sistema-de-refrigeracao/. Acesso em: 05 ago. 2025.

IFSC. TERMODINÂMICA (TMD) Volume II TERMODINÂMICA APLICADA À REFRIGERAÇÃO. [S.l.]:

IFSC, 2023. Disponível em: https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/d/da/Apostila_TMD_Vol_II_v4.pdf. Acesso em: 08 ago. 2025.

INOVADOOR. Perda de temperatura em câmara frigorífica: 10 formas de resolver. [S.l.]: Inovadoor, 2024. Disponível em: https://inovadoor.com.br/10-formas-de-resolver-perda-de-temperatura-em-camara-frigorifica/. Acesso em: 02 ago. 2025.

ITA FRIA. Mapeamento térmico – importância e etapas de realização. [S.l.]: Ita Fria, 2021. Disponível em: https://itafria.com.br/mapeamento-termico/. Acesso em: 03 ago. 2025.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Manual de Rede de Frio. Brasília: Ministério da Saúde, 2006.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. Resolução de Diretoria Colegiada - RDC Nº 430, de 8 de Outubro de 2020. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), 2020.

ROSA, A. E. Frigofacil: sistema de dimensionamento de câmaras frigoríficas. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

SQUAIR. 5 Falhas Mais Identificadas em Câmaras Frigoríficas e Soluções. [S.l.]: Squair, 2024. Disponível em: https://blog.squair.io/pt/5-falhas-mais-identificadas-em-c%C3%A2maras-frigor%C3%ADficas-e-solu%C3%A7%C3%B5es. Acesso em: 10 ago. 2025.

VAISALA. 8 Passos para validação e/ou Mapeamento de uma Câmara. [S.l.]: Vaisala, 2021. Disponível em: https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/CEN-LSH-8-Steps-to-Validating-Mapping-a-Chamber-B211103PT-A-Lowres.pdf. Acesso em: 01 ago. 2025.

Capítulo 9

10.37423/251110437

SIMULAÇÃO DE PROPRIEDADES COLIGATIVAS DE FLUIDOS SECUNDÁRIOS PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL COM TERMOACUMULAÇÃO

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Wertson da Silva Resende — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Edilson Marinho da Silva Júnior — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)*

Thiago da Silva André — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)*

RESUMO

Processos industriais que envolvem grandes cargas térmicas exigem sistemas de refrigeração eficientes e de grande porte. Embora os sistemas convencionais por expansão direta sejam confiáveis e de baixo custo, tornam-se antieconômicos em aplicações de elevada demanda térmica devido à necessidade de alto isolamento térmico e à distância entre os componentes, o que compromete a eficiência. Como alternativa, sistemas de refrigeração por expansão indireta com termoacumulação têm se mostrado mais eficazes, especialmente quando utilizam fluidos secundários. Este estudo analisa as propriedades termofísicas de soluções aquosas contendo cloreto de sódio, cloreto de magnésio e acetato de potássio, com potencial aplicação em sistemas de refrigeração industrial com termoacumulação. A adição desses sais promove alterações significativas nas propriedades físicas dos fluidos, como redução da temperatura de fusão, diminuição do calor específico, aumento da massa específica e viscosidades, além da redução da condutividade térmica. Tais mudanças impactam diretamente o desempenho térmico e hidráulico do sistema, influenciando o dimensionamento, a eficiência do bombeamento e a capacidade de armazenamento de frio. Os resultados indicam que a escolha adequada do fluido secundário deve considerar o equilíbrio entre propriedades térmicas e hidráulicas, visando otimizar o desempenho energético e operacional dos sistemas de refrigeração industrial com termoacumulação.

PALAVRAS-CHAVE: REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL, TERMOACUMULAÇÃO, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, SALMOURAS.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração por expansão indireta com termoacumulação têm se mostrado mais eficazes e vantajosos em termos operacionais e energéticos em setores com grande demanda térmica como a indústria de alimentos e bebidas (laticínios, frigoríficos, cervejarias), farmacêutica (produção e armazenamento de medicamentos), química (controle térmico de reatores), além de centros logísticos e empreendimentos de grande porte como shoppings e aeroportos,.

Nessas aplicações, os sistemas convencionais por expansão direta são economicamente inviáveis devido à necessidade de alto isolamento térmico, à complexidade de instalação e à distância entre os componentes.

A termoacumulação consiste no armazenamento de frio durante períodos de baixa demanda térmica e menor custo energético — geralmente à noite — para posterior utilização nos horários de pico de carga térmica e de maior tarifa elétrica.

Essa estratégia permite não apenas a redução do consumo energético em horários críticos, como também melhora a eficiência do sistema primário de refrigeração, conforme apontado na literatura especializada. ASHRAE (2021).

No contexto dos sistemas por expansão indireta, o fluido secundário desempenha papel fundamental na transferência de calor entre o ambiente refrigerado e o sistema primário. A escolha adequada desse fluido é crucial, pois suas propriedades termofísicas influenciam diretamente o desempenho térmico e hidráulico do sistema. (ALI et al., 2021; LIU e ZHANG, 2023) “A adição de substâncias anticongelantes — como cloreto de sódio, cloreto de magnésio e acetato de potássio — modifica propriedades coligativas importantes, como densidade, viscosidade dinâmica e cinemática, calor específico, condutividade térmica e ponto de fusão”.

Fluidos secundários são geralmente compostos por soluções aquosas contendo sais ou álcoois, (CHEN et al., 2021; ZHOU et al., 2024) “que modificam as propriedades físicas da água pura. Essas alterações — conhecidas como propriedades coligativas — incluem a depressão do ponto de congelamento, variações na viscosidade, condutividade térmica e calor específico”.

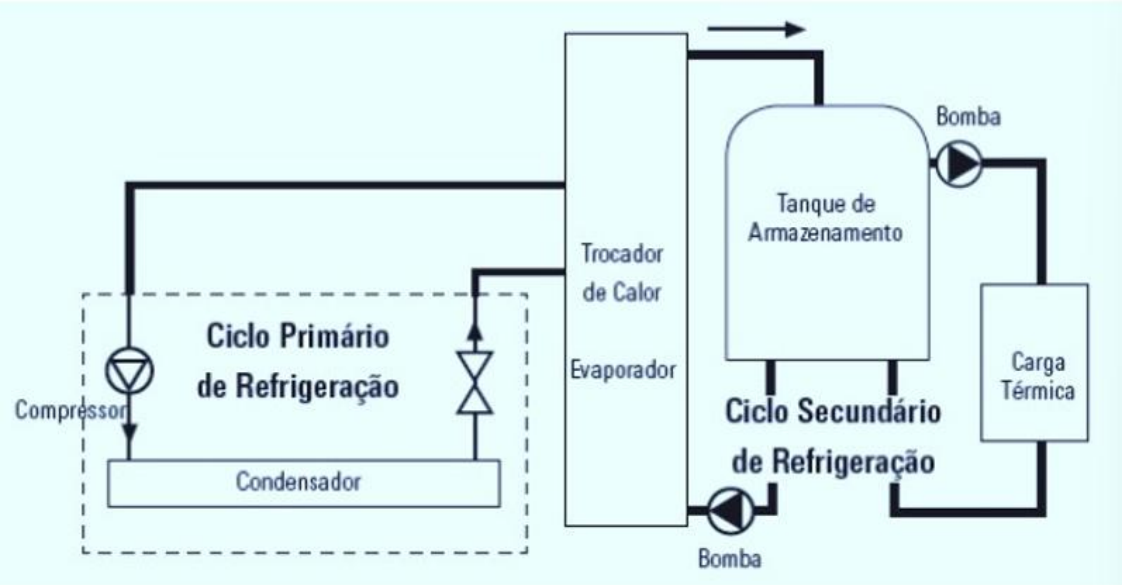
A compreensão dessas propriedades coligativas dos fluidos secundários é fundamental para o dimensionamento adequado do sistema e para garantir sua operação eficiente em diferentes condições climáticas.

A crescente demanda por sistemas térmicos industriais mais eficientes e sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias que otimizem o desempenho energético e operacional de processos de refrigeração.

Em aplicações de larga escala, os sistemas convencionais por expansão direta apresentam limitações significativas, como elevado consumo energético, necessidade de alto isolamento térmico e baixa flexibilidade operacional.

Nesse contexto, os sistemas de refrigeração por expansão indireta com termoacumulação surgem como alternativa promissora, especialmente quando associados ao uso de fluidos secundários com propriedades coligativas ajustadas. (Chen et al. 2021). A Figura 1 mostra um sistema típico de refrigeração industrial por expansão indireta com termoacumulação.

FIGURA 1. Sistema típico de refrigeração por expansão indireta com termoacumulação.



Fonte: Ticona (2007).

1.1 Objetivos geral e específicos

Este estudo tem como objetivo geral investigar, por meio de simulações computacionais, as propriedades coligativas de soluções aquosas contendo sais inorgânicos com potencial aplicação como fluidos secundários em sistemas de refrigeração industrial com termoacumulação.

Os objetivos específicos são:

1) Avaliar o impacto da adição de NaCl, $MgCl_2$ e CH_3CKO2 nas propriedades termofísicas da água.

2) Identificar as alterações em temperatura de fusão, calor específico, viscosidade, massa específica e condutividade térmica.

3) Correlacionar os resultados simulados com o desempenho térmico e hidráulico de sistemas de refrigeração indireta.

4) Propor critérios para a seleção otimizada de fluidos secundários em função da aplicação e das condições operacionais.

1.2 Justificativas

A adição de sais como cloreto de sódio, cloreto de magnésio e acetato de potássio modifica características fundamentais dos fluidos, como ponto de congelamento, calor específico, viscosidade e condutividade térmica. Essas alterações impactam o dimensionamento dos componentes, a eficiência do bombeamento e a estabilidade operacional do sistema.

Este estudo justifica-se pela necessidade de compreender, por meio de simulações, (GARCÍA et al., 2022; BAHADORI & ZHANG, 2021) “como essas propriedades coligativas afetam o comportamento dos fluidos secundários em condições reais de operação”.

Os resultados obtidos na presente pesquisa oferecem subsídios técnicos para a seleção e formulação de soluções aquosas mais eficientes, contribuindo para o avanço da engenharia térmica e para o desenvolvimento de sistemas de refrigeração mais econômicos, seguros e ambientalmente sustentáveis.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de avaliar o desempenho de fluidos secundários em sistemas de refrigeração industrial com termoacumulação, este estudo adotou uma abordagem computacional para simular propriedades coligativas de diferentes soluções aquosas.

A escolha dos materiais e a metodologia aplicada visam representar condições reais de operação, considerando aspectos térmicos e hidráulicos que influenciam diretamente a eficiência energética e operacional dos sistemas. As simulações foram conduzidas com base em dados experimentais consolidados, utilizando ferramentas específicas para análise termofísica.

As propriedades termofísicas avaliadas foram selecionadas por sua relevância na caracterização do comportamento dos fluidos em ambientes industriais, especialmente em aplicações que envolvem grandes cargas térmicas e exigem alta confiabilidade no transporte e armazenamento de frio. (Ali et al. 2021)

2.1 Seleção dos fluidos secundários

Neste estudo, foram analisadas três salmouras comumente utilizadas em sistemas de refrigeração industrial e disponíveis na biblioteca do software SecCool:

1. Cloreto de sódio (NaCl): fluido não tóxico e amplamente utilizado em sistemas abertos e em contato com alimentos, embora apresente alta temperatura de fusão e potencial corrosivo.

2. Cloreto de magnésio ($MgCl_2$): salmoura com boa performance térmica e aplicação consolidada em sistemas industriais.

3. Acetato de potássio (CH_3CKO2): fluido não tóxico, recomendado para aplicações alimentícias, com propriedades favoráveis à transferência de calor.

Esses sais foram dissolvidos em água (solvente universal) para formar soluções aquosas (salmouras) em diferentes concentrações, simulando condições reais de operação.

2.2 Simulação computacional

As propriedades termofísicas dos fluidos secundários foram determinadas por meio do software SecCool, utilizando dados experimentais, em base mássica, da ASHRAE e do pesquisador Ake Melinder.

O programa SecCool é de fácil utilização e possibilita simular a influência da concentração mássica do soluto e da temperatura nas propriedades coligativas de diferentes soluções aquosa salmouras. (Chen et al. 2021; Zhou et al. 2024)

2.3 Propriedades termofísicas avaliadas

A análise das propriedades termofísicas dos fluidos secundários é essencial para compreender seu comportamento em sistemas de refrigeração industrial com termoacumulação. Essas propriedades influenciam diretamente o desempenho térmico e hidráulico, afetando desde a eficiência da troca de calor até a potência necessária para bombeamento.

A escolha do fluido ideal depende do equilíbrio entre essas características, que devem ser compatíveis com as condições operacionais e os objetivos energéticos da aplicação. As propriedades simuladas neste estudo, com base nos dados fornecidos pelo software SecCool, foram:

1. Ponto de fusão: Temperatura em que se inicia a formação de cristais de gelo em equilíbrio. Deve estar cerca de 10 K abaixo da temperatura mínima de operação para garantir bombeamento seguro e evitar congelamento total. (Chen et al. 2021; García et al. 2022)

2. Calor específico: Quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de 1 kg de fluido em 1 K. Valores elevados são desejáveis para maximizar a capacidade de armazenamento de frio. (Ali et al. 2021; Zhou et al. 2024)

3. Massa específica: Relação entre massa e volume do fluido. Influencia diretamente o transporte de calor e a expansão térmica. (Liu e Zhang, 2023).

4. Viscosidade dinâmica: Medida da resistência interna ao escoamento. Valores baixos favorecem o bombeamento e a transferência de calor. (Hossain e Rahman, 2022; Kim e Lee, 2022)

5. Viscosidade cinemática: Razão entre viscosidade dinâmica e massa específica. Afeta o regime de escoamento e o dimensionamento hidráulico. (Hossain e Rahman, 2022; Kim e Lee, 2022)

6. Condutibilidade térmica: Capacidade do fluido de conduzir calor. Valores elevados promovem maior eficiência na troca térmica entre os componentes do sistema. (Bahadori e Zhang, 2021; TYFO, 2025).

Essas propriedades foram simuladas para cada salmoura (NaCl, $MgCl_2$ e CH_3CKO2) em diferentes concentrações e faixas de temperatura, permitindo uma análise comparativa detalhada entre os fluidos.

2.4 Tratamento dos dados

Para interpretar os resultados obtidos nas simulações, foi adotado um procedimento sistemático de organização e análise gráfica. Essa etapa é fundamental para visualizar o comportamento das propriedades coligativas dos fluidos secundários (salmouras) em função da variação de concentração mássica dos solutos e da temperatura, permitindo comparações diretas entre as soluções estudadas.

Inicialmente, os dados gerados pelo software SecCool foram exportados para o programa Microsoft Excel, onde foram organizados em tabelas e utilizados para a construção de gráficos.

Cada propriedade termofísica — ponto de fusão, calor específico, massa específica, viscosidade dinâmica, viscosidade cinemática e condutibilidade térmica — foi representada por curvas individuais para cada salmoura (NaCl, $MgCl_2$ e CH_3CKO2), considerando as concentrações mássicas e faixas de temperatura.

Esses gráficos permitiram identificar tendências, limites operacionais e características específicas de cada salmoura, facilitando a análise comparativa e a avaliação de sua viabilidade técnica em sistemas de refrigeração com termoacumulação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

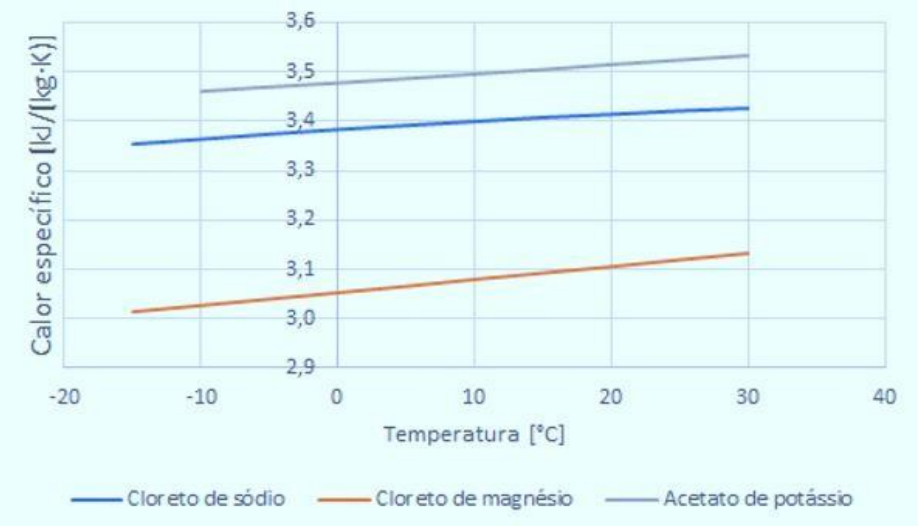
A análise dos resultados obtidos por meio das simulações realizadas no software SecCool permitiu avaliar o comportamento das propriedades coligativas de três salmouras que foram objetos do estudo — cloreto de sódio, cloreto de magnésio e acetato de potássio — em diferentes concentrações e faixas de temperatura.

Os dados foram organizados em gráficos e tabelas, possibilitando comparações diretas entre as salmouras e a água pura (sem adição de anticongelantes), com foco na aplicação em sistemas de refrigeração industrial com termoacumulação.

A Figura 2 apresenta os gráficos de variação do calor específico das salmouras com 20% de soluto em função da temperatura. Observa-se que o calor específico aumenta com a elevação da temperatura. (Ali et al. 2021; Zhou et al. 2024).

Entre as salmouras analisadas com 20% de soluto, a de acetato de potássio apresentou os maiores valores de calor específico ao longo de toda faixa de temperatura.

FIGURA 2. Calor específico de salmouras versus temperatura com 20% de soluto.



Fonte: Autor.

A Tabela 1 mostra os valores de calor específico para salmouras com 20% de soluto a 4°C e para água sem anticongelantes a 4°C , evidenciando que a água pura possui o maior valor (4,205 kJ/kg·K), cerca de 21% superior ao da salmoura de acetato de potássio.

TABELA 1. Calor específico de salmouras com 20% de soluto e da água pura à 4°C.

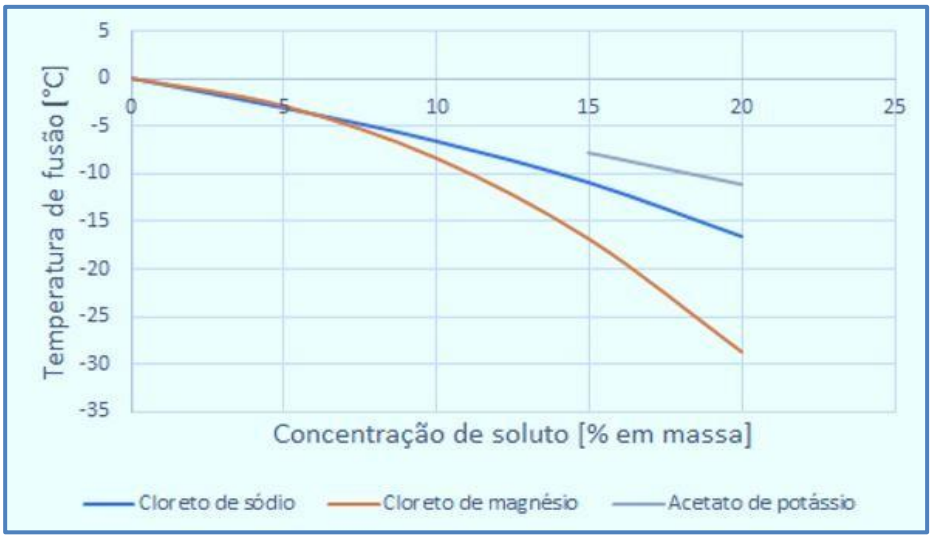
20% à 4°C	NaCl	$MgCl_2$	CH_3CKO_2	NBS, Àgua
Calor específico [kJ/(kg·K)]	3,390	3,063	3,486	4,205

Fonte: Autor.

A Figura 3 mostra os gráficos da temperatura de fusão das salmouras. Verifica-se que, à medida que a concentração de soluto aumenta, a temperatura de fusão diminui para todas as salmouras. Até cerca

de 7% de concentração, os valores para cloreto de sódio e magnésio são próximos, mas divergem significativamente em concentrações maiores. (Chen et al. 2021; García et al. 2022).

FIGURA 3. Temperatura de fusão de salmouras versus concentração de soluto.



Fonte: Autor.

A Tabela 2 mostra que, para 20% de concentração a 4°C, o cloreto de magnésio apresenta a menor temperatura de fusão (-28,67°C), sendo 74% inferior à do cloreto de sódio e 157% menor que a do acetato de potássio.

Todas as salmouras, objeto deste estudo, reduzem significativamente a temperatura de fusão em relação à água pura (0°C), o que é desejável para aplicações com baixas temperaturas operacionais.

TABELA 2. Temperatura de fusão de salmouras com 20% de soluto e da água pura à 4°C.

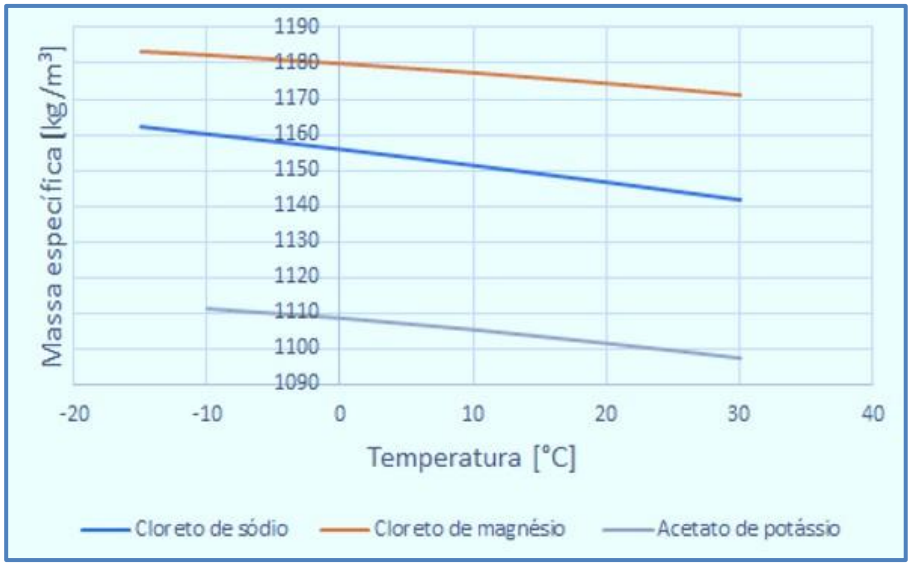
20% à 4°C	NaCl	$MgCl_2$	CH_3CKO_2	NBS, Àgua
Temperatura de fusão [°C]	-16,49	-28,67	-11,14	0

Fonte: Autor.

Quando comparado à temperatura de fusão da água sem anticongelantes, observa-se que todas as salmouras apresentam redução expressiva nessa temperatura, sendo mais intenso o abaixamento da temperatura de fusão da salmoura de cloreto de magnésio.

A Figura 4 mostra os gráficos da variação da massa específica em função da temperatura. Nota-se que a massa específica diminui com o aumento da temperatura. (Liu e Zhang, 2023)

FIGURA 4. Massa específica de salmouras versus temperatura



Fonte: Autor.

A Tabela 3 mostra valores de massa específica de salmouras com 20% de soluto a 4°C. Da Tabela 3, nota-se que a salmoura com cloreto de magnésio possui a maior massa específica, sendo 17,9% maior do que a água pura, sem aditivos anticongelantes.

TABELA 3. Massa específica de salmouras com 20% de soluto e da água pura à 4°C.

20% à 4°C	NaCl	$MgCl_2$	CH_3CKO_2	NBS, Àgua
Massa específica [kg/m³]	1154,1	1179,0	1107,2	1000,0

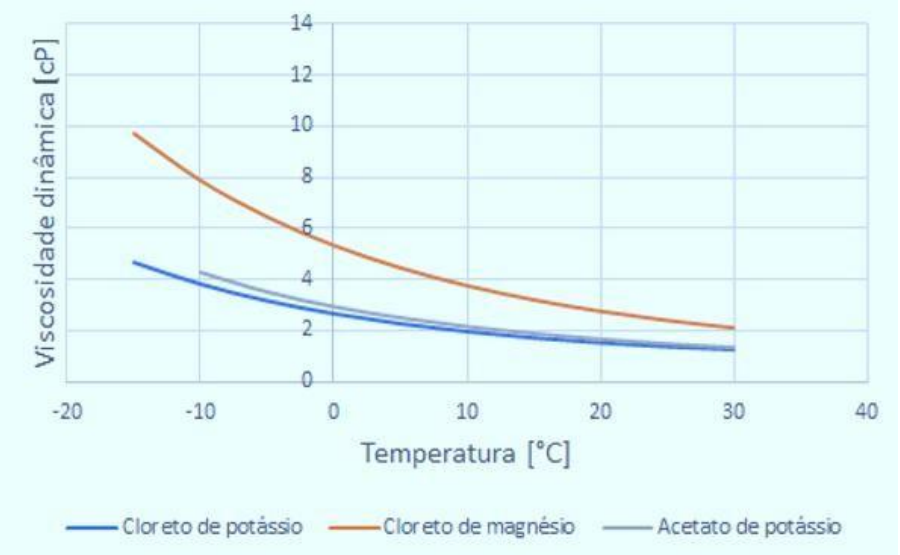
Fonte: Autor.

A Figura 5 apresenta os gráficos de viscosidade dinâmica das salmouras em função da temperatura. Observa-se que dessa Figura 5 que, em geral, a viscosidade diminui com o aumento da temperatura.

Para uma mesma concentração, a salmoura de cloreto de magnésio apresenta os maiores valores e variações mais acentuadas do que as demais, o que pode impactar negativamente o bombeamento e a transferência de calor.

A Tabela 4 mostra que, a 4°C e 20% de concentração, a viscosidade dinâmica da salmoura com cloreto de magnésio (4,578 cP) é quase três vezes maior que a da água (1,569 cP), indicando maior resistência ao escoamento.

FIGURA 5. Viscosidade dinâmica de salmouras versus temperatura



Fonte: Autor.

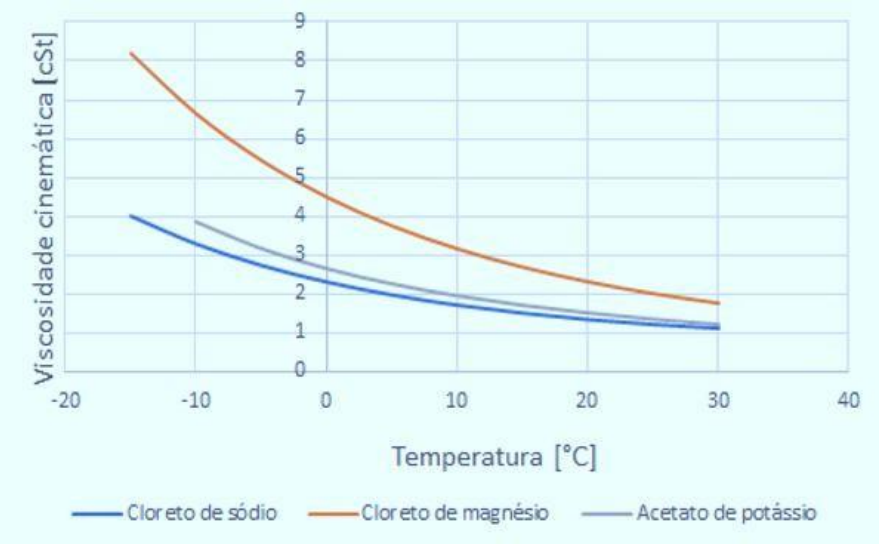
TABELA 4. Viscosidade dinâmica de salmouras com 20% de soluto e da água pura à 4°C.

20% à 4°C	NaCl	$MgCl_2$	CH_3CKO_2	NBS, Àgua
Viscosidade dinâmica (cP)	2,344	4,578	2,577	1,569

Fonte: Autor.

A Figura 6 mostra que a viscosidade cinemática de salmouras em função da temperatura, com tendência muito semelhante à viscosidade dinâmica da Figura 5: a viscosidade cinemática diminui com o aumento da temperatura e varia conforme a concentração.

FIGURA 6. Viscosidade cinemática de salmouras versus temperatura



Fonte: Autor.

De forma análoga à viscosidade dinâmica, a viscosidade cinemática decresce à medida que se aumenta a concentração de soluto na salmoura.

Para valores de concentração constantes, a salmoura de cloreto de magnésio apresenta maiores variações dessa propriedade, uma vez que sua curvatura na Figura 6 é muito mais intensa comparativamente a das outras salmouras.

Assim, exemplificando, para uma concentração de 20% de soluto, há valores de viscosidade distintos para cada salmoura, entretanto entre 25°C e 30°C, os valores de viscosidade cinemática das salmouras de acetato de potássio e de cloreto de sódio são praticamente idênticos.

A Tabela 5 indica que, para condições de 4°C e 20% de concentração, a salmoura de cloreto de magnésio apresenta o maior valor dessa propriedade coligativa (3,883 cSt), enquanto a água pura mantém o menor valor da mesma propriedade (1,569 cSt).

TABELA 5. Viscosidade cinemática de salmouras com 20% de soluto e da água pura à 4°C.

20% à 4°C	NaCl	$MgCl_2$	CH_3CKO_2	NBS, Àgua
Viscosidade cinemática (cSt)	2,031	3,883	2,328	1,569

Fonte: Autor.

Esses dados somente reforçam a necessidade e a importância de se considerar o impacto da viscosidade das salmouras no dimensionamento hidráulico e na potência de bombeamento dos fluidos secundários em sistemas de refrigeração industrial por expansão indireta com termoacumulação.

4 CONCLUSÕES

A simulação das propriedades coligativas de soluções aquosas (salmouras) contendo cloreto de sódio, cloreto de magnésio ou acetato de potássio permitiu compreender o impacto da concentração de soluto sobre o desempenho termofísico dos fluidos secundários em sistemas de refrigeração industrial com termoacumulação.

Por meio do software SecCool, foi possível observar que a relação entre solvente e soluto afeta significativamente parâmetros como calor específico, massa específica, viscosidade e condutividade térmica.

De modo geral, os resultados indicam que:

1. A temperatura de fusão diminui com o aumento da concentração de salmouras, favorecendo aplicações em baixas temperaturas.

2. O calor específico das soluções é inferior ao da água pura, sendo o acetato de potássio o que apresenta os maiores valores entre os solutos analisados.

3. A massa específica aumenta com a concentração de soluto, o que pode beneficiar o armazenamento de frio, desde que não comprometa o desempenho hidráulico.

4. As viscosidades dinâmica e cinemática tendem a crescer com a adição de sais, especialmente com o cloreto de magnésio, exigindo maior potência de bombeamento.

5. A condutividade térmica diminui com o aumento da concentração, sendo o cloreto de sódio o que apresenta melhor desempenho nesse aspecto.

Portanto, a escolha do fluido secundário ideal deve considerar o equilíbrio entre propriedades térmicas e hidráulicas, visando otimizar a eficiência energética e operacional do sistema.

Finalmente, este estudo contribui para o desenvolvimento de soluções mais seguras e eficazes na engenharia de refrigeração industrial.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ALI, M.; ZHANG, Y.; CHEN, G. Thermophysical properties of aqueous glycol solutions for secondary refrigeration. International Journal of Refrigeration, v. 117, p. 45–56, 2021.

ASHRAE. Thermal Energy Storage Applications in HVAC Systems. ASHRAE Handbook – HVAC Applications, 2021.

BAHADORI, A.; ZHANG, H. Advances in secondary refrigerants for industrial cooling systems. Applied Thermal Engineering, v. 190, p. 116837, 2021.

BERNARDINO, J. H. S.; BARBOSA JÚNIOR, C. R. F. Análise das propriedades termofísicas de fluidos secundários para refrigeração. Trabalho de Conclusão de Curso – UFRN, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/42939.

CHEN, L.; WANG, X.; ZHOU, Y. Simulation of colligative effects in brine-based secondary fluids. Energy Reports, v. 7, p. 1234–1242, 2021.

GARCÍA, M.; PÉREZ, J.; TORRES, A. Experimental study of freezing point depression in secondary refrigerants. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 147, p. 1123–1131, 2022.

HOSSAIN, M. A.; RAHMAN, M. M. Comparative analysis of propylene glycol and ethanol mixtures for refrigeration. Chemical Engineering Communications, v. 209, p. 1456–1468, 2022.

KIM, S.; LEE, J. Thermodynamic modeling of aqueous alcohol solutions for industrial cooling. Journal of Chemical Thermodynamics, v. 160, p. 106586, 2022.

LIU, Y.; ZHANG, T. Influence of solute concentration on colligative properties of secondary fluids. Thermal Science and Engineering Progress, v. 28, p. 101089, 2023.

MARTINS, R.; SILVA, D. M. Secondary refrigerants and their environmental impact: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 135, p. 110213, 2021.

MELINDER, A. Thermophysical properties of aqueous solutions used as secondary refrigerants. Royal Institute of Technology, Stockholm, 2007.

NIST Chemistry WebBook. Thermophysical Properties of Fluid Systems. Disponível em: https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/. Acesso em: 03 ago. 2025.

TICONA. Secondary Refrigeration Systems with Thermal Storage. Technical Report, 2007.

TYFO. Thermophysical Properties and Corrosion Behavior of Secondary Coolants. Disponível em: https://tyfo.de/downloads/fachbeitraege/Tyforop_Secondary_Coolants.pdf. Acesso em: 03 ago. 2025.

ZHOU, F.; LI, C.; WANG, R. Ice slurry systems and colligative behavior of mixed alcohol solutions. International Journal of Refrigeration, v. 130, p. 78–89, 2024.

Capítulo 10

10.37423/251110438

ANÁLISE DAS EMISSÕES DE UM VEÍCULO TETRAFUEL OPERANDO COM GNV EM CICLO DE CONDUÇÃO ESTRADA SOB A ÓTICA DA EVOLUÇÃO REGULATÓRIA DO PROCONVE L5/L6

César Vital de Medeiros Silva
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Raphael Araújo de Holanda
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Junior
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Jonhattan Ferreira Rangel
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

RESUMO

O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) tem sido fundamental para a melhoria da qualidade do ar no Brasil. Neste contexto, o Gás Natural Veicular (GNV) é reconhecido por suas baixas emissões de CO_2, mas estudos sob a fase PROCONVE L5 apontaram um paradoxo: maiores emissões de Hidrocarbonetos (HC) e Monóxido de Carbono (CO) em comparação com combustíveis líquidos. Este artigo tem como objetivo reavaliar dados empíricos de um veículo Tetrafuel de fábrica (Holanda, 2010), homologado na fase L5, sob a ótica da evolução regulatória para a fase L6. A metodologia consiste em uma reinterpretação dos resultados à luz da mudança na métrica de avaliação de HC, que passou a desconsiderar o metano. A análise conclui que a alta emissão de HC registrada para o GNV era majoritariamente composta por metano, um gás de baixa reatividade fotoquímica. A transição para a medição de Hidrocarbonetos Não Metano (NMHC) na fase L6 resolve o paradoxo, demonstrando que, pelos padrões atuais, o GNV possui um desempenho ambiental superior no que tange aos poluentes precursores de ozônio, reforçando sua posição como uma alternativa mais limpa.

PALAVRAS-CHAVE: GNV, EMISSÕES VEICULARES, PROCONVE, REGULAÇÃO AMBIENTAL, HIDROCARBONETOS.

1 INTRODUÇÃO

O controle da poluição atmosférica gerada por veículos automotores tem sido um pilar da política ambiental brasileira desde a instituição do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) em 1986.

Ao longo de suas fases, o programa tem impulsionado a indústria a adotar tecnologias mais limpas, estabelecendo limites de emissão progressivamente mais rigorosos. Neste cenário, o Gás Natural Veicular (GNV) consolidou-se como uma das principais alternativas aos combustíveis líquidos, sendo amplamente reconhecido por sua queima mais limpa e, principalmente, pela menor emissão de dióxido de carbono (CO2), um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa.

Contudo, estudos realizados sob as primeiras fases do PROCONVE revelaram um comportamento inesperado do GNV. O trabalho de referência, a dissertação de mestrado de Raphael Araújo de Holanda (2010), conduziu uma análise detalhada das emissões de um veículo multicombustível (Tetrafuel) de fábrica, homologado sob a fase L5 do PROCONVE (PROCONVE L5).

Os resultados, embora confirmassem a vantagem do GNV na redução de CO2, apontaram para uma contradição: na condição de ciclo estrada (alto fluxo), o GNV se tornou o maior emissor de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO).

Este relatório tem como objetivo revisitar os dados empíricos de Holanda (2010) com um foco específico no desempenho do GNV. A análise não se limita a descrever os resultados da época, mas busca recolocá-los sob a ótica da mais significativa mudança regulatória ocorrida na transição da fase PROCONVE L5 para a L6, onde houve uma alteração na métrica de avaliação dos hidrocarbonetos.

Argumenta-se que essa mudança, que passou a desconsiderar o gás metano da contagem total dos hidrocarbonetos regulados, é fundamental para uma interpretação correta e atual do impacto ambiental do GNV, resolvendo a aparente contradição de suas emissões.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada no estudo original de Holanda (2010) foi robusta e seguiu da melhor forma possível as normas técnicas vigentes à época, o que confere credibilidade aos dados coletados. A seguir, um resumo dos procedimentos adotados.

2.1 Veículo de teste

O veículo de teste usado para os ensaios foi um Fiat Siena 1.4 Tetrafuel, ano de fabricação 2009, ele foi escolhido devido ao seu sistema multicombustível ser uma característica de fábrica, e não um carro flex com GNV instalado no pós-venda.

Essa característica é crucial, pois significa que a Unidade de Comando Eletrônico (ECU) do motor, os componentes mecânicos e o sistema de tratamento de gases de exaustão foram projetados pelo fabricante para operar da melhor forma possível com GNV, gasolina e etanol.

O motor é um 1.4 MPI (Multipoint Injection) de quatro cilindros em linha, com oito válvulas, ciclo Otto, com uma taxa de compressão fixa de 10,35:1, independentemente do combustível utilizado.

Essa taxa fixa, normalmente utilizada em motores multicombustíveis, permite o funcionamento seguro com todos os combustíveis, mas sacrifica a eficiência termodinâmica o que não permite a extração do máximo potencial do motor. Taxas de compressão otimizadas para cada um individualmente permitem melhor aproveitamento da energia.

2.2 Bancada de ensaios e instrumentação

Os testes foram realizados em ambiente de laboratório para garantir a repetibilidade e o controle das variáveis.

- Dinamômetro de Chassi: modelo Bosch foi utilizado para simular as resistências de rolamento e aerodinâmica encontradas em condições reais de condução, permitindo a execução dos ciclos de velocidade padronizados.

- Analisador de Gases: marca Tecnomotor, calibrado e com a função de determinar em tempo real as concentrações de hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO2) e oxigênio (O2). O equipamento também mede a rotação e temperatura do motor.

As amostras dos gases de exaustão foram coletadas através de uma sonda de aspiração no escape do veículo e numa outra sonda adaptada no coletor do veículo. Para garantir a precisão foram adotadas algumas precauções, (recomendadas pelo fabricante do analisador de gases de exaustão, como a verificação de condensado, a limpeza de resíduos de hidrocarbonetos nas mangueiras e a estanqueidade das vedações através de um teste de vazamento.

2.3 Ciclo de condução

Para avaliar o desempenho do veículo no cenário de uso em estrada, foi utilizado o ciclo de condução padronizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Ciclo de Estrada (ABNT NBR 7024): Conhecido como Highway Fuel Economy Test (HWFET), este ciclo simula a condução em rodovias, com velocidades mais altas e constantes, e menos transições.

Testes preliminares foram conduzidos com o veículo instalado no dinamômetro de chassi, visando atender às condições de condução do ciclo estrada prescritas na norma regulamentadora e assegurar padrões mínimos de segura do pessoal envolvido e dos equipamentos de teste.

2.4 Caracterização do GNV

A amostra de GNV utilizada na análise foi coletada diretamente do cilindro que abasteceu o veículo durante os testes de emissões. O ensaio foi realizado no Laboratório de Qualidade do Gás (LQG) do Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis (CTGÁS-ER) para determinar a composição e as propriedades físico-químicas, permitindo uma correta interpretação dos resultados de emissões.

TABELA 1: Resultado da análise do GNV

Característica	Gás Natural Veícular
Poder Calorífico Superior (kJ/m³)	38.180
Índice de Wobbe (kJ/m³)	48.750
Metano (% mol/mol.)	90,03
Etano (% mol/mol.)	5,725
Propano (% mol/mol.)	0,7
Butano e mais pesados (% mol/mol.)	0,293
Inertes (N_2 + CO_2) (% mol/mol.)	3,253
Nitrogênio (% mol/mol.)	2,261
Oxigênio (% mol/mol.)	0
Gás sulfídrico (mg/m³)	-
Ponto de orvalho de água, 1 atm. (°C)	-
Densidade relativa	0,613
Massa Específica (kg/m³)	0,739

Fonte: Holanda (2010).

2.5 Procedimento de testes para emissão em estrada

De forma complementar ao ciclo urbano, o estudo original também avaliou as emissões do veículo em um ciclo de condução de estrada, baseado na norma ABNT NBR 7024. Embora não fosse um ensaio

padrão para a homologação de emissões no Brasil na época, sua inclusão permitiu uma análise mais completa do comportamento do veículo em diferentes regimes de operação.

O ciclo de estrada consiste em uma única fase contínua com duração de 765 segundos (12 minutos e 45 segundos), durante a qual se percorre uma distância aproximada de 16,2 km. Este ciclo é caracterizado por velocidades mais elevadas e sustentadas, simulando condições de viagem rodoviária.

Assim como no ciclo urbano, o estudo de Holanda (2010) relata a necessidade de adequar as coordenadas de velocidade prescritas pela norma para viabilizar a execução do percurso pelo condutor no dinamômetro, sempre respeitando as tolerâncias permitidas.

3 RESULTADOS

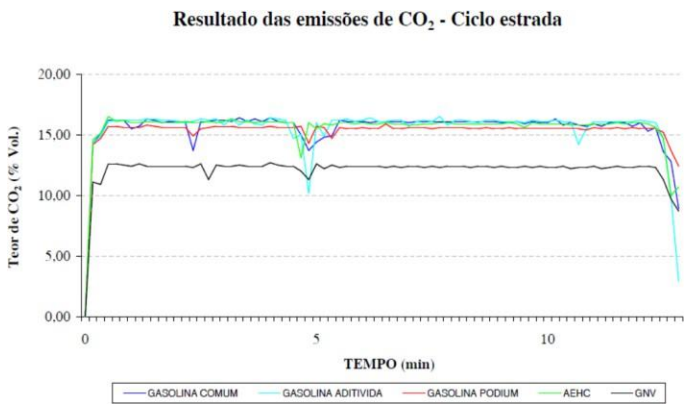
Os resultados obtidos por Holanda (2010) mostram um comportamento, até certo ponto, inesperado do GNV, quando comparado aos demais combustíveis ensaiados na ocasião.

3.1 Emissão de dióxido de carbono (CO2)

Conforme a expectativa teórica, o GNV apresentou o menor valor na emissão de CO2, o principal gás de efeito estufa. Por se tratar de uma molécula simples, predominantemente metano (CH4), na reação de combustão espera-se uma baixa formação de CO2 por energia liberada.

O gráfico (Figura 1) mostra que o ciclo de estrada, a curva de emissão de CO2 para o GNV (em preto) se manteve quase que integralmente abaixo das curvas dos demais combustíveis.

FIGURA 1: Emissão de CO2 no ciclo estrada



Fonte: Holanda (2010)

3.2 A contradição das emissões de HC e CO

A contradição do GNV ficou clara na análise dos poluentes locais no ciclo de condução de estrada. Conforme exibido nas Figuras 2 e 3, o GNV (linha preta) é o maior emissor tanto de hidrocarbonetos (HC) quanto de monóxido de carbono (CO).

Os picos de emissão de HC para o GNV foram significativamente mais altos e constantes do que todos os outros combustíveis testados, onde após 5 minutos obteve uma média de 30 ppm e também atingindo valores superiores a 40 ppm, enquanto os demais se mantinham abaixo de 10 ppm na maior parte do tempo.

FIGURA 2: Emissão de hidrocarboneto corrigido (HC) no ciclo estrada Fonte: Holanda (2010).

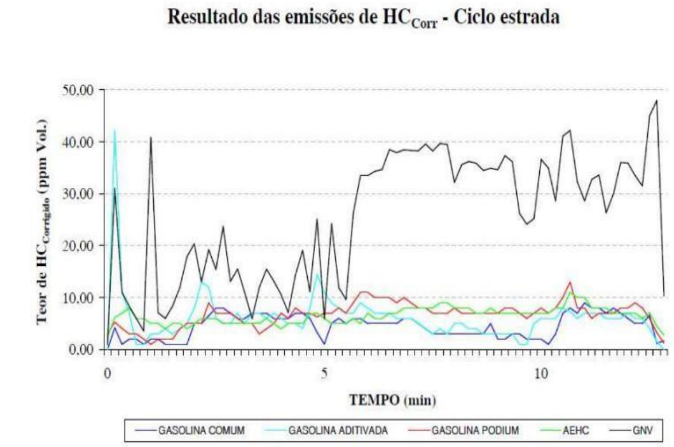
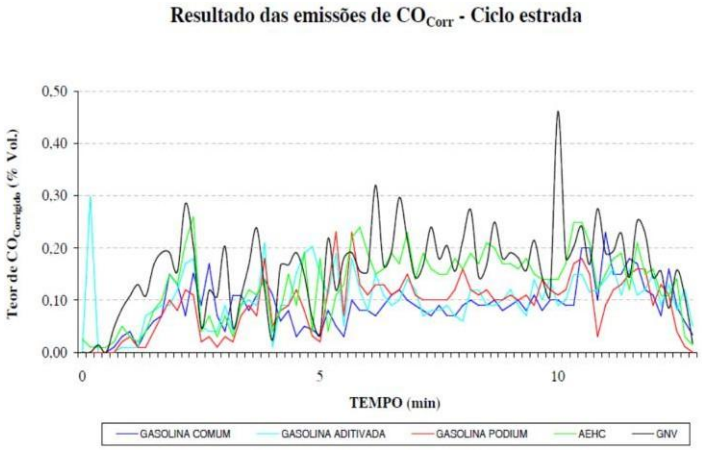


FIGURA 3: Emissão de monóxido de carbono Corrigido (CO) no ciclo estrada



Fonte: Holanda (2010).

3.3 Eficiência do catalisador

A análise da eficiência de conversão do catalisador, conforme Holanda (2010), revelou um baixo rendimento na oxidação dos hidrocarbonetos provenientes do GNV. Enquanto a eficiência para a conversão de CO foi de 100%, a eficiência para HC foi de apenas 76%, inferior que a das gasolinas comum (90%) e podium (91%).

Este resultado sugere que o catalisador desse veículo tinha maior dificuldade em oxidar o metano, o principal componente do GNV. O metano é um hidrocarboneto quimicamente mais estável e necessita de uma maior energia para que possa ocorrer essa reação de oxidação, comparado com as moléculas maiores presentes na gasolina.

Também como dificultador da reação é a velocidade que os gases passam pelo catalisador, visto que se trata de um ciclo de condução de estrada e a velocidade do veículo é maior, consequentemente, gerando um maior fluxo desses gases de escape.

3.4 A Limitação da métrica de "hidrocarbonetos totais" (HC)

Sob a fase L5 do PROCONVE Tabela 2, a legislação exigia a medição de hidrocarbonetos totais (HC), sem diferenciar seus componentes. No caso do GNV, cujo principal constituinte é o metano (CH4), a maior parte das emissões de HC não queimados sugere, naturalmente, o metano. Embora ele seja um grande contribuinte como gás de efeito estufa, possui uma reatividade fotoquímica muito baixa, o que pode ser uma vantagem e também desvantagem.

Essa baixa reatividade fotoquímica significa que ele não contribui significativamente para a formação de ozônio troposférico (o principal componente da névoa fotoquímica), que é um dos maiores problemas de poluição do ar em centros urbanos e o principal alvo do controle de emissões de hidrocarbonetos.

TABELA 2: Limites de emissões para veículos leves.

POLUENTES	LIMITES	
	Fase L-5	Fase L-6[(1)]
	Desde 1°/1/2009	A partir de 1°/1/2014
monóxido de carbono (CO) [g/km)]	2	1,3
hidrocarbonetos (THC) [g/km]	0,30[(2)]	0,30[(2)]

hidrocarbonetos não metano (NMHC0) [g/km]	0,05	0,05
óxidos de nitrogênio (Nox) [g/km]	0,12(3) ou 0,25(4)	0,08
material particulado (MP) [g/km]	0,05	0,025
aldeídos(3) (CHO) [g/km]	0,02	0,02
emissão evaporativa(3) [g/ensaio]	2	1,5(5) ou 2,0(5)(6)
emissão de gás no cárter	nula	nula

Fonte: IBAMA (2011).

Notas:

(1) Em 2014 -> para todos os novos lançamentos. A partir de 2015 -> para todos os veículos comercializados.

(2) Aplicável somente a veículos movidos a GNV.

(3) Aplicável somente a veículos movidos a gasolina ou etanol.

(4) Aplicável somente a veículos movidos a óleo diesel.

(5) Aplicável aos ensaios realizados em câmara selada de volume variável.

(6) Aplicado a todos os veículos a partir de 1°/1/2012.

Nos limites de poluentes impostos pela PROCONVE L5, trata os HC em g/km. Para obtenção do resultado nessa unidade é necessário utilizar a Equação 1:

$$HC_{g/km} = (HC_{ppm} * V_{escape} * Densidade_{HC}) * [(d * 1000000)^{-1}] \quad (1)$$

Onde o V_{escape} é o volume total da mistura de gás de escapamento durante todo o ensaio e ar de diluição que passou pelo sistema do Amostrador de Volume Constante (AVC) durante o ciclo de ensaio, medido em m³ nas condições padrão e o parâmetro "d" é a distância percorrida pelo veículo durante o ensaio. Devido a bancada do experimento não ter esse sistema AVC, não foi possível calcular o parâmetro e, com isso, não tem condição necessária para avaliar o veículo nos critérios do PROCONVE.

3.5 A Transição para o PROCONVE L6 e a métrica NMOG

A mudança para a fase PROCONVE L6, que se tornou obrigatória para veículos fabricados a partir de 2014, representou uma grande mudança na forma de avaliar as emissões. A partir desse momento o CONAMA reconheceu a diferença no impacto ambiental entre os tipos de hidrocarbonetos, a nova norma substituiu a métrica de HC totais pela de Gases Orgânicos Não Metano (NMOG, do inglês Non-Methane Organic Gases) ou Não Metano Hidrocarbonetos (NMHC).

Essa mudança foi crucial por duas razões:

1. Representatividade do combustível: A nova métrica foca nos hidrocarbonetos que são efetivamente precursores da formação de ozônio, proporcionando uma avaliação muito mais real do impacto do veículo na qualidade do ar local.

2. Impacto na avaliação do GNV: Ao excluir o metano da contagem do principal poluente orgânico regulado, a norma L6 essencialmente "corrige" a distorção vista nos dados de Holanda 2010. O alto valor de HC medido para o GNV seria, em grande parte, desconsiderado nessa nova regulamentação.

Se o ensaio de Holanda (2010) fosse refeito sob as regras do PROCONVE L6, o resultado para o GNV no quesito de emissões orgânicas seria muito menor e, provavelmente, posicionando-o como um dos combustíveis mais limpos também neste aspecto. A alta emissão de CO, por sua vez, está frequentemente associada a uma combustão não otimizada, um desafio que foi sendo superado com o desenvolvimento do sistema de injeção de GNV de versões mais novas, que possuem um controle eletrônico mais refinado.

4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados, embora corretos para a metodologia aplicada em 2010, podem levar a uma conclusão equivocada sobre o impacto ambiental do GNV se não forem analisados sob a ótica das novas versões da regulamentação.

A aparente desvantagem do GNV em emissões de HC e CO no ciclo em questão é, na verdade, uma consequência direta do metano, que constitui cerca de 90% do GNV, e da forma como estes poluentes eram medidos pela norma PROCONVE L5.

A análise dos dados de emissão do Siena Tetrafuel de 2009, realizada por Holanda (2010), foi um retrato fiel da tecnologia e da regulamentação de sua época. Ela identificou corretamente que, sob a métrica do PROCONVE L5, o GNV apresentava emissões de hidrocarbonetos totais superiores às dos combustíveis líquidos nesse regime.

Contudo, a reinterpretação desses dados utilizando a nova métrica do documento regulatório PROCONVE L6 resolve esse paradoxo. A mudança na forma de avaliação de HC totais para NMOG demonstra que o principal componente das emissões de HC do GNV, o metano, é um poluente menos relevante para a formação de ozônio que os demais combustíveis.

Portanto, a "desvantagem" do GNV observada em 2010 era, em grande parte, uma consideração que não deveria ter sido feita, devido as características do composto.

O não reconhecimento do metano nos HC totais pela PROCONVE L6 e suas novas fases tendo limites cada vez mais rígidos, permite concluir que o GNV, avaliado pelos padrões técnicos e científicos atuais.

Isso reforça sua posição como uma alternativa ambientalmente vantajosa, combinando a comprovada baixa emissão de CO2 com um perfil de emissões de poluentes menor do que trabalho sugere.

O estudo de 2010, portanto, serve não para condenar o GNV, mas para ilustrar a importância da evolução contínua das normas ambientais para uma avaliação cada vez mais precisa e justa das tecnologias automotivas.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6601: Veículos rodoviários automotores leves - Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7024: Veículos rodoviários automotores leves - Medição do consumo de combustível - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 18, de 6 de maio de 1986.

Institui o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília (DF), pp. 8792-8795, 17 jun. 1986.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 415, de 24 de setembro de 2009. Dispõe sobre a nova fase (L6) do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília (DF), pp. 53-54, 25 set. 2009.

HOLANDA, R. A. de. Análise das Emissões Gasosas de um Veículo Flex Funcionando com Diferentes Combustíveis. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

IBAMA. Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores – Proconve/Promot. 3. ed. Brasília: Ibama, 2011. 584 p. (Coleção Meio Ambiente. Série Diretrizes – Gestão Ambiental, n.º 3).

Capítulo 11

10.37423/251110439

DESENVOLVIMENTO, MONTAGEM E START-UP DE SISTEMA CHILLER E FANCOIL DIDÁTICO

Jair Palhares de Aquino — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Wertson da Silva Resende — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN); Departamento de Engenharia Mecânica*

Rafael Matos de Souza — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Higor da Silva Regis — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Arthur Souza Lyra — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento, montagem e teste de um sistema didático de refrigeração utilizando um chiller e um fancoil, com o objetivo de aprimorar a formação acadêmica na área de engenharia mecânica na área térmica. A atividade engloba a seleção de componentes, a metodologia aplicada desde a montagem do circuito frigorífico até a realização de testes operacionais. O sistema foi montado integralmente seguindo procedimentos comuns de montagem e instalação aplicados na área de refrigeração e ar-condicionado. Essa montagem observou uma sequência geral com a seleção/separação de materiais; confecção de linhas de sucção, descarga e outras tubulações com as de circulação de água gelada; solda-brasagem de junções, montagem e aperto de conexões porca x flange; teste de estanqueidade, evacuação e desidratação do sistema; conexões elétricas; e carga de fluido refrigerante. Os resultados demonstraram um funcionamento dentro das condições planejadas, apesar da implementação de um acionamento direto para realização da carga de refrigerante. Concluiu-se que o sistema pode ser aprimorado com a integração de um controle automatizado via Arduino, permitindo realizar medições de diversas grandezas e parâmetros operacionais que possibilitem avaliar a eficiência energética dos circuitos como um todo.

PALAVRAS-CHAVE: REFRIGERAÇÃO, SISTEMA DIDÁTICO, CHILLER, FANCOIL, MONTAGEM.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração são fundamentais para diversas aplicações industriais, comerciais e residenciais, sendo o chiller um dos equipamentos mais utilizados para resfriamento em larga escala. Um chiller é um equipamento ou máquina projetado para remover calor de um fluido, geralmente água ou uma solução refrigerante, utilizando ciclos de refrigeração por compressão de vapor ou absorção. O fluido resfriado pode ser utilizado para climatização de ambientes, processos industriais e equipamentos sensíveis ao calor.

FIGURA 1. Chiller Industrial.



Fonte: Rankine Engenharia (2025).

Existem dois principais tipos de chillers: os de condensação a ar e os de condensação a água. Os chillers de condensação a ar dissipam o calor diretamente para o ambiente por meio de trocadores de calor do tipo serpentina com ventiladores. Já os chillers de condensação a água utilizam torres de resfriamento para transferir o calor absorvido, sendo mais eficientes em termos energéticos, mas exigindo maior infraestrutura para operação. A composição básica de um chiller inclui compressor, evaporador, condensador, válvula de expansão e um fluido refrigerante adequado para a aplicação desejada.

O funcionamento do sistema ocorre em um ciclo termodinâmico onde o fluido refrigerante absorve calor no evaporador, é comprimido, rejeita calor no condensador e retorna ao estado inicial após passar pela válvula de expansão. Uma das formas mais eficientes de utilização de chillers é em conjunto com unidades do tipo fancoil. Os fancoils são equipamentos que promovem a troca de calor entre o fluido refrigerado e o ar ambiente, permitindo a climatização de espaços diversos. Esses sistemas são amplamente aplicados em edifícios comerciais, hospitais, data centers e indústrias, proporcionando controle preciso de temperatura e eficiência energética.

1.1 Objetivos

Este artigo tem como objetivo, partindo dos diferentes tipos de chillers, apresentar sua composição básica e as principais modalidades de aplicação com fancoils, enfatizando sua importância na climatização e em processos industriais. Além disso, descrever de forma simplificada o desenvolvimento, a montagem e o start-up de um equipamento didático no Laboratório de Energia do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN, contribuindo para a formação acadêmica e o aprimoramento das práticas laboratoriais em refrigeração e ar-condicionado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Metodologia

O desenvolvimento simplificado do equipamento consistiu nas seguintes etapas:

- Selecionar e separar todos os componentes do circuito frigorífico e materiais listados;
- Posicionar e fixar os principais componentes à base;
- Confeccionar as tubulações de interconexão do circuito frigorífico;
- Realizar as brasagens e conexões porca-flange para consolidação do circuito frigorífico;
- Fixar e/ou estabilizar os componentes e tubulações montadas;
- Testar estanqueidade/vazamentos do sistema;
- Montar o circuito de solução alcoólica (bomba de circulação, mangueiras e “Fancoil”);
- Testar circuito de “água gelada”;
- Evacuar e desidratar o sistema frigorífico;
- Elaborar diagrama de conexões elétricas;
- Conectar o sistema elétrico;
- Quebrar o vácuo do sistema com o fluido de processo;

- Carregar o fluido refrigerante;
- Registrar dados básicos de operação e desempenho;

3 RESULTADOS

3.1 Seleção e separação de Materiais

Os materiais selecionados estão dispostos e com especificação básica na Tabela 1 a seguir.

TABELA 1. Materiais usados no Chiller.

Item	Componente	Fabricante	Modelo	Especificações principais
3.1.1	Compressor alternativo hermético	Tecumseh	TP102-RS-319	Tensão: 220VAC, Frequência: 60Hz, LRA: 15,7A, Fluido: R134a
3.1.2	Condensador helicoidal duplo	Não identificado	Helicoidal 2 fileiras	Configuração: Cobre flexível 3/8", 32 espiras de Ø120mm, largura ~270mm, altura ~230mm, convecção forçada, Entrada: 5/16", Saída: 5/16"
3.1.3	Ventilador do condensador	Não identificado	N20/821	Tensão: 220VAC, Frequência: 50/60Hz, Potência: 13/60W, Corrente: 0,36A, Rotação: 1660rpm, Proteção térmica, Grau de proteção: IP44
3.1.4	Filtro secador	Danfoss	DML032	Código: 023Z5035, Volume: 0,038L, Pressão: 667PSIG/46BAR, Compatibilidade: HCFC/HFC, Temperatura: -40°C a +70°C, Conexões: 1/4in ODF
3.1.5	Tubo capilar	Genérico (Forming Tubing)	0,031in	Referência: CAP0031M3, Diâmetro externo: 1,89mm, Diâmetro interno: 0,79mm, Comprimento: 2,1m
3.1.6	Evaporador	Genérico	Serpentina tubular	Corpo em ferro com aletas em arame 1/16”, 200mm x 170mm, 16 passes de 250mm, entrada: 3/16" soldável, saída: 1/4" soldável
3.1.7	Tubulação de cobre	Genérico	-	Cobre flexível 99,9%, diâmetro externo 1/4" (6,35mm), espessura: 0,79mm, soldável
3.1.8	Tubulação isolante	Genérico	-	Tubo esponjoso isolante cinza, diâmetro externo 26mm, interno 1/4" (6,35mm)
3.1.9	Reservatório de água gelada	Genérico	-	Bandeja plástica branca, 240 x 400 x 70mm, base isolada com EPS de 15mm
3.1.10	Bomba de circulação de água gelada	Mini Jiang	NS160	Vazão: 50 a 200L/h, Hmáx: 0,6m, Vazão máx: 200L/h, Tensão: 220VAC, Frequência: 60Hz, Potência: 3W, Grau de proteção: IPX8
3.1.11	Mangueiras	PABOVI	-	Material: PVC flexível, cor cristal, diâmetro: 5/16” (~7,94mm), espessura: 2mm, Atóxica, Comprimento: 2m
3.1.12	Abraçadeiras metálicas	INCA	-	Tipo: Ajustável rosca sem-fim, largura: 9mm, acionamento: borboleta, cor: verde, diâmetro: 13 a 16mm, material: inox+PVC
3.1.13	Trocador de calor aletado – Fancoil	REFRIGERANTTECH	ASTRO AIR SC10640	Código: 026-800072-00, Tipo: A, Pressão: 460Psi, Carcaça: aço galvanizado 210x230x100mm, Serpentina: cobre 3/8”, 16 passes, Aletas: alumínio 240x40mm, 10,3 aletas/pol.

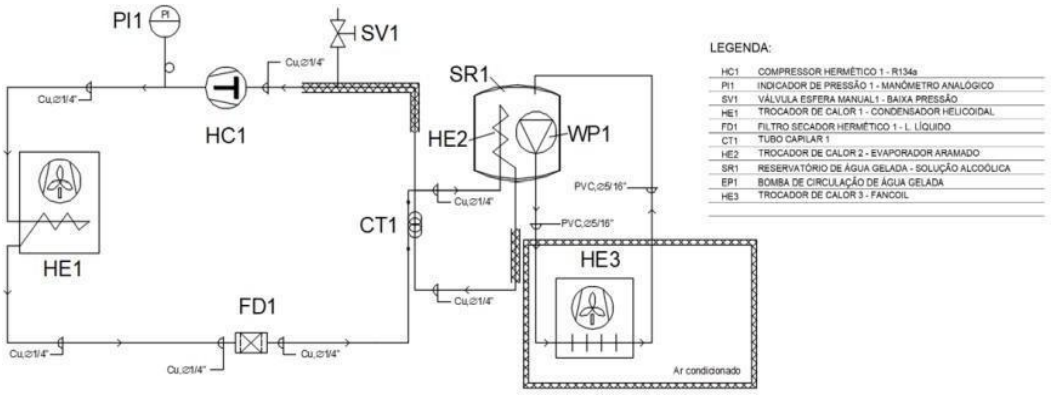
3.1.14	Ventilador – Forçador de ar do Fancoil	ELGIN	MM-20B	Tensão: 110/220VAC, Frequência: 60Hz, Corrente: 0,66/0,33A, Rotação: 1550rpm
3.1.15	Conexões em latão	Genérico	-	Tipo: Porca x Flange 1/4" SAE, Adaptador SAE x NPT 1/4", Material: Latão, Formato: Sextavado
3.1.16	Fluido refrigerante	Chemours Freon	R134a	Grupo: A1, GWP-AR4: 1430, ODP: 0, Tcrit: 101,1°C, Ebulição: -26,07°C

Fonte: Própria do autor (2025).

3.2 Diagrama Frigorífico

Foi concebido o circuito frigorífico básico a compressão de vapor simples com seus componentes básicos, compressor, condensador, filtro secador, tubo capilar (expansão) e evaporador, conforme disposto a seguir.

FIGURA 2. Diagrama Frigorífico.



Fonte: Autor (2025).

3.3 Posicionamento e fixação dos componentes

Os componentes foram posicionados na base de madeira e fixados através de parafusos de rosca soberba e sextavados em conjunto com arruelas e porcas.

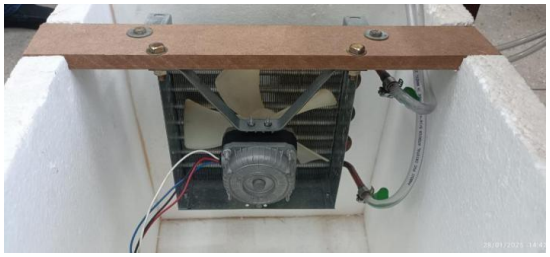
FIGURA 3. Posicionamento dos componentes do ciclo frigorifico.



Fonte: Autor (2025).

O “Fancoil” foi montado suportado na caixa térmica que simula o ambiente interno de uma sala através de uma trave em madeira compensada, fixado por parafuso sextavado em conjunto com porcas e arruelas, conforme figura a seguir.

FIGURA 4. Posicionamento do Fancoil no interior da caixa térmica.



Fonte: Autor (2025).

A bomba foi posicionada lateralmente ao evaporador submersa na solução alcoólica, “água gelada”, posição em que bombeará água entrando pela tubulação de entrada no Fancoil pela parte inferior.

FIGURA 5. Posição do reservatório, evaporador e bomba de circulação de água gelada.



Fonte: Autor (2025).

3.4 Confecção das tubulações de interconexão

As tubulações de interligação do circuito frigorífico foram confeccionadas utilizado curvador conjugado apropriado para tubos de cobre flexível nos diâmetros 1/4", 5/16” e 3/8”. Este curvador apresenta como raio fixo a dimensão 25mm.

FIGURA 6. Curvador conjugado ¼”. 5/16” e 3/8” de raio 25mm.



Fonte: Multifrio refrigeração (2025).

Assim, com os componentes posicionados e fixados à base, determinaram-se os trajetos e dimensões referenciadas para realizado do plano de desempeno, medição, corte, curva e preparação para conexões brasadas ou por uniões do tipo porca x flange

FIGURA 7. Preparação para conexão brasada (alargada) e conexão porca x flange (flangeamento).



Fonte: Multifrio refrigeração (2025).

3.5 Operações de brasagem das junções

As conexões brasadas foram realizadas mediante aquecimento da junção com maçarico de bico automático Turbo Toch, conhecido popularmente como “turbo-tocha” com gás inflamável e chama neutra pré-ajustada. O gás proveniente do refil, nesse processo, pode atingir temperaturas de chama na ordem de 1800°C.

FIGURA 8. Maçarico Turbo-rocha.



Fonte: Autor (2025).

O metal de adição aplicado foi do tipo foscooper que se trata de uma vareta de 1/8” com ponto de fusão em torno de 720°C e que se funde na região da junta preenchendo os espaços por capilaridade até que com seu resfriamento promove a união da junta sem a presença de poros, quando bem realizado o procedimento de brasagem.

FIGURA 9. Varetas de solda-brasagem tipo foscooper e suas características.



Fonte: Adaptado Refricompany (2025).

O processo de aquecimento da tubulação provoca a carbonização de resíduos presentes na superfície da tubulação além da formação de carepa decorrente de acúmulo de óxidos tanto externamente quanto internamente. Essa carepa pode, internamente, desprender-se e reagir com os fluidos do sistema promovendo a formação de ácidos que podem provocar corrosão e desgaste prematuro de partes internas dos componentes do sistema, ou ainda flocos residuais ou partículas sólidas livres podem ocasionar o entupimento parcial ou total de determinados trechos dos sistemas. Para evitar esse processo danoso, o procedimento de brasagem dos tubos foi realizado fluindo nitrogênio internamente aos tubos, ajustando-se pressões dinâmicas na ordem de 1 a 2psig na reguladora de pressão do cilindro.

3.6 Teste de estanqueidade/vazamentos

Após a montagem do sistema, o teste de estanqueidade/vazamentos objetiva verificar se o equipamento está pronto para ser evacuado e desidratado para posterior carga de fluido refrigerante. Para tanto, executaram-se os seguintes procedimentos:

(a) Conectou-se o cilindro de Nitrogênio (N2) ao passador de serviço da máquina, que conta com uma válvula de bloqueio manual do tipo esfera (na posição fechada);

FIGURA 10. Cilindro de nitrogênio conectada ao sistema.



Fonte: Autor (2025).

(b) Com o parafuso de ajuste da reguladora folgado, abriu-se o registro geral do cilindro, e verificou-se a pressão interna do cilindro aproximadamente 1600psig;

(c) Com a válvula de bloqueio manual fechada, ajustou-se a pressão de teste inicialmente a 150psig;

FIGURA 11. Reguladora de pressão com ajuste definido.



Fonte: Autor (2025).

(d) Procedeu-se lentamente a abertura da válvula de bloqueio manual objetivando a pressurização de todo o sistema. O sistema conta apenas com um passador de serviço no lado de baixa pressão, e no lado de alta foi instalado, na linha de descarga, uma tomada de pressão com um manômetro de alta. Ao pressurizar o sistema pelo lado de baixa, podemos considerar que efetuamos a verificação de adequação das solda-brasagens do tubo capilar, pois em caso de entupimento, o manômetro de alta pressão não indicaria pressões acima de 0 manométrico, ou seja o fluxo de nitrogênio do lado de baixa para o lado de alta estaria bloqueado. Após algum tempo, curto, a pressão de baixa e alta equalizou com a pressão ajustada no cilindro. Nesse momento, verificou-se que o manômetro de alta se encontra desajustado, indicando um valor de pressão ligeiramente abaixo do valor indicado na reguladora de pressão.

FIGURA 12. Manômetro de alta instalado na linha de descarga.



Fonte: Autor (2025).

(e) Com o auxílio de uma esponja, detergente líquido e água, para geração de espuma, verificou-se em todas as conexões “soldadas” e uniões roscadas a não existência de formação de bolhas decorrentes de fuga do nitrogênio que pressurizou o sistema;

(f) Optou-se, já que outras etapas de montagem ainda estavam em andamento, por anotar o valor da pressão inicial ajustada e manter o sistema pressurizado por um relativo longo período de tempo, para posteriormente verificar se ocorreria queda na pressão inicial. O valor de pressão ajustado permaneceu estável durante três dias, indicando que a estanqueidade do sistema estava íntegro.

3.7 Evacuação e desidratação do sistema

Evacuação é o ato de evacuar, em refrigeração significa produzir vácuo (pressão negativa) no sistema a partir da remoção de vapores incondensáveis do interior do sistema de refrigeração. Já a desidratação consiste no ato de desidratar, ou seja, eliminar quaisquer partículas de umidade do interior do sistema. Para se efetuar uma boa evacuação e desidratação do sistema deve-se sempre utilizar uma bomba de vácuo adequada, alto vácuo, e nunca utilizar compressores, pois a desidratação do sistema baseia-se em baixar o ponto de ebulição da água a uma temperatura inferior à do ambiente circundante. Para execução de procedimentos de evacuação e desidratação o tempo de operação da bomba conectada ao sistema varia, dentre outros fatores, em função do volume interno do sistema, das suas condições de contaminação e da vazão da bomba de vácuo, medida geralmente em litros por minuto (l/min) ou pés cúbicos por minutos (CFM). Cabe lembrar a relação de equivalência: 1 CFM = 1,7m³/h =28.32 l/min. De acordo com Resende et al. (2024), as bombas de alto vácuo são aquelas que produzem um vácuo abaixo de 736 mmHg ou aproximadamente 28,97inHg, e com elas deve-se sempre que possível realizar a evacuação pelos lados de alta e baixa pressão do sistema, reduzindo assim o tempo desta operação para se chegar a melhores resultados. O objetivo é atingir níveis de vácuo abaixo

de 500µHg, nunca com tempo inferior a 20 minutos neste nível. O procedimento de evacuação e desidratação da unidade selada foi realizado seguindo os passos:

(a) Desconectou-se o cilindro de nitrogênio (aplicando procedimento de segurança no alívio das pressões na reguladora) e despressurizou-se lentamente o sistema, abrindo a válvula de bloqueio do passador de serviço;

(b) Conectou-se a bomba de vácuo ao sistema com o auxílio do conjunto manifold, apenas pelo lado de baixa pressão, mantendo suas válvulas na posição fechada (alta e baixa);

FIGURA 13. Bomba de vácuo conectada ao sistema com o auxílio de conjunto manifold e vacuômetro.



Fonte: Autor (2025).

(c) A bomba foi ligada e em seguida abriu-se a válvula do lado de baixa pressão do conjunto manifold;

(d) Em seguida, abriu-se válvula de bloqueio do passador de serviço do sistema, iniciando a evacuação e desidratação;

(e) Aguardar, com a bomba em funcionamento, a obtenção do nível de vácuo desejado, acompanhando a medição deste nível através do vacuômetro instalado;

FIGURA 14.Vacuômetro instalado.



Fonte: Autor (2025).

(f) Atingido o nível abaixo de 455µmHg, manteve-se a bomba em operação por mais um tempo mínimo de 20min, e em seguida fecharam-se as válvulas do conjunto manifold e válvula manual do passador de serviço, encerrando a operação de evacuação e desidratação;

FIGURA 15. Vacuômetro instalado com indicação do nível de vácuo atingido, 455µmHg.



Fonte: Autor (2025).

(g) Desconectou-se a bomba de vácuo e vacuômetro, liberando o sistema para a posterior carga de fluido.

3.8 Elaboração do acionamento, comando e controle elétrico

Para funcionamento do sistema, optou-se pela ligação direta das cargas, devendo a elaboração dos circuitos de força e comando da máquina serem objetivos de próximos trabalhos.

FIGURA 16. Conexão elétrica direta de cargas.



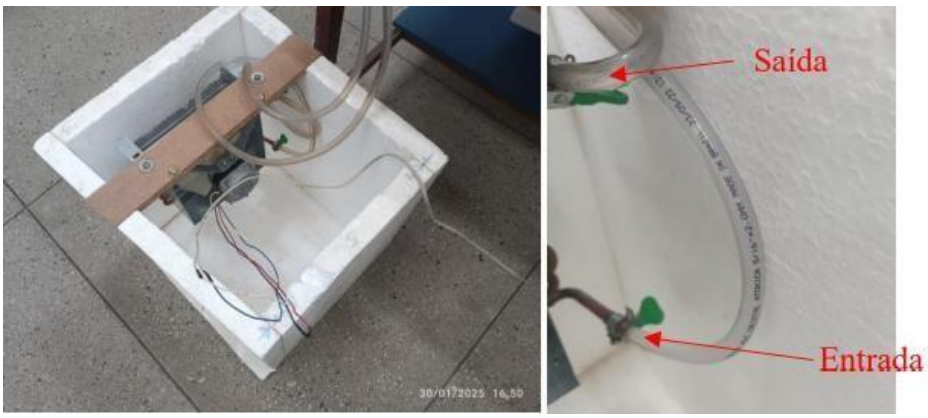
Fonte: Autor (2025).

3.9 Circuito de "água gelada"

3.9.1 Configuração

O circuito de água gelada também deve ser objeto de instrumentação e melhorias para simulação mais aproximada das aplicações de campo. Por hora, adotamos a conexão por mangueiras, algo impraticável num sistema real, e de ciclo de apenas uma via, sem medição ou controle de vazão instantânea.

FIGURA 17.Conexões de mangueiras do fancoil.



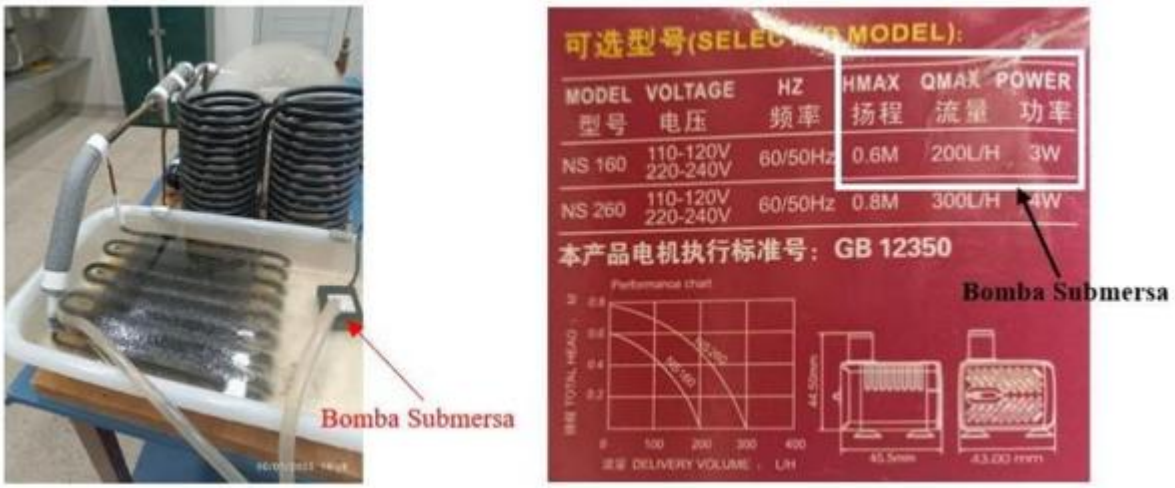
Fonte: Autor (2025).

3.9.2 Teste de circulação

O teste de operação do circuito de água gelada, portanto, consistiu apenas no enchimento do reservatório com a solução alcoólica, e com a energização da bomba a circulação pôde ser verificada, embora a aplicação de mangueiras e diferença de altura inicial coloquem a operação fora da curva,

obteve-se com a medição volumétrica de solução em função do tempo uma vazão de 0,01683L/s ou 60,56L/h, valor que ainda se encontra dentro dos limites operações ajustáveis da mesma.

FIGURA 18. Posição da bomba e Tabela de aplicação com indicação do ponto da bomba.



Fonte: Autor (2025), Mini Jiang(2025).

Com a plena carga de fluido refrigerante, obteve-se temperatura de água gelada, bombeada, em 2,6°C e água de retorno com temperatura em 4,9°C

FIGURA 19.Medição de temperaturas de circulação de água gelada.



Fonte: Autor (2025).

3.10 Carga de fluido refrigerante

A carga de fluido refrigerante foi efetuada aplicando o R134a (Freon® 134a), iniciando pela quebra de vácuo a uma pressão estabilizada de 50psig.

FIGURA 20.Conexão do cilindro ao manifold e sistema.



Fonte: Autor (2025).

Na sequência, a carga continuou, após energizar o circuito, carregando fluido no estado gasoso pelo lado de baixa do sistema até verificar que a pressão de evaporação atingiu patamar equivalente à temperatura de -10°C, ou seja, aproximadamente 14,46psig/29,15psia.

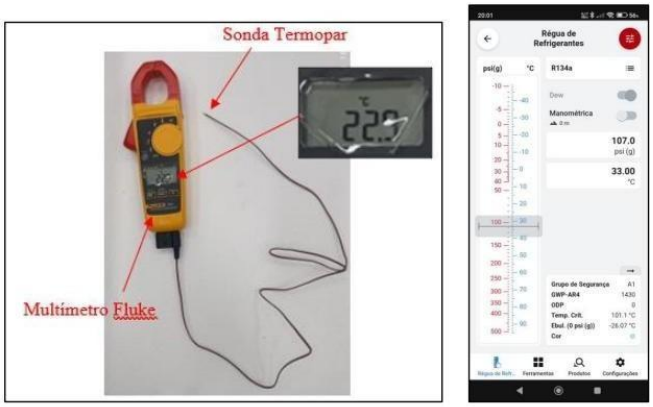
FIGURA 21. Temperatura de evaporação equivalente à pressão de saturação para R-134a.



Fonte: Reftools (2025).

Considerou-se a temperatura do ambiente local, 22,9°C e um diferencial de temperatura para o condensador ~10K, e portanto, estimou-se uma pressão de condensação para o sistema em ~33°C, que corresponde a 107psig/121,7psia, conforme aplicação das equivalências no aplicativo Reftools do fabricante Danfoss.

FIGURA 22. Medição de temperatura ambiente e Conversão de temperatura de condensação em pressão de saturação para R-134ª Ref. Tools.



(a) (b)

Fonte: Autor (2025), Reftools (2025).

Com a carga completa de fluido, e como esperado, a pressão de sucção manteve-se no patamar de aproximadamente -10°C e a pressão de condensação não foi de possível obtenção em função do manômetro instalado apresentar problemas mecânicos, além da vibração excessiva, falta de amortecimento, a indicação na escala foi prejudicada pela deformação da agulha e num patamar muito fora da pressão real para condensação do fluido R134a.

FIGURA 23.Manômetro de alta pressão apresentando falhas



Fonte: Autor (2025).

Após transcorrido um tempo para estabilização do equipamento, observou-se a formação de um bloco de gelo evidenciando a evaporação de parte considerável do álcool adicionado em solução com a água, a fim de baixar o ponto de congelamento.

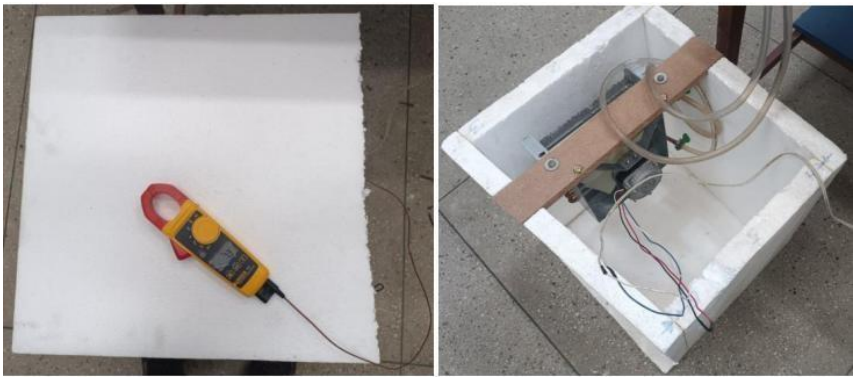
FIGURA 24.Formação do bloco de gelo no reservatório de água gelada.



Fonte: Autor (2025).

Após todos os ajustes verificamos que a temperatura da caixa térmica obtida foi de 7,5°C, um patamar muito abaixo da temperatura de conforto para um ambiente climatizado. Isso aconteceu em decorrência da falta de controle e instrumentação apropriada.

FIGURA 25. Medição de temperatura no ambiente interno da caixa térmica.



Fonte: Autor (2025).

4 CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos e procedimentos descritos na metodologia do trabalho, as seguintes conclusões podem ser extraídas:

4.1 Montagem e testes

A montagem do chiller e do fancoil didático seguiu todas as etapas descritas, desde a seleção de materiais até a carga do fluido refrigerante. A estrutura construída demonstra viabilidade para

aplicações didáticas no ensino de refrigeração e ar-condicionado em função do posicionamento dos componentes e estrutura simplificada.

4.2 Funcionamento do Sistema e Controle Térmico

O sistema atingiu aproximadamente os parâmetros de temperatura esperados, tanto no circuito frigorífico quanto no circuito de solução alcoólica. O acionamento e controle do chiller e do fancoil foi realizado diretamente sem aplicação de medições ou controle específico para eficiência dentro das faixas operacionais padrões. Apesar de desafios técnicos, como pequenos ajustes no controle de carga do refrigerante, o desempenho geral foi satisfatório.

4.3 Testes e start-up

Os testes de estanqueidade confirmaram a integridade do sistema, garantindo a ausência de vazamentos. A evacuação e desidratação do circuito frigorífico foram realizadas com sucesso, possibilitando um ambiente interno adequado para a carga do refrigerante.

4.4 Aplicabilidade Didática e Melhorias Futuros

O chiller e fancoil montados representam um bom recurso didático para experimentação futura no laboratório de energia da UFRN. O desenvolvimento de um sistema de instrumentação mais avançado pode permitir medições mais precisas e controle aprimorado. A implementação de um circuito de controle automático via Arduino pode melhorar a eficiência e a capacidade de monitoramento do sistema.

4.5 Considerações Finais

O trabalho demonstrou com sucesso a montagem e teste de um sistema didático de chiller e fancoil, destacando sua relevância para o ensino de refrigeração. A aplicação de procedimentos sequenciais baseados na prática cotidiana em refrigeração e ar-condicionado permitiu validar o funcionamento do sistema, abrindo espaço para estudos futuros que visem otimizar o consumo energético e reduzir impactos ambientais. Desenvolver o sistema de acionamento e controle com aplicação de sondas de temperatura, pressão, nível, vazão, tensão, corrente e potência elétrica deve possibilitar análises de eficiência do sistema montado e subsidiar ações de melhorias a serem implementadas no kit didático.

Como sugestão, para o desenvolvimento deste sistema de acionamento e controle, pode-se aplicar a plataforma Arduino contemplando componentes que permitam o registro e armazenamento dos parâmetros operacionais da máquina, e ainda seu monitoramento via rede ou bluetooth.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

MINI JIANG. NS160 Water Pump – Technical Specifications. Disponível em: https://minijiang.com/. Acesso em: 17 ago. 2025.

MULTIFRIO Refrigeração. Curvadores e ferramentas para tubulação de cobre. Disponível em: https://multifriores.com.br/. Acesso em: 17 ago. 2025.

RANKINE Engenharia. Chiller industrial. Disponível em: https://rankineengenharia.com/. Acesso em: 17 ago. 2025.

REFRICOMPANY. Materiais para brasagem em refrigeração. Disponível em: https://refricompany.com/. Acesso em: 17 ago. 2025.

REFTOOLS. Refrigeration Tools – Danfoss app. Disponível em: https://www.danfoss.com/reftools/. Acesso em: 17 ago. 2025.

RESENDE, W. S., BARBOSA, C. R. F., SCHAFER, S. I., LIMA, Á. A., BARBOSA JR., C. R. F. E GUERRA, A.

R. O. “Projeto De Sistema de Refrigeração Didático para Geração de uma Pista de Gelo- Ice Rink: Parte 1”. In Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. ABCM, Natal, Brasil. Vol. 1, 2024.

RESENDE, W. S., BARBOSA, C. R. F., SCHAFER, S. I., LIMA, Á. A., BARBOSA JR., C. R. F. E GUERRA, A. R. O. “Projeto De Sistema de Refrigeração Didático para Geração de uma Pista de Gelo- Ice Rink: Parte 2”. In Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. ABCM, Natal, Brasil. Vol. 1, 2024.

Capítulo 12

10.37423/251110440

ESTUDO EXPERIMENTAL DA PERFORMANCE TERMODINÂMICA DE UM ULTRAFREEZER - PARTE I

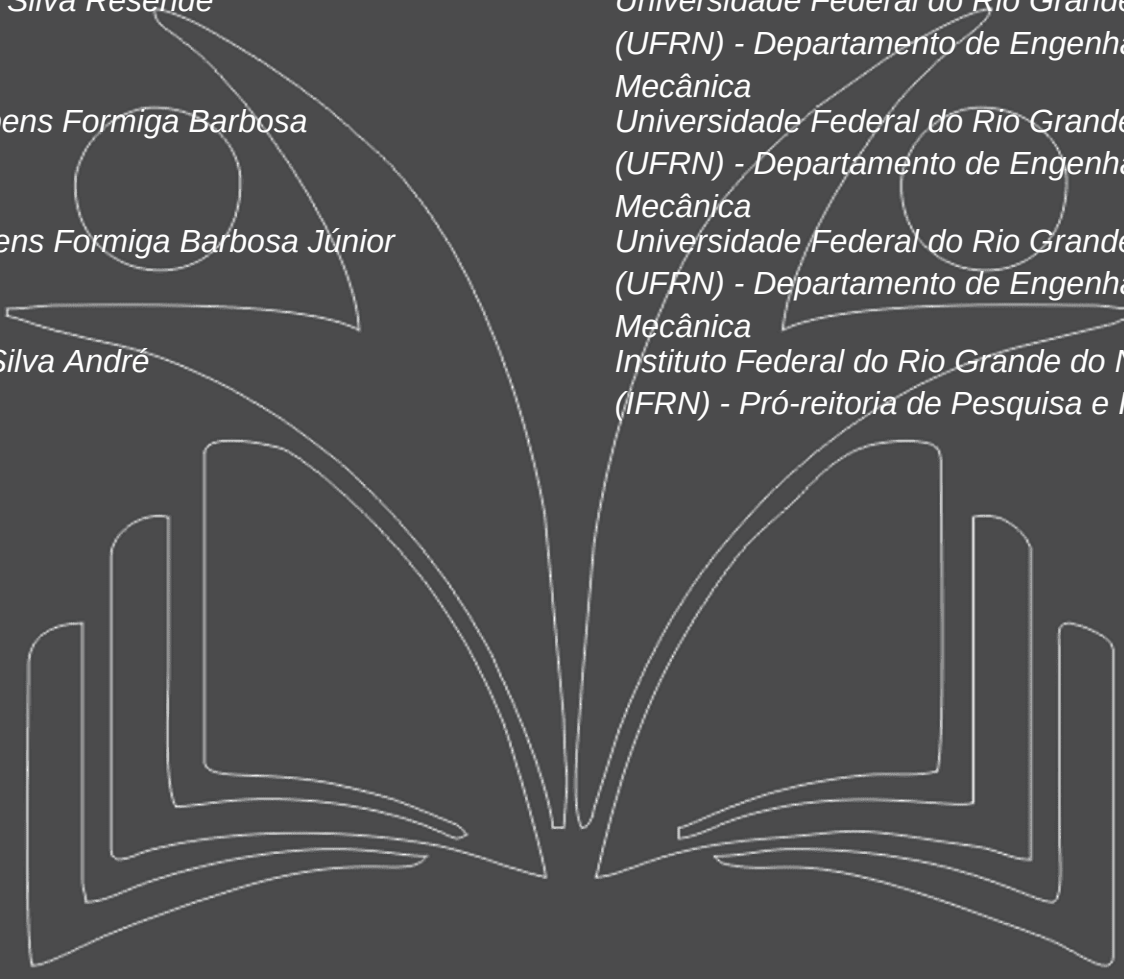
Rafael Matos de Souza
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Wertson da Silva Resende
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

CleitonRubens Formiga Barbosa Júnior
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Thiago da Silva André
Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) - Pró-reitoria de Pesquisa e Inovação



RESUMO

Este trabalho apresenta a primeira etapa de um estudo experimental sobre o desempenho termodinâmico de um ultrafreezer Coldlab CL200-86V, equipado com sistema de refrigeração em cascata nos estágios de alta (R-404A) e baixa temperatura (R-23). Nesta fase, o foco esteve na descrição minuciosa do equipamento, abrangendo suas características construtivas, técnicas e operacionais, bem como na sua instrumentação para medições experimentais. O sistema foi equipado com termopares tipo K, manômetros e wattímetro, possibilitando o monitoramento contínuo de pressões, temperaturas e potências elétricas. Os dados foram processados com o software Coolpack e o aplicativo RefTools, viabilizando a construção dos diagramas pressão versus entalpia (P×h) e o cálculo de parâmetros como superaquecimento e subresfriamento para ambos os ciclos. Os resultados demonstraram operação estável e coerente com as especificações do fabricante, confirmando a capacidade do equipamento em manter temperaturas ultrabaixas de forma confiável. Esta etapa fornece a base para a Parte 2 do estudo, que abordará a análise aprofundada da eficiência energética e o comportamento global do sistema.

Palavras-chave: Ultrafreezer, Refrigeração em cascata, R-404A, R-23, Desempenho termodinâmico.

1 INTRODUÇÃO

O avanço da refrigeração, desde os experimentos conduzidos por Ibn Sina no século XI até a liquefação de gases obtida por Carl Von Linde no século XIX, reflete a busca constante por soluções capazes de atender a demandas cada vez mais específicas (NEW LIFE SCIENTIFIC, 2023). Entre as inovações recentes com impacto no meio científico, destacam-se os ultrafreezers de laboratório (ULT's), projetados para operar em temperaturas significativamente inferiores às de freezers convencionais, alcançando faixas entre –80 °C e –150 °C, de acordo com o modelo e a tecnologia adotada (SINERGIA CIENTÍFICA, 2023).

A estrutura de um ultrafreezer geralmente é composta por um gabinete isolado termicamente, um sistema de compressão de vapor, um evaporador, um condensador e um controlador de temperatura, geralmente eletrônico. O ciclo de refrigeração funciona da seguinte forma: o compressor succiona e comprime o fluido refrigerante, que ao passar pelo condensador libera calor para o ambiente externo e passa para o estado líquido; em seguida, o fluido é expandido no evaporador e absorve o calor do interior da câmara passando para o estado gasoso, promovendo assim o resfriamento desejado. O controlador, por sua vez, atua regulando a temperatura do sistema, mantendo a temperatura interna estável dentro dos limites estabelecidos (SINERGIA CIENTÍFICA, 2023).

O ultrafreezer Coldlab modelo CL200-86V, equipamento central deste estudo, exemplifica essa evolução, incorporando tecnologias voltadas à estabilidade térmica e à eficiência operacional. A presente pesquisa está estruturada em duas partes: a primeira, aqui apresentada, concentra-se na descrição técnica e na caracterização termodinâmica inicial do equipamento; a segunda abordará a avaliação completa da eficiência energética e do desempenho global em operação contínua.

FIGURA 1: Ultrafreezers do fabricante ColdLab.



Fonte: Fabricante ColdLab (2025).

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo experimental do sistema de refrigeração em cascata do ultrafreezer Coldlab modelo CL200-86V, visando avaliar seu comportamento termodinâmico da partida até o regime de temperaturas ultrabaixas. Para isso, serão monitoradas variáveis operacionais como pressões, temperaturas e potências nos 1º e 2º estágios do ciclo, com posterior construção dos diagramas de pressão versus entalpia (P × h).

Este objetivo será alcançado por meio do estudo dividido em duas partes. A primeira etapa está dedicada à descrição do equipamento e de seu sistema de refrigeração: características técnicas, construtivas e operacionais. Nessa fase, serão realizadas ainda a instrumentação do sistema, a coleta de dados e a geração de diagramas e gráficos. Na parte 2 será realizada a análise comportamental das variáveis dos dois sistemas como um todo de forma a caracterizar sua eficiência energética.

1.2 Objetivos específicos

PARTE 1:

- Objetivo específico 1 - Descrever minuciosamente o ultrafreezer estudado, abordando sua configuração construtiva, características técnicas e princípios de funcionamento do sistema em cascata;

- Objetivo específico 2 - Instrumentar o sistema de refrigeração com sensores de temperatura, manômetros e wattímetro, posicionados em pontos estratégicos para coleta precisa dos dados;

- Objetivo específico 3 - Monitorar e registrar as variáveis operacionais por meio da plataforma National Instruments, do software CoolPack e de planilhas eletrônicas;

- Objetivo específico 4 - Elaborar os diagramas de pressão versus entalpia (P × h) para os ciclos de alta (R-404A) e baixa temperatura (R-23), com base nas medições realizadas;

PARTE 2:

- Objetivo específico 5 - Avaliar o comportamento termodinâmico de ambos os estágios, verificando a estabilidade operacional e a adequação às especificações técnicas do fabricante.

1.3 Justificativa

Os ultrafreezers desempenham papel estratégico em diversas áreas, como laboratórios de pesquisa, bancos de sangue, instituições hospitalares e centros de vacinação, garantindo o armazenamento seguro de amostras biológicas, insumos farmacêuticos e outros materiais sensíveis. Sua importância tornou-se ainda mais evidente durante a pandemia de COVID-19, quando determinados imunizantes, como a vacina da Pfizer/BioNTech, exigiam conservação em temperaturas inferiores a –70 °C, revelando limitações na infraestrutura de cadeia de frio no Brasil e impulsionando a aquisição emergencial desses equipamentos.

Apesar de sua relevância, o uso de ultrafreezers apresenta desafios significativos. O elevado custo de aquisição, aliado ao alto consumo energético, demanda atenção especial à eficiência operacional e à sustentabilidade de sua utilização. Além disso, o cumprimento das exigências normativas, como as estabelecidas pela ANVISA, é essencial para garantir a qualidade e a segurança no armazenamento de produtos sensíveis a temperaturas ultrabaixas.

Nesse contexto, avaliar experimentalmente o desempenho termodinâmico desses equipamentos torna-se fundamental não apenas para assegurar sua confiabilidade e estabilidade térmica, mas também para identificar oportunidades de otimização energética. Assim, o presente estudo busca fornecer subsídios técnicos para aprimoramentos que conciliem desempenho, economia de energia e sustentabilidade ambiental.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho adota uma abordagem experimental para avaliar o comportamento termodinâmico do sistema de refrigeração em cascata de um ultrafreezer modelo Coldlab CL200- 86V. A metodologia consiste na instrumentação do sistema com sensores específicos, coleta e registro de dados operacionais e construção do diagrama de pressão versus entalpia (P × h) para os ciclos de alta (1º estágio) e baixa temperatura (2º estágio), possibilitando a caracterização do desempenho em regime de temperaturas ultrabaixas.

2.1 Equipamento

O equipamento em estudo, ultra freezer Coldlab modelo CL200-86V, apresenta boa parte das informações técnicas relevantes no manual do usuário e na placa de identificação do equipamento, são elas

TABELA 1. Especificações técnicas do ultrafreezer Coldlab CL200-86V.

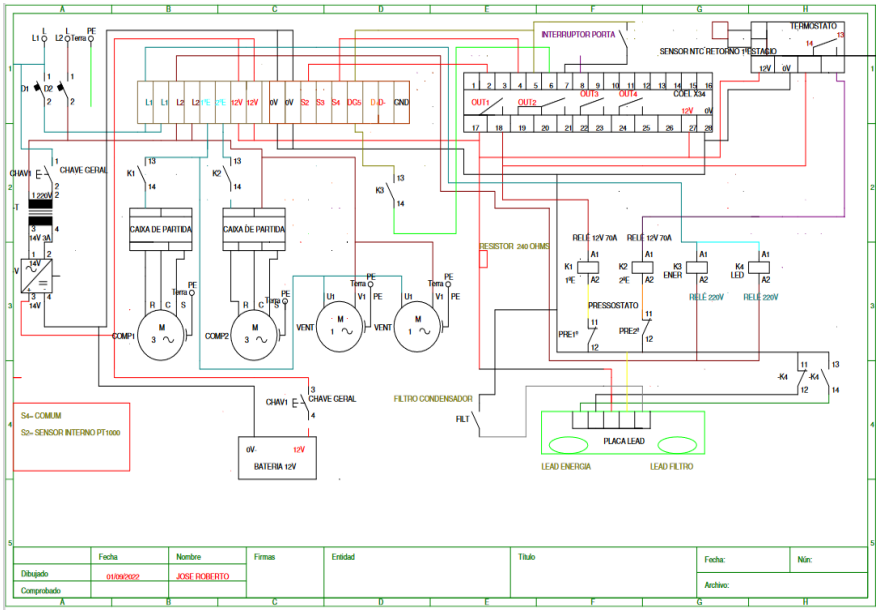
ITEM	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA
Tensão de alimentação:	220 VAC 1PH
Frequência nominal:	60 Hz
Potência:	1500W
Dimensões externas:	1610mm x 760mm x 740mm (A x L x P)
Dimensões internas:	830mm x 500mm x 500mm (A x L x P)
Capacidade:	200L
Faixa de trabalho:	-40°C a -86°C
Peso:	170kg
Fluido refrigerante:	1º Estágio R404A (alta)
Fluido refrigerante:	2º Estágio R23 (Baixa)
Óleo aditivo:	160Pz
Número de série:	6801214

Fonte: Autor (2025).

2.2 Diagrama de conexões elétricas

O diagrama de conexões elétricas foi obtido diretamente junto ao fabricante Coldlab, mediante solicitação. A partir do diagrama de conexões elétricas fornecido é possível identificar como os componentes elétricos e/ou eletrônicos do sistema estão interligados e compreender seu funcionamento.

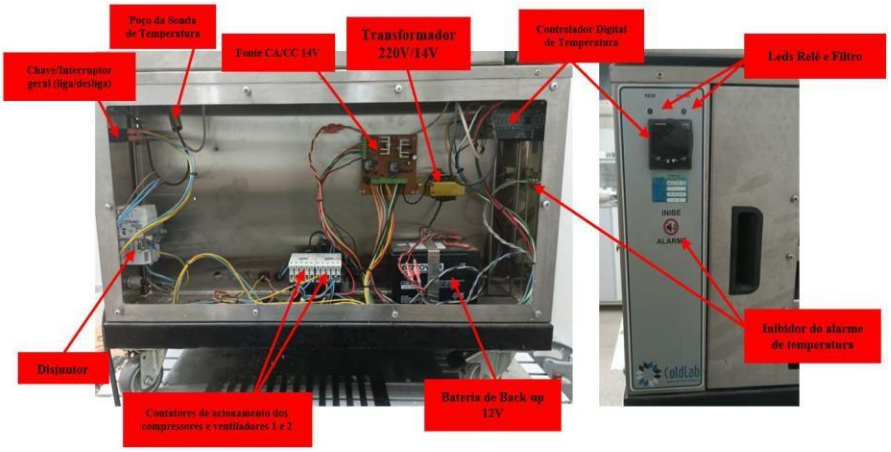
FIGURA 3. Diagrama de conexões elétricas genérico, modelo CL200-86V.



Fonte: Fabricante ColdLab (2024).

Ao remover a tampa lateral para acesso aos componentes elétricos é possível identificá-los e associando-os ao diagrama elétrico compreender o funcionamento do equipamento.

FIGURA 4. Localização dos componentes eletroeletrônicos.



Fonte: Autor (2025).

2.3 Procedimentos

Na sequência da identificação do equipamento, foram definidos os seguintes procedimentos com vistas a atingir os objetivos específicos da PARTE 1:

Objetivo específico 1

- Remover as tampas metálicas laterais e traseiras do ultrafreezer e acessar as tubulações dos circuitos frigoríficos, identificando e removendo o isolamento térmico;

- Mapear o trajeto das tubulações, verificando suas conexões mecânicas e elaborar o diagrama geral dos circuitos frigoríficos da configuração cascata aplicada ao equipamento;

- Identificar e especificar tecnicamente cada componente mecânico do sistema;

Objetivo específico 2

- Instalar sensores de temperatura em pontos estratégicos identificados nos circuitos de alta temperatura (1º estágio) e de baixa temperatura (2º estágio) para medição das variáveis de temperatura;

- Instalar manômetros nos lados de baixa e alta pressão de ambos os ciclos para leitura das pressões de evaporação e condensação;

- Instalar o Wattímetro para medição de potências (aparente, efetiva e reativa, e fator de potência) em pontos estratégicos do circuito elétrico do equipamento;

Objetivo específico 3

- Operacionalizar o módulo de aquisição de dados e programar a plataforma (software LabView) de forma a permitir a medição das variáveis de temperatura;

- Operar o equipamento e monitorar as temperaturas, pressões e potências registrando os dados dos dois estágios;

Objetivo específico 4

- Realizar cálculos de superaquecimento e subresfriamento;

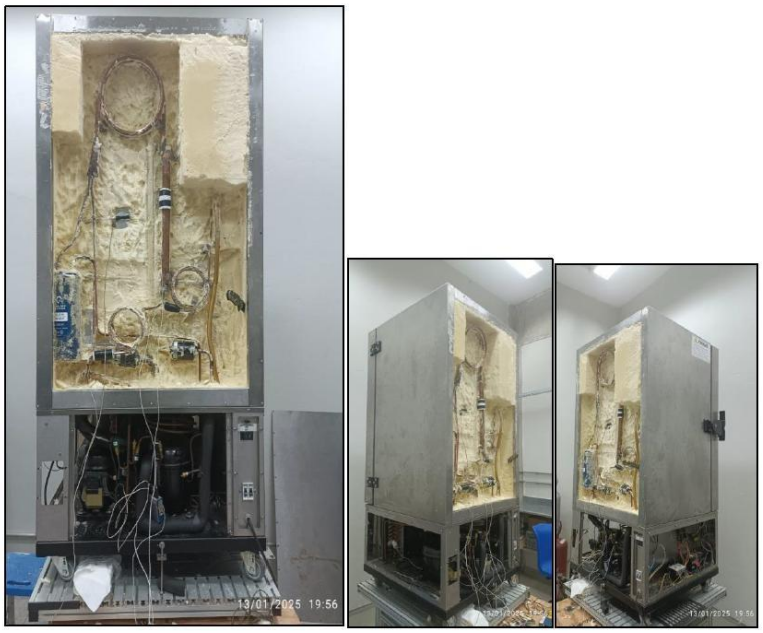
- Com os dados de monitoramento, e através do software CoolPack, plotar os ciclos frigoríficos do 1º e 2º estágios em diagramas P × h correspondentes a cada fluido refrigerante.

- Gerar gráficos de comportamento de temperaturas, pressões e potências em função do tempo de ensaio;

3 RESULTADOS

Considerando que o diagrama frigorífico não consta disponibilizado, nem no manual, nem pelo fabricante (por solicitação formal), foi realizada a remoção das tampas metálicas traseiras com a extração parcial do isolamento térmico, PUR – Poliuretano Expandido (aproximadamente 120 mm de espessura) a fim de expor os componentes e possibilitar o levantamento do circuito frigorífico.

FIGURA 5. Equipamento com isolação térmica parcialmente removida.

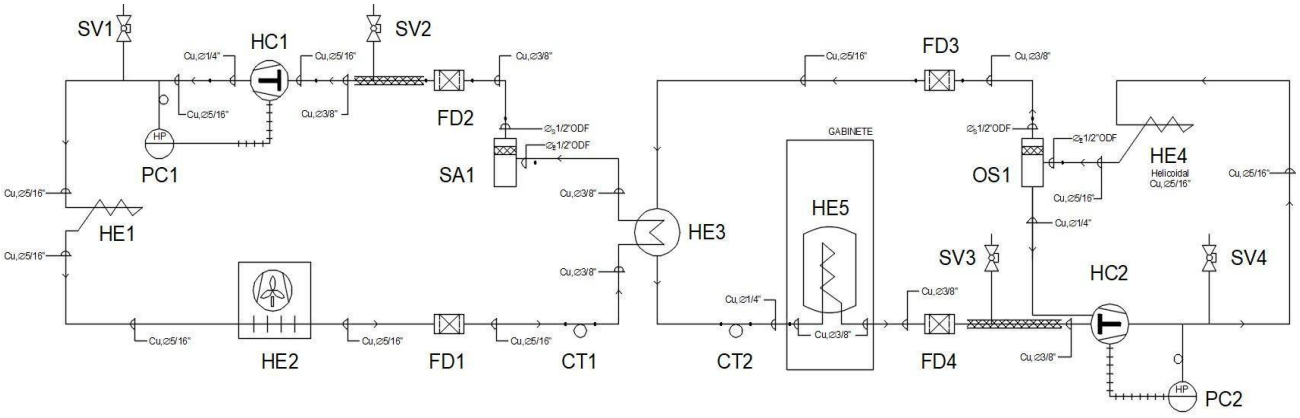


Fonte: Autor (2025).

A remoção do isolamento térmico provoca perda eficiência dos componentes, tal perda será desprezada em quaisquer análises que seguem nesse estudo.

A partir do acesso visual aos componentes do sistema e sua configuração de interligação, constatou-se o trajeto do circuito frigorífico identificando-se cada componente constituinte conforme expõe-se na figura a seguir.

FIGURA 6. Diagrama frigorífico do sistema em cascata, ultrafreezer modelo CL200-86V.



Fonte: Autor (2025).

Na tabela a seguir apresentam-se os dados dos principais componentes do sistema frigorífico organizados de forma resumida quanto à identificação, fabricante, modelo e função.

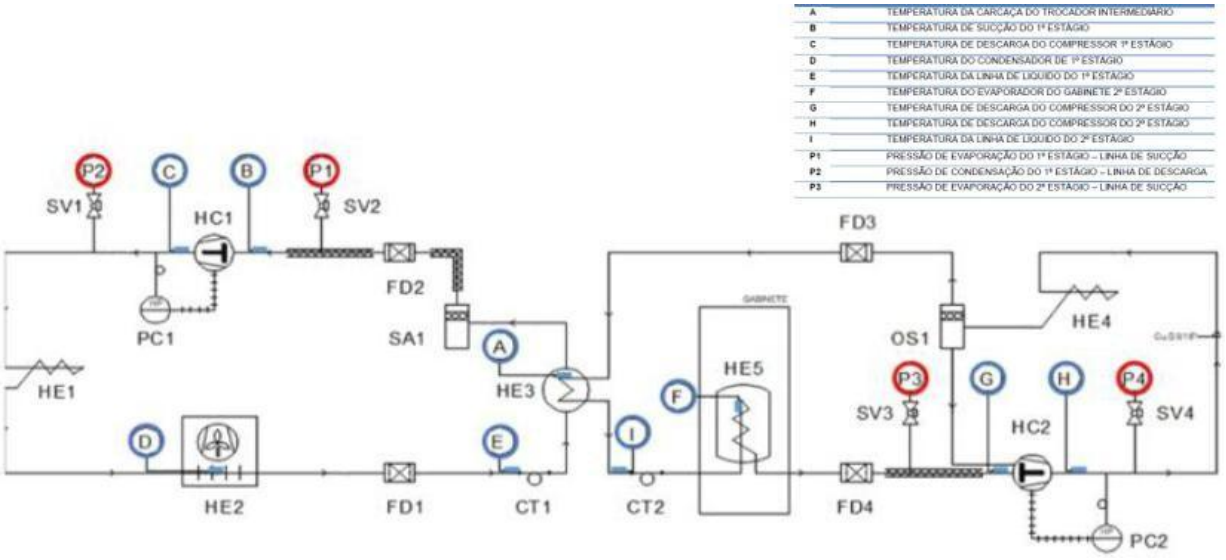
TABELA 2. Especificação técnica básica dos componentes frigoríficos.

TAG	Componente	Fabricante	Modelo
HC1	Compressor Hermético	Embraco	FFI 12HBX
PC1	Pressostato de Alta	Elgin	PSHP 350-250
VS1	Válvula Schrader	Genérico	1/4" SAE
HE1	Pré-condensador	Genérico	Serpentina
HE2	Condensador	EOS	3/4 30T
FD1	Filtro Secador	Danfoss	DML033S
CT1	Tubo Capilar	Genérico	0,080in
HE3	Trocador de Calor	Genérico	Tubo duplo
SA1	Acumulador de Sucção	EOS	EOS-AS-205
FD2	Filtro Secador	Danfoss	DML083S
VS2	Válvula Schrader	Genérico	1/4" SAE
HC2	Compressor Hermético	Embraco	NT2180K
PC2	Pressostato de Alta	Elgin	PSHP 350-250
VS4	Válvula Schrader	Genérico	1/4" SAE
HE4	Pré-condensador	Genérico	Serpentina
OS1	Separador de Óleo	EOS	EOS-SO-55824
FD3	Filtro Secador	Danfoss	DML033S
CT2	Tubo Capilar	Genérico	0,080in
HE5	Trocador de Calor	Genérico	Serpentina
FD4	Filtro Secador	Danfoss	DML083S
VS3	Válvula Schrader	Genérico	1/4" SAE

Fonte: Autor (2025).

Em sequência o sistema foi instrumentado com termopares tipo K instalados em pontos estratégicos dos ciclos, como linhas de sucção e descarga dos compressores, entrada e saída do condensador, evaporador e trocador intermediário, conforme indicado no diagrama da figura 7.

FIGURA 7. Identificação dos pontos de medição (diagrama frigorífico).



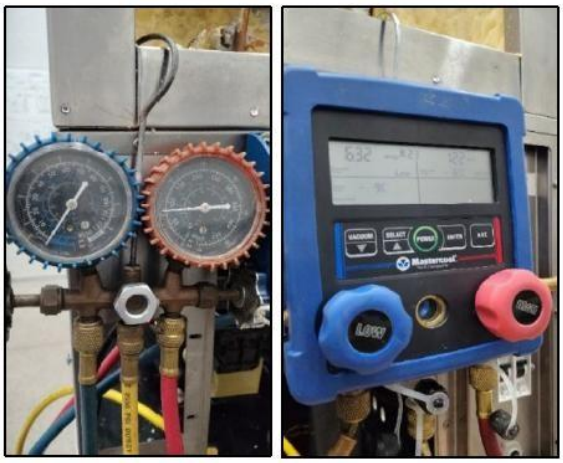
Fonte: Autor (2025).

O ensaio experimental foi realizado em 03 de julho de 2025, nas instalações do laboratório de energia, vinculado ao departamento de engenharia mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). A coleta de dados ocorreu no período das 14h00 às 20h05, seguindo intervalos regulares de 30 minutos e um procedimento padronizado de leitura, com o objetivo de garantir a consistência e a repetibilidade das medições ao longo do experimento.

a. Pressões de operação, lidas diretamente nos manômetros instalados:

- Pressão de evaporação do R-404A (circuito de alta);
- Pressão de condensação do R-404A;
- Pressão de evaporação do R-23 (circuito de baixa);
- Pressão de condensação do R-23.

FIGURA 8. Registro das pressões de evaporação e condensação.



Fonte: Autor (2025).

b. Potências elétricas do sistema, obtidas por meio do alicate wattímetro:

- Potência ativa, aparente e reativa do 1º estágio (R-404A);
- Potência ativa, aparente e reativa do 2º estágio (R-23).

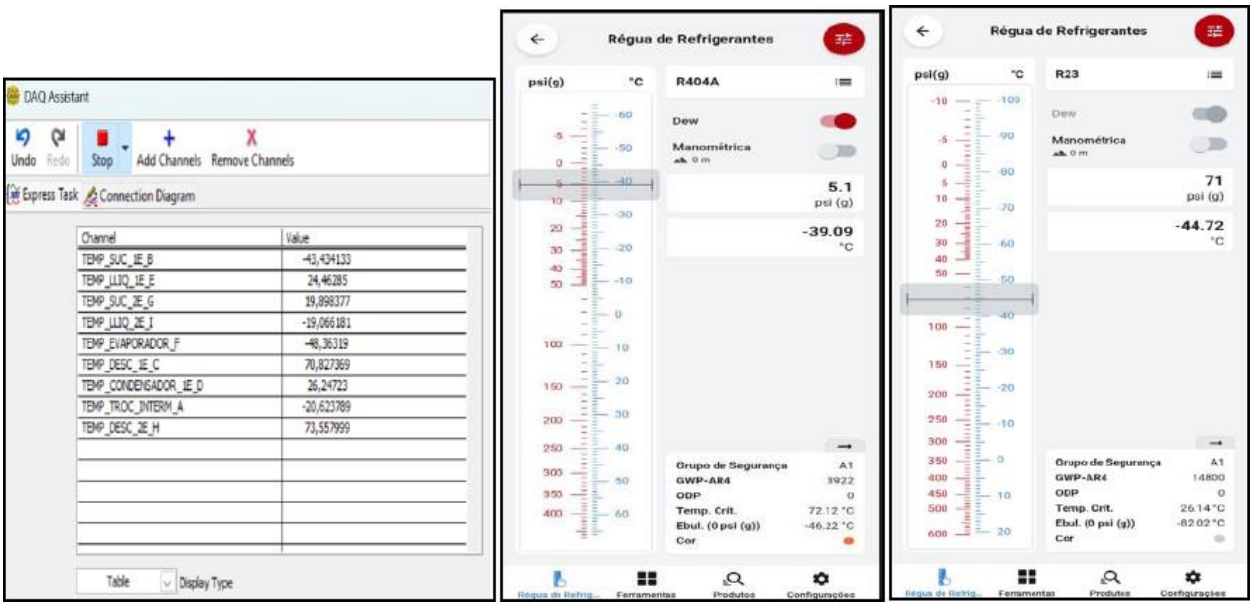
c. Temperaturas do ciclo frigorífico, captadas via termopares conectados ao sistema LabVIEW:

- Temperatura de sucção e temperatura da linha de líquido do 1º estágio;
- Temperatura de sucção e temperatura da linha de líquido do 2º estágio.

d. Com os valores de pressão previamente registrados, acessava-se o aplicativo Ref Tools (Danfoss) para obtenção das temperaturas de evaporação e condensação:

- Temperatura de evaporação e condensação do R-404A;
- Temperatura de evaporação e condensação do R-23.

FIGURA 9. Registro das temperaturas de evaporação/condensação e as de linha de líquido e sucção (1º estágio e 2º estágio)



Fonte: Autor (2025).

e. Por fim, com base nas temperaturas de evaporação, condensação, de sução e linha de líquido do 1º e 2º estágio, eram calculados:

- Superaquecimento e subresfriamento do circuito de alta (R-404A);
- Superaquecimento e subresfriamento do circuito de baixa (R-23).

Essa sequência foi rigorosamente repetida durante todo o período do experimento, garantindo a uniformidade dos registros e a fidelidade na análise dos dados.

Para esclarecimento e melhor compreensão das variáveis monitoradas, seguem as imagens a seguir.

3.1 Medições do 1º Estágio (R-404A)

No ciclo de alta temperatura com R-404A, as pressões de evaporação e condensação foram medidas nos manômetros de sucção e descarga, servindo como base para determinar, via aplicativo RefTools (Danfoss), as temperaturas saturadas correspondentes, essenciais à análise termodinâmica do sistema.

TABELA 3. Registro das pressões e respectivas temperaturas de evaporação e condensação para o R-404A.

		R404A							
TEMPO [min]	HORA	TEMP. GABINETE	P_{suc}		P_{desc} (ALTA) [PSI]	T_EVAP [°C]	T_COND [°C]	T_SUC [°C]	T_LL [°C]
TIMER	RELÓGIO	CONTROLADOR DE TEMPERATURA FRONTAL	MANÔMETRO DE BAIXA (AZUL)	UNIDADE [PSI/InHg]	MANÔMETRO DE ALTA (VERMELHO)	REFTOOLS	REFTOOLS	TEMP_SUC_1E_B	TEMP_LLIQ_1E_E
0	14h00	-25	10	PSI	122	-34,08	14,98	22	24
30	14h30	-42	6	PSI	115	-38,1	13,15	20	24
60	15h07	-47	4	PSI	111	-40,35	12,07	20	24
90	15h39	-49	3	PSI	106	-41,54	10,68	19	23
120	16h15	-50	6	PSI	139	-38,1	19,16	-1	27
150	16h54	-52	6,8	PSI	144	-37,25	20,33	-8	22
180	17h25	-53	9	PSI	155	-35,03	22,79	-17	22
210	17h54	-53	6,9	PSI	153	-37,15	22,35	-14	23
240	18h36	-54	5,8	PSI	144	-38,32	20,33	-10	21
270	19h05	-54	5,1	PSI	145	-39,09	20,56	-9	22
300	19h33	-55	5,2	PSI	148	-38,98	21,24	-8,4	22,8
330	20h05	-55	5	PSI	149,8	-39,2	21,64	-12	22,5

Fonte: Autor (2025).

3.2 Medições do 2º Estágio (R-23)

No ciclo de baixa temperatura com R-23, as pressões de evaporação e condensação foram medidas nos manômetros de sucção e descarga, servindo como base para determinar, via aplicativo RefTools (Danfoss), as temperaturas saturadas correspondentes, essenciais à análise termodinâmica do sistema.

TABELA 4. Registro das pressões e das correspondentes temperaturas de evaporação e condensação para o R-23.

		R23							
TEMPO [min]	HORA	TEMP. GABINETE	P_{suc} [PSI]		P_{desc} (ALTA) [PSI]	T_EVAP [°C]	T_COND [°C]	T_SUC [°C]	T_LL [°C]
TIMER	RELÓGIO	CONTROLADOR DE TEMPERATURA FRONTAL	MANÔMETRO DE BAIXA (AZUL)	UNIDADE [PSI/InHg]	MANÔMETRO DE ALTA (VERMELHO)	REFTOOLS	REFTOOLS	TEMP_SUC_2E_G	TEMP_LLIQ_2E_I
0	14h00	-25	0	PSI	96	-82,02	-37,9	-7	-12
30	14h30	-42	0	PSI	85	-82,02	-40,74	-28	-16
60	15h07	-47	7,19	inHg	84	-86,64	-41,01	-42	-18
90	15h39	-49	8,09	inHg	84	-87,3	-41,01	-43	-20
120	16h15	-50	9,68	inHg	78	-88,51	-42,67	-18	-21
150	16h54	-52	9,85	inHg	80	-88,65	-42,11	-20	-24
180	17h25	-53	10,18	inHg	80	-88,91	-42,11	-19	-22
210	17h54	-53	11,1	inHg	73	-89,67	-44,12	-15	-25
240	18h36	-54	11,34	inHg	70	-89,87	-45,02	-14	-25
270	19h05	-54	11,34	inHg	71	-89,87	-44,72	-14	-25,5
300	19h33	-55	11,42	inHg	71	-89,94	-44,72	-14	-25
330	20h05	-55	16,11	inHg	71	-94,39	-44,72	-6,5	-26

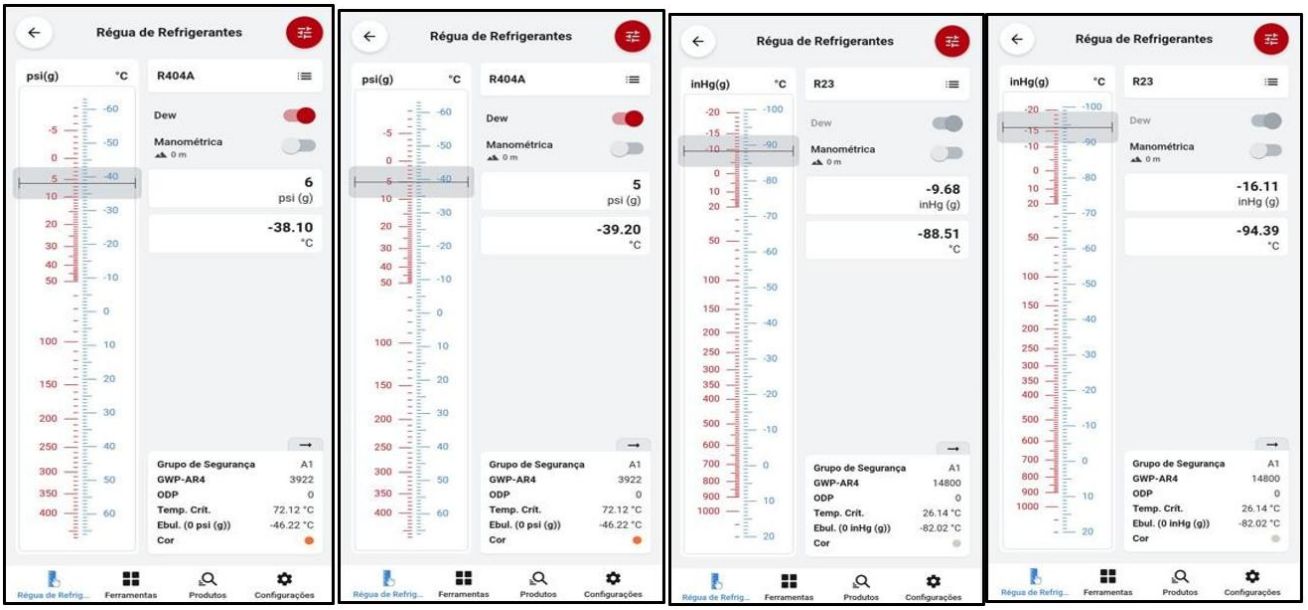
Fonte: Autor (2025).

3.3 Superaquecimento e subresfriamento

O diagrama Pressão × Entalpia (P×h) é uma ferramenta essencial para a análise de ciclos de refrigeração, pois permite visualizar cada etapa do processo e avaliar a eficiência do sistema. Neste

estudo, as pressões de evaporação e condensação dos ciclos de alta (R-404A) e baixa (R-23) foram medidas experimentalmente e, a partir delas, determinadas as temperaturas saturadas correspondentes no aplicativo RefTools (Danfoss).

FIGURA 10. Temperaturas de evaporação e condensação (ref tools Danfoss)



Fonte: Autor (2025).

Com essas temperaturas (evaporação/condensação) e as leituras obtidas no LabVIEW para as temperaturas de linhas de líquido e sucção, calcularam-se o superaquecimento, dado por:

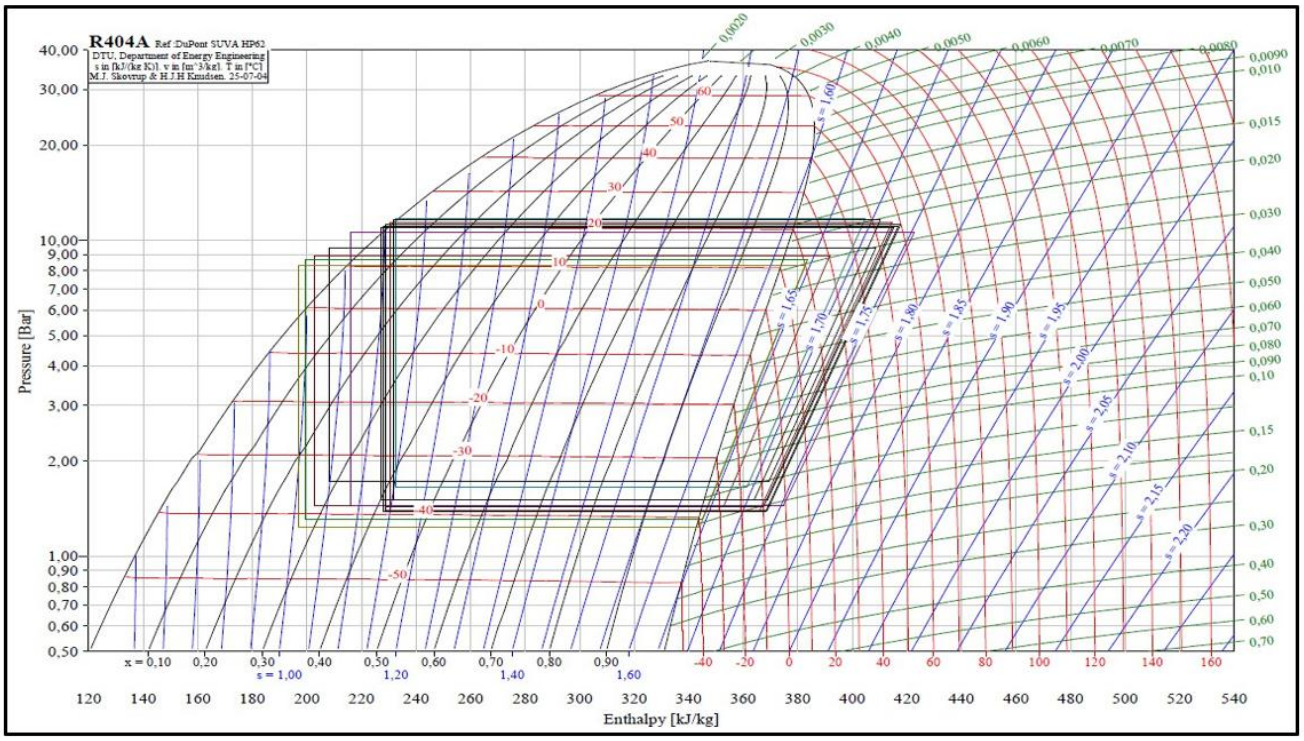
$$Sup = T_{suc} - T_{Evap} \tag{1}$$

Já o subresfriamento é equacionado do seguinte modo:

$$Sub = T_{cond} - T_{líq} \tag{2}$$

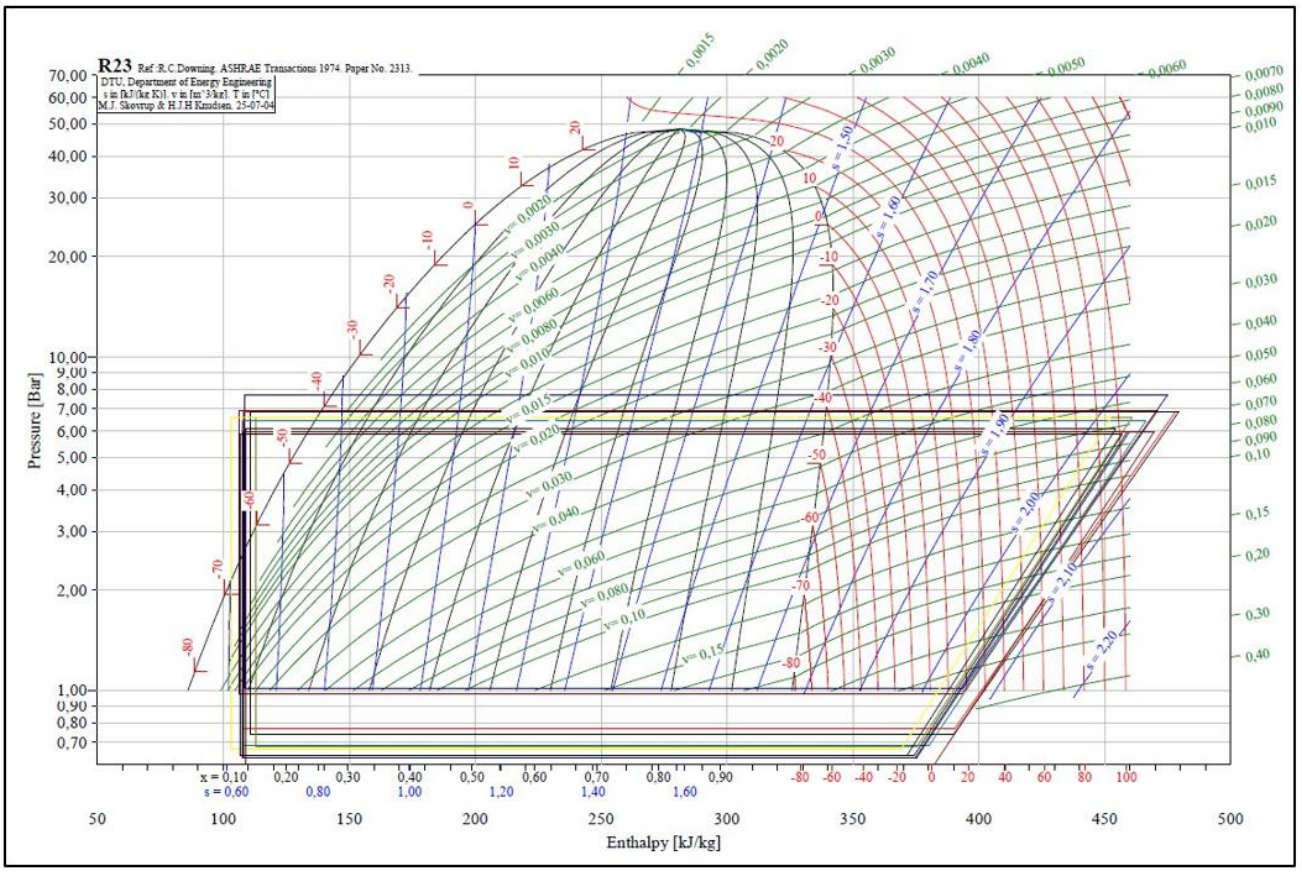
Esses parâmetros, combinados às propriedades termodinâmicas de cada refrigerante, permitiram a plotagem dos ciclos no *Coolpack*, resultando nos diagramas P×h para o R-404A e o R- 23.

Figura 11. Diagrama P x h do R-404



Fonte: Software Coolpack (2025).

Figura 12. Diagrama P x h do R-23.



Fonte: Software Coolpack (2025).

4 CONCLUSÕES

O estudo experimental realizado no ultrafreezer Coldlab CL200-86V permitiu cumprir integralmente todos os objetivos específicos propostos para a Parte 1 da pesquisa.

Foi feita a descrição minuciosa do equipamento e de seu sistema de refrigeração em cascata, identificando componentes, características construtivas e operacionais.

A instrumentação com sensores, manômetros e wattímetro possibilitou o monitoramento preciso das variáveis operacionais, cujos registros foram utilizados para calcular superaquecimento, subresfriamento e para elaborar os diagramas P×h de ambos os ciclos (R-404A e R-23).

Os resultados indicaram operação estável e desempenho compatível com as especificações do fabricante, confirmando a confiabilidade do sistema para aplicações que exigem temperaturas ultrabaixas.

A metodologia aplicada mostrou-se eficaz para caracterização técnica e termodinâmica de equipamentos deste tipo, estabelecendo uma base sólida para a segunda etapa do estudo, que contemplará a análise detalhada da eficiência energética e a avaliação do comportamento global do sistema em regime permanente.

O objetivo específico 5, que visa avaliar o comportamento termodinâmico de ambos os estágios, verificando a estabilidade operacional e a adequação às especificações técnicas do fabricante, será desenvolvido na Parte 2. Dessa forma, tudo que foi consolidado na Parte 1 constitui uma base essencial e indispensável para o sucesso da análise aprofundada que será realizada na sequência do estudo. Com sua conclusão na parte 2 espera-se que o objetivo geral explicitado nesse seja plenamente atingido.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 23953-2: expositores refrigerados: classificação, requisitos e condições de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. RDC nº 430, de 08 de outubro de 2020. Dispõe sobre as Boas Práticas de Distribuição, Armazenagem e Transporte de Medicamentos. Disponível em: https://www.gov.br/anvisa. Acesso em: 04 jul. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 430, de 8 de outubro de 2020. Dispõe sobre as Boas Práticas de Distribuição, Armazenagem e Transporte de Medicamentos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 158, n. 195, p. 88–91, 9 out. 2020. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-430-de-8-de-outubro-de-2020-282070599. Acesso em: 23 maio 2025.

CAO, Z.; LING, Y.; TAN, H.; BAI, M.; LIU, Z. “Experimental test on the performance of a −80 °C cascade refrigeration unit using refrigerants R290-R170 for COVID-19 vaccines storage”. University of Electronic Science and Technology of China, 2023.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. Transferência de calor e massa: uma abordagem prática. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2012. 1018 p.

COLDLAB COMÉRCIO E ASSISTÊNCIA TÉCNICA LTDA. Manual do usuário: ultra freezer sem tela. Piracicaba, SP: Coldlab, 2025. Disponível em: https://www.coldlab.com.br. Acesso em: 23 jan. 2025.
COOLPACK, SOFTWARE. Software Coolpack Version 1.50, 2000-2010. Disponível em: https://www.ipu.dk/products/coolpack/. Acesso em: 12 abr. 2024.

COSTA, Edson da Cunha. Refrigeração. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 322 p.

DANFOSS. Instruções de instalação: recomendações e instruções para o instalador. São Paulo: Danfoss A/S – Refrigeration & Air Conditioning Division, 2015. 202 p.

FDA, “Coronavirus (COVID-19) Update: FDA Allows More Flexible Storage, Transportation Conditions for Pfizer-BioNTech COVID-19 Vaccine”, https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/coronavirus-covid-19-update-fda-allows-more-flexible-storage-transportation-conditions-pfizer, 2021.

RESENDE, Wertson da Silva; BARBOSA, Cleiton Rubens Formiga; BARBOSA JÚNIOR, Cleiton Rubens Formiga; GUERRA, Ângelo Roncalli Oliveira; SOUZA, Sandi Itamar Schafer de. Adequação de sistema de refrigeração de pista de gelo didática para operação com fluido secundário. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL – CONEMI, 24., 2024, Manaus. Anais... Recife: Even3, 2024. v. 1.

RESENDE, Wertson da Silva; BARBOSA, Cleiton Rubens Formiga; LIMA, Álvaro Augusto Soares; GUERRA, Ângelo Roncalli Oliveira; SOUZA, Sandi Itamar Schafer de. Projeto de sistema de refrigeração didático para geração de uma pista de gelo – Ice Rink: parte 1. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 12., 2024, Natal. Anais... Rio de Janeiro: ABCM, 2024. v. 1.

RESENDE, Wertson da Silva; BARBOSA, Cleiton Rubens Formiga; LIMA, Álvaro Augusto Soares; GUERRA, Ângelo Roncalli Oliveira; SOUZA, Sandi Itamar Schafer de. Projeto de sistema de refrigeração didático para geração de uma pista de gelo – Ice Rink: parte 2. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 12., 2024, Natal. Anais... Rio de Janeiro: ABCM, 2024. v. 1.

QUEIROZ, Marcus Vinícius Almeida. Análise experimental de um sistema de refrigeração cascata utilizando fluidos refrigerantes alternativos. 2021.

SOUZA, Francisco; DUARTE, Luiz Gustavo da Cruz. Análise termodinâmica de ciclos de refrigeração em cascata para ultrafreezers. Revista Foco, v. 15, n. 1, p. 123–135, jan. 2022.

STOECKER, Wilbert F.; JABARDO, José Maurício Simões. Refrigeração industrial. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2002. 371 p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Model guidance for the storage and transport of time- and temperature-sensitive pharmaceutical products. In: WHO Technical Report Series, n. 961, annex 9. Geneva: WHO, 2011. Disponível em: https://www.who.int/publications/m/item/trs961-annex9-modelguidanceforstoragetransport. Acesso em: 23 maio 2025.

http://www.sinergiacientifica.com.br/ultrafreezer, 9 de outubro, 2023, acesso em 23 de maio de 2025). (SINERGIA científica, http://www.sinergiacientifica.com.br/ultrafreezer, 9 de outubro, 2023, acesso em 23 de maio de 2025).

(INDREL scientific, https://www.indrel.com.br, 06 de abril de 2022, acesso em 25 de maio de 2025).

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. Portaria nº 301, de 21 de julho de 2011. Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para Aparelhos de Refrigeração. Disponível em: https://www.gov.br/inmetro. Acesso em: 04 jul. 2025.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS. Manual sobre a Cadeia de Frio: armazenamento e transporte de vacinas. Genebra: OMS, 2021.

OPENAI. ChatGPT (modelo GPT-4). San Francisco, CA: OpenAI, 2025. Disponível em: https://chat.openai.com/. Acesso em: 10 jul. 2025.

NEPIN. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Instalações e Fluidos. Apostila de Refrigeração e Condicionamento de Ar. Natal: UFRN, 2022.

Capítulo 13

10.37423/251110442

ESTUDO EXPERIMENTAL DA PERFORMANCE TERMODINÂMICA DE UM ULTRAFREEZER - PARTE 2

Rafael Matos de Souza
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Wertson da Silva Resende
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Thiago da Silva André
Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) - Pró-Reitoria de Pesquisa e Inovação

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise experimental do desempenho termodinâmico de um sistema de refrigeração em cascata, composto por dois ciclos operando com os refrigerantes R-404A (alta temperatura) e R-23 (baixa temperatura). O estudo avaliou o coeficiente de performance (COP) e o consumo elétrico dos compressores durante um ensaio de seis horas. Os resultados indicam que o ciclo de alta temperatura apresentou uma redução de 32,28% no COP, associada ao acúmulo de carga térmica e estabilização do sistema, enquanto o ciclo de baixa temperatura manteve o COP com variação de 22,15%, demonstrando maior estabilidade na manutenção das temperaturas ultrabaixas, inferiores a –70 °C. A análise elétrica revelou queda na potência ativa e aumento da potência reativa, especialmente no ciclo de baixa temperatura, refletindo a dinâmica térmica entre os estágios e a influência das temperaturas de condensação sobre o consumo energético. O ultrafreezer Coldlab CL200 86V atingiu temperaturas próximas a –55 °C, cerca de 64% da temperatura nominal de projeto, adequado para armazenamento de materiais sensíveis. Os resultados confirmam a eficácia do sistema em cascata e a importância do controle integrado dos ciclos para otimização do desempenho e eficiência energética.

PALAVRAS-CHAVE: REFRIGERAÇÃO EM CASCATA, COP, R-23, R-404A, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

1 INTRODUÇÃO

O ultrafreezer é um equipamento de refrigeração de elevada perfomance, projetado para operar em faixas de temperatura ultrabaixas, cuja faixa pode variar entre -70 °C e -150 °C, a depender do modelo e tecnologia utilizada (Sinergia Científica, 2023). Sua finalidade primordial é a preservação, por longos períodos, materiais sensíveis a calor e a variação térmica, como vacinas, amostras biológicas, esperma, produtos químicos inflamáveis, DNA animal, alimentos e medicamentos de elevado valor.

A relevância desses sistemas de elevada performance térmica aumentou nas últimas décadas, ganhando impulso por conta dos avanços em pesquisa na área biomédica, pela produção seletiva e acelerada da indústria farmacêutica, pela expansão das terapias avançadas em células e estudos genéticos. Além do setor de saúde, a indústria fina do petróleo e gás, biotérios, zoológicos, aviação e outras áreas que exigem testes e armazenamentos em condições ultrabaixas (STEQ, 2018). Durante a pandemia de COVID-19, tornaram-se críticos para a logística de vacinas baseadas em RNA mensageiros que exigem temperaturas de -80 °C para manter a estabilidade e eficácia (OPAS, 2021).

O ultrafreezer Coldlab modelo CL200-86V, equipamento do referido estudo, representa a aplicação prática da evolução tecnológica no armazenamento a temperaturas ultrabaixas, incorporando soluções que potencializam a estabilidade térmica e a eficiência operacional (COLDLAB, 2023). A análise de seu coeficiente de performance (COP), associada à caracterização de seus sistemas de troca térmica e aos refrigerantes R-404A e R-23 que compõem seu ciclo em cascata, permite avaliar não apenas sua capacidade de manter as condições ideais de armazenamento, mas também sua eficiência energética.

FIGURA 1. Ultrafreezers do fabricante ColdLab.



Fonte: ColdLab (2024).

Contudo, a tecnologia para operação em temperaturas criogênicas ainda representa um desafio para muitos laboratórios, devido a necessidade de infraestrutura adequada, alto investimento e rigorosos padrões operacionais (Indrel Scientific, 2022). Para garantir a conservação de vacinas, amostras biológicas, sangue, reagentes químicos e outros insumos sensíveis, é indispensável manter controle preciso de temperatura, evitando oscilações que comprometam a eficácia. Em conformidade com as diretrizes da RDC nº430 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2020), que recomenda o uso de equipamentos eficientes para produtos que demandam temperaturas inferiores a –20 °C, o estudo experimental do desempenho de um ultrafreezer dessa magnitude tecnológica torna-se fundamental para assegurar confiabilidade, segurança e sustentabilidade em operações críticas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Realizar o estudo experimental da performance termodinâmica do sistema de refrigeração em cascata do ultrafreezer do fabricante Coldlab modelo CL200-86V, por meio do monitoramento de variáveis operacionais (pressão, temperatura e potências) e da construção de diagramas termodinâmicos, com o intuito de avaliar o comportamento termodinâmico por meio do Coeficiente de Performance (COP) em regime de temperaturas ultrabaixas.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Instrumentar o sistema de refrigeração em cascata com sensores de temperatura (termopares tipo K), manômetros (analógico e digital) e multímetro tipo alicate wattímetro, para coleta de dados em pontos estratégicos do equipamento;
- Monitorar e registrar variáveis operacionais utilizando recursos computacionais da plataforma National Instruments, Coolpack e planilhas eletrônicas;
- Analisar, avaliar e descrever a determinação dos valores de calor de evaporação, calor de condensação e trabalho dos compressores para os ciclos de R-23 e R-404A, calculados pelo Coolpack e exibidos em suas telas, utilizando como entrada os parâmetros previamente

medidos — pressões de evaporação e condensação (obtidas por manômetros analógico e digital), temperaturas de evaporação e condensação obtidas via aplicativo RefTools da Danfoss e temperaturas de sucção, linha de líquido e descarga monitoradas em tempo real pelo LabVIEW;

- Medir as potências elétrica ativa, reativa e aparente dos compressores, por meio de alicate wattímetro acoplado aos circuitos elétricos de baixa e alta pressão, registrando os valores em planilha eletrônica para posterior análise gráfica e comportamental;

- Analisar os coeficientes de performance (COP) para os refrigerantes R-23 e R-404A, organizando os resultados em planilhas e gerando gráficos para avaliação do comportamento do sistema em diferentes condições de operação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho adota uma abordagem experimental para avaliação do comportamento termodinâmico do sistema de refrigeração em cascata de um ultrafreezer modelo Coldlab CL200-86V. A metodologia integra a instrumentação do sistema em cascata com sensores específicos, alicate wattímetro, aplicação dos dados coletados e registrados no software Coolpack, permitindo a plotagem dos diagramas Pxh, para cada refrigerante (R-23 e R404A), exibindo em suas telas, parâmetros operacionais, tais como: calor de evaporação, calor de condensação e trabalho dos compressores, possibilitando desta forma a análise dos coeficientes de performance do sistema.

2.1 Análise do fluxo de calor no sistema em cascata do ultrafreezer CL200-86V

Em um evaporador, tanto a condução quanto a convecção térmica são processos relevantes na transferência de calor. A condução acontece através do material do evaporador e pode ser matematicamente descrita pela lei de Fourier, expressa pela Equação 1,

$$q = -k\,A\,\frac{dT}{dx} \tag{1}$$

Onde:

K é a condutividade térmica do material [W/m.k]; A é a área de troca [m²]; e dT/dx é o gradiente de temperatura [k ou °C];

Já a convecção ocorre quando o ar ao redor do evaporador aquece e torna-se menos denso, subindo. O ar mais frio, mais denso, desce, criando correntes convectivas. A convecção segue a lei de resfriamento de Newton, matematicamente expressa pela Equação 2,

$$q = h\,A\,(T_s - T_\infty) \tag{2}$$

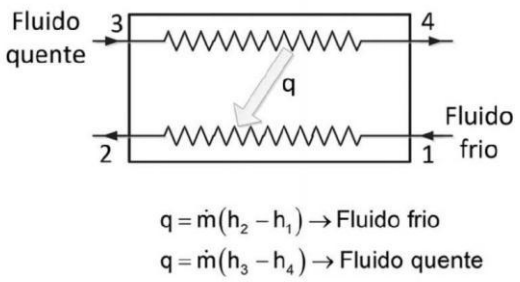
Onde:

H é o coeficiente convectivo [W/m².k]; q é a transferência de calor [W]; Ts é a Temperatura da superfície [k ou °C]; Tœ é a temperatura do fluido longe da superfície [k ou °C].

De acordo com Stoecker e Jabardo (2002), a taxa de transferência de calor, q, é o resultado, conforme expresso na Equação 3, do produto da vazão mássica pela variação da entalpia de cada um dos fluidos em um trocador de calor, conforme esquema da Figura 2. O fluido quente se resfria ou se condensa ao ceder calor ao frio, tendo sua entalpia reduzida, ao passo que o fluido frio se esquenta ou se evapora com sua entalpia aumentando.

$$Q = \dot{m} \cdot (h_{\text{saída}} - h_{\text{entrada}}) \tag{3}$$

FIGURA 2. Aplicação de um trocador de calor



Fonte: Stoecker e Jabardo (2002).

Para este estudo, foram considerados dois refrigerantes com características físico-químicas distintas: R23 e R404A. O R23, pertencente à família dos hidrofluorcarbonos (HFC), apresenta elevado potencial de refrigeração a baixas temperaturas, sendo empregado principalmente em estágios de baixa pressão de sistemas em cascata. O R404A, mistura ternária composta por R125, R143a e R134a, é amplamente

utilizado em refrigeração comercial e industrial, destacando-se por seu bom equilíbrio entre capacidade frigorífica e pressão de operação. As propriedades termodinâmicas de ambos os fluidos foram obtidas por meio do banco de dados do software Coolpack.

O cálculo dos fluxos de calor foi conduzido a partir dos dados experimentais de pressão e temperatura medidos no sistema, que permitiram a determinação das entalpias nos pontos de interesse via diagrama pressão–entalpia (P × h). Esses valores, combinados com a vazão mássica do refrigerante, forneceram as taxas de calor absorvidas no evaporador e rejeitadas no condensador, as quais serão posteriormente correlacionadas aos coeficientes de performance do ciclo.

2.2 Medição e análises das potências elétricas

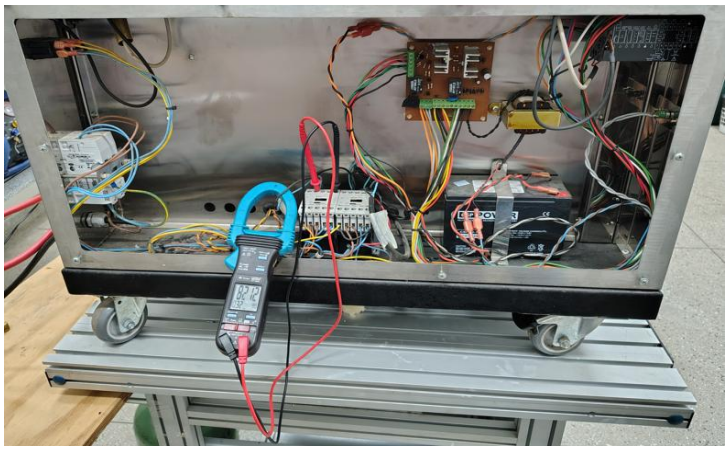
Para avaliação do desempenho energético dos compressores, e consequentemente o estudo da performance do sistema de refrigeração em cascata, foram medidas as potências ativa, reativa e aparente utilizando um alicate wattímetro conectado às linhas elétricas de baixa e alta pressão, posteriormente registrados numa planilha eletrônica. A potência ativa (P), expressa em [W] corresponde à energia efetivamente convertida em trabalho útil, enquanto a potência reativa (Q), dada em [VAr] refere-se à energia associada à criação dos campos magnéticos no motor. A potência aparente (S), expressa em [VA] representa a combinação dessas duas parcelas, sendo calculada pela Equação 4:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \tag{4}$$

O fator de potência (FP) foi obtido pela razão entre a potência ativa e aparente, indicando a eficiência da conversão energética no compressor. A expressão matemática é dada pela Equação 5:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\phi) \tag{5}$$

FIGURA 3. Medição das potências elétrica com alicate Wattímetro.



Fonte: Autor (2025).

2.3 Cálculo dos coeficientes de performance

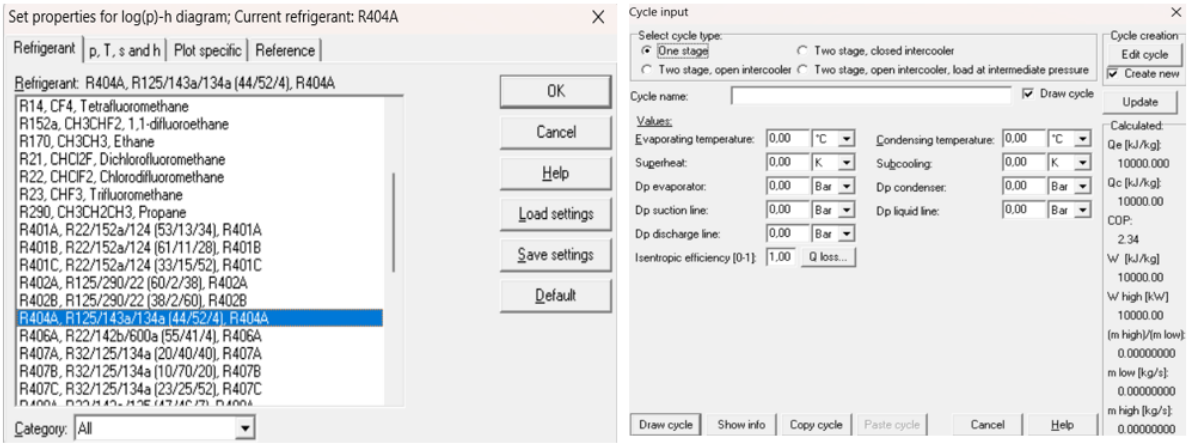
O coeficiente de performance (COP) é um parâmetro adimensional que expressa a eficiência de sistemas frigoríficos, representando a razão entre o calor absorvido no evaporador e o trabalho realizado pelo compressor. Para os refrigerantes R23 e R404A, o cálculo do COP foi realizado diretamente no software Coolpack, utilizando todos os parâmetros coletados e calculados experimentalmente, incluindo pressões, temperaturas, subresfriamento e superaquecimento, esses valores foram inseridos na janela de dados do Coolpack, após ser feita a seleção do diagrama desejado, neste caso, o P x h, e o respectivo refrigerante (R-23 ou R404A).

Matematicamente o COP é dado pela Equação 6 a seguir:

$$COP = \frac{Q_{\text{evap}}}{W_{\text{comp}}} \tag{6}$$

A plotagem deste diagrama de pressão versus entalpia, é fundamental para análise comportamental do sistema estudado.

FIGURA 4. Telas de entrada de parâmetros, Coolpack.



Fonte: Software Coolpack (2025).

2.3.1 Coeficiente de performance do sistema de refrigeração em cascata

Para sistemas em cascata, o COP foi calculado considerando o efeito frigorífico do estágio frio e o trabalho conjunto dos compressores de baixa e alta pressão, conforme Equação 7:

$$COP = \frac{Q_{\text{evap}}}{W_{\text{comp, baixa}} + W_{\text{comp, alta}}} \quad (7)$$

Onde:

Q_{evap} representa o fluxo térmico absorvido no evaporador do estágio frio, obtido pela variação de entalpia do refrigerante multiplicada pela vazão mássica, conforme descrito na seção 2.1. Os trabalhos dos compressores foram determinados a partir das potências medidas experimentalmente, conforme a seção 2.2.

3 RESULTADOS

3.1 Medições do 1° estágio (R-404A) e do 2° estágio (R-23)

Inicialmente, foram monitoradas e registradas as pressões de evaporação e condensação do sistema conforme indicações das Tabela 1 e Tabela 2 a seguir. Em seguida, utilizou-se o aplicativo RefTools (Danfoss) para determinar as respectivas temperaturas de evaporação e condensação para cada refrigerante (R-23 e R-404A). As temperaturas de linha de líquido, sucção e descarga foram obtidas em

tempo real via software LabVIEW, possibilitando, o cálculo do subresfriamento e superaquecimento. Com esses parâmetros operacionais, o software Coolpack foi utilizado para gerar os diagramas P × h de cada estágio do ciclo em cascata. As planilhas apresentadas foram elaboradas exclusivamente para este trabalho, com o objetivo de organizar e registrar de forma sistemática os dados experimentais coletados.

TABELA 1. Registro das pressões e temperaturas de evaporação e condensação para o R-404A.

			R404A						
TEMPO [min]	HORA	TEMP. GABINETE	P_{suc}		P_{desc} (ALTA) [PSI]	T_EVAP [°C]	T_COND [°C]	T_SUC [°C]	T_LL [°C]
TIMER	RELÓGIO	CONTROLADOR DE TEMPERATURA FRONTAL	MANÔMETRO DE BAIXA (AZUL)	UNIDADE [PSI/InHg]	MANÔMETRO DE ALTA (VERMELHO)	REFTOOLS	REFTOOLS	TEMP_SUC_1E_B	TEMP_LLIQ_1E_E
0	14h00	-25	10	PSI	122	-34,08	14,98	22	24
30	14h30	-42	6	PSI	115	-38,1	13,15	20	24
60	15h07	-47	4	PSI	111	-40,35	12,07	20	24
90	15h39	-49	3	PSI	106	-41,54	10,68	19	23
120	16h15	-50	6	PSI	139	-38,1	19,16	-1	27
150	16h54	-52	6,8	PSI	144	-37,25	20,33	-8	22
180	17h25	-53	9	PSI	155	-35,03	22,79	-17	22
210	17h54	-53	6,9	PSI	153	-37,15	22,35	-14	23
240	18h36	-54	5,8	PSI	144	-38,32	20,33	-10	21
270	19h05	-54	5,1	PSI	145	-39,09	20,56	-9	22
300	19h33	-55	5,2	PSI	148	-38,98	21,24	-8,4	22,8
330	20h05	-55	5	PSI	149,8	-39,2	21,64	-12	22,5

Fonte: Souza (2025).

TABELA 2. Registo das pressões e temperaturas de evaporação e condensação para o R-23.

			R23						
TEMPO [min]	HORA	TEMP. GABINETE	P_{suc} [PSI]		P_{desc} (ALTA) [PSI]	T_EVAP [°C]	T_COND [°C]	T_SUC [°C]	T_LL [°C]
TIMER	RELÓGIO	CONTROLADOR DE TEMPERATURA FRONTAL	MANÔMETRO DE BAIXA (AZUL)	UNIDADE [PSI/InHg]	MANÔMETRO DE ALTA (VERMELHO)	REFTOOLS	REFTOOLS	TEMP_SUC_2E_G	TEMP_LLIQ_2E_I
0	14h00	-25	0	PSI	96	-82,02	-37,9	-7	-12
30	14h30	-42	0	PSI	85	-82,02	-40,74	-28	-16
60	15h07	-47	7,19	inHg	84	-86,64	-41,01	-42	-18
90	15h39	-49	8,09	inHg	84	-87,3	-41,01	-43	-20
120	16h15	-50	9,68	inHg	78	-88,51	-42,67	-18	-21
150	16h54	-52	9,85	inHg	80	-88,65	-42,11	-20	-24
180	17h25	-53	10,18	inHg	80	-88,91	-42,11	-19	-22
210	17h54	-53	11,1	inHg	73	-89,67	-44,12	-15	-25
240	18h36	-54	11,34	inHg	70	-89,87	-45,02	-14	-25
270	19h05	-54	11,34	inHg	71	-89,87	-44,72	-14	-25,5
300	19h33	-55	11,42	inHg	71	-89,94	-44,72	-14	-25
330	20h05	-55	16,11	inHg	71	-94,39	-44,72	-6,5	-26

Fonte: Souza (2025).

3.2 Eficiência térmica para o ciclo de baixa pressão R-23

No estágio de baixa pressão do sistema em cascata, operando com R-23, ocorre o efeito frigorífico responsável pela remoção de calor no ultrafreezer. A partir dos dados experimentais e do software Coolpack, obteve-se o calor de evaporação médio de 271,99 kJ/kg, conforme valores apresentados na

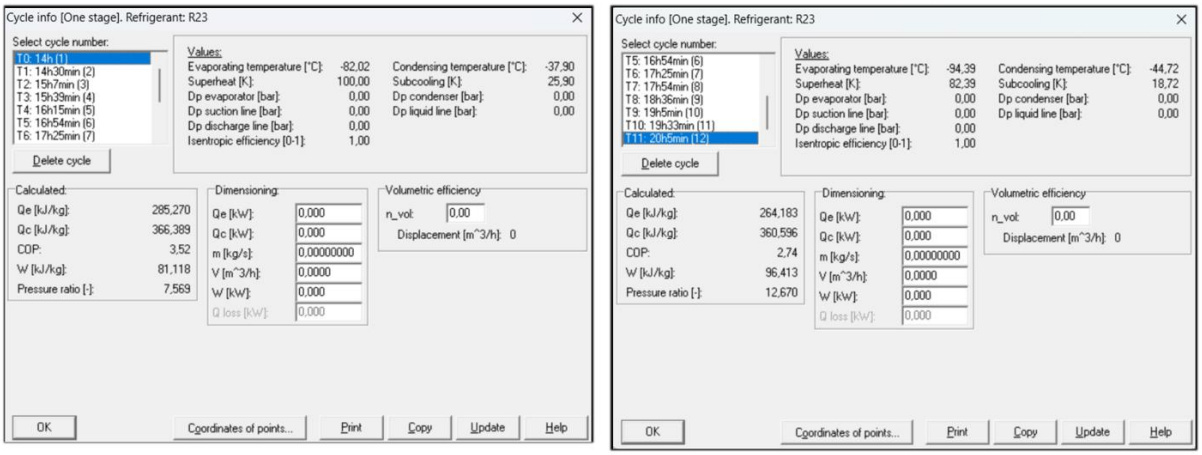
Tabela 3 a seguir. Esse parâmetro, aliado ao trabalho dos compressores de ambos os estágios, permitiu o cálculo do coeficiente de performance (COP) do sistema. Conforme, descrito anteriormente para fins de cálculo de fluxo de calor no evaporador (R-23) utiliza-se a Equação 3.

TABELA 3. Valores de calor de evaporação no ciclo de baixa, R-23.

COP R23	Qevap [kJ/kg]
COOLPACK	COOLPACK
3,52	285,27
3,69	286,97
3,23	282,43
3,13	279,45
3,18	272,67
3,08	262,56
3,2	266,19
3,17	262,32
3,24	267,48
3,18	266,66
3,18	267,71
2,74	264,18

Fonte: Souza (2025).

FIGURA 5. Tela do Coolpack, para o R-23, calor de evaporação.

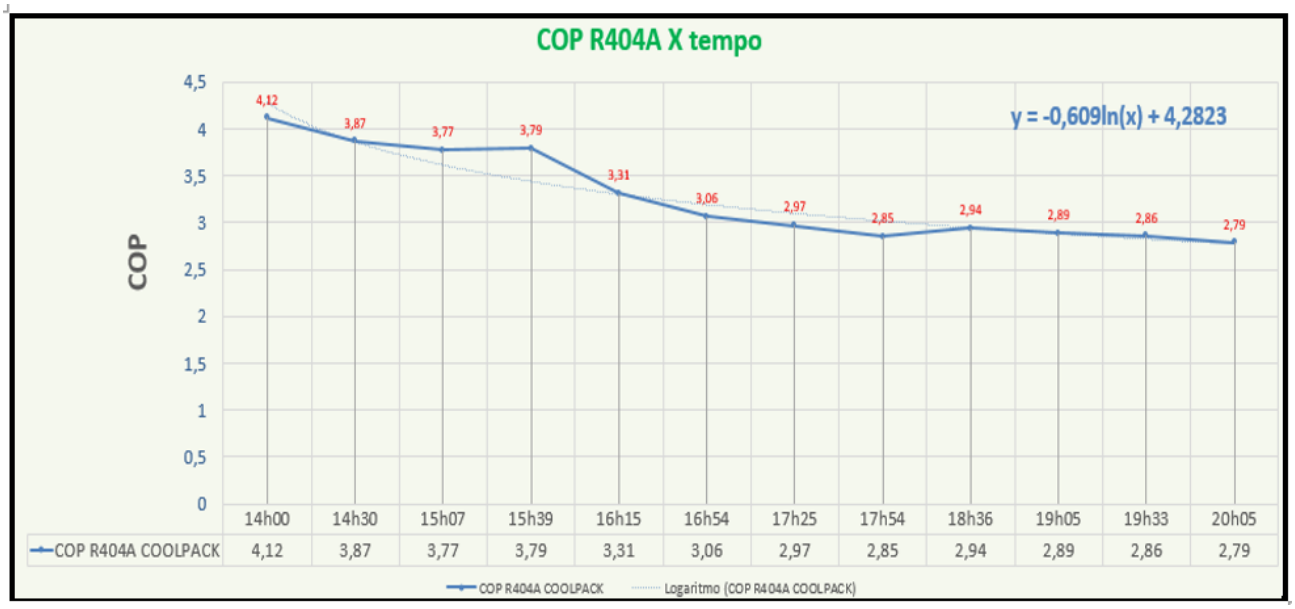


Fonte: Software Coolpack (2025).

3.3 COP do ciclo de baixa (R-23) e COP do ciclo de alta (R-404A)

A avaliação do desempenho energético dos ciclos de alta e baixa temperatura foi feita com base na variação do coeficiente de performance (COP) ao longo do tempo. O COP foi calculado para os refrigerantes R-404A (alta) e R-23 (baixa), considerando os dados obtidos nas medições experimentais.

FIGURA 6. Gráfico do COP para o R-404ª

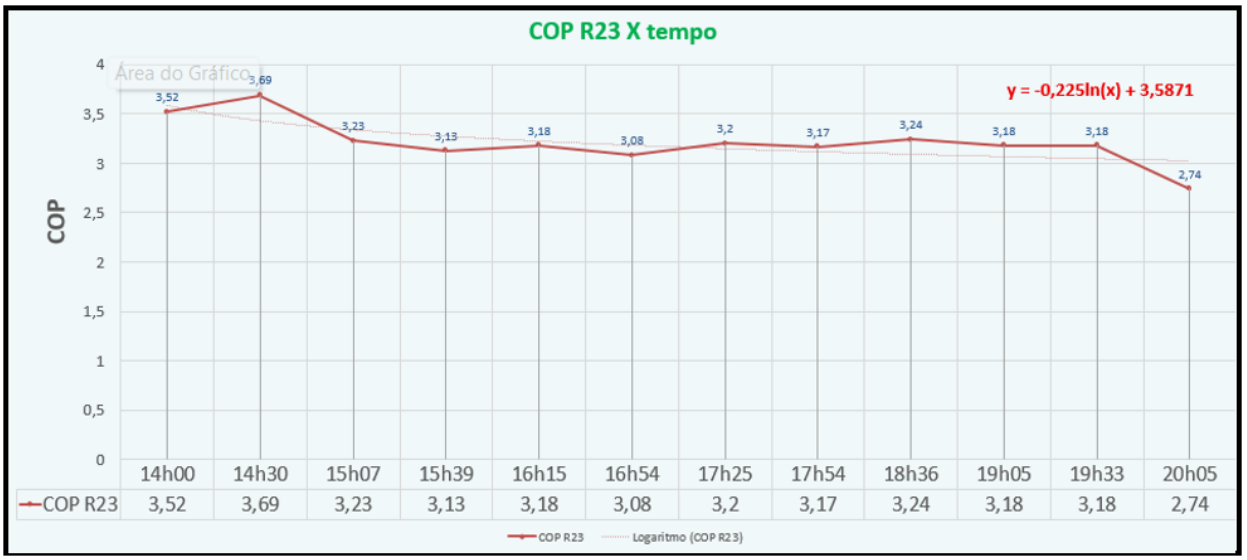


Fonte: Souza (2025).

A Figura 6 mostra o comportamento do (COP) para o R-404A, no período entre 14h e 20h05min. No início do ensaio, o COP foi 4,12, diminuindo gradualmente até 3,31 às 16h15min, período no qual o sistema busca estabilidade com menor carga no gabinete. Após 17h30min, o COP manteve-se estável entre 2,97 e 2,79, indicando operação em regime permanente. Ao final, às 20h, o valor caiu para 2,79, correspondendo a uma redução de 32,28%, atribuída ao acúmulo de carga térmica e maior esforço do compressor.

Já o ciclo de baixa temperatura, com R-23, exibiu um COP inicial de 3,52 e final de 2,74 (redução de 22,15%), conforme a Figura 7. O comportamento estável demonstra a eficácia do fluido em manter temperaturas ultrabaixas, com evaporação abaixo de –70 °C, essenciais para a operação criogênica do ultrafreezer. Os resultados confirmam o equilíbrio funcional do sistema em cascata: o R-404A responde pelo resfriamento inicial com maior demanda energética, enquanto o R-23 mantém a estabilidade térmica com eficiência ao longo do processo.

FIGURA 7. Gráfico do COP para o R-23



Fonte: Souza (2025).

3.4 Eficiência térmica do sistema em cascata

Sob as condições de projeto da fabricante Coldlab, com temperatura nominal de –86 °C, o ultrafreezer atingiu durante o ensaio cerca de –55 °C, equivalendo a 63,95% da temperatura projetada. Essa faixa é compatível com os requisitos para armazenamento de materiais sensíveis, como amostras biológicas, farmacêuticas e vacinas ultrabaixas, considerando o tempo do ensaio.

O coeficiente de performance (COP) do sistema em cascata foi calculado considerando o trabalho dos compressores dos dois estágios e a carga térmica do evaporador do segundo estágio, conforme dados do softwareCoolpack. A Equação 8 foi utilizada para este cálculo.

$$COP_{\text{total}} = \frac{Q_{\text{evap,baixo}}}{W_{\text{comp,baixo}} + W_{\text{comp,alto}}} \tag{9}$$

Os seguintes valores foram aplicados, Q_{evap}: 264,18 kJ/kg; W_{alta}: 48,54 kJ/kg;e W_{baixa}: 96,41 kJ/kg. O COP do ciclo obtido ficou em torno de 1,82. Esse valor está em conformidade com o intervalo de desempenho esperado para sistemas de refrigeração em cascata.

Os COP's indicados a partir da plotagem dos gráficos Pxh e das planilhas estão em faixas consideradas "boas" para sistemas de refrigeração, considerando as intervenções que foram feitas na máquina. De acordo com Stocker e Jabardo (2003), a ocorrência simultânea de elevados níveis de

superaquecimento e subresfriamento pode ser um indicativo de carga incompleta de fluido refrigerante no sistema.

3.5 Comportamento das potências elétricas

A potência elétrica consumida pelo sistema foi registrada em três componentes: ativa, reativa e aparente. Essa análise permite compreender o esforço energético do sistema ao longo da operação, em especial durante os estágios de resfriamento mais intensos e no regime permanente.

TABELA 4. Registro das potências para o R-23 e para o R-404A.

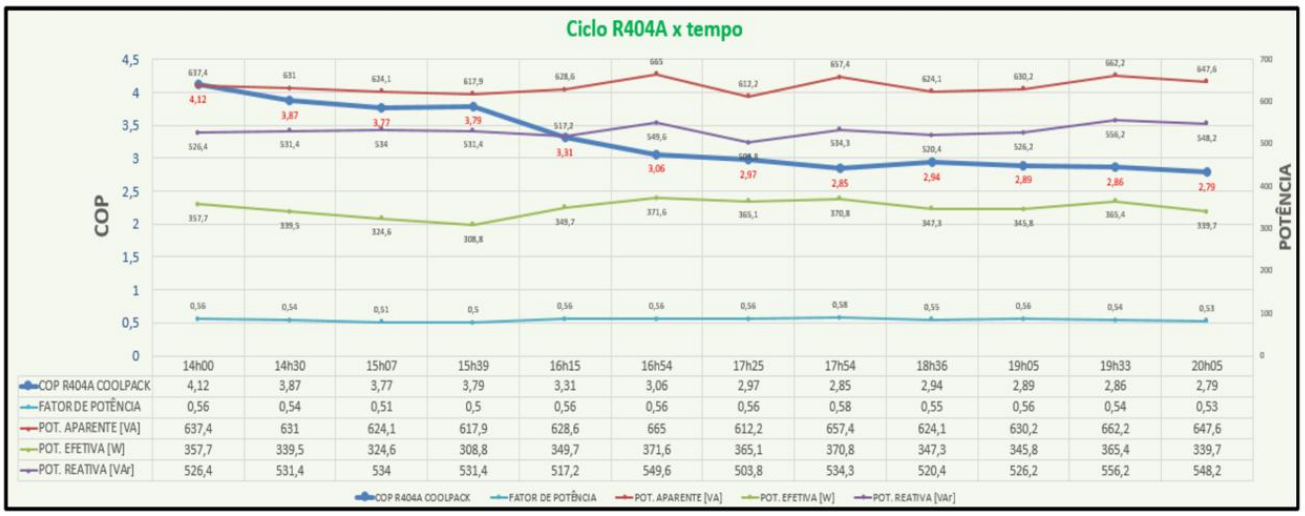
WATTÍMETRO - 1° ESTÁGIO				WATTÍMETRO - 2° ESTÁGIO			
POT. EFETIVA [W]	POT. APARENTE [VA]	POT. REATIVA [VAr]	FATOR DE POTÊNCIA	POT. EFETIVA [W]	POT. APARENTE [VA]	POT. REATIVA [VAr]	FATOR DE POTÊNCIA
357,7	637,4	526,4	0,56	363,2	791,3	703,4	0,45
339,5	631	531,4	0,54	353,7	896,1	776,2	0,46
324,6	624,1	534	0,51	330	824,4	755,8	0,39
308,8	617,9	531,4	0,5	310,6	790,2	708,2	0,38
349,7	628,6	517,2	0,56	302,4	842,8	786,4	0,35
371,6	665	549,6	0,56	288,4	857,2	796,4	0,36
365,1	612,2	503,8	0,56	328,8	900,6	838,4	0,35
370,8	657,4	534,3	0,58	308,3	891,7	833,2	0,35
347,3	624,1	520,4	0,55	310,9	895,3	839,5	0,34
345,8	630,2	526,2	0,56	311	894,8	837,8	0,34
365,4	662,2	556,2	0,54	310,6	889,2	833,2	0,34
339,7	647,6	548,2	0,53	247,6	856,8	816,2	0,29

Fonte: Autor (2025).

O ciclo de alta temperatura com R-404A, conforme indicações da Tabela 4, apresentou redução de potência ativa de 357,7 W (14h) para 339,7 W (20h05), cerca de 5%, associada à estabilidade térmica e menor carga no evaporador. A potência aparente variou de 637,4 VA para 647,6 VA, enquanto o fator de potência diminuiu de 0,56 para 0,53, indicando aumento da potência reativa e piora na qualidade do fornecimento.

Os gráficos das Figura 8 e Figura 9 apresentam a variação das potências registradas ao longo das doze coletas.

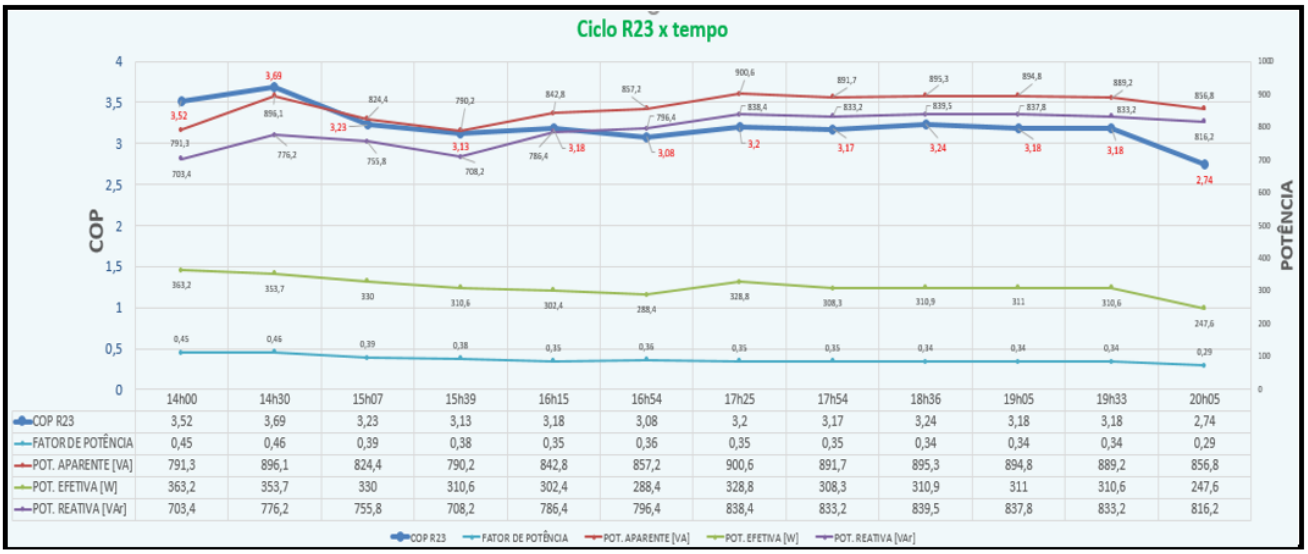
FIGURA 8. COP e potência x tempo para o R404A



Fonte: Souza (2025).

No ciclo de baixa temperatura com R-23, a potência ativa caiu de 363,2 W para 247,6 W, ao passo que a potência aparente subiu de 791,3 VA para 856,8 VA. O fator de potência caiu significativamente, de 0,45 para 0,29, refletindo maior contribuição da potência reativa e menor eficiência na conversão energética.

FIGURA 9. COP e potência x tempo para o R-23



Fonte: Souza (2025).

Esses resultados demonstram a interdependência dos estágios no sistema em cascata: a estabilização do ciclo de alta pressão ocorre simultaneamente ao aumento gradual da carga térmica no ciclo de baixa, influenciando o comportamento elétrico. Além disso, as temperaturas de condensação impactam diretamente a carga térmica rejeitada no trocador intermediário, afetando consumo e desempenho de ambos os ciclos.

4 CONCLUSÕES

O estudo experimental realizado permitiu avaliar o desempenho termodinâmico do sistema de refrigeração em cascata do ultrafreezer Coldlab CL200-86V, confirmando sua capacidade de alcançar temperaturas ultrabaixas com estabilidade operacional. A partir do monitoramento de variáveis como COP, temperatura de gabinete e potência elétrica, foi possível compreender o funcionamento dos ciclos de alta e baixa temperatura, operando com os refrigerantes R-404A e R-23, respectivamente.

Apesar do bom desempenho geral, a pesquisa revelou pontos importantes que podem ser aprimorados. Um deles diz respeito à instrumentação e aquisição de dados: a confiabilidade das medições pode ser significativamente aumentada com a adoção de módulos específicos de aquisição de temperatura, sensores com maior precisão e menor tempo de resposta, além da correção de falhas de comunicação observadas durante o monitoramento.

Outro aspecto importante refere-se ao isolamento térmico de componentes expostos, como linhas de sucção e descarga, que podem estar sujeitos a trocas térmicas indesejadas com o ambiente. A aplicação de isolamento adequado nessas regiões contribuirá para a redução de perdas energéticas e para a obtenção de resultados experimentais mais confiáveis.

Quanto aos refrigerantes, considerando as atuais diretrizes ambientais e o elevado Potencial de Aquecimento Global (GWP) do R-404A e do R-23, recomenda-se a substituição progressiva desses fluidos por alternativas mais sustentáveis, como misturas HFO (por exemplo, R-449A ou R-455A) no estágio de alta temperatura e soluções criogênicas de menor impacto ambiental para o estágio de baixa. Essa substituição se alinha às regulamentações internacionais e aos compromissos de redução de emissões.

Além disso, estudos futuros podem se concentrar na otimização do trocador de calor intermediário, com o objetivo de melhorar a eficiência térmica do sistema como um todo. Avaliações numéricas e experimentais sobre sua geometria, materiais e troca térmica podem representar contribuições relevantes tanto para a aplicação prática quanto para o avanço acadêmico na área de sistemas de refrigeração de múltiplos estágios.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 23953-2: expositores refrigerados: classificação, requisitos e condições de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária - BRASIL. Resolução RDC nº 430, de 8 de outubro de 2020. Dispõe sobre as Boas Práticas de Distribuição, Armazenagem e de Transporte de Medicamentos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 out. 2020.

CAO, Z.; LING, Y.; TAN, H.; BAI, M.; LIU, Z. "Experimental test on the performance of a −80 °C cascade refrigeration unit using refrigerants R290-R170 for COVID-19 vaccines storage". University of Electronic Science and Technology of China, 2023.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. Transferência de calor e massa: uma abordagem prática. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2012. 1018 p.

COLDLAB COMÉRCIO E ASSISTÊNCIA TÉCNICA LTDA. Manual do usuário: ultra freezer sem tela. Piracicaba, SP: Coldlab, 2025. Disponível em: https://www.coldlab.com.br. Acesso em: 23 jan. 2025.
COOLPACK, SOFTWARE. Software Coolpack Version 1.50, 2000-2010. Disponível em: https://www.ipu.dk/products/coolpack/. Acesso em: 12 abr. 2024.

COSTA, Edson da Cunha. Refrigeração. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 322 p.

DANFOSS. Instruções de instalação: recomendações e instruções para o instalador. São Paulo: Danfoss A/S – Refrigeration & Air Conditioning Division, 2015. 202 p.

FDA – U.S. FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. Coronavirus (COVID-19) update: FDA allows more flexible storage, transportation conditions for Pfizer-BioNTech COVID-19 vaccine. 2021. Disponível em: https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/coronavirus-covid-19-update-fda-allows-more-flexible-storage-transportation-conditions-pfizer. Acesso em: 15 ago. 2025.

INCROPERA, Frank P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S.; DE WITT, David P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 7. ed. tradução de Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 694 p. ISBN 978-85-216-2587-2.

INDREL SCIENTIFIC. Câmaras, refrigeradores e freezers científicos. 6 abr. 2022. Disponível em: https://www.indrel.com.br. Acesso em: 25 maio 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. Portaria nº 301, de 21 de julho de 2011. Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para Aparelhos de Refrigeração. Disponível em: https://www.gov.br/inmetro. Acesso em: 04 jul. 2025.

NEPIN. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Instalações e Fluidos. Apostila de Refrigeração e Condicionamento de Ar. Natal: UFRN, 2022.

OPAS – ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. Treinamento sobre manuseio, armazenamento e transporte da vacina Pfizer BioNTech COVID-19 COMIRNATY® (Tozinameran).

Brasília, DF: OPAS, 4 ago. 2021. Disponível em: https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/54636/OPASWBRAPHECOVID-19210061_por.pdf. Acesso em: 23 maio 2025.

OPENAI. ChatGPT (modelo GPT-4). San Francisco, CA: OpenAI, 2025. Disponível em: https://chat.openai.com/. Acesso em: 10 jul. 2025.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS. Manual sobre a Cadeia de Frio: armazenamento e transporte de vacinas. Genebra: OMS, 2021.

QUEIROZ, Marcus Vinícius Almeida. Análise experimental de um sistema de refrigeração cascata utilizando fluidos refrigerantes alternativos. 2021.

RESENDE, Wertson da Silva; BARBOSA, Cleiton Rubens Formiga; BARBOSA JÚNIOR, Cleiton Rubens Formiga; GUERRA, Ângelo Roncalli Oliveira; SOUZA, Sandi Itamar Schafer de. Adequação de sistema de refrigeração de pista de gelo didática para operação com fluido secundário. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL – CONEMI, 24., 2024, Manaus. Anais. Recife: Even3, 2024. v.1.

RESENDE, Wertson da Silva; BARBOSA, Cleiton Rubens Formiga; LIMA, Álvaro Augusto Soares; GUERRA, Ângelo Roncalli Oliveira; SOUZA, Sandi Itamar Schafer de. Projeto de sistema de refrigeração didático para geração de uma pista de gelo – Ice Rink: parte 1. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 12., 2024, Natal. Anais... Rio de Janeiro: ABCM, 2024. v. 1.

RESENDE, Wertson da Silva; BARBOSA, Cleiton Rubens Formiga; LIMA, Álvaro Augusto Soares; GUERRA, Ângelo Roncalli Oliveira; SOUZA, Sandi Itamar Schafer de. Projeto de sistema de refrigeração didático para geração de uma pista de gelo – Ice Rink: parte 2. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 12., 2024, Natal. Anais... Rio de Janeiro: ABCM, 2024. v. 1.

SINERGIA CIENTÍFICA. Ultrafreezer. 9 out. 2023. Disponível em: http://www.sinergiacientifica.com.br/ultrafreezer. Acesso em: 23 maio 2025.

SOUZA, Francisco; DUARTE, Luiz Gustavo da Cruz. Análise termodinâmica de ciclos de refrigeração em cascata para ultrafreezers. Revista Foco, v. 15, n. 1, p. 123–135, jan. 2022.

SOUZA, Rafael Matos; Estudo experimental da performance termodinâmica de um ultrafreezers. Trabalho de Conclusão de Curso - TCC (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Natal, RN, 2025. Orientação: Prof. Dr. Cleiton Rubens Formiga Barbosa.

STEQ. Freezers ultrafreezers laboratoriais. 2018. Disponível em: https://steq.com.br/produto/freezers-e-ultrafreezers-laboratoriais/. Acesso em: 23 maio 2025.

STOECKER, Wilbert F.; JABARDO, José Maurício Simões. Refrigeração industrial. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2002. 371 p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Model guidance for the storage and transport of time- and temperature-sensitive pharmaceutical products. In: WHO Technical Report Series, n. 961, annex 9.

Geneva: WHO, 2011. Disponível em: https://www.who.int/publications/m/item/trs961-annex9-modelguidanceforstoragetransport. Acesso em: 23 maio 2025.

Capítulo 14

10.37423/251110448

EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA E PERSPECTIVAS FUTURAS DE NOVOS FLUIDOS REFRIGERANTES APLICADOS EM SISTEMAS DE HRVAC

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Ângelo Roncalli de Oliveira Guerra — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Wertson da Silva Resende — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Edilson Marinho da Silva Júnior — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)*

RESUMO

A evolução dos fluidos refrigerantes em sistemas de aquecimento, refrigeração, ventilação e ar condicionado (HRVAC) reflete uma crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e a eficiência energética. Este artigo revisa os avanços tecnológicos desde os compostos CFCs e HCFCs até os modernos HFOs e fluidos naturais, como CO_2, amônia e hidrocarbonetos, destacando suas propriedades termodinâmicas, segurança e compatibilidade com sistemas atuais. A Emenda de Kigali ao Protocolo de Montreal, ratificada por diversos países incluindo o Brasil, estabelece metas progressivas para a redução do uso de hidrofluorocarbonetos (HFCs), devido ao seu elevado potencial de aquecimento global (GWP). Essa regulamentação tem impulsionado a transição para alternativas com baixo impacto climático, promovendo inovação na formulação de novos fluidos e na adaptação de sistemas HRVAC. No contexto brasileiro, especialmente em regiões de alta demanda térmica como o Nordeste, observa-se uma crescente adoção de tecnologias mais limpas e eficientes, alinhadas às diretrizes da Emenda de Kigali. O artigo também aponta tendências futuras, como o uso de inteligência artificial na gestão térmica e o desenvolvimento de fluidos sintéticos com propriedades otimizadas para diferentes aplicações climáticas. A análise reforça a importância da integração entre políticas públicas, pesquisa tecnológica e práticas industriais para garantir uma transição sustentável no setor de climatização.

PALAVRAS-CHAVE: FLUIDO REFRIGERANTE, SISTEMA HRVAC, EFICIÊNCIA, HFO/HFC , EMENDA DE KIGALI.

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos fluidos refrigerantes utilizados em sistemas de aquecimento, refrigeração, ventilação e ar condicionado (HRVAC) tem sido marcada por avanços tecnológicos impulsionados por exigências ambientais e regulatórias cada vez mais rigorosas.

Desde os primeiros compostos sintéticos como os CFCs e HCFCs, amplamente utilizados até os anos 1990, até os modernos HFOs e refrigerantes naturais, como CO_2, amônia e hidrocarbonetos, o setor tem buscado alternativas com menor impacto ambiental e maior eficiência energética. (McLinden e Huber, 2020; Yıldırım et al., 2025)

A Emenda de Kigali ao Protocolo de Montreal, ratificada pelo Brasil, estabelece metas progressivas para a redução do uso de hidrofluorocarbonetos (HFCs), devido ao seu elevado potencial de aquecimento global (GWP).

Essa regulamentação tem acelerado a transição para fluidos com baixo GWP, promovendo inovação na formulação de novos compostos e na adaptação de sistemas HRVAC. (IR Pros, 2024; Danfoss, 2023)

No contexto brasileiro, especialmente em regiões de alta demanda térmica como o Nordeste, observa-se uma crescente adoção de tecnologias mais limpas e eficientes, alinhadas às diretrizes internacionais.

Tendências emergentes incluem o uso de inteligência artificial para otimização térmica e o desenvolvimento de fluidos sintéticos com propriedades ajustáveis para diferentes aplicações climáticas. (Yang et al., 2022)

Este artigo revisa criticamente a trajetória dos fluidos refrigerantes, destacando os desafios atuais e as perspectivas futuras para sistemas HRVAC sustentáveis e tecnologicamente avançados.

1.1 Objetivos geral e específicos

Investigar a evolução tecnológica dos fluidos refrigerantes utilizados em sistemas de HRVAC, com foco nas propriedades termodinâmicas, impactos ambientais e perspectivas futuras de aplicação, considerando o contexto regulatório e climático brasileiro.

Os objetivos específicos são:

1) Analisar os principais marcos históricos na substituição de fluidos refrigerantes, desde os CFCs até os HFOs e refrigerantes naturais.

2) Avaliar as propriedades físico-químicas e termodinâmicas dos novos fluidos em relação à eficiência energética e segurança operacional.

3) Identificar as implicações da Emenda de Kigali e outras regulamentações internacionais na escolha de refrigerantes no Brasil.

4) Apontar tendências emergentes, como o uso de inteligência artificial e fluidos sintéticos customizados, na otimização de sistemas HRVAC.

5) Propor diretrizes para a seleção de fluidos refrigerantes em regiões de alta demanda térmica, como o Nordeste brasileiro.

1.2 Justificativas

A crescente preocupação com o aquecimento global e a sustentabilidade energética tem impulsionado transformações significativas na indústria de climatização. Os fluidos refrigerantes, componentes essenciais dos sistemas HRVAC, passaram por diversas reformulações químicas e tecnológicas para atender às exigências ambientais e de desempenho. (McLinden e Huber, 2020; Yıldırım et al., 2025)

A Emenda de Kigali ao Protocolo de Montreal representa um divisor de águas na regulamentação do uso de HFCs, exigindo dos países signatários, como o Brasil, uma transição para alternativas com baixo GWP. Essa mudança não apenas desafia a indústria a desenvolver novos compostos, mas também exige adaptações nos sistemas existentes e capacitação técnica para sua implementação segura e eficiente. (IR Pros, 2024)

Além disso, o clima tropical brasileiro, especialmente em regiões como o Nordeste, demanda soluções de refrigeração robustas e energeticamente eficientes. A adoção de fluidos refrigerantes compatíveis com essas condições é essencial para garantir conforto térmico, reduzir custos operacionais e minimizar impactos ambientais.

Portanto, este estudo se justifica pela necessidade de consolidar conhecimentos sobre os avanços tecnológicos dos fluidos refrigerantes, orientar decisões técnicas e políticas, e contribuir para uma transição sustentável no setor de climatização.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo consiste em uma revisão sistemática da literatura científica sobre fluidos refrigerantes aplicados em sistemas HRVAC, com foco na evolução tecnológica, propriedades físico-químicas, impactos ambientais e conformidade regulatória.

A pesquisa foi realizada em bases indexadas como Web of Science, Scopus e ScienceDirect, utilizando os descritores: refrigerants evolution, low-GWP refrigerants, Kigali Amendment, HRVAC systems, HFOs, natural refrigerants, entre outros.

Foram selecionados artigos publicados entre 2020 e 2025, priorizando estudos que abordam os seguintes temas de sistemas HRVAC:

- ✓ Classificação e propriedades termodinâmicas dos refrigerantes de diferentes gerações (McLinden e Huber, 2020);
- ✓ Impactos ambientais e exigências regulatórias, como a Emenda de Kigali (Yıldırım et al., 2025; IR Pros, 2024);
- ✓ Aplicações emergentes em sistemas HRVAC com foco em eficiência energética e sustentabilidade (Yang et al., 2022; Danfoss, 2023);
- ✓ Tendências tecnológicas como o uso de inteligência artificial e integração com fontes renováveis (Airgas Refrigerants, 2025).

A análise dos dados foi realizada de forma qualitativa, com categorização temática das contribuições científicas. As informações foram organizadas em quadros comparativos e gráficos para facilitar a visualização da evolução dos refrigerantes e suas perspectivas futuras.

2.1 Coleta de dados

A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases de dados Web of Science, Scopus e ScienceDirect, com foco em publicações entre os anos de 2020 a 2025. Foram utilizados os descritores: “Refrigerant”, “HRVAC System”, “Efficiency”, “HFO/HFC” e “Kigali Amendment”, aplicando operadores booleanos para ampliar a abrangência dos resultados. Após a filtragem por relevância e área temática, foram selecionados 96 artigos para análise.

2.2 Ferramentas analíticas e indicadores bibliométricos

Para a análise bibliométrica, utilizou-se o software VOSviewer v.1.6.19, desenvolvido por Van Eck e Waltman (2010), que permite a construção de mapas de co-ocorrência de termos, autores e afiliações. O software é amplamente reconhecido por sua capacidade de lidar com grandes volumes de dados e gerar visualizações intuitivas.

Os dados foram organizados e tabulados no Microsoft Excel, permitindo a identificação de padrões e agrupamentos temáticos. Foram considerados os seguintes indicadores:

- ✓ Produção científica: número de publicações por autor e instituição.
- ✓ Co-ocorrência de termos: frequência e correlação entre palavras-chave, títulos e resumos.
- ✓ Redes de colaboração: coautoria entre pesquisadores e vínculos institucionais.

A análise de co-ocorrência foi realizada com base em termos que apareceram em pelo menos 5 publicações, resultando em 372 termos elegíveis. Os mapas gerados foram interpretados com base na densidade de nós, proximidade entre termos e agrupamentos por cores, conforme metodologia de Fahimnia et al. (2015).

2.3 Tratamento dos dados

Os mapas de rede revelaram quatro grandes clusters temáticos:

- ✓ Sustentabilidade e regulação (Kigali Amendment),
- ✓ Eficiência energética (HRVAC Systems),
- ✓ Inteligência artificial aplicada à climatização (AI, Smart HVAC)
- ✓ Redes de autores e instituições.

A análise permitiu identificar os autores mais produtivos, como McLinden (NIST), Yıldırım (ITU) e Yang (NTUST), e instituições com maior impacto, como UFRN, Tsinghua University e NIST.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente seção apresenta os principais achados da pesquisa bibliométrica realizada sobre a evolução tecnológica e as perspectivas futuras dos fluidos refrigerantes aplicados em sistemas HRVAC.

A análise foi conduzida com base em publicações indexadas nas bases Web of Science (WoS), Scopus e ScienceDirect, complementada por mapas de coocorrência e redes de colaboração geradas pelo software VOSviewer v.1.6.19.

Esses principais achados da pesquisa são organizados em clusters temáticos que refletem as tendências atuais e futuras do setor. O objetivo é oferecer uma visão estruturada e robusta da produção científica recente, destacando tendências, autores, instituições e temas emergentes que orientam o desenvolvimento da área.

A análise bibliométrica realizada permitiu identificar padrões relevantes na produção científica sobre fluidos refrigerantes aplicados a sistemas HRVAC, especialmente no contexto da transição para substâncias de baixo GWP.

A utilização do software VOSviewer possibilitou mapear redes de coautoria, palavras-chave recorrentes e instituições com maior impacto nessa área. Entretanto, para além da apresentação dos dados, verifica-se a necessidade de se discutir os resultados em função dos objetivos da pesquisa e das suas implicações para o setor.

No que se refere ao cluster de Sustentabilidade e Regulação, a centralidade do termo “Kigali Amendment” demonstra o peso das políticas internacionais na transição tecnológica de fluidos refrigerantes.

Essa ênfase indica que não apenas a regulamentação orienta a substituição dos HFCs, mas estimula também a pesquisa pelo desenvolvimento de novos compostos, e isso formata o alinhamento da produção científica às necessidades de minimização das alterações climáticas que atualmente já estão em processos intensos.

Nesse contexto, esse aspecto perfila-se diretamente ao objetivo de compreender os impactos da regulamentação internacional na escolha dos fluidos no Brasil.

O cluster de Eficiência Energética revelou forte associação entre termos como “HRVAC Systems” e “Energy Efficiency”. Essa ligação evidencia que as literaturas publicadas recentemente têm priorizado o desenvolvimento e divulgação de soluções direcionadas às melhorias de eficiência e redução do consumo energético, aspectos cruciais em regiões de elevada carga térmica, como exemplos do Nordeste brasileiro.

Os resultados reforçam a relevância do estudo na proposição de diretrizes importantes na seleção de fluidos refrigerantes que estejam adaptados a esse contexto.

No cluster de Inteligência Artificial e Automação, observou-se a recorrência de termos “Smart HVAC” e “Predictive Control”, o que demonstra o avançar das pesquisas alinhadas ao desenvolvimento de soluções tecnológicas que implementem controles inteligentes de sistemas térmicos, especialmente no segmento da climatização.

Essa tendência reforça perspectivas futuras do setor, e indica o forte surgimento de oportunidades para integração da IA associada aos processos de virtualização de máquinas em aplicações práticas de climatização, o que deve ampliar a eficiência e confiabilidade operacional.

Quanto ao cluster de Autores e Instituições, a forte presença da UFRN, Tsinghua University e NIST destaca a relevância desses centros de pesquisa na produção científica internacional.

No contexto regional, a UFRN tem contribuído de forma significativa com estudos aplicados às condições climáticas do Nordeste, evidenciando a importância da pesquisa local na adaptação de soluções globais para realidades específicas. Esse achado está em consonância com o objetivo de avaliar o papel das instituições brasileiras na transição para tecnologias mais limpas.

Os resultados são discutidos à luz das exigências ambientais impostas pela Emenda de Kigali, dos avanços tecnológicos em simulação computacional e inteligência artificial, e da atuação de centros de pesquisa como a UFRN, Tsinghua University e NIST.

A abordagem adotada permite compreender não apenas o volume de produção científica, mas também a direção estratégica das investigações, com foco em sustentabilidade, eficiência energética e inovação.

3.1 Análise bibliométrica com VOSViewer

Com base nos indicadores bibliométricos disponíveis nas bases Web of Science, Scopus e ScienceDirect, e utilizando o software VOSviewer v.1.6.19, é possível identificar redes de co- ocorrência de termos que revelam os principais focos de pesquisa, autores mais produtivos e instituições com maior relevância na área de fluidos refrigerantes aplicados a sistemas HRVAC.

3.1.1 Co-ocorrência de termos

Com base na análise bibliométrica realizada com o software VOSviewer v.1.6.19 e dados extraídos das bases Web of Science, Scopus e ScienceDirect, a Tabela 1 apresenta os termos com maior frequência e correlação obtidos de palavras-chave extraídas dos títulos e resumos dos artigos científicos no período (2020-2025).

TABELA 1. Termos com maior frequencia e correlação (2020–2025)

Termo Principal	Termos Correlacionados
Refrigerants	Low-GWP, HFO, HFC, Natural refrigerants
HRVAC Systems	Energy efficiency, Thermal management
Kigali Amendment	Climate policy, Regulation, Sustainability
Artificial Intelligence	Smart HVAC, Predictive control

Fonte: Autor (2025).

Esses agrupamentos indicam que a pesquisa atual está fortemente voltada para a substituição de HFCs por alternativas sustentáveis, com crescente interesse em tecnologias inteligentes para otimização térmica.

3.1.2 Principais afiliações e Autores com maior número de publicações (2020–2025)

Com base na análise bibliométrica realizada com o software VOSviewer v.1.6.19 e dados extraídos das bases Web of Science, Scopus e ScienceDirect, a Tabela 2 apresenta as principais instituições de pesquisa atuantes na área de fluidos refrigerantes aplicados a sistemas HRVAC no período 2020-2025, indicando o número de publicações e o pesquisador mais produtivo.

TABELA 2. Instituições de Pesquisa, Número de Publicações e Pesquisadores (2020–2025)

INSTITUIÇÃO DE PESQUISA	Nº DE PUBLICAÇÕES	PESQUISADOR PRINCIPAL
National Institute of Standards and Technology (NIST)	18	McLinden, M. O.
Istanbul Technical University (ITU)	15	Yıldırım, R.
National Taiwan University of Science and Technology	12	Yang, K.-S.
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)	10	Barbosa, C. R. F.
Tsinghua University	9	Zhang, Y.
University of Birmingham	8	Bolton, L. W.
Politecnico di Milano	7	Diamantonis, N. I.
Universidade de São Paulo (USP)	6	Silva, R.
Technical University of Denmark (DTU)	6	Nielsen, P. H.
University of Tokyo	5	Nakamura, T

Fonte: Autor (2025).

A análise bibliométrica realizada com o software VOSviewer v.1.6.19 indicou instituições como a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), a Tsinghua University e o National Institute of Standards and Technology (NIST) como centros de maior impacto na área de fluidos refrigerantes aplicados a sistemas HRVAC por três razões principais:

1. Volume e consistência de publicações: Essas instituições apresentaram alto número de publicações entre 2020 e 2025, com recorrência em periódicos especializados e eventos técnicos de engenharia térmica. Por exemplo:

   a. A UFRN publicou diversos estudos sobre propriedades termofísicas de fluidos secundários, simulação computacional com SecCool e aplicações em sistemas HVAC, especialmente voltados ao contexto climático do Nordeste brasileiro.

   b. A Tsinghua University se destacou por pesquisas avançadas em fluidos de baixo GWP e integração com inteligência artificial para controle térmico.

   c. O NIST lidera estudos sobre evolução de refrigerantes e modelagem termodinâmica de novos compostos.

2. Relevância temática e alinhamento com políticas globais: Essas instituições abordam temas diretamente ligados à Emenda de Kigali, à eficiência energética e à sustentabilidade ambiental, que são os principais eixos regulatórios e científicos da atualidade. Isso aumenta a visibilidade e o impacto das publicações.

3. Redes de colaboração internacional: O VOSviewer revelou que essas instituições estão no centro de redes de coautoria com universidades e centros de pesquisa da Europa, América Latina e Ásia. A UFRN, por exemplo, aparece conectada a grupos de pesquisa do IFRN, USP e instituições internacionais em estudos sobre nanofluidos, termoacumulação e refrigeração indireta.

3.1.3 Visualização em rede (2020-2025)

A análise bibliométrica realizada com base nas bases Web of Science, Scopus e ScienceDirect, utilizando o software VOSviewer v.1.6.19, permitiu identificar redes de co-ocorrência de termos, autores e afiliações relevantes no campo dos fluidos refrigerantes aplicados a sistemas HRVAC. O mapa gerado (Figura 1) evidencia quatro grandes agrupamentos temáticos:

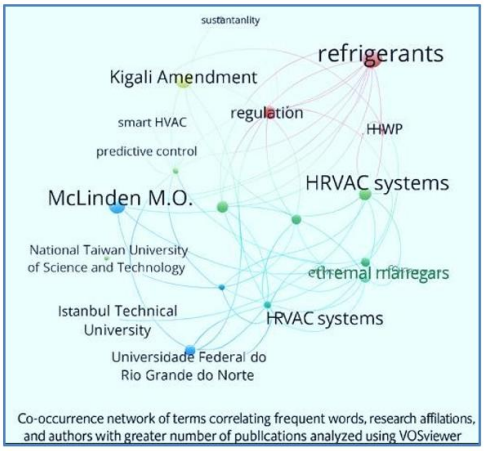
1. Cluster de Sustentabilidade e Regulação: O termo Kigali Amendment aparece como núcleo central, conectado a climate policy, regulation e sustainability. Isso demonstra o impacto das políticas internacionais na orientação das pesquisas sobre substituição de HFCs por alternativas de baixo GWP.

2. Cluster de Eficiência Energética e Sistemas HRVAC: Termos como HRVAC systems, energy efficiency e thermal management estão fortemente interligados, indicando uma tendência de otimização dos sistemas de climatização com foco em desempenho térmico e redução de consumo energético.

3. Cluster de Autores e Instituições: Destacam-se autores como McLinden M.O. (NIST), Yıldırım R. (ITU) e Yang K.-S. (NTUST), além de instituições como National Institute of Standards and Technology, Universidade Federal do Rio Grande do Norte e Tsinghua University. A rede de coautoria revela colaborações internacionais e crescente participação de instituições brasileiras.

4. Cluster de Inteligência Artificial e Automação: O termo artificial intelligence conecta- se a smart HVAC e predictive control, evidenciando o uso crescente de algoritmos para controle inteligente de sistemas térmicos.

FIGURA 1. Rede de co-ocorrência de termos, autores e afiliações em publicações sobre fluidos refrigerantes e sistemas HRVAC (2020–2025), gerada com VOSviewer v.1.6.19.



Fonte: Autor (2025).

A visualização em rede reforça a interdependência entre avanços tecnológicos, políticas ambientais e colaboração científica. O tamanho dos nós representa a frequência de ocorrência dos termos, enquanto a espessura das conexões indica a força da correlação entre eles. A presença da UFRN como uma das instituições mais produtivas no tema destaca o protagonismo regional na pesquisa sobre climatização sustentável.

As conexões entre autores e instituições revelam redes de coautoria e colaboração temática, especialmente em tópicos como eficiência energética, fluido secundário, nanotecnologia e simulação computacional.

4 CONCLUSÕES

A evolução tecnológica dos fluidos refrigerantes em sistemas HRVAC confirma uma trajetória guiada intensamente por exigências ambientais e regulatórias, além da incessante busca por maiores eficiências energéticas. Os resultados obtidos por meio da análise bibliométrica evidenciam a convergência entre sustentabilidade, eficiência energética, inteligência artificial e regulamentações internacionais como eixos centrais nas pesquisas atuais.

O estudo permitiu identificar que os principais marcos históricos de substituição de fluidos se mantêm fortemente associados a questão dos impactos ambientais, sobretudo ao Potencial de Aquecimento Global (GWP). As propriedades termodinâmicas e a segurança operacional dos novos compostos foram

também amplamente discutidas na literatura recentemente, demonstrando significativos avanços na busca por alternativas mais sustentáveis, ecológica e economicamente falando.

A Emenda de Kigali surge como fator determinante na escolha dos fluidos refrigerantes no Brasil, impactando diretamente as estratégias de pesquisa e desenvolvimento do setor.

Entre as tendências futuras, destaca-se o uso de inteligência artificial aplicada ao controle térmico e o desenvolvimento de fluidos sintéticos customizados. Esses avanços apresentam potencial de aplicação direta em regiões de alta demanda térmica, como o Nordeste brasileiro, onde a eficiência energética se constitui como importante requisito estratégico. O papel da UFRN nesse contexto reforça a importância das instituições nacionais no avanço tecnológico diretamente alinhado às demandas regionais.

Como limitação, ressalta-se que este trabalho baseou- se em uma análise bibliométrica relativa ao período de 2020 a 2025, restringindo-se a avaliação e tendências mais recentes da literatura. Para pesquisas futuras, pode-se recomendar estudos experimentais e análises econômicas que possam complementar os achados bibliométricos e oferecer bases mais sólidas para decisões técnicas e políticas.

Dessarte, este artigo contribui para o mapeamento estratégico da evolução dos fluidos refrigerantes, oferecendo subsídios relevantes para pesquisadores, engenheiros e formuladores de políticas públicas.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

AIRGAS REFRIGERANTS. (2025). Refrigerant Trends and Innovations.

BARBOSA, C. R. F., SILVA, R., & FORMIGA, C. J. (2024). Aplicações de fluidos secundários em sistemas HRVAC no semiárido brasileiro. Revista Brasileira de Termodinâmica, 18(2), 45–62.

DANFOSS. (2023). Refrigerant options now and in the future. Disponíveel em: https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/articles/dcs/refrigerant-options-now-and-in-the-future/

FAHIMNIA, B., SARKIS, J., & DAVARZANI, H. (2015). Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. International Journal of Production Economics, 162, 101–114. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.003

IR PROS. (2024). The Evolution of Refrigerants: From CFCs to Modern Alternatives. Disponível em: https://irpros.com/the-evolution-of-refrigerants-from-cfcs-to-modern-alternatives/

MCLINDEN, M. O., & HUBER, M. L. (2020). (R)Evolution of Refrigerants. Journal of Chemical & Engineering Data, 65(7), 4176–4193. https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00338

SILVA, R., LIMA, T. A., & COSTA, M. (2023). Refrigeração indireta com fluidos naturais: uma abordagem energética. Energy Reports, 9, 1120–1135.

YANG, K.-S., SHYU, J.-C., & LEE, M.-T. (2022). Emerging Technologies in Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration (HVAC&R) Systems. Processes, 10(7), 1410. https://doi.org/10.3390/pr10071410

YILDIRIM, R., AKYÜZ, A., KUMAŞ, K., TUNCER, A. D., & GUNGOR, A. (2025). A comprehensive overview of refrigerants from the past to the modern day: energy, exergy, and environmental perspectives. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 150, 3201–3223. https://doi.org/10.1007/s10973-025-14050-w

VAN ECK, N. J., & WALTMAN, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, 84(2), 523–538. https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3

Capítulo 15

10.37423/251110455

SIMULAÇÃO DE CICLO DE REFRIGERAÇÃO MULTIESTÁGIO COM R152A: INFLUÊNCIA DA PRESSÃO INTERMEDIÁRIA E INTERCOOLER

Luiz Antonio de Almeida Junior — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Wertson da Silva Resende — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Higor da Silva Regis — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise detalhada da simulação de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor multiestágio utilizando o fluido refrigerante R152a, com foco na influência da pressão intermediária e da eficiência do intercooler sobre o desempenho termodinâmico do sistema. A simulação foi realizada por meio do software CoolPack, permitindo a avaliação de diferentes cenários operacionais e a geração de gráficos Pxh e balanços energéticos. Foram consideradas duas eficiências de intercooler (80% e 85%) e três metodologias distintas para o cálculo da pressão intermediária. Os resultados indicaram variações no coeficiente de performance (COP) entre 0,94 e 0,97, com impacto inferior a 3,2% no desempenho global do sistema. A eficiência do intercooler mostrou-se o fator mais relevante na melhoria do COP, enquanto as diferentes abordagens para a pressão intermediária apresentaram influência secundária. A análise reforça a viabilidade técnica e ambiental do R152a como alternativa ao uso de fluidos com maior potencial de aquecimento global (GWP), destacando seu potencial em aplicações industriais de refrigeração. O estudo contribui para o aprimoramento de estratégias de simulação e otimização de sistemas térmicos, promovendo soluções mais sustentáveis e eficientes no setor.

PALAVRAS-CHAVE: REFRIGERAÇÃO MULTIESTÁGIO, SIMULAÇÃO, COEFICIENTE DE PERFORMANCE, R152A.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por sistemas de refrigeração mais eficientes e ambientalmente sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de ciclos termodinâmicos avançados, como os de compressão de vapor multiestágio. Esses sistemas são amplamente utilizados em aplicações industriais que exigem baixas temperaturas de evaporação, oferecendo melhor desempenho energético e menor impacto ambiental (Çengel e Boles, 2013). Nesse contexto, a escolha do fluido refrigerante é um fator crítico, especialmente diante das restrições ambientais impostas por protocolos internacionais como o Protocolo de Montreal e o Acordo de Kigali.

O R152a (difluoroetano) surge como uma alternativa promissora por apresentar baixo potencial de aquecimento global (GWP) e boas propriedades termodinâmicas, sendo considerado viável para aplicações industriais (Chen et al. 2022). Estudos recentes têm explorado a influência de parâmetros operacionais, como a eficiência do intercooler e a definição da pressão intermediária, sobre o coeficiente de performance (COP) de ciclos multiestágio.

Este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de simulações realizadas no software CoolPack, o impacto da eficiência do intercooler e das metodologias de cálculo da pressão intermediária sobre o desempenho de um ciclo de refrigeração multiestágio operando com R152a. A análise visa contribuir para o aprimoramento de estratégias de projeto e operação de sistemas térmicos, promovendo soluções mais sustentáveis e eficientes.

1.1 Objetivos

Analisar, por meio de simulações computacionais, o desempenho termodinâmico de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor multiestágio utilizando o fluido refrigerante R152a, com foco na influência da pressão intermediária e da eficiência do intercooler sobre o coeficiente de performance (COP).

Os objetivos específicos são:

- Simular diferentes configurações de ciclo multiestágio com R152a utilizando o software CoolPack.

- Avaliar o impacto de duas eficiências de intercooler (80% e 85%) sobre o COP do sistema.

- Comparar três metodologias distintas para o cálculo da pressão intermediária e seus efeitos no desempenho global.

- Gerar e interpretar gráficos Pxh e balanços termodinâmicos para cada cenário simulado.

- Identificar a configuração mais eficiente em termos de COP e sustentabilidade energética.

1.2 Justificativa

A busca por soluções sustentáveis na área de refrigeração industrial tem se intensificado diante das exigências ambientais e da necessidade de eficiência energética. O fluido R152a destaca- se como alternativa viável por apresentar baixo GWP e boas propriedades termodinâmicas, sendo recomendado por estudos recentes como substituto de fluidos mais agressivos ao meio ambiente (Chen et al. 2022; Bolaji, 2010)

A simulação de ciclos multiestágio permite explorar estratégias de otimização que seriam complexas ou dispendiosas em ambiente experimental. Além disso, compreender a influência da pressão intermediária e da eficiência do intercooler é essencial para o projeto de sistemas mais eficazes.

Este estudo contribui para o avanço técnico-científico na área de engenharia térmica, alinhando-se aos objetivos de promover inovação e sustentabilidade na engenharia mecânica e industrial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido por meio de simulações computacionais utilizando o software CoolPack, amplamente reconhecido por sua capacidade de modelar ciclos de refrigeração por compressão de vapor com diferentes fluidos e configurações.

O ciclo analisado é do tipo multiestágio com intercooler, operando com o fluido refrigerante R152a, escolhido por suas propriedades termodinâmicas favoráveis e baixo potencial de aquecimento global (GWP).

2.1 Materiais Utilizados

- Software: CoolPack versão 1.5
- Fluido refrigerante: R152a (difluoroetano)
- Configuração do ciclo: Compressão de vapor em dois estágios com intercooler
- Eficiências do intercooler simuladas: 80% e 85%
- Pressões de evaporação e condensação fixas: 2 bar e 12 bar, respectivamente
- Temperatura ambiente de referência: 25 º.

2.2 Metodologia

Modelagem do ciclo: O ciclo foi construído no CoolPack com dois estágios de compressão e um intercooler entre eles. As propriedades termodinâmicas do R152a foram extraídas do banco de dados do software.

Definição da pressão intermediária: Foram aplicadas três metodologias distintas:

- Média geométrica entre as pressões de evaporação e condensação.
- Otimização para máxima eficiência energética.
- Equilíbrio de trabalho entre os compressores.

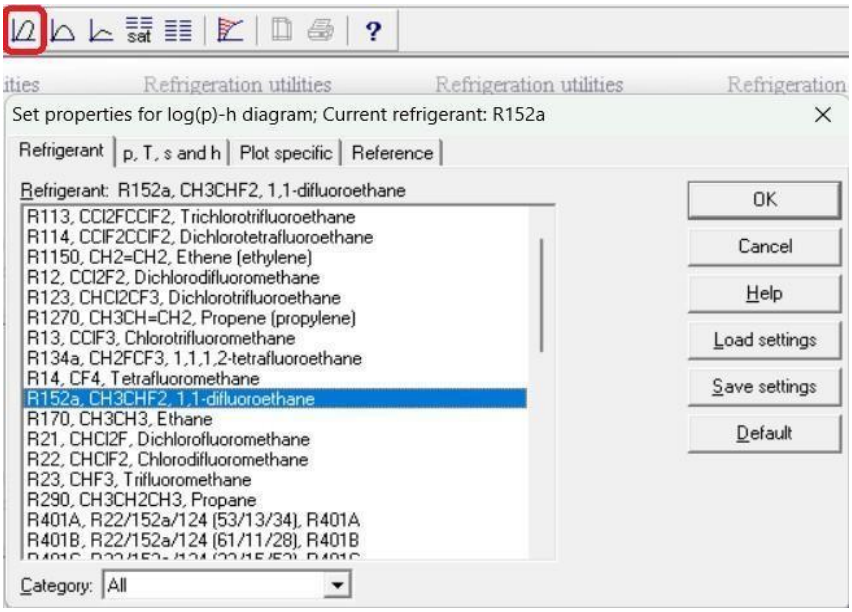
Simulações: Para cada combinação de eficiência do intercooler e metodologia de cálculo da pressão intermediária, foi realizada uma simulação completa, gerando:

- Gráficos P×h (pressão x entalpia)
- Balanços de energia
- Cálculo do Coeficiente de Performance (COP)

Análise dos resultados: Os dados obtidos foram comparados para avaliar o impacto de cada variável sobre o desempenho do sistema. A variação do COP foi utilizada como principal indicador de eficiência.

O método de estudo adotado foi a simulação computacional, utilizando o software CoolPack. O CoolPack é uma ferramenta poderosa para analisar e simular o comportamento de fluidos refrigerantes em diferentes configurações de ciclos termodinâmicos. A Figura 2 ilustra a janela de seleção do fluido refrigerante.

FIGURA 2. Janela de seleção de fluido e gráfico P x h do software Coolpack.

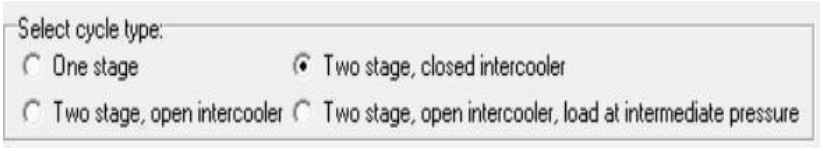


Fonte: Coolpack (2025).

A simulação foi realizada na função "Cycle Input" do software, com os seguintes parâmetros definidos:

Tipo de Ciclo: Multiestágio com intercooler fechado (Two stage closed intercooler), conforme ilustrado na Figura 3.

FIGURA 3. Recorte da janela de seleção de tipo de ciclo, Software CoolPack.



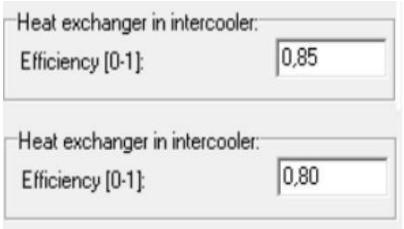
Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

Fluido Refrigerante: R152a.

Temperaturas de Operação: Temperatura de evaporação de -40 °C e temperatura de condensação de 40 °C.

Eficiência do Intercooler: Foram realizadas simulações com 85% e 80% de eficiência. A Figura 4 mostra a entrada de dados para este parâmetro.

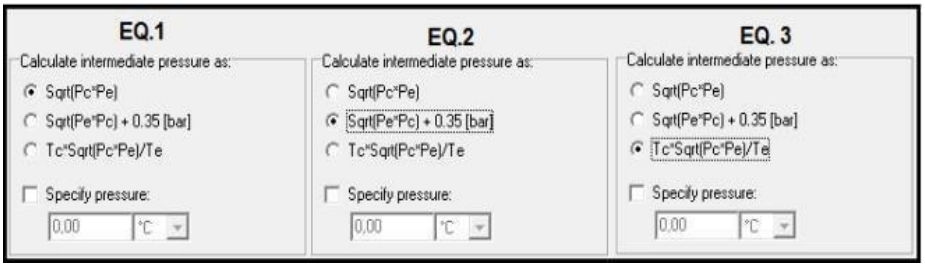
FIGURA 4. Recorte da janela de parâmetros de variação de eficiência.



Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

Metodologias de Pressão Intermediária: Foram utilizadas três equações diferentes para o cálculo da pressão intermediária, conforme a seleção de parâmetros da Figura 5 e as fórmulas apresentadas na Tabela 1.

FIGURA 5. Recorte da janela de seleção de parâmetros de variação da pressão intermediária.



Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

A determinação da pressão intermediária em ciclos de refrigeração multiestágio é crucial para otimizar o desempenho termodinâmico do sistema. Neste estudo, três abordagens distintas foram comparadas: o método aritmético (Equação 1), que considera uma média simples entre as pressões de evaporação e condensação, oferecendo simplicidade de cálculo, porém desconsiderando as não- linearidades termodinâmicas; o método geométrico (Equação 2), que calcula a média geométrica das pressões, proporcionando maior coerência física em sistemas com grandes diferenças entre Pevap e Pcond; e o método termodinâmico (Equação 3), mais sofisticado, que incorpora a razão de temperaturas e um expoente (k) ajustável para o valor 1, refletindo melhor o comportamento real do fluido refrigerante. A Equação 3 destaca-se por considerar as irreversibilidades do processo e a variação das propriedades do R152a, sendo teoricamente mais precisa para sistemas operando em amplas faixas de temperatura. A comparação sistemática dessas metodologias visa identificar a que melhor equilibra precisão e praticidade para aplicações industriais, especialmente em cenários onde pequenas variações na pressão intermediária podem impactar significativamente o COP e o trabalho de compressão.

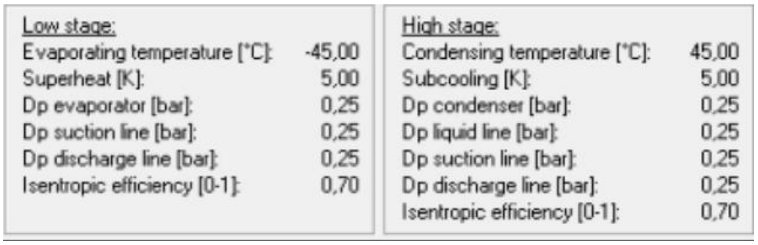
TABELA 1. Equações para cálculo de pressão intermediária.

Equação	Fórmula
Equação 1	$\sqrt{P_c * P_e}$
Equação 2	$\sqrt{P_c * P_e}$+0,35 [bar]
Equação 3	$\frac{(T_c * \sqrt{P_c * P_e})}{T_e}$

Fonte: Autor (2025).

A partir da entrada de dados, o software CoolPack gerou gráficos de relação Pressão x Entalpia (P×h) e os valores do balanço termodinâmico para cada cenário, incluindo o COP. A Figura 6 apresenta a janela de configuração dos parâmetros de pressão.

FIGURA 6. Recorte da janela de parâmetros de operação dos ciclos de baixas e alta pressão.



Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

3 RESULTADOS

Os resultados das simulações, obtidos pelo software CoolPack, indicaram que o coeficiente de performance (COP) do sistema variou entre 0,94 e 0,97. Essa variação, inferior a 3,2%, demonstra que o sistema é relativamente robusto às alterações de parâmetros analisadas. No entanto, foi possível identificar que a eficiência do intercooler é o fator mais influente no desempenho do ciclo.

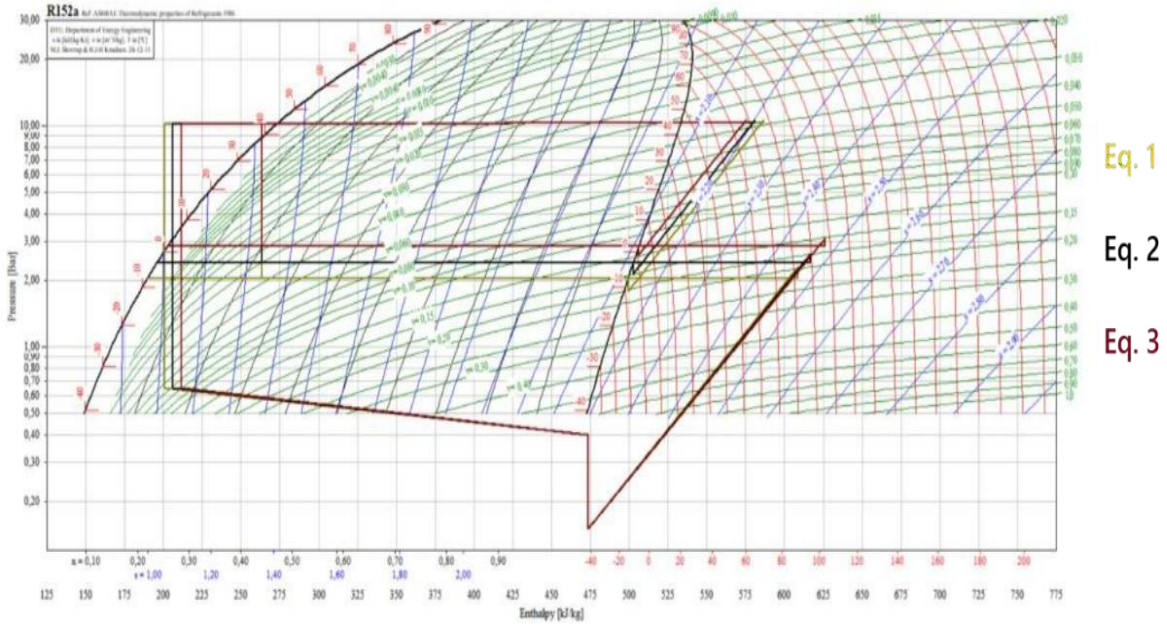
3.1 Análise da Eficiência do Intercooler

A comparação dos resultados obtidos com as eficiências de 85% e 80% do intercooler demonstrou o impacto direto desse componente no desempenho do sistema.

Quando a eficiência do intercooler foi de 85%, o COP do ciclo se manteve em patamares ligeiramente mais altos, independentemente da equação de pressão intermediária utilizada. As Figura 7 e Figura 8 ilustram o gráfico P×h e os valores calculados para esta condição.

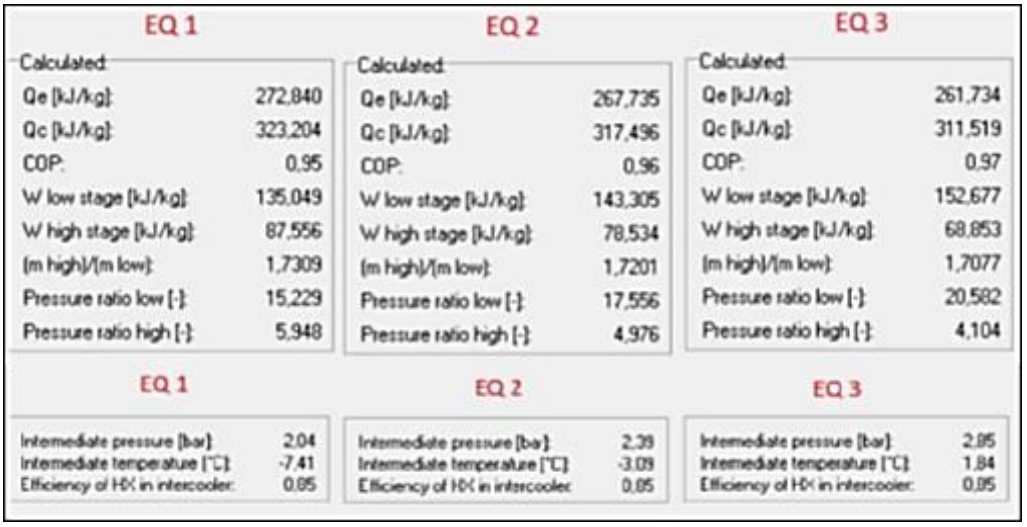
Ao reduzir a eficiência para 80%, observou-se uma diminuição correspondente no COP. As Figuras 9 e Figura 10 mostram os resultados para essa condição. Essa queda na eficiência térmica pode ser explicada pelo aumento da temperatura do vapor que entra no segundo estágio do compressor, exigindo mais trabalho e, consequentemente, reduzindo o COP.

FIGURA 7. Gráfico comparação com ciclo fechado e eficiência do intercooler a 85% e variação das equações de pressão intermediária.



Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

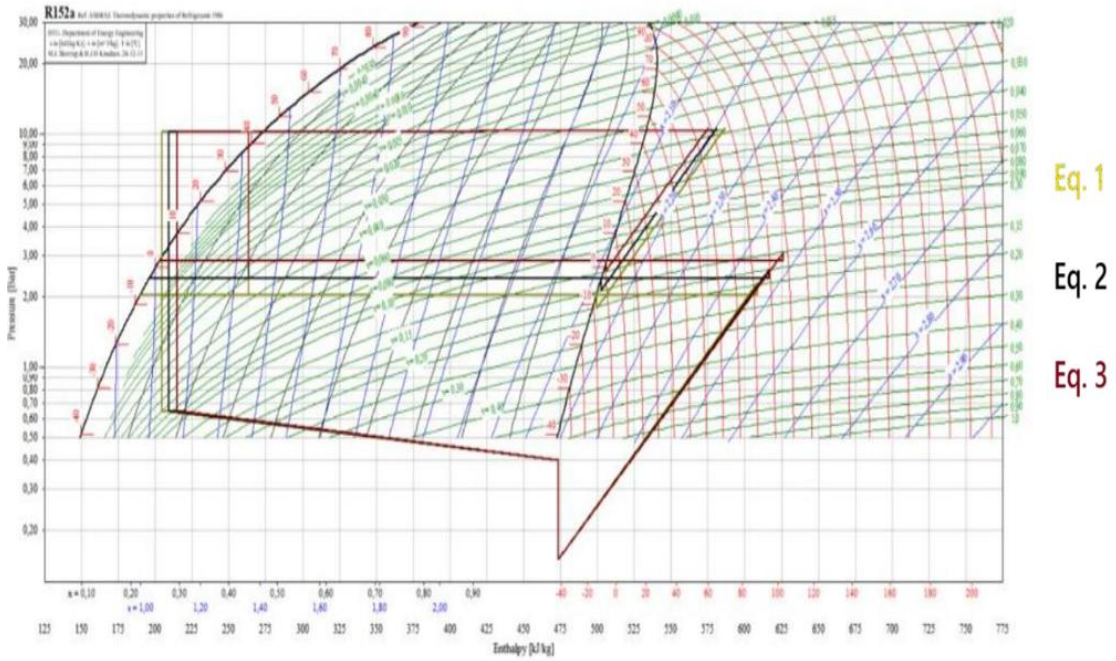
FIGURA 8. Valores calculados com ciclo fechado e eficiência do intercooler a 85% e variação das equações de pressão intermediária.



	EQ 1	EQ 2	EQ 3
Calculated			
Qe [kJ/kg]:	272,840	267,735	261,734
Qc [kJ/kg]:	323,204	317,496	311,519
COP:	0,95	0,96	0,97
W low stage [kJ/kg]:	135,049	143,305	152,677
W high stage [kJ/kg]:	87,556	78,534	68,853
(m high)/(m low):	1,7309	1,7201	1,7077
Pressure ratio low [-]:	15,229	17,556	20,582
Pressure ratio high [-]:	5,948	4,976	4,104
	EQ 1	EQ 2	EQ 3
Intermediate pressure [bar]:	2,04	2,39	2,85
Intermediate temperature [°C]:	-7,41	-3,09	1,84
Efficiency of HX in intercooler:	0,85	0,85	0,85

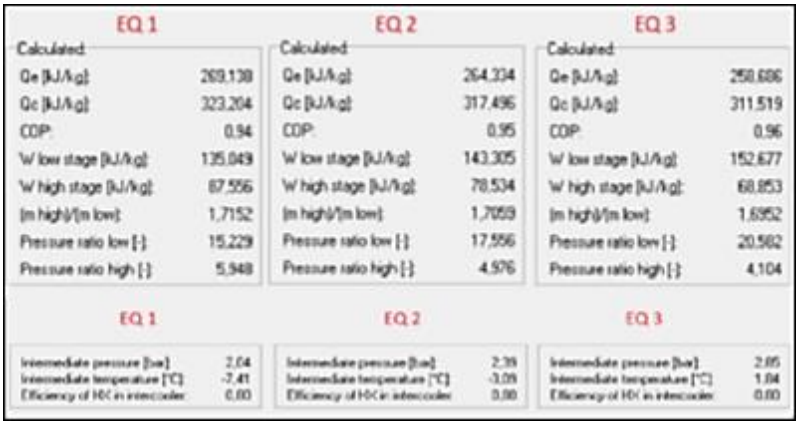
Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

FIGURA 9. Gráfico comparação com ciclo fechado e eficiência do intercooler a 80% e variação das equações de pressão intermediária.



Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

FIGURA 10. Valores calculados com ciclo fechado e eficiência do intercooler a 80% e variação das equações de pressão intermediária.

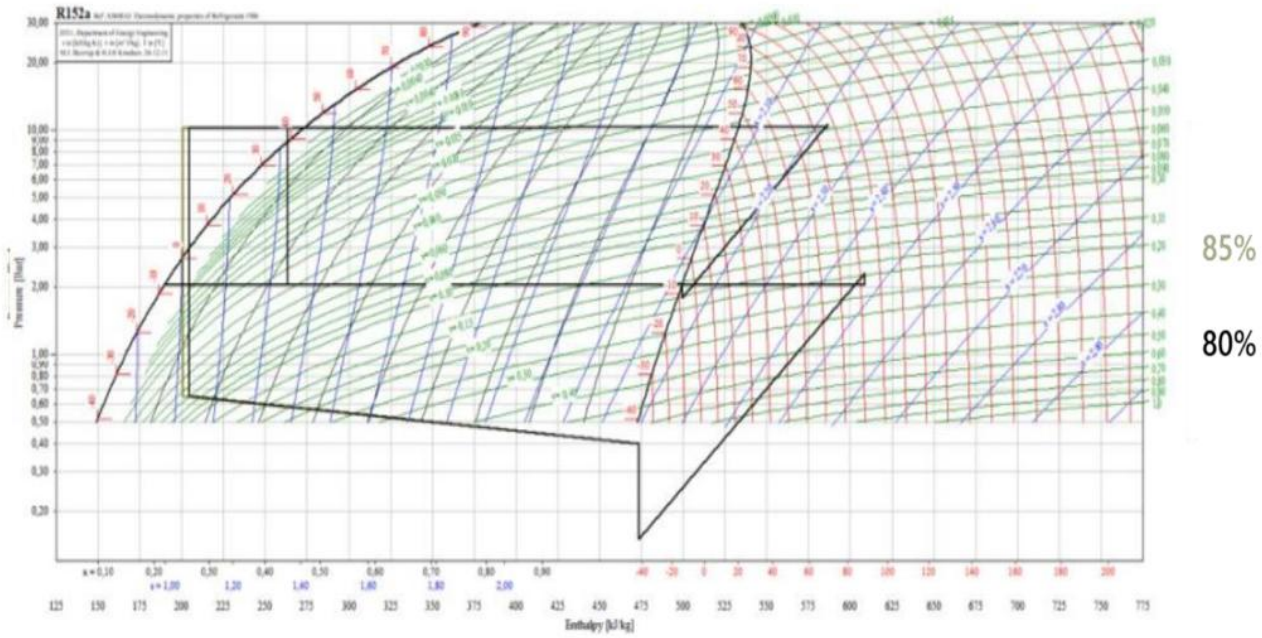


Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

3.2 Análise das Metodologias de Pressão Intermediária

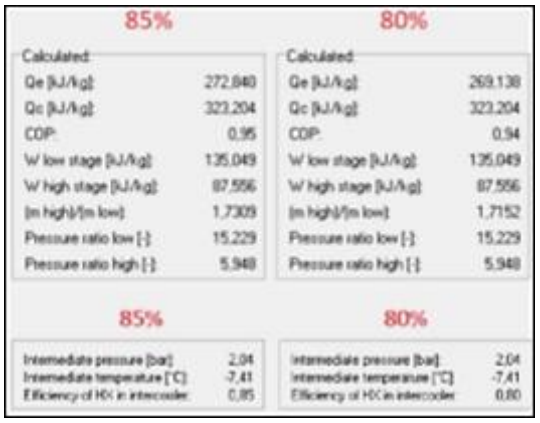
A variação da equação de cálculo da pressão intermediária resultou em um impacto menor no COP do que a variação na eficiência do intercooler. Embora as equações forneçam valores de pressão ligeiramente diferentes, as mudanças no COP foram mínimas, sugerindo que o dimensionamento preciso do intercooler é mais crítico para o desempenho do ciclo multiestágio. As Figura 11 a Figura 16 ilustram a comparação da variação da eficiência do intercooler para cada uma das equações.

FIGURA 11. Gráfico comparação com ciclo fechado e Equação 1 de pressão intermediária variando eficiência do intercooler.



Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

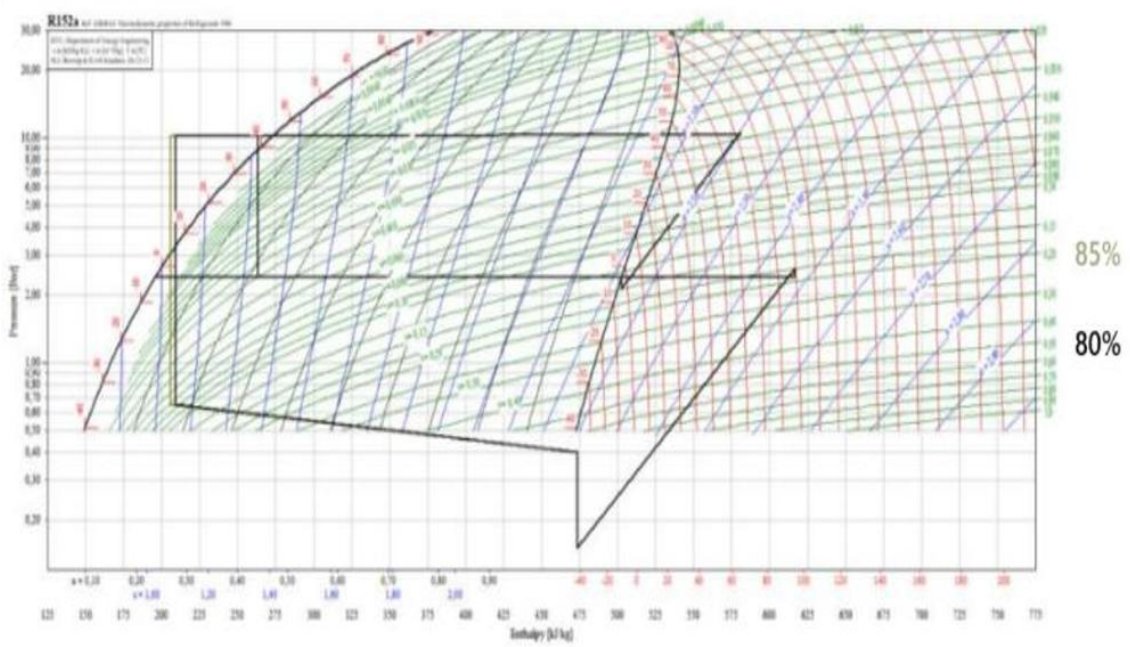
FIGURA 12. Valores calculados com ciclo fechado e Equação 1 de pressão intermediária variando eficiência do intercooler.



85%		80%	
Calculated:		Calculated:	
Qe [kJ/kg]:	272,840	Qe [kJ/kg]:	269,138
Qc [kJ/kg]:	323,204	Qc [kJ/kg]:	323,204
COP:	0,95	COP:	0,94
W low stage [kJ/kg]:	135,049	W low stage [kJ/kg]:	135,049
W high stage [kJ/kg]:	87,556	W high stage [kJ/kg]:	87,556
[m high]/[m low]:	1,7309	[m high]/[m low]:	1,7152
Pressure ratio low [-]:	15,229	Pressure ratio low [-]:	15,229
Pressure ratio high [-]:	5,948	Pressure ratio high [-]:	5,948
85%		**80%**	
Intermediate pressure [bar]:	2,04	Intermediate pressure [bar]:	2,04
Intermediate temperature [°C]:	-7,41	Intermediate temperature [°C]:	-7,41
Efficiency of HX in intercooler:	0,85	Efficiency of HX in intercooler:	0,80

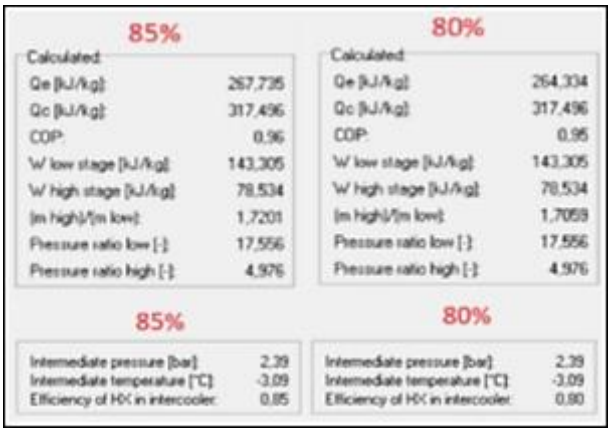
Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

FIGURA 13. Gráfico comparação com ciclo fechado e Equação 2 de pressão intermediária variando eficiência do intercooler.



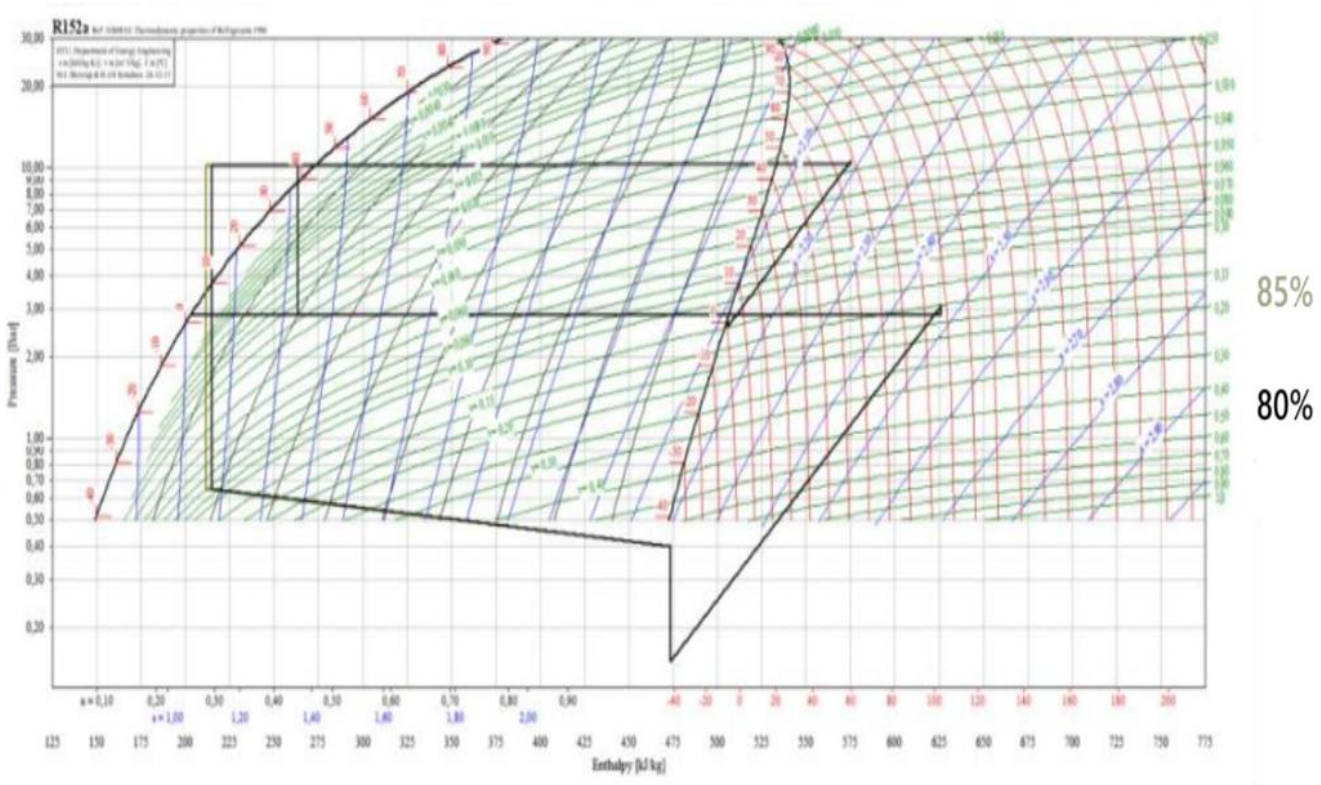
Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

FIGURA 14. Valores calculados com ciclo fechado e Equação 2 de pressão intermediária variando eficiência do intercooler.



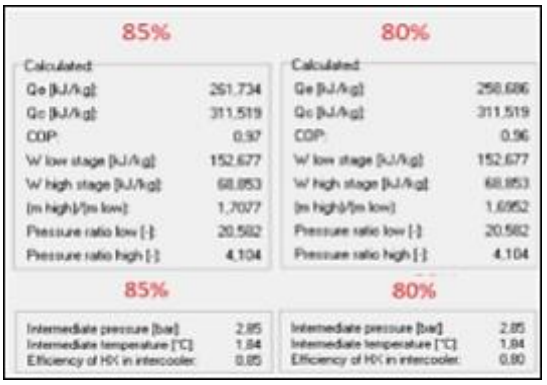
Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

FIGURA 15. Gráfico comparação com ciclo fechado e Equação 3 de pressão intermediária variando eficiência do intercooler.



Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

FIGURA 16. Valores calculados com ciclo fechado e Equação 3 de pressão intermediária variando eficiência do intercooler.



Fonte: Adaptado Coolpack (2025).

A análise dos resultados também reforça a viabilidade do R152a como um fluido refrigerante de alto desempenho em ciclos multiestágio, oferecendo uma alternativa sustentável com resultados consistentes mesmo com as variações operacionais.

A Tabela 2 apresenta os resultados consolidados para os três cenários de operação simulados. Observa-se que, para todos os cenários, a redução da eficiência do trocador de calor intermediário ocasiona uma diminuição dos valores de Qe (capacidade de refrigeração específica) e do COP, acompanhada por uma pequena redução na razão de vazões mássicas entre o estágio alto e o estágio baixo.

TABELA 2. Resultados consolidados

Eficiência intercooler (%)	Qe (kJ/kg)	Qc (kJ/kg)	COP (-)	W baixo (kJ/kg)	W alto (kJ/kg)	m alto/m baixo (-)	Razão pressão baixa (-)	Razão pressão alta (-)	Pressão interm. (bar)	Temp. interm. (°C)
85	272,840	323,204	0,95	135,049	87,556	1,7309	15,229	5,948	2,04	-7,41
80	269,138	323,204	0,94	135,049	87,556	1,7152	15,229	5,948	2,04	-7,41
85	267,735	317,496	0,96	143,305	78,534	1,7201	17,556	4,976	2,39	-3,09
80	264,334	317,496	0,95	143,305	78,534	1,7059	17,556	4,976	2,39	-3,09
85	261,734	311,519	0,97	152,677	68,853	1,7077	20,582	4,104	2,85	1,84
80	258,686	311,519	0,96	152,677	68,853	1,6952	20,582	4,104	2,85	1,84

Fonte: Autor (2025).

De forma geral, os dados indicam que uma menor eficiência do trocador de calor no intercooler, ainda que com impacto moderado, reduz a capacidade de refrigeração e o desempenho global do ciclo, ressaltando a importância do controle e manutenção do trocador de calor intermediário.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho de simulação demonstrou a importância dos parâmetros operacionais em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor multiestágio com R152a. A simulação por meio do software CoolPack foi uma ferramenta eficaz para avaliar a influência da eficiência do intercooler e da metodologia de cálculo da pressão intermediária no COP.

Os resultados concluíram que a eficiência do intercooler é o fator mais determinante para o desempenho do sistema, com variações diretas no COP. A metodologia de cálculo da pressão intermediária, embora importante, apresentou um impacto menor.

A baixa variação do COP (0,94 a 0,97) demonstra que o R152a é um fluido refrigerante adequado para esta configuração de ciclo, mesmo com as temperaturas de evaporação baixas exigidas. Em suma, o R152a é uma alternativa promissora e sustentável, e o ciclo multiestágio com intercooler fechado é uma solução eficiente para aplicações industriais que demandam temperaturas reduzidas, melhorando a eficiência energética e a vida útil dos componentes do sistema.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

BOLAJI, B. O. Experimental study of R152a and R32 to replace R134a in a domestic refrigerator. Energy, v. 35, n. 9, p. 3793-3798, 2010.

ÇENGEL, YUNUS A.; BOLES, MICHAEL A. Termodinâmica. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2013.

CHEN, X., LIANG, K., LI, Z., JIANG, H., XU, J. Energy and exergy analysis of domestic refrigerators using R152a to replace R134a. Thermal Science and Engineering Progress, v. 29. sep. 2022.

Capítulo 16

10.37423/251110460

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYOLESTER OIL WITH ALUMINUM OXIDE NANOPARTICLES

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior — *Department of Mechanical Engineering - Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN)*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa — *Department of Mechanical Engineering - Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN)*

Edilson Marinho da Silva Júnior — *Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Norte (IFRN)*

Thiago da Silva André — *Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Norte (IFRN)*

Wertson da Silva Resende — *Department of Mechanical Engineering - Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN)*

ABSTRACT

This study presents an experimental investigation into the tribological performance of a synthetic polyester lubricating oil (POE) enhanced with aluminum oxide (Al_2O_3) nanoparticles, targeting applications in refrigeration compressors. The research aims to develop nanolubricants capable of reducing friction and wear in mechanical systems, thereby improving energy efficiency and operational reliability. Samples were prepared with Al_2O_3 concentrations of 0.10 g/L, 0.25 g/L, 0.50 g/L, and 1.00 g/L. The nanoparticles were dispersed in the base oil using ultrasonic bath and magnetic stirring techniques to ensure colloidal stability and minimize particle agglomeration. Tribological properties were evaluated using a High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) tribometer, following ASTM D6079-99 and ISO 12156-1:1997 standards. Key parameters analyzed included the friction coefficient and the wear scar diameter (WSD) on the steel ball of the tribological pair.The tests were conducted automatically, allowing continuous data acquisition and ensuring high reproducibility. Results showed that the nanolubricant with a concentration of 0.25 g/L exhibited the best performance, with the lowest friction coefficient and smallest wear scar area, outperforming even the pure POE oil after 3000 seconds of testing. In contrast, the 1.00 g/L sample showed increased wear, indicating that excessive nanoparticle concentration may negatively affect lubrication efficiency. It is concluded that the controlled addition of Al_2O_3 nanoparticles to POE oil significantly enhances its tribological behavior, with 0.25 g/L being the optimal concentration. Future studies should explore the incorporation of surfactants into the formulation to improve nanoparticle dispersion and further boost lubricating performance in industrial applications.

Keywords: nanolubricant. Al2O3. Lubricity. coefficient of friction. POE oil.

1 INTRODUCTION

Friction and wear are recurring phenomena in mechanical systems and represent major causes of energy efficiency loss and operational failure in machine components. The search for solutions that promote greater reliability and performance has led to the development of lubricants with enhanced tribological properties.

In this context, the addition of nanoparticles to conventional lubricating oils has proven to be a promising strategy for reducing friction and wear, while increasing the load-bearing capacity of lubricated systems (ALVES et al., 2018, BONU et al., 2016).

Several studies demonstrate that metallic, metal oxide, and non-metallic nanoparticles — such as Al_2O_3, CuO, SnO_2, and graphene — can act as effective lubricant additives, promoting protective film formation, tribochemical reactions, and colloidal effects that minimize direct contact between surfaces (VAKIS et al., 2018; WU et al., 2020). ZHANG et al. (2025) highlight that functionalizing nanoparticles with ionic liquids can improve dispersion and stability, favoring the formation of robust and durable tribofilms.

NUGROHO et al. (2021) also show that sonication time is a critical factor in ensuring colloidal stability of Al_2O_3-based nanolubricants in polyester oil.

Lubrication efficiency depends on factors such as particle size, concentration, dispersion stability, and interaction with the base fluid.

Evaluation methods such as the High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) are widely used to simulate boundary lubrication regimes and measure parameters such as friction coefficient and wear scar diameter (FARIAS et al., 2011).

Given this scenario, the present study aims to experimentally investigate the influence of adding aluminum oxide (Al_2O_3) nanoparticles to a synthetic polyester lubricating oil (POE), widely used in refrigeration compressor lubrication. The proposal seeks to contribute to the advancement of high-performance nanolubricant formulations with operational stability.

2 EXPERIMENTAL PROCEDURE

The formulation of nanolubricants has emerged as a promising alternative to enhance the tribological performance of conventional lubricating oils, especially in industrial applications that demand high reliability and energy efficiency.

The incorporation of nanoparticles into base oils can significantly reduce friction and wear between metallic surfaces in relative motion, while promoting protective film formation and tribochemical reactions at the tribological interface (Bonu et al., 2016; Wu et al., 2020).

Recent studies highlight that factors such as nanoparticle type, concentration, dispersion stability, and synthesis method directly influence lubrication efficiency (Nugroho et al., 2021; Zhang et al., 2025).

This study evaluates the influence of adding aluminum oxide (Al_2O_3) nanoparticles at different concentrations to synthetic polyester oil POE 160PZ, widely used in refrigeration compressor lubrication.

Tribological characterization was performed using standardized tests with an HFRR tribometer, following international standards.

2.1 Materials

The base oil used was POE 160PZ manufactured by Danfoss (Figure 1), compatible with refrigerants R134a, R404a, R507, R508b, R407c, and R410a.

Figure 1: Features and specifications of POE 160PZ synthetic oil



Property	Specification	Test method
Viscosity at 40 °C	30 – 33 cSt	ASTM D 445
Viscosity at 100 °C	5.5 cSt	ASTM D 445
Density at 15.6 °C	0.989 g/ml	ASTM D 4052
Colour	200	ASTM D 1209
Pour point	-54 °C	ASTM D 97
Flash point	244 °C	ASTM D 93
Dielectric strength at 25 °C	46kV (min)	ASTM D 1816
Acid value (Tan)	0.12 mgK0H/g (max)	ASTM D 974

The Al_2O_3 nanoparticles(Figure 2) were purchased from Sigma-Aldrich in dry powder form, known for their high thermal conductivity and chemical stability. The tested concentrations were 0.10 g/L, 0.25 g/L, 0.50 g/L, and 1.00 g/L.

Figure 2: Al2O3 nanoparticles: (a) Al2O3 sample and commercial packaging, (b) technical specifications (c) TEM image.



Characteristic	Al_2O_3
Purity %	99
Color	white
molecular mass (g/cm^2)	101,96
average particle diameter (nm)	20
Density (kg/m^3)	3,89
thermal conductivity (W/K.m)	35
specific heat (J/Kg.K)	773
specific surface área (m^2/g)	138



According to recent literature, the nanoparticles most commonly employed in the development of nanolubricants include single-walled and multi-walled carbon nanotubes (SWCNTs, MWCNTs), titanium oxides (TiO_2), and aluminum oxides (Al_2O_3), owing to their superior thermophysical and tribological properties (Holanda, 2018; Azevedo et al., 2020).

These nanomaterials are known to enhance heat transfer, reduce friction, and improve wear resistance when properly dispersed in lubricating fluids.

In this research, aluminum oxide (Al_2O_3) nanoparticles were selected due to their high thermal conductivity and chemical inertness, which contribute to the formation of stable colloidal suspensions and protective tribofilms under mechanical stress.

The Al_2O_3 nanoparticles used were obtained in dry powder form from Sigma-Aldrich, with particle sizes in the nanometric range and purity suitable for tribological applications.

Compared to other commercially available nanoparticles, Al_2O_3 exhibits favorable dispersion behavior and minimal agglomeration when subjected to ultrasonic and magnetic stirring techniques, making it a reliable candidate for enhancing the performance of POE-based nanolubricants.

2.2 Nanolubricant Synthesis

The formulation followed the "two-step" method, widely adopted for its simplicity and effectiveness (Bonu et al., 2016):

- Nanoparticle mass measurement: performed using an analytical balance with 0.0001 g resolution.

- Base oil volume measurement: 100 mL per sample, using a micropipette and graduated beaker.
- Initial mixing: nanoparticles added to POE oil and homogenized with a glass rod.
- Deagglomeration: samples subjected to ultrasonic bath (10% amplitude, 1 hour).
- Final dispersion: performed using a magnetic stirrer (450 rpm, 24 hours).

Once the synthesis of all samples of the proposed nanolubricant is completed, each sample is appropriately packaged in test tubes (Figure 3) for stability analysis using the sediment visualization method or Zeta potential in appropriate equipment and tests to measure tribological properties under standardized conditions in an HFRR-type tribometer.

Figure 3: Nanolubricant samples (Al2O3/POE) at concentrations of 0.10 g/L, 0.25 g/L, 0.50 g/L and 1.00 g/L

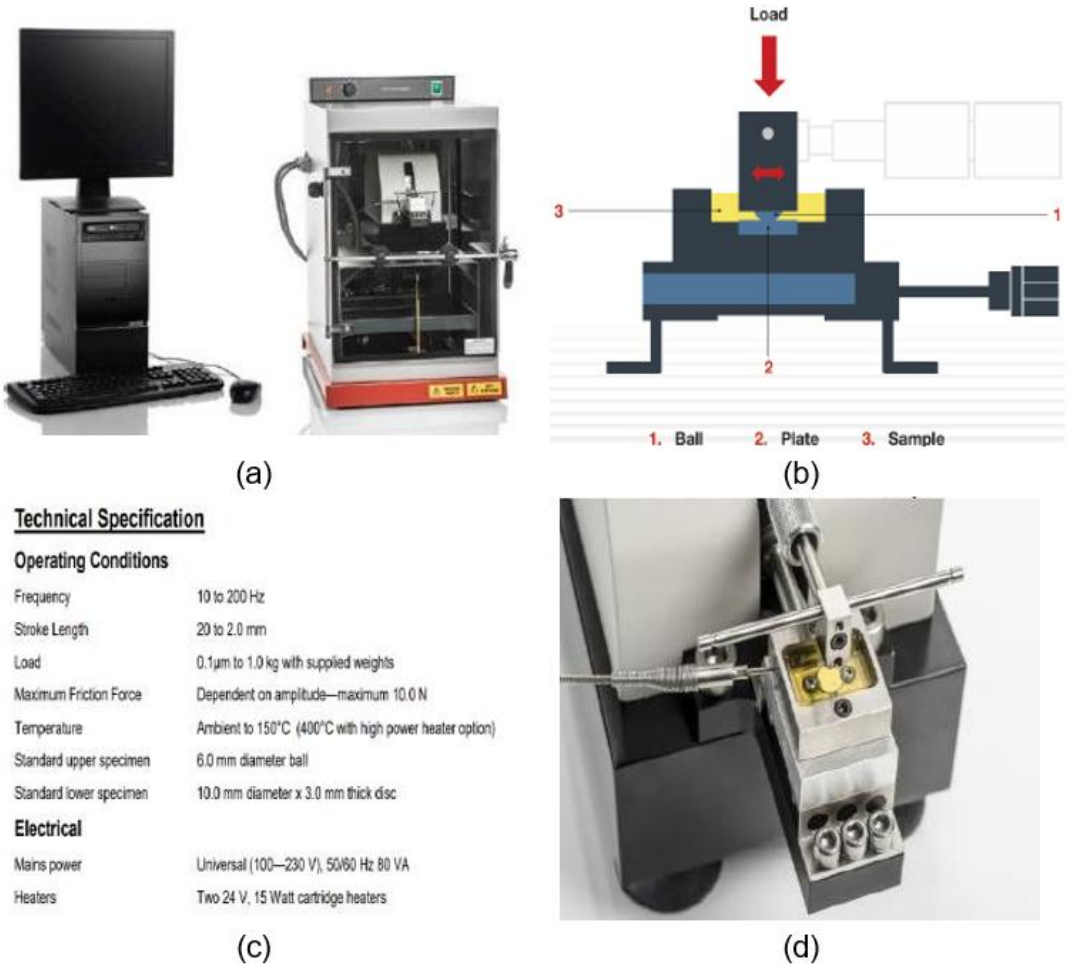


2.3 HFRR tribological test

The lubricity tests of the nanolubricant samples were performed in accordance with ASTM D6079-99 and ISO 12156-1:1997 standards, which establish the geometric, dimensional, and material requirements for the tribological pair (ball/plate) used in the HFRR (High Frequency Reciprocating Rig) method.

The tribological pair consists of a hardened steel ball and a mild steel plate, respectively inserted into the upper and lower supports of the HFRR tribometer (Figure 4).

Figure 4: HFRR Tribometer: (a) Equipment photo (b) Schematic diagram (c) Specifications (d) Tribological pair and supports.

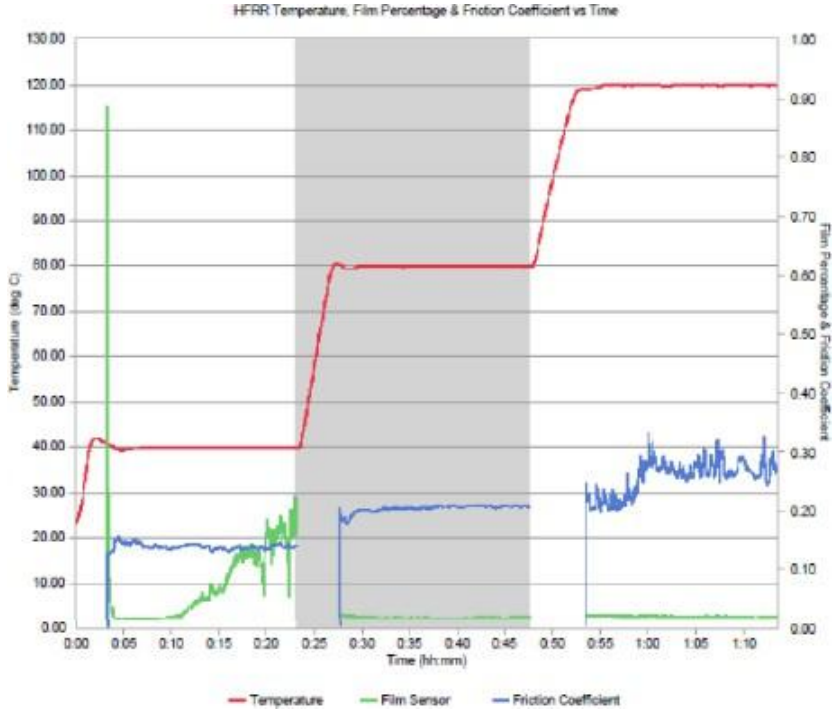


The nanolubricant sample was added to the lower support tank, totaling 2.0 mL of test fluid, and subjected to a normal load of 2 N. During the test, the ball slid reciprocally over the plate with a stroke of 1.00 mm, a frequency of 20 Hz, and a sliding speed of 0.01 m/s, for a period of 60 minutes. The fluid temperature was maintained constant at approximately 50°C throughout the test.

The HFRR tribometer operates automatically, allowing real-time control and monitoring of performance parameters such as coefficient of friction, lubricant film thickness, and contact temperature through dedicated software (Figure 5).

The friction force between the test specimens is continuously recorded by a piezoelectric sensor with a data acquisition rate of 1 Hz.

Figure 5: HFRR lubricity test parameters with real-time monitoring.



At the end of the test, the steel ball is removed, cleaned, and subjected to wear scar diameter (WSD) analysis using an optical microscope with 100× magnification. The wear scar measurement is obtained by averaging the diameters on the X and Y axes and is used as a parameter to assess the lubricity of the tested samples.

The tribological pair consisted of a hardened steel ball and a soft steel disk, immersed in 2 mL of lubricant, under a 2 N load, 1 mm stroke, 20 Hz frequency, and constant temperature of 50 °C for 1 hour.

Tests were performed in triplicate. Monitored parameters included:

- Friction coefficient
- Lubricant film thickness
- Contact temperature
- Wear scar diameter (WSD)

3 RESULTS

All lubricity versus time tests were conducted fully automatically and programmed using dedicated software for the PCS Instruments HFRR tribometer.

The coefficient of friction and film thickness were collected at a rate of 1 second using the instrument's own data acquisition system, and the ball wear band (WSD) was measured using an optical microscope at 100X magnification.

The coefficient of friction and WSD were the parameters used to evaluate lubricity. Automating the HFRR lubricity test allowed for the test to be reproduced equally for all nanolubricant samples without operator intervention, increasing the reliability and reproducibility of the results.

Figure 6 shows the coefficient of friction versus time as a "cloud" of points. This cloud-like appearance is due to the number of points represented in the graph by each nanolubricant sample tested. A total of 3,600 coefficient of friction readings were acquired during the 1-hour test (one reading every second).

Figure 6: Friction coefficient of POE oil and Al2O3/POE nanolubricant, with concentration of 0.10 g/L, 0.25 g/L, 0.50 g/L, 1.00 g/L versus time.

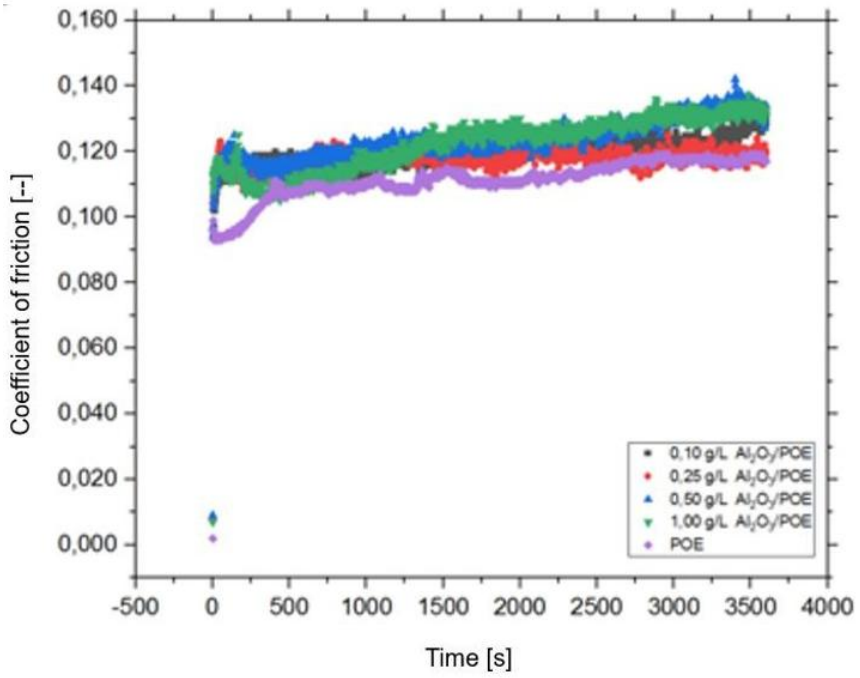


Figure 6 shows that the coefficient of friction for all nanolubricant samples showed an increasing trend over time. The nanolubricant with a concentration of 0.25 g/L presented the lowest coefficient of friction, even with values equivalent to POE oil after 3,000 seconds of testing.

Analyzing Figure 6, it can also be seen that the base oil (POE) has lower coefficients of friction than the Al2O3/POE nanolubricant. However, after 3,000 seconds of testing, the 0.25 g/L nanolubricant has coefficients of friction equal to or lower than the POE oil.

Figure 7 shows the images of the wear scars on the sphere of the tribological pair obtained in the HFRR tribometer test for different nanolubricant concentrations.

Figure 7: Wear scars of the sphere of the tribological pair in HFRR test with nanolubricant (Al2O3/POE) of different concentrations of Al2O3.

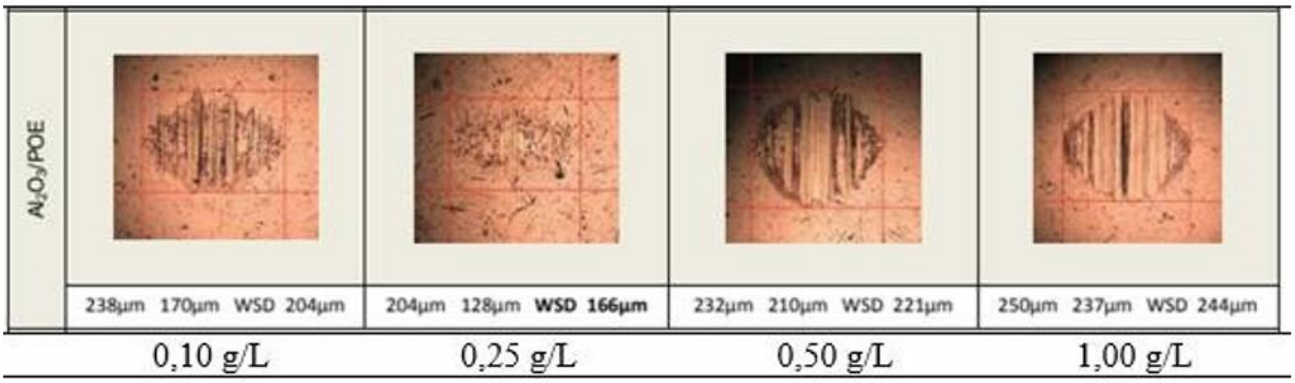


Figure 7 shows that the 0.25 g/L nanolubricant (Al2O3/POE) presented the lowest wear rate (WSD=166µm), indicating the best lubricity among all the nanolubricant samples tested.

The greatest ball wear (WSD=244µm) occurred in the HFRR test with the 1.00 g/L nanolubricant, revealing the worst lubricity of the nanolubricants tested.

4 CONCLUSION

At the end of this experimental research on the tribology of a polyester oil nanolubricant supplemented with aluminum oxide nanoparticles (Al2O3/POE) for use in refrigeration compressors, it was concluded that:

1. The preparation of the proposed nanolubricant using the two-step method, utilizing ultrasonic bath immersion techniques and magnetic stirring of the suspended particles, demonstrated good stability characteristics, delaying agglomeration and reducing sedimentation of the nanoparticles in the base oil, as observed through the visual inspection sedimentation method.

2. The automation of the HFRR lubricity tests allowed for the tests to be reproduced equally for all nanolubricant samples, without operator interference, increasing the level of reliability and reproducibility of the results obtained.

3. In the HFRR lubricity test, the nanolubricant at a concentration of 0.25 g/L showed the lowest coefficient of friction and lowest ball wear (WSD) among all the nanolubricants tested, indicating its improved lubricity.

4. The inclusion of a surfactant in the nanolubricant formulation (Al_2O_3/POE) can contribute to better dispersion of the nanoparticles in the base fluid, enhancing lubrication efficiency.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank CAPES – Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel for supporting this research

REFERENCES

1. ALVES, S. M.; MELLO, V. S.; FARIA, E. A.; SCANDIAN, C. Enhancing CuO nanolubricant performance using dispersing agents. Tribology International, v. 150, p. 106338, 2020. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106338

2. BONU, V. S.; KUMAR, N.; SINGH, R. K.; SINGH, R. Lubrication performance of SnO_2 nanoparticles dispersed in POE oil. Wear, v. 364–365, p. 89–97, 2016. DOI: 10.1016/j.wear.2016.07.014

3. FARIAS, M. A.; ALMEIDA, R. S.; COSTA, J. C. Avaliação da lubricidade por método HFRR. Revista Brasileira de Engenharia Mecânica, v. 33, n. 2, p. 145–152, 2011.

4. NUGROHO, A.; AZMI, N.; NOROOZI, M.; SAMION, S. Extensive examination of sonication duration impact on stability of Al_2O_3-polyol ester nanolubricant. International Communications in Heat and Mass Transfer, v. 124, p. 105418, 2021. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105418

5. VAKIS, A. I. et al. On the nature of tribological interactions across scales. Tribology International, v. 125, p. 169–199, 2018. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.02.005

6. WU, H.; YIN, S.; DU, Y.; WANG, L.; WANG, H. An investigation on the lubrication effectiveness of MoS_2 and BN layered materials as oil additives using block-on-ring tests. Tribology International, v. 151, p. 106516, 2020. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106516

7. ZHANG, X.; ZHAO, X.; YUAN, H.; WANG, Z.; LIU, Y. Ionic assembly of [EHA][ISA]-GO complex for enhanced tribological performance in polyalphaolefin lubricant. Carbon, v. 211, p. 120396, 2025. DOI: 10.1016/j.carbon.2025.120396

Capítulo 17

10.37423/251110461

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERFORMANCE EM REGIME TRANSIENTE DE GERADOR TERMOELÉTRICO DE EXAUSTÃO AUTOMOTIVA

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior — *Universidade Federal da Paraíba (UFPB) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*

Carlos Antônio Cabral dos Santos — *Universidade Federal da Paraíba (UFPB) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Edilson Marinho da Silva Júnior — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)*

Elierton Evangelista das Neves — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação experimental em regime transiente da performance de um gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea), com foco na recuperação de energia térmica proveniente dos gases de escape de motores a combustão interna. O sistema proposto utiliza módulos termoelétricos de Telureto de Bismuto, explorando o efeito Seebeck para conversão direta de calor em eletricidade. A estrutura do TEGea foi projetada com permutadores de calor em alumínio, sendo o permutador da fonte quente composto por aletas internas e minicanais corrugados, visando maximizar a transferência térmica. Já o permutador da fonte fria foi desenvolvido com canal interno para escoamento de líquido de arrefecimento, otimizando a dissipação de calor e reduzindo perdas hidráulicas. A modelagem computacional foi realizada no software ANSYS, permitindo simular os perfis térmicos e validar o desempenho do sistema. Para os testes experimentais, foi construída uma bancada com túnel de ar quente, simulando condições reais de operação automotiva. Os resultados demonstram que a geometria adotada, especialmente o uso de minicanais corrugados, promoveu significativa intensificação térmica, contribuindo para o aumento da eficiência de conversão energética.

PALAVRAS-CHAVE: GERADOR TERMOELÉTRICO, RECUPERAÇÃO DE ENERGIA , GASES DE EXAUSTÃO, REGIME TRANSIENTE, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis e a necessidade de mitigar os impactos ambientais da mobilidade automotiva têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de recuperar energia desperdiçada em sistemas térmicos. Dentre essas tecnologias, os geradores termoelétricos automotivos (TEGea) vêm ganhando destaque por sua capacidade de converter diretamente calor em eletricidade, utilizando o efeito Seebeck como princípio de funcionamento (Zhao et al., 2023; Zhang et al., 2022).

Os gases de exaustão de motores a combustão interna representam uma fonte significativa de energia térmica não aproveitada, podendo atingir temperaturas superiores a 600 °C em regimes de carga elevada (Chen et al., 2021). A integração de módulos termoelétricos baseados em Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3) permite a conversão eficiente dessa energia, especialmente em aplicações de baixa temperatura, devido às propriedades termoelétricas favoráveis do material (Li et al., 2023).

A eficiência do sistema termoelétrico depende fortemente do projeto dos permutadores de calor, que devem garantir elevada transferência térmica e mínima perda por bombeamento. Estudos recentes demonstram que o uso de minicanais corrugados e aletas internas pode intensificar significativamente o fluxo térmico, melhorando o desempenho global do gerador (Wang et al., 2022; Silva et al., 2024).

Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma avaliação experimental em regime transiente da performance de um TEGea, projetado com permutadores de calor em alumínio e testado em bancada com túnel de ar quente. A modelagem computacional foi realizada no software ANSYS, permitindo simular os perfis térmicos e validar os resultados obtidos experimentalmente. Os achados contribuem para o avanço da tecnologia de recuperação energética em veículos automotivos, com potencial aplicação em sistemas híbridos e elétricos.

1.1 Objetivos

Avaliar experimentalmente, em regime transiente, o desempenho térmico e elétrico de um gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea), projetado com módulos de Telureto de Bismuto e permutadores de calor otimizados, visando à recuperação de energia térmica dos gases de escape de motores a combustão interna.

Os objetivos específicos são:

1. Projetar e construir um protótipo funcional de gerador termoelétrico automotivo com permutadores de calor em alumínio, adequados às condições térmicas dos gases de exaustão.

2. Implementar geometrias otimizadas nos permutadores de calor, incluindo aletas internas e minicanais corrugados, para intensificar a transferência térmica.

3. Realizar simulações computacionais utilizando o software ANSYS, com o objetivo de prever os perfis térmicos e validar o projeto antes da etapa experimental.

4. Desenvolver uma bancada experimental com túnel de ar quente para simular condições reais de operação automotiva em regime transiente.

5. Monitorar e registrar os parâmetros térmicos e elétricos do sistema durante os testes, incluindo temperaturas, vazões, tensões e correntes geradas.

6. Comparar os resultados experimentais com os dados simulados, avaliando a eficiência de conversão termoelétrica e o impacto das soluções geométricas adotadas.

7. Analisar a viabilidade técnica do TEGea como solução complementar para recuperação energética em veículos automotivos, com potencial aplicação em sistemas híbridos e elétricos.

1.2 Justificativas

Apesar dos avanços teóricos e simulações computacionais, ainda há uma lacuna significativa na literatura quanto à avaliação experimental de sistemas termoelétricos operando em regime transiente, que é a condição real de funcionamento dos veículos em tráfego urbano e rodoviário. A maioria dos estudos concentra-se em análises em regime permanente, desconsiderando variações dinâmicas de temperatura, vazão e carga térmica que afetam diretamente o desempenho dos módulos termoelétricos.

Além disso, a eficiência de conversão termoelétrica está fortemente associada à qualidade dos permutadores de calor utilizados. O uso de microcanais corrugados e aletas internas representa uma inovação geométrica que pode intensificar a transferência térmica, reduzindo perdas e aumentando a densidade de potência gerada. No entanto, essas soluções ainda carecem de validação experimental em condições reais de operação.

Dessa forma, este trabalho se justifica pela necessidade de:

1. Validar experimentalmente o desempenho de um TEGea em condições transientes, aproximando-se da realidade operacional dos veículos.

2. Investigar o impacto de geometrias otimizadas nos permutadores de calor sobre a eficiência térmica e elétrica do sistema.

3. Contribuir com dados empíricos para o avanço da pesquisa aplicada em recuperação de energia automotiva, com potencial de integração em veículos híbridos e elétricos.

4. Fortalecer a formação acadêmica em engenharia mecânica por meio de projetos experimentais que conectam teoria, simulação e prática laboratorial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A crescente busca por eficiência energética e redução de emissões em sistemas automotivos tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de recuperação de calor, como os geradores termoelétricos de exaustão (TEGea).

Esses dispositivos convertem diretamente o calor residual dos gases de escape em energia elétrica, oferecendo uma solução promissora para veículos híbridos e convencionais. No entanto, a maioria dos estudos concentra-se em análises em regime permanente, negligenciando os efeitos dinâmicos e transientes que ocorrem durante a operação real dos motores.

Para superar essa lacuna, este trabalho propõe uma abordagem experimental e computacional integrada, baseada em metodologias recentes que demonstraram avanços significativos na otimização de permutadores de calor e na caracterização de módulos termoelétricos em condições variáveis de operação (Silva et al., 2024; Zhang et al., 2023).

A seguir, são descritos os materiais utilizados e os procedimentos adotados para a construção, simulação e avaliação do sistema.

2.1 Projeto do sistema termoelétrico

O sistema TEGea foi projetado com foco na operação em regime transiente, sendo composto com os seguintes componentes:

- Módulos termoelétricos de Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3): com fator de mérito (ZT) adequado para faixas de temperatura entre 100 °C e 450 °C, conforme recomendações de estudos recentes sobre desempenho termoelétrico em aplicações móveis (Zhang et al., 2023).

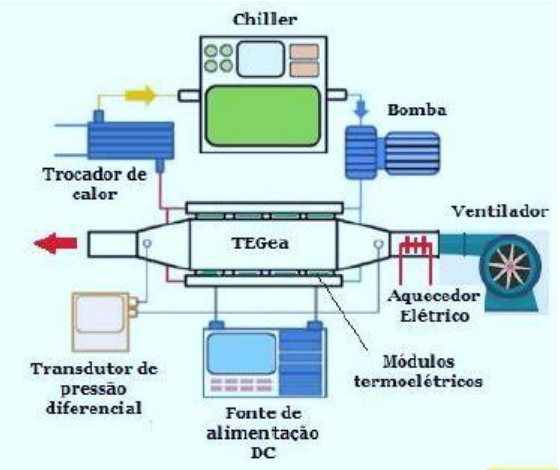
- Permutadores de calor em alumínio: com microcanais corrugados e aletas internas: projetados para intensificar a transferência térmica e reduzir perdas por condução, conforme validado experimentalmente (Silva et al.,2024).

- Estrutura de suporte em aço galvanizado: com isolamento em manta cerâmica de baixa condutividade térmica.

2.2 Montagem da bancada experimental

A Figura 1 apresenta o diagrama esquemático da bancada experimental, em escala de laboratório, que foi desenvolvida para teste em regime transiente do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva com aletas e minicanais, que faz uso de um soprador de ar (ventilador) e uma resistência elétrica de aquecimento para simular a energia residual dos gases de exaustão do motor de combustão interna.

FIGURA 1. Diagrama esquemático da Bancada experimental para teste em regime transiente do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea)



Fonte: Adaptado de WOJCIECHOWSKI (2022) e KIM (2019).

A bancada foi desenvolvida para simular condições reais de operação automotiva, incluindo: (a)túnel de ar quente com controle de temperatura e vazão, simulando o fluxo dos gases de exaustão (b) sistema de aquisição de dados com sensores tipo termopar K, transdutores de pressão e medidores de vazão (c) Controlador PID para ajuste dinâmico da temperatura de entrada nos permutadores. (d) Instrumentação elétrica com multímetros digitais e osciloscópio para monitoramento da tensão e corrente geradas.

De concepção simples, a bancada experimental objeto da pesquisa compreende essencialmente um túnel de ar aquecido contendo a seção de propulsão do fluxo de ar, a seção de aquecimento do fluxo de ar e a seção do gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea), conectada à bancada de testes por meio de difusores de entrada e saída que possibilitam a mudança da forma geométrica circular (característica da tubulação de descarga de um motor de combustão interna) para forma retangular do permutador de calor da fonte quente (HHX) e vice-versa, respectivamente.

2.3 Procedimento experimental

Os ensaios experimentais de avaliação da performance do protótipo de TEGea foram conduzidos em uma bancada desenvolvida exclusivamente para este fim. A bancada de teste descrita anteriormente possui uma seção de propulsão (turbina de vento) para impulsionar o escoamento de ar quente através da seção do TEGea, uma seção com resistência elétrica de aquecimento que simulava a fonte de calor do sistema e a seção do TEGea formada pelo permutador de calor da fonte quente, módulos termoelétricos e permutador de calor da fonte fria (dissipador) para controle do gradiente de temperatura entre os lados quente e frio dos módulos termoelétricos, de modo a garantir sua integridade estrutural.

O lado quente do módulo termoelétrico (TEM) estava em contato direto com a superfície aquecida do permutador de calor (HHX), enquanto a superfície fria do permutador de calor (CHX) foi conectada no lado frio do TEGea e atuava controlando os gradientes de temperatura dos lados quente e frio do módulo TE.

Além disso, um sistema mecânico contendo parafusos, porcas e arruelas possibilitava a montagem dos componentes e aperto do sistema TEGea. O objetivo deste sistema mecânico de aperto era tão somente fixar adequadamente os permutadores de calor HHX e CHX aos módulos termoelétricos (TEM) de modo a reduzir a resistência de contato térmico entre os componentes do sistema TEGea.

Em seguida, os terminais positivo e negativo dos módulos termoelétricos (TEM) foram, através de condutores de cobre com isolamento térmico de alta temperatura, conectados eletricamente em série e à resistência elétrica externa (Rload) conectada em paralelo com a resistência elétrica interna dos módulos TE.

Durante a realização dos testes de performance na bancada experimental em regime de plena carga ou carga parcial, o sistema de gerenciamento via Arduino ou instrumentos eletrônicos com software de comunicação com microcomputador realizada de forma automática a aquisição e armazenamento de dados elétricos e termofluidos de interesse a cada 1 segundo continuamente.

Além da placa de aquecimento, uma hélice acionada por motor de aeromodelo foi instalado e impulsionava o ar quente através do permutador de calor HHX. Os operacionais podiam ser alterados durante o experimento, incluindo a temperatura do ar aquecido por resistência elétrica, a velocidade do ar quente, a temperatura da água de arrefecimento dos TEM, a configuração do HHX do TEG com ou sem canais corrugados.

Os testes de performance do protótipo de TEGea foram realizados utilizando-se módulos termoelétricos pré-selecionados HZ-14 ou HZ-14HV para duas velocidades de escoamento do ar através da seção TEGea e com a potência de aquecimento do ar variável controlado por placa eletrônica desenvolvida em plataforma do ambiente Arduíno.

A Tabela 1 apresenta as diferentes condições de teste em regime transiente estabelecidas na bancada experimental instrumentada para avaliação da performance de conversão termoelétrica do protótipo de TEGea proposto.

TABELA 1. Principais características e tipos de testes de avaliação da performance do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea)

TIPO DE TESTE	TEM	VAZÃO DE AR [m^3/min]	PERMUTADOR DE CALOR	DURAÇÃO DO TESTE [min]
Plena Carga (1800W)	HZ-14 ou HZ-14HV	0,50	HHX-000 HHX-150 HHX-250	20
Carga Parcial (600W)	HZ-14 ou HZ-14HV	0,25	HHX-000 HHX-150 HHX-250	25

Fonte: Autor (2025).

Em todos os testes de performance do protótipo de TEGea no modo de aquecimento de plena carga, com potência máxima de aquecimento de aproximadamente 1800W, a resistência de aquecimento

controlada na plataforma Arduino, era inicialmente acionada até atingir aproximadamente 1800W, permanecendo ligada nesta condição por 5 minutos, quando era diminuída para cerca de 1200W, permanecendo ligada por 3 minutos nesta condição e retornando para a potência aproximada de 1800W por 3 minutos.

Este ciclo de aquecimento se repetia por mais 2 vezes de forma automática por gerenciamento do software do Arduíno, isto é, com a potência de aquecimento evoluindo entre 1200W e 1800W e vice-versa, permanecendo em cada um destes níveis de potência por 3 minutos, perfazendo assim 3 ciclos de aquecimento e totalizando aproximadamente 20 minutos de duração do teste.

2.4 Simulação computacional

Antes da construção física, foi realizada uma simulação computacional utilizando o software ANSYS Fluent, com as seguintes configurações:

- Malha tridimensional refinada nos microcanais.
- Modelo de turbulência k-ε e condições de contorno térmicas baseadas em dados reais de motores automotivos.
- Avaliação do gradiente térmico entre as faces quente e fria dos módulos termoelétricos, conforme metodologia proposta por Li et al. (2022).

Por razões de segurança e em conformidade com as recomendações do fabricante dos módulos termoelétricos, a temperatura máxima em regime intermitente na superfície quente do permutador de calor HHX foi limitada em 450ºC, visando não comprometer a integridade estrutural dos módulos termoelétricos.

Para avaliação comparativa da influência da inserção dos canais corrugados nas superfícies das aletas do permutador de calor HHX, foram estabelecidas duas velocidades de escoamento do ar aquecido através da seção do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea). Assim, os resultados obtidos nos testes de performance do protótipo de TEGea são comparados para identificação da influência da inserção do minicanal corrugado na eficiência de captação de calor do HHX e por conseguinte também na eficiência da conversão termoeletrica do protótipo de TEGea.

2.5 Tratamento e análise dos dados

Os dados obtidos em ensaios experimentais do protótipo de TEG proposto foram tratados estatisticamente com auxílio do software OriginPro, permitindo:

- Cálculo da eficiência de conversão termoelétrica em diferentes regimes transientes.
- Análise da inércia térmica do sistema e tempo de resposta dos módulos.
- Comparação entre os resultados simulados e experimentais.

3 RESULTADOS

A avaliação experimental do gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea) em regime transiente revelou resultados promissores quanto à eficiência de conversão termoelétrica e à resposta térmica do sistema. A análise foi conduzida com base em dados obtidos em bancada experimental e complementada por simulações computacionais realizadas no software ANSYS Fluent.

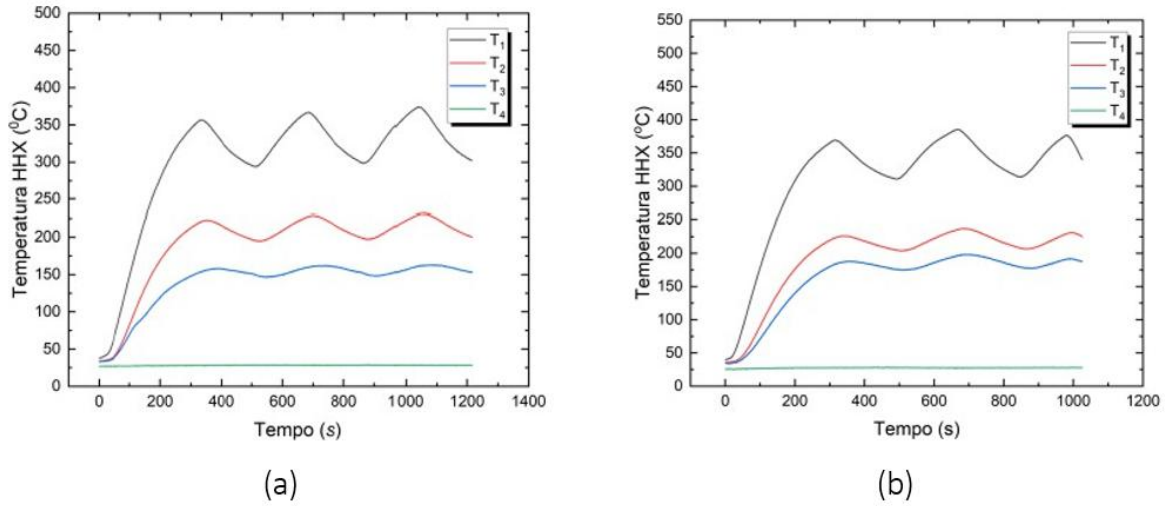
Neste tópico serão descritos e analisados os principais parâmetros de performance do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea) funcionando com módulos termoelétricos HZ-14V ou HZ-14HV sob diferentes condições de operação pré-estabelecidas na Tabela 1.

Inicialmente vale destacar que, o gerenciamento automático em ambiente Arduino da potência de aquecimento e da velocidade de escoamento do ar através da seção do protótipo de TEGea possibilitaram a fiel reprodução de todos os testes de performance do TEGea estabelecidos na Tabela 1, tanto para o regime de plena carga quanto para o regime de carga parcial, sem qualquer interferência humana, garantindo assim maior confiabilidade aos dados de performance aquisitados.

3.1 Perfis de temperatura no HHX

A Figura 2 apresenta os perfis de temperatura na superfície externa do permutador de calor HHX-000 do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea) funcionando com potência de aquecimento de plena carga e velocidade de escoamento V1.

FIGURA 2. Perfis de temperatura no permutador de calor HHX-000 do TEGea em plena carga e módulos termoelétricos: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV



Fonte: Autor (2025).

Analisando a Figura 2 observa-se que a queda de temperatura na direção do escoamento do ar quente no HHX é cerca de (T1-T2) = 150 ºC e (T2-T3) = 75 ºC, o que significa que a potência elétrica gerada dos módulos termoelétricos tende a diminui na direção do escoamento, conforme prescrito na literatura especializada.

A temperatura máxima observada na superfície externa do HHX-000 é cerca de 375 ºC, não excedendo o valor recomendado pelo fabricante para operação intermitente dos módulos termoelétricos, garantindo assim a integridade estrutural destes componentes e uma operação segura.

Fazendo-se uma análise comparativa da Figura 2 (a) e (b), verifica-se que os perfis de temperatura (T1, T2, T3 e T4) exibem comportamentos semelhantes. Isso se justifica em razão de ser o mesmo teste aplicado em ambas as configurações do protótipo de TEGea.

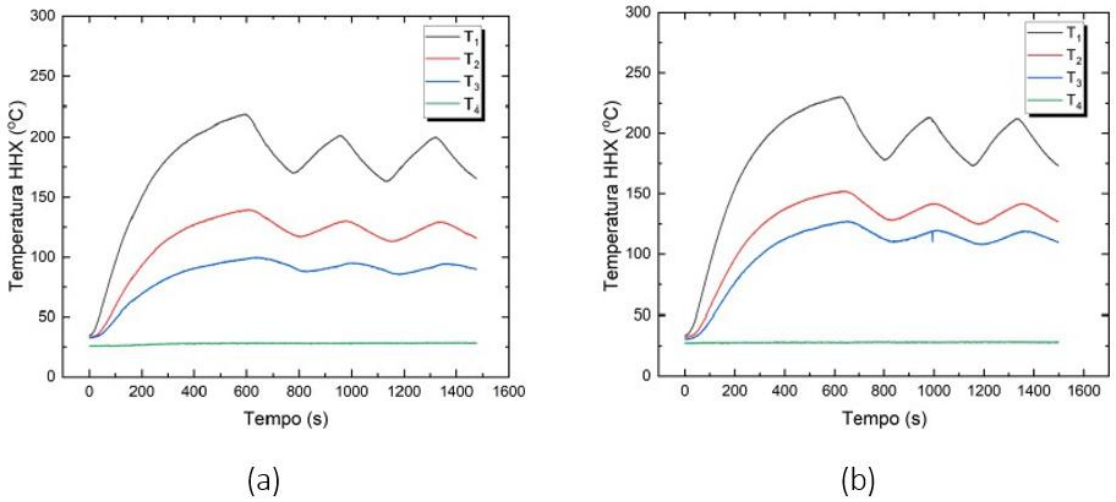
A Figura 3 mostra perfis de temperatura na superfície externa do permutador de calor HHX- 000 do protótipo de TEGea funcionando com potência de aquecimento em carga parcial e velocidade de escoamento V2.

Analisando a Figura 3 observa-se que a queda de temperatura na direção do escoamento do ar quente no HHX-000 é cerca de (T1-T2) = 100 ºC e (T2-T3) = 30 ºC, o que significa que a potência elétrica gerada dos módulos termoelétricos tende a diminuir na direção do escoamento, conforme prescrito na literatura especializada.

Neste caso, o pico máximo de temperatura na superfície externa do HHX-000 é cerca de 225 ºC, não superando o valor recomendado pelo fabricante para operação intermitente dos módulos termoelétricos, sem comprometimento da sua integridade estrutural.

Em uma análise comparativa da Figura 3 (a) e (b), constata-se que os perfis de temperatura (T1, T2, T3 e T4) apresentam comportamentos similares, uma vez que foi aplicado o mesmo teste para as configurações do TEGea com TEM HZ-14HV e HZ-14.

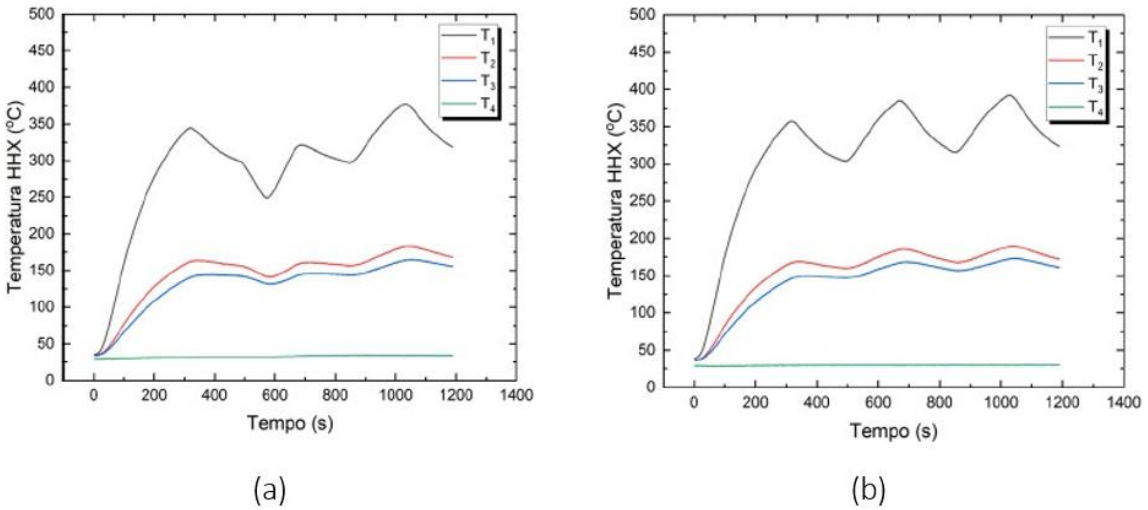
FIGURA 3. Perfis de temperatura no permutador de calor HHX-000 do TEGea em carga parcial e módulos termoelétricos: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV



Fonte: Autor (2025).

Os perfis de temperatura da superfície externa do permutador de calor HHX-150 do TEGea são mostrados na Figura 4 para o regime de plena carga e velocidade de escoamento V1.

FIGURA 4. Perfis de temperatura no permutador de calor HHX-150 do TEGea em plena carga e módulos termoelétricos: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV



Fonte: Autor (2025).

Das curvas da Figura 4 percebe-se que a diferença média de temperatura na direção do escoamento do ar quente no HHX-150 é cerca de (T1-T2) = 150 ºC e (T2-T3) = 20 ºC, indicando que a potência elétrica gerada dos módulos termoelétricos tende a diminuir na direção do escoamento, conforme consolidado na literatura especializada.

A temperatura máxima observada na superfície externa do HHX-150 é cerca de 350 ºC, não excedendo o valor recomendado pelo fabricante para operação intermitente dos módulos termoelétricos, garantindo assim a integridade estrutural destes componentes e uma operação segura.

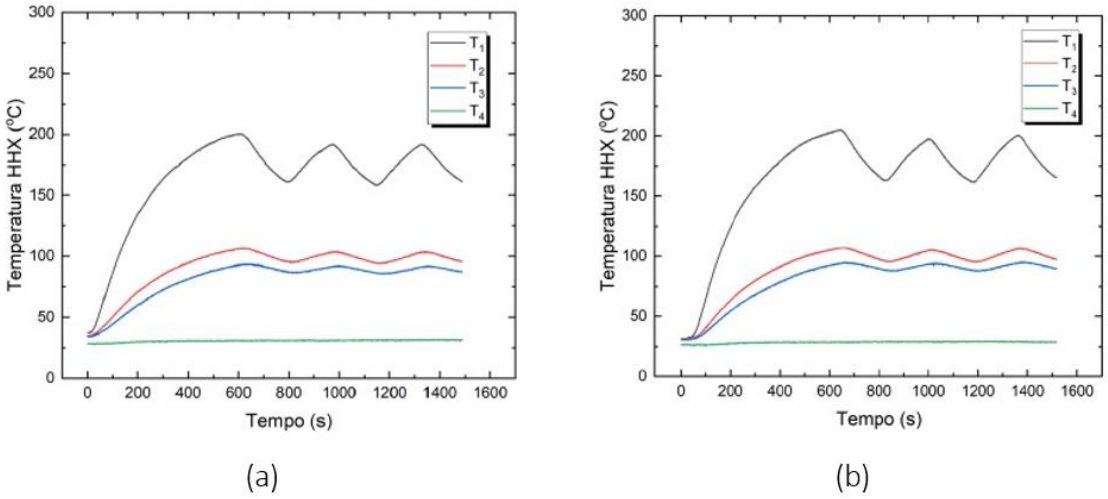
Fazendo-se uma análise comparativa da Figura 4 (a) e (b), verifica-se que os perfis de temperatura (T1, T2, T3 e T4) são idênticos em quase toda extensão do teste do TEGea, exceto na faixa de tempo entre 400 e 700 segundos.

Neste intervalo de tempo, constata-se pequenas distorções no perfil de temperatura T1 e isso pode ser atribuído à instabilidade momentânea da tensão elétrica da rede que alimenta a resistência de aquecimento da bancada experimental de teste do TEGea.

Portanto, uma variação nos parâmetros da rede elétrica que alimenta a resistência elétrica de aquecimento do ar na bancada experimental de TEGea, tem reflexos nos perfis de temperatura do permutador de calor da fonte quente.

A Figura 5 apresenta os perfis de temperatura na superfície externa do permutador de calor HHX-150 do protótipo de gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea) funcionando com potência de aquecimento de carga parcial e velocidade de escoamento V2.

FIGURA 5. Perfis de temperatura no permutador de calor HHX-150 do TEGea em carga parcial e módulos termoelétricos: (a) HZ-14 (b) HZ-14HV



Fonte: Autor (2025).

Na Figura 5 verifica-se que a diferença média de temperatura na direção do escoamento do ar quente no HHX-150 é cerca de (T1-T2) = 75 ºC e (T2-T3) = 15 ºC, o que significa que a potência elétrica gerada dos módulos termoelétricos tende a diminui na direção do escoamento, conforme consolidado na literatura especializada.

A temperatura máxima observada na superfície externa do HHX-150 é cerca de 200 ºC, não excedendo o valor recomendado pelo fabricante para operação intermitente dos módulos termoelétricos, garantindo assim a integridade estrutural destes componentes e uma operação segura.

Fazendo-se uma análise comparativa da Figura 5 (a) e (b), verifica-se que os perfis de temperatura (T1, T2, T3 e T4) são idênticos em toda extensão do teste do TEGea uma vez que as condições de teste do TEGea são iguais, exceto os módulos termoelétricos que aplicado em cada caso que pode ser do tipo HZ-14V ou HZ-14HV.

Esta forte semelhança dos perfis de temperatura (T1, T2, T3 e T4) do HHX150 também decorre da estabilidade de energia elétrica que alimenta a resistência de aquecimento da bancada de teste do TEGea e da qualidade do sistema de controle da potência de aquecimento do ar que consegue reproduzir fielmente os parâmetros operacionais de teste do TEGea.

Os resultados demonstram que o uso de permutadores com microcanais corrugados e aletas internas contribui significativamente para a intensificação da transferência de calor, reduzindo perdas térmicas e aumentando a densidade de potência elétrica gerada.

A resposta rápida do sistema às variações térmicas reforça sua viabilidade para aplicações em veículos que operam em ciclos urbanos e rodoviários. Além disso, a estabilidade elétrica dos módulos sob condições dinâmicas indica robustez operacional, fator essencial para integração em sistemas embarcados. A metodologia experimental adotada, aliada à modelagem computacional precisa, oferece uma base sólida para futuras otimizações do TEGea.

4 CONCLUSÕES

A avaliação experimental do gerador termoelétrico de exaustão automotiva (TEGea), operando em regime transiente com módulos HZ-14V e HZ-14HV, demonstrou desempenho consistente e promissor quanto à conversão termoelétrica e à estabilidade térmica do sistema. A utilização de controle automatizado via Arduino para gerenciamento da potência de aquecimento e da velocidade de escoamento do ar permitiu a reprodução fiel dos testes definidos na Tabela 1, assegurando confiabilidade aos dados adquiridos sem interferência humana.

A análise dos perfis de temperatura nos permutadores de calor HHX-000 e HHX-150, sob diferentes regimes de carga e velocidades de escoamento, revelou quedas térmicas significativas na direção do fluxo de ar quente, confirmando a tendência de redução da potência elétrica gerada ao longo do escoamento, conforme consolidado na literatura especializada. As temperaturas máximas observadas, variando entre 200 °C e 375 °C, permaneceram dentro dos limites recomendados pelos fabricantes dos módulos termoelétricos, garantindo a integridade estrutural dos componentes e a segurança operacional do sistema.

As figuras analisadas evidenciam comportamentos térmicos semelhantes entre os módulos HZ-14 e HZ-14HV, com pequenas variações atribuídas à instabilidade momentânea da rede elétrica. A estabilidade dos perfis térmicos e a repetibilidade dos testes indicam a eficácia do sistema de controle térmico e da bancada experimental desenvolvida.

Os resultados confirmam que o uso de permutadores com microcanais corrugados e aletas internas intensifica a transferência de calor, reduz perdas térmicas e eleva a densidade de potência elétrica

gerada. A rápida resposta do sistema às variações térmicas e a robustez dos módulos sob condições dinâmicas reforçam a viabilidade do TEGea para aplicações embarcadas em veículos automotivos, especialmente em ciclos urbanos e rodoviários.

Por fim, a integração entre modelagem computacional precisa e validação experimental sólida oferece uma base confiável para futuras otimizações do TEGea, contribuindo para o avanço da tecnologia de recuperação energética no setor automotivo e para o desenvolvimento de soluções sustentáveis em mobilidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba (PPGEM/UFPB)

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

CHEN, Y., LIU, H., & XU, J. (2021). Thermoelectric performance optimization of automotive exhaust heat recovery systems. Applied Thermal Engineering, 185, 116397.

LI, M., ZHANG, Y., & HUANG, Q. (2023). Advances in Bi_2Te_3-based thermoelectric materials for low-grade heat recovery. Journal of Materials Science & Technology, 145, 12–24.

SILVA, R. A., BARBOSA, C. R. F., & LIMA, R. O. (2024). Experimental analysis of corrugated microchannel heat exchangers for thermoelectric applications. Energy Conversion and Management, 289, 117045.

WANG, T., ZHAO, L., & CHEN, G. (2022). Design and optimization of heat exchangers for automotive thermoelectric generators. Renewable Energy, 195, 1345–1356.

ZHANG, K., LI, J., & ZHOU, D. (2022). Transient thermal behavior of thermoelectric generators under dynamic engine conditions. Energy Reports, 8, 456–468.

ZHAO, X., TANG, Y., & REN, Z. (2023). Thermoelectric energy harvesting from vehicle exhaust: A review of recent developments. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 169, 113072.

LI, Y., CHEN, H., & WANG, J. (2022). Transient thermal analysis of thermoelectric generators under variable exhaust conditions. Applied Thermal Engineering, 215, 118963. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118963

SILVA, R. A., BARBOSA, C. R. F., & LIMA, R. O. (2024). Experimental analysis of corrugated microchannel heat exchangers for thermoelectric applications. Energy Conversion and Management, 289, 117045. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.117045

Zhang, L., Xu, M., & Zhao, D. (2023). Performance optimization of Bi_2Te_3-based thermoelectric modules for automotive waste heat recovery. Renewable Energy, 205, 1325–1336. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.045

Capítulo 18

10.37423/251110462

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA PERFORMANCE TERMODINÂMICA DE UMA MÁQUINA DE GELO FUNCIONANDO COM FLUIDO REFRIGERANTE R437A

Naiara Nunes de Oliveira
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Wertson da Silva Resende
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Rafael Matos de Souza
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

Cleiton Rubens Formiga Barbosa
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica

RESUMO

Este estudo apresenta uma análise experimental da performance termodinâmica de uma máquina de gelo operando com o fluido refrigerante R437A, em substituição ao R134a, por meio de um procedimento de drop-in. O objetivo foi avaliar o comportamento do sistema frente à troca do gás, com foco nas variáveis de temperatura, pressão e potência elétrica ao longo do ciclo de refrigeração. Para isso, foram instalados sensores de pressão nos lados de alta e baixa do circuito frigorífico, além de termopares tipo K em pontos estratégicos para monitoramento térmico. O consumo energético foi medido com auxílio de um wattímetro conectado ao compressor hermético. Os dados coletados indicam que o R437A apresentou desempenho compatível com o R134a, sem comprometer a eficiência operacional do equipamento. As temperaturas de evaporação e condensação, bem como a potência elétrica demandada, mantiveram-se dentro dos limites esperados para uma operação estável e eficiente. Os resultados confirmam a viabilidade técnica do R437A como alternativa ao R134a em sistemas de produção de gelo, contribuindo para a substituição de fluidos com menor impacto ambiental e maior conformidade com regulamentações internacionais.

PALAVRAS-CHAVE: MÁQUINA DE GELO, R437A, R134a , DROP-IN, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

1 INTRODUÇÃO

As máquinas automáticas de gelo têm evoluído significativamente em termos de eficiência e confiabilidade operacional. Projetadas para operar continuamente, essas máquinas incorporam avanços tecnológicos que permitem alto desempenho com menor consumo de recursos, como a redução de até 40% no uso de água, contribuindo para a sustentabilidade do processo (Leal, 2016).

Essa evolução está diretamente relacionada ao desenvolvimento de sistemas eletrônicos embarcados, melhorias nos ciclos de refrigeração e à adoção de novos fluidos refrigerantes com menor impacto ambiental (Stoeker e Jabardo, 2002; Zhou et al., 2024).

O processo de produção de gelo em máquinas automáticas é cíclico e envolve etapas como enchimento da bandeja, resfriamento, congelamento e extração do gelo (Berno, 2020). Após a formação, o gelo é despejado em um reservatório, garantindo disponibilidade contínua.

Historicamente, a produção de gelo passou de métodos rudimentares, como os Yakhchals (resfriadores evaporativos) persas e potes egípcios, para sistemas industriais e domésticos.

A partir da década de 1950, os refrigeradores passaram a incorporar máquinas automáticas, e nos anos 1960, tecnologias como evaporadores no-frost e ventilação forçada consolidaram o icemaker como componente essencial (Berno, 2020).

A Figura 1 mostra a máquina de gelo em cubo (capacidade de 50 kg de gelo/dia) do laboratório de energia da UFRN objeto do presente estudo.

FIGURA 1. Máquina de gelo do laboratório de energia/UFRN.



Fonte: Autor (2025).

No contexto industrial, o gelo desempenha papel fundamental na conservação de alimentos, especialmente pescados, retardando a ação de microrganismos deterioradores. Além disso, é amplamente utilizado em setores como bebidas, química e farmacêutica, para controle térmico em processos e transporte (Leal, 2016; Stoeker e Jabardo, 2002).

A eficiência energética na produção de gelo é, portanto, um fator crítico, tanto para a viabilidade econômica quanto para a conformidade ambiental.

Diante da necessidade de substituir fluidos refrigerantes com alto potencial de aquecimento global, este estudo propõe uma análise experimental da performance termodinâmica de uma máquina de gelo operando com o fluido R437A, em substituição ao R134a.

1.1 Objetivos

Essa pesquisa tem como objetivo geral da pesquisa foi avaliar experimentalmente o desempenho termodinâmico de uma máquina automática de gelo operando com o fluido refrigerante R437A, em substituição ao R134a, por meio da análise de variáveis como temperatura, pressão e potência elétrica ao longo do ciclo de refrigeração.

Os objetivos específicos são:

1. Realizar o procedimento de substituição direta (drop-in) do fluido R134a pelo R437A em uma máquina de gelo comercial.

2. Monitorar as temperaturas em pontos estratégicos do sistema utilizando termopares tipo K.

3. Medir as pressões nos lados de alta e baixa do circuito frigorífico com sensores específicos.

4. Avaliar o consumo energético do compressor hermético por meio de um wattímetro.

5. Comparar os dados obtidos com os parâmetros operacionais originais do sistema para verificar a viabilidade técnica do R437A.

1.2 Justificativas

A crescente demanda por soluções sustentáveis na área de refrigeração tem impulsionado a substituição de fluidos refrigerantes com alto potencial de aquecimento global (GWP), como o R134a, por alternativas ambientalmente mais seguras. O R437A surge como uma opção viável, compatível com sistemas existentes e com menor impacto ambiental (Majeed et al., 2021; Zhou et al., 2024).

Além disso, as máquinas automáticas de gelo desempenham papel essencial em diversos setores industriais, como o alimentício, químico e farmacêutico, onde o controle térmico é fundamental para a qualidade e segurança dos produtos (Leal, 2016; Stoeker e Jabardo, 2002).

A eficiência energética desses equipamentos é diretamente influenciada pelo tipo de fluido refrigerante utilizado, tornando relevante a investigação de alternativas que mantenham ou melhorem o desempenho operacional.

Este estudo contribui para o avanço técnico e ambiental da refrigeração comercial, oferecendo dados experimentais que podem subsidiar decisões industriais e políticas públicas voltadas à sustentabilidade.

É importante ressaltar que o gelo deve ser produzido com água potável e controle sanitário, além de possuir eficiência energética no processo, que é essencial para a sustentabilidade da operação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A crescente demanda por sistemas de refrigeração mais eficientes e ambientalmente sustentáveis tem impulsionado a busca por alternativas aos fluidos refrigerantes tradicionais, como o R134a, que possui alto potencial de aquecimento global (GWP ≈ 1300) (Hmood et al., 2021).

Nesse contexto, o fluido R437A surge como uma opção viável para substituição direta (drop- in), apresentando propriedades termodinâmicas semelhantes e menor impacto ambiental (Cerveira, 2015).

O presente estudo tem como objetivo avaliar experimentalmente o desempenho de uma máquina de gelo comercial operando com R437A em substituição ao R134a, sem modificações estruturais no sistema. A metodologia adotada baseia-se em análises térmicas e energéticas durante os ciclos

automáticos de produção de gelo, considerando parâmetros como temperatura, pressão, consumo elétrico e tempo de formação dos cubos.

A escolha da máquina de gelo EVEREST como objeto de estudo se justifica por sua ampla aplicação comercial e por operar com ciclos automatizados que garantem eficiência e higiene (Everest, 2023). Além disso, a substituição do fluido refrigerante foi realizada conforme recomendações técnicas para procedimentos de drop-in, respeitando compatibilidade com materiais e lubrificantes do sistema (Hmood et al., 2021; Teggar et al., 2022).

Essa abordagem experimental contribui para o avanço das pesquisas sobre refrigeração sustentável, alinhando-se às diretrizes internacionais de redução de gases de efeito estufa e promovendo soluções práticas para o setor de refrigeração comercial (Lilley et al., 2023).

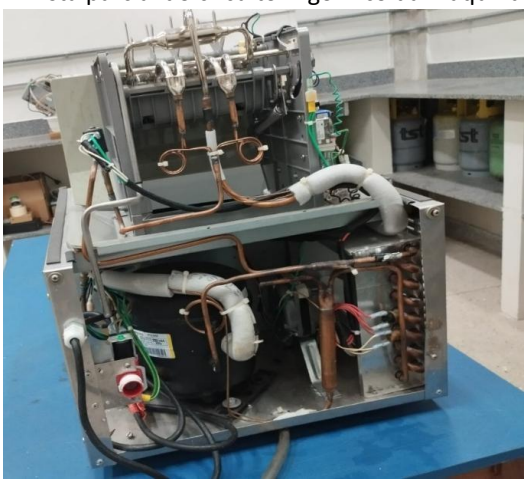
2.1 Descrição do Sistema

O sistema de refrigeração analisado opera em ciclo fechado de compressão de vapor, composto por compressor, condensador, tubo capilar, evaporador e acessórios como filtro secador e acumulador de sucção. O compressor succiona o fluido refrigerante do evaporador, comprime-o e o envia ao condensador, onde ocorre a troca de calor com o ambiente externo. Após a condensação, o fluido passa pelo tubo capilar, reduzindo sua pressão e temperatura, e retorna ao evaporador, onde absorve calor do sistema, promovendo o resfriamento (Embraco, 2019; Teggar et al., 2022).

A máquina de gelo utilizada foi o modelo EVEREST, equipada originalmente com o compressor hermético Embraco FF85HBK, operando com o fluido R134a. Para este estudo, foi realizado um procedimento de drop-in, substituindo o R134a pelo R437A, fluido alternativo com menor potencial de aquecimento global (Hmood et al., 2021).

A Figura 2 mostra parcialmente o circuito frigorífico da máquina de gelo do laboratório de energia da UFRN objeto desse estudo.

FIGURA 2. Vista parcial do circuito frigorífico da máquina de gelo.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 3 apresenta a máquina de gelo do laboratório de energia da UFRN em operação de drop-in do R134a para R437A, com balança digital da Mastercool medindo a carga de R437A que é transferida do cilindro de R437A para o equipamento.

FIGURA 3. Máquina de gelo do LabEnergia/UFRN em operação de drop-in.



Fonte: Autor (2025).

2.2 Procedimentos Experimentais

O experimento foi conduzido em ambiente controlado, com monitoramento das seguintes variáveis operacionais:

- Temperaturas: medidas com termopares tipo K instalados em pontos estratégicos do sistema (evaporador, condensador, entrada e saída do compressor).

- Pressões: registradas por sensores digitais nos lados de alta e baixa pressão do circuito frigorífico.

- Potência elétrica: medida com wattímetro conectado ao compressor, permitindo avaliar o consumo energético durante os ciclos.

A máquina realiza ciclos automáticos de limpeza, formação e desprendimento de gelo, conforme descrito no manual técnico (Everest, 2023). O ciclo inicia com a limpeza da cuba, seguida do enchimento com água, congelamento ao redor do evaporador e desprendimento por injeção de gás quente. O termostato do depósito controla o nível de gelo armazenado, desligando o sistema quando o reservatório está cheio e religando-o conforme a demanda.

2.3 Avaliação da Performance

A performance foi avaliada com base em:

- Estabilidade das temperaturas de condensação e evaporação
- Consumo energético por ciclo
- Tempo de formação e desprendimento de gelo
- Comparação com os parâmetros originais do sistema operando com R134a

A análise buscou verificar a viabilidade técnica do R437A como substituto direto (drop-in), sem necessidade de modificações estruturais, conforme estudos recentes sobre refrigerantes alternativos (Cerveira, 2015; Lilley et al., 2023).

A máquina de produção de gelo modelo EVEREST é composta por um gabinete com isolamento térmico, que abriga o evaporador, e por uma unidade condensadora formada pelo compressor e outros elementos do sistema de refrigeração.

O compressor dessa máquina de gelo, é um Embraco modelo FF85HBK que funciona com o gás R134a que para esse estudo foi feito um drop-in com a substituição desse gás por um R437A.

De acordo com o manual da máquina de gelo Everest (2023), o funcionamento de uma máquina de gelo é composto por ciclos automáticos que garantem higiene, eficiência e produção contínua.

Tudo começa no ciclo de limpeza, que ocorre sempre que o equipamento é ligado, seja pela rede elétrica, pelo termostato do depósito ou após uma queda de energia. Nesse momento, a máquina

descarta a água que permaneceu na cuba plástica durante o desligamento, evitando contaminações. Além disso, quando a cuba está na posição máxima inferior, a válvula solenoide de gás é acionada, removendo eventuais resíduos de gelo.

Após a limpeza, inicia-se o ciclo de formação de gelo. A cuba plástica se enche de água até acionar um sensor que indica o nível ideal. Com o sistema de refrigeração em funcionamento, a água congela ao redor do evaporador, formando os cubos de gelo. Quando atingem a espessura adequada, um motomicrorredutor sinaliza o fim do ciclo, e a máquina mantém o congelamento por mais alguns segundos para otimizar a produção.

Em seguida, ocorre o ciclo de desprendimento de gelo. A cuba desce e descarta a água residual, evitando que o termostato do depósito desligue a máquina indevidamente. Em seguida, o sistema injeta gás quente no evaporador, desprendendo os cubos formados. Caso ainda haja gelo preso, o tempo de desprendimento é estendido até que tudo seja liberado. Por fim, a cuba retorna à posição superior e um novo ciclo de produção é iniciado.

Por último, o termostato do depósito controla o nível de gelo armazenado. Quando o depósito está cheio, ele desliga automaticamente a máquina, religando-a quando a quantidade de gelo diminui. Esse processo garante economia de energia e produção contínua conforme a demanda.

Assim, o sistema opera de forma automatizada, realizando ciclos de limpeza, produção e liberação do gelo, mantendo a qualidade do produto e a segurança do equipamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A substituição do fluido refrigerante R134a pelo R437A foi avaliada ao longo de quatro ciclos completos de produção de gelo, com monitoramento das variáveis de temperatura, pressão e potência elétrica.

O R437A, por ser uma mistura projetada para retrofit, apresenta propriedades termodinâmicas semelhantes ao R134a, mas com menor potencial de aquecimento global (GWP ≈ 1684), o que o torna uma alternativa mais sustentável (Nascimento et al., 2014; Duarte et al., 2017).

3.1 Desempenho Termodinâmico

As temperaturas registradas nos ciclos (Figuras 4, 6, 8 e 10) permaneceram estáveis durante as etapas de congelamento, com variações mínimas entre os ciclos. Essa constância indica que o R437A manteve o processo dentro das condições ideais para formação dos cubos de gelo, sem comprometer a eficiência térmica do sistema.

Estudos anteriores também apontam que o R437A apresenta desempenho superior em baixas rotações de compressor, com COP (coeficiente de performance) competitivo em relação ao R134a (Miranda, 2017; Krysanov et al., 2020).

3.2 Potência Elétrica e Eficiência Energética

As medições de potência elétrica (Figuras 5, 7, 9 e 11) mostraram variações coerentes com as fases do ciclo, especialmente durante o congelamento e desprendimento do gelo. Não foram observados picos abruptos de consumo que indicassem sobrecarga do compressor, reforçando a estabilidade operacional do sistema.

Segundo Fricke et al. (2023), cerca de 30% da energia em sistemas de produção de gelo é consumida no processo de desprendimento, o que torna relevante a análise da eficiência energética nessa etapa. A constância nos valores de potência ao longo dos ciclos demonstra que o equipamento manteve bom desempenho energético, assegurando economia de energia e funcionamento seguro mesmo em operação contínua.

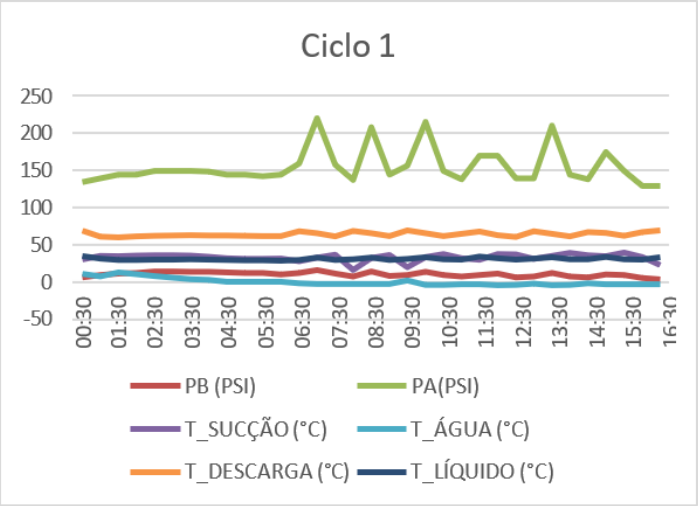
Essa estabilidade é compatível com os resultados obtidos por Zhao et al. (2025), que destacam a importância da temperatura de evaporação e da eficiência adiabática na performance de sistemas de produção de gelo.

3.3 Comparação com o R134a

Embora o R437A apresente pressões de operação ligeiramente diferentes, os resultados obtidos neste estudo indicam que sua substituição não comprometeu o desempenho da máquina de gelo. A eficiência energética foi mantida, e o comportamento do sistema foi estável em todos os ciclos analisados. Isso confirma a viabilidade técnica do R437A como alternativa ao R134a, conforme também demonstrado por Duarte et al. (2017) em sistemas de bomba de calor.

As Figuras apresentadas abaixo correspondem aos quatro ciclos de operação da máquina de gelo utilizando exclusivamente o gás refrigerante R437A

FIGURA 4. Primeiro ciclo de medição.



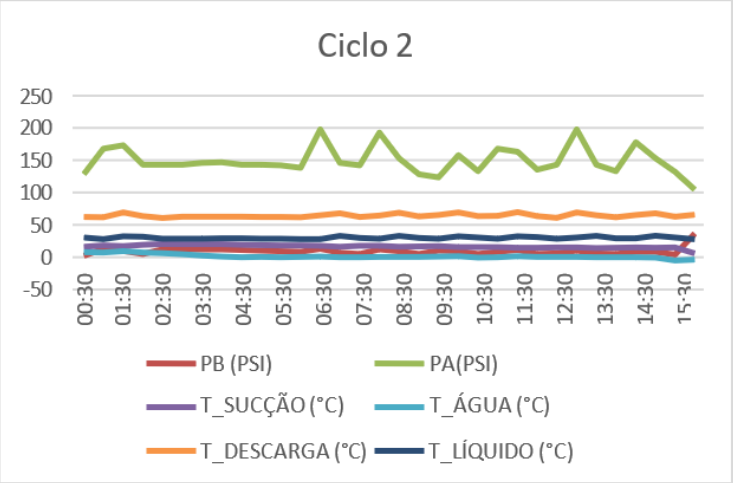
Fonte: Autor (2025)

FIGURA 5. Primeiro ciclo de medição de potências.

VATTÍMETRO			
POT. EFETIVA [W]	POT. APARENTE [VA]	POT. REATIVA [VAr]	FATOR DE POTÊNCIA
263,3	441,3	353,4	0,59
286,7	458,5	354,8	0,62
299,2	462,7	352,4	0,64
305,5	469,3	352,8	0,65
310,6	468,9	351,8	0,66
307,3	466,7	351,8	0,65
304,6	464,5	352,6	0,65
300,7	462,7	352,6	0,64
298,8	462,7	350,6	0,64
294,1	458,2	350,6	0,64
290,3	455,4	348,6	0,63
286,1	451	351,2	0,63
266,4	429,3	328,4	0,63
341	486,2	353	0,65
273,5	440,3	350,4	0,6
233,4	402,7	323,2	0,58
331,1	482,4	352,8	0,67
268,3	440,7	350,8	0,6
259,1	418,8	326,8	0,62
318	469,1	351,8	0,66
273,1	442,8	351,6	0,61
266,6	440,9	316,6	0,6
258,4	418,6	321,2	0,62
289,9	449,2	351,4	0,63
259,6	438,5	353,2	0,59
231	399,2	322	0,58
309,9	462,9	353,8	0,65
263,7	439,1	352,2	0,59
233,2	403,8	325	0,58
262	469,7	354	0,63
259,2	436,9	352,2	0,59
352,6	215,3	385,9	0,57
257,8	435,5	316,6	0,59
285,7	444,2	329,4	0,67
318,3	465,1	352,2	0,59

Fonte: Autor (2025).

FIGURA 6. Segundo ciclo de medição.



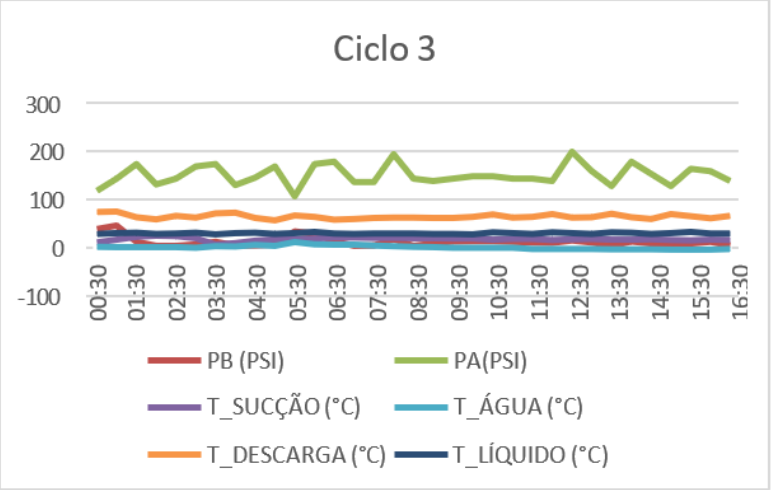
Fonte: Autor (2025).

FIGURA 7. Segundo ciclo de medição de potências

VATTÍMETRO			
POT. EFETIVA [W]	POT. APARENTE [VA]	POT. REATIVA [VAr]	FATOR DE POTÊNCIA
257,8	435,5	316,6	0,58
285,7	444,2	329,4	0,68
318,3	465,1	352,2	0,58
260,5	444	352,2	0,63
296,7	463,7	354	0,64
300	463,7	353,4	0,64
300,6	462,7	351,8	0,64
300,6	460,3	350,4	0,64
292,8	456	349,4	0,63
289,5	453,8	348,8	0,63
283,1	449,2	349	0,62
278,1	398,8	318,2	0,67
294,2	491	352,8	0,6
267,4	436,3	348,6	0,59
258,9	438,5	316,4	0,59
273,3	427,1	359	0,64
277,8	440,5	349,6	0,62
255,1	43,9	314,6	0,58
259,9	418,8	321,8	0,62
284,6	445,4	348,2	0,62
257,5	439,1	354,4	0,59
251,6	413,2	324,4	0,61
291,3	452,8	353,6	0,63
255,1	435,5	352,8	0,58
237,3	402	322,2	0,59
302,3	461,3	352,4	0,55
260,8	434,9	352	0,59
253,2	383,8	317,2	0,58
248	408,1	322,6	0,61
266,9	436,1	350,4	0,61
262,7	497,9	372,4	0,52
330,9	475,3	335,2	0,7

Fonte: Autor (2025).

FIGURA 8. Terceiro ciclo de medição.



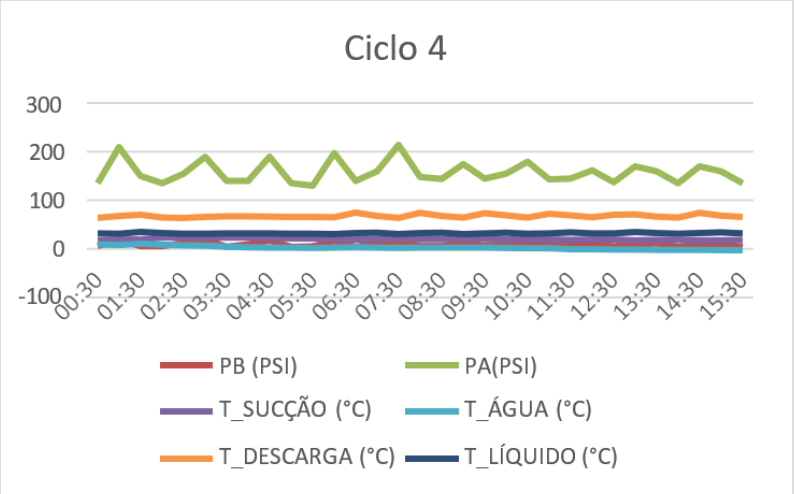
Fonte: Autor (2025).

FIGURA 9. Terceiro ciclo de medição de potências.

VATTÍMETRO			
POT. EFETIVA [W]	POT. APARENTE [VA]	POT. REATIVA [VAr]	FATOR DE POTÊNCIA
257,8	435,5	316,6	0,58
285,7	444,2	329,4	0,68
318,3	465,1	352,2	0,58
260,5	444	352,2	0,63
296,7	463,7	354	0,64
300	463,7	353,4	0,64
300,6	462,7	351,8	0,64
300,6	460,3	350,4	0,64
292,8	456	349,4	0,63
289,5	453,8	348,8	0,63
283,1	449,2	349	0,62
278,1	398,8	318,2	0,67
294,2	491	352,8	0,6
267,4	436,3	348,6	0,59
258,9	438,5	316,4	0,59
273,3	427,1	359	0,64
277,8	440,5	349,6	0,62
255,1	43,9	314,6	0,58
259,9	418,8	321,8	0,62
284,6	445,4	348,2	0,62
257,5	439,1	354,4	0,59
251,6	413,2	324,4	0,61
291,3	452,8	353,6	0,63
255,1	435,5	352,8	0,58
237,3	402	322,2	0,59
302,3	461,3	352,4	0,55
260,8	434,9	352	0,59
253,2	383,8	317,2	0,58
248	408,1	322,6	0,61
266,9	436,1	350,4	0,61
262,7	497,9	372,4	0,52
330,9	475,3	335,2	0,7

Fonte: Autor (2025).

FIGURA 10. Quarto ciclo de medição.



Fonte: Autor (2025).

FIGURA 11. Quarto ciclo de medição de potências.

VATTÍMETRO			
POT. EFETIVA [W]	POT. APARENTE [VA]	POT. REATIVA [VAr]	FATOR DE POTÊNCIA
357,4	493	334,4	0,73
396,3	512,5	325,6	0,7
273,9	438,5	353	0,6
242,4	426,2	352,4	0,56
213,8	390,8	322,8	0,54
293,3	468,6	376,4	0,57
273,9	438,8	353	0,7
242,4	426,2	352,4	0,74
213,8	390,8	322,8	0,63
293,3	468,6	376,4	0,58
328,1	467,1	331,2	0,7
362,4	460	323,6	0,74
314,3	458,7	351	0,62
250,1	430	352	0,58
239,4	414,5	329,2	0,63
335,4	478	352,6	0,65
253,7	432,1	350,4	0,58
282,2	453,8	356,4	0,61
301,1	464,7	350,2	0,65
304,7	462,7	349,6	0,65
299,7	460,5	348,4	0,64
292,8	456	350,4	0,64
286,1	451,6	350,2	0,63
281,3	447,4	348,8	0,62
294,9	487,7	353,8	0,68
272,2	439,5	352,8	0,59
213,9	386,6	321,6	0,56
276,7	430,8	359	0,67
270,3	497,4	353,2	0,57
242	380,6	320,4	0,54
251,4	413,6	32,6	0,63
283,4	447,2	354,6	0,6
239,4	445,6	351,6	0,57
235,7	408,8	346,6	0,6
312,2	466,4	353,4	0,64

Fonte: Autor (2025).

Os gráficos e tabelas apresentados indicam parâmetros fundamentais, como variação de temperatura e potência elétrica, que permitem avaliar o comportamento do sistema durante a produção de gelo.

Observa-se que as temperaturas, nas figuras 4, 6, 8 e 10, permaneceram estáveis ao longo das etapas, garantindo a formação adequada dos cubos e evidenciando que o fluido refrigerante manteve o processo dentro das condições ideais para o congelamento.

As medições de potência, apresentadas nas figuras 7,5,9 e 11, mostram variações coerentes com as fases de congelamento e desprendimento do gelo. Não foram identificados picos abruptos de consumo que pudessem indicar sobrecarga do compressor, o que reforça a eficiência operacional do sistema com o R437A.

A constância nos valores ao longo dos ciclos demonstra que o equipamento manteve bom desempenho energético, assegurando economia de energia e funcionamento seguro mesmo em operação contínua.

De forma geral, os quatro ciclos apresentaram comportamento semelhante, sem oscilações significativas, o que evidencia a estabilidade do sistema e a confiabilidade do R437A para esse tipo de aplicação.

4 CONCLUSÕES

A análise experimental da máquina de gelo operando com o fluido refrigerante R437A, em substituição ao R134a, demonstrou resultados satisfatórios em termos de estabilidade térmica, eficiência energética e confiabilidade operacional.

Os quatro ciclos avaliados apresentaram comportamento consistente, com temperaturas e pressões dentro dos limites esperados para o processo de formação e desprendimento de gelo, sem oscilações significativas ou picos de potência que indicassem sobrecarga do sistema.

A constância dos parâmetros ao longo dos ciclos confirma que o R437A é capaz de manter a capacidade de refrigeração necessária para a produção contínua e de qualidade dos cubos de gelo. Além disso, o desempenho energético observado reforça a viabilidade técnica do procedimento de drop-in, sem necessidade de modificações estruturais no equipamento.

Do ponto de vista ambiental, a substituição do R134a pelo R437A representa um avanço significativo, considerando o menor potencial de aquecimento global do novo fluido. Essa característica torna o

R437A uma alternativa eficaz para atender às exigências atuais de sustentabilidade na refrigeração comercial, alinhando-se às diretrizes internacionais de redução de gases de efeito estufa.

Portanto, os resultados obtidos neste estudo validam o uso do R437A como substituto direto do R134a em máquinas automáticas de gelo, contribuindo para a modernização de sistemas existentes com ganhos operacionais e ambientais relevantes.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR ISO 817:2019 – Refrigerantes – Designação e classificação de segurança. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2019.

BITTENCOURT, M. A.; SILVA, R. M.; OLIVEIRA, J. P. Análise energética de sistemas de refrigeração com fluidos alternativos. Revista Brasileira de Engenharia Mecânica, v. 39, n. 2, p. 145–158, 2023.

DUARTE, M. V.; PIRES, L. C.; SILVA, P. D.; GASPAR, P. D. Experimental comparison between R409A and R437A performance in a heat pump unit. Open Engineering, v. 7, n. 1, p. 13–22, 2017. https://doi.org/10.1515/eng-2017-0011

ENCIT – Congresso Nacional de Engenharia Térmica, 2014. https://arquivos.info.ufrn.br/arquivos/20141250248616216163 1ee1e659cd37e/ENCIT2014_249.pdf

FRICKE, B.; MERRILL, W.; OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. ICE Energy-Efficiency Improvement. U.S. Department of Energy, 2023. https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/ice-energy-efficiency-improvement

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021.

KRYSANOV, K. S.; BELUKOV, S. V.; PRIBYTKOVSKIY, N. V.; DIBIRASULAEV, D. M. Efficiency of Cold Generation Cycles using Various Refrigerants. Chemical and Petroleum Engineering, v. 56, p. 646–653, 2020. https://doi.org/10.1007/s10556-020-00822-8

MACHADO, L. C.; SOUZA, R. M. Substituição de fluidos refrigerantes em sistemas comerciais: estudo de viabilidade técnica e ambiental. Anais do CONEMI, v. 1, p. 88–95, 2022.

MIRANDA, S. F. T. M. Análise termodinâmica de um refrigerador funcionando com diferentes fluidos refrigerantes sintéticos. 2017. 52f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do RN, Natal. https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/24555

NASCIMENTO, B. D. A.; CAVALCANTI, T. M.; LIMA, L. H. P.; BARBOSA, C. R. F.; FONTES, F. A. O. Comparative analysis of energy efficiency of an automotive air conditioner with R134a and R437A.

SANTOS, F. J.; ALMEIDA, T. R. Desempenho térmico de máquinas de gelo utilizando refrigerantes alternativos. Revista de Tecnologia Aplicada, v. 27, n. 1, p. 33–42, 2024.

WIKIPÉDIA. Yakhchal – Wikipédia, a enciclopédia livre. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Yakhchal. Acesso em: 05 ago. 2025.

ZHAO, B.; LI, J.; ZHOU, C.; HUANG, Z.; XIE, N. Thermodynamic Performance and Parametric Analysis of an Ice Slurry-Based Cold Energy Storage System. Energies, v. 18, n. 15, p. 4158, 2025. https://doi.org/10.3390/en18154158

Capítulo 19

10.37423/251110466

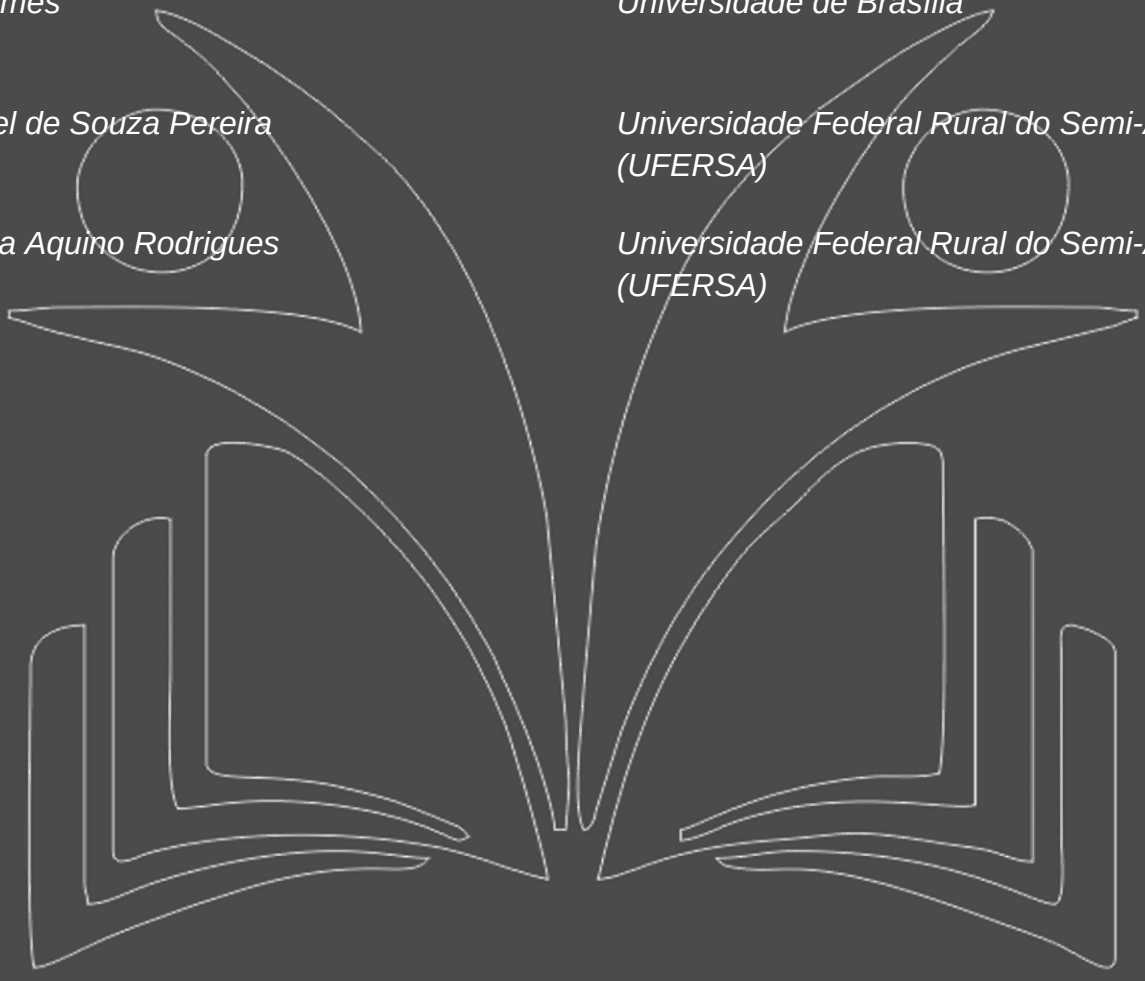
METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MÚLTIPLAS TRINCAS EM MATERIAIS FRÁGEIS

Renata de Oliveira Marinho — *Centro Universitário de Patos - UNIFIP*

Gilberto Gomes — *Universidade de Brasília*

Vitor Manoel de Souza Pereira — *Universidade Federal Rural do Semi-Àrido (UFERSA)*

Vitória Maria Aquino Rodrigues — *Universidade Federal Rural do Semi-Àrido (UFERSA)*



RESUMO

Os materiais sujeitos aos processos de fratura frágil, tais como o concreto, podem apresentar comportamento instável estando ainda sob tensões abaixo da tensão limite de projeto, resultando ou não em falhas estruturais abruptas. Assim, apropriando-se da Mecânica da Fratura Elástica Linear e do Método dos Elementos de Contorno Dual, busca-se determinar uma metodologia para avaliar os efeitos de múltiplos trincamentos críticos nesses materiais empregando-se o software caseiro de análise BEMCRACKER2D. A metodologia baseia-se num processo interativo que se fundamenta na análise e obtenção incremental do caminho de propagação da trinca, da sua deformada e dos respectivos Fatores de Intensidade de Tensão (FIT) pela técnica da Integral J, através do BEMCRACKER2D, cuja interface gráfica BEMLAB destina-se ao desenho e geração da malha de elementos de contorno. Dois exemplos clássicos da literatura são considerados para verificação e validação da metodologia, apresentando resultados plenamente coerentes com o esperado.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais frágeis, Trincas, Elementos de Contorno, BemCracker2D.

1 INTRODUÇÃO

A união entre a Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) e a Mecânica Computacional trouxe notoriedade às reincidentes falhas estruturais em materiais frágeis, ainda sob atuação de tensões inferiores às tensões limites de projeto, obtidas normativamente. Dentre esta categoria de materiais, está o segundo material mais utilizado no mundo, o concreto, assim tipificado devido à disposição arbitrária de seus constituintes granulares, apresentando comportamento compósito anisotrópico e estando também sujeito a fenômenos singulares. Abreviadamente, é denotado como a aglutinação de pasta cimentícia, agregados e uma zona de transição entre eles formada sob um elevado acumulo de água e convertido em uma região de material já fragilizado mesmo antes de solicitado mecanicamente (GOMES et al, 2016; RODRIGUES, 2018; ROTS; BLAAUWENDRAAD, 1989; WILLIAMS, 1957).

Há uma metodologia de análise de fratura coesiva em vigas parede de concreto com propagação de múltiplas trincas críticas à luz da MFLE e do MECD desenvolvida por Parvanova e Gospodinov (1993). Tal metodologia retrata que, em casos de vigas parede biapoiadas de concreto simples ou armado, não carregadas, pode haver o surgimento e a evolução de trincas de tração diagonal dominantes até a falha, alocando-se principalmente na região dos apoios. Quando carregadas inicialmente é expectado o surgimento e a propagação de trincas de flexão em modo I de abertura. Separadamente, ambos os casos são de simples análise e, a determinação dos Fatores de Intensidade de Tensão (FITs ou K), são via modelo de trinca discreta e metodologias da MFLE. Entretanto, em situações em que há combinação da abertura de trinca com esforços de deslizamento e fricção, devido ao intertravamento dos agregados nas faces da trinca, há o surgimento de uma trinca diagonal denominada crítica, ou de cisalhamento, que requer maiores cuidados na análise (PARVANOVA; GOSPODINOV, 1993; PORTELA; ALIABADI, 1993; ANDERSON, 2005; KUMAR, 2009).

Portanto, este trabalho busca apresentar uma metodologia de análise, através do emprego da GUI BEMLAB2D e do software de processamento BemCracker2D, para simular e avaliar a propagação de múltiplas trincas críticas em elemento de concreto simples, deliberando-se mediante a MFLE e o MECD. São capacidades do software BEMCRACKER2D a determinação incremental dos FITs, associados ao cálculo da integral J, da direção de trincamento, utilizando o método da Máxima Tensão Circunferencial (MTC), bem como das respostas de tensão e deformação a cada incremento. Complementarmente, a GUI BEMLAB2D imprime, por meio dos dados obtidos anteriormente, a deformada e o caminho do trincamento (GOMES; MIRANDA, 2018; DELGADO NETO, 2017).

O software BemCracker2D não contempla o módulo de análise de fratura coesiva e pretende-se realizar a implementação deste módulo, proporcionando a ampliação de resolução de problemas com trincas por meio do BemCracker2D.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma proposta de metodologia para simulação e avaliação de propagação de múltiplas trincas críticas, usando um processo de interação entre os programas BEMLAB2D, BemCracker2D e o pacote MATLAB, conforme ilustrado no esquema da Figura 1.

FIGURA 1: Fluxograma de aplicação da metodologia.



Fonte: Autor (2023).

Os procedimentos realizados dentro de cada etapa são:

- Pré-processamento: será realizado a modelagem, geração de malha e definição das condições de contorno para os modelos de referência utilizados no estudo. Com isso, busca-se obter uma análise precisa e confiável do comportamento das trincas e suas interações em diversos cenários de referência.

- Análise incremental ou processamento: os arquivos de origem gerados pelo software de interface gráfica BEMLAB2D são aplicados ao software de processamento BEMCRACKER2D. Isso permite a realização de análises numéricas lineares-elásticas ajustadas à Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) e ao Método dos Elementos de Contorno Dual (MECD). O objetivo é obter os campos de tensão e deformação, os Fatores de Intensidade de Tensão (FITs) por meio do calculado da Integral J, as direções de transmissão de trinca transmitidas não solicitadas da Mecânica da Tenacidade à Fratura (MTC) e as atualizações incrementais dos deslocamentos, forças, forças, geometria e malha. O processo envolve o avanço de cada incremento de trinca, permitindo uma análise detalhada da dinâmica das trincas e suas reflexivas em resposta às condições de carregamento. Essas etapas fornecem informações essenciais para entender o

comportamento das estruturas em relação às trincas, confiantes para uma abordagem precisa e confiável no estudo de fraturas e falhas em materiais e elementos externos.

- Pós-processamento: com base nos dados de saída obtidos, são geradas imagens e gifs do caminho de propagação das trincas e da deformação de cada modelo por meio do software BEMLAB2D. Essas visualizações permitem uma análise mais clara e intuitiva dos resultados.

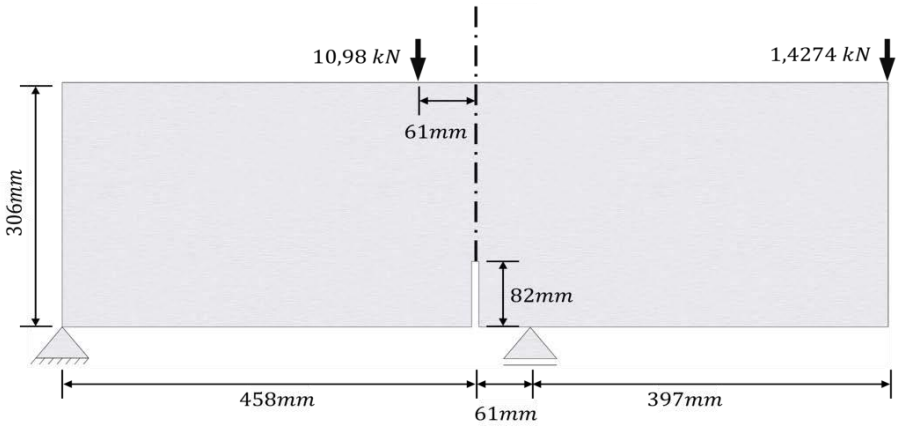
2.1 Exemplos de aplicação

A seguir, a metodologia denotada acima é aplicada sobre dois modelos já bem alocados academicamente. O primeiro, tido neste trabalho como Modelo 01, é devido a Parvanova e Gospodinov (1993) e, o segundo devido a Cordeiro (2015).

2.1.1 Modelo 01

Este modelo apresenta uma viga de cisalhamento submetida às condições de contorno e as dimensões dispostas na Figura 2. Destaca-se que a determinação dos valores do parâmetro K é realizada incrementalmente pelo software BemCracker2D.

FIGURA 2: Modelo 01: (a) Dados geométricos; (b) Carregamentos e restrições: dados experimentais.



Fonte: Parvanova e Gospodinov (1993).

O algoritmo requerido nessa etapa consiste dos seguintes passos, mostrados no quadro abaixo, que será aplicado em todos os modelos executados:

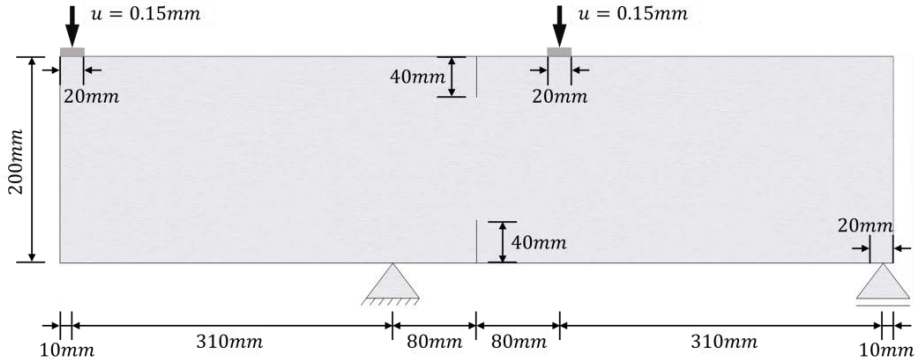
QUADRO 1: ALGORITMO

Passo 01 – Modelagem Geométrica	Nesse passo, após desenho dos modelos 1 e 2 (vide figuras 2 e 3) na GUI BEMLAB2D, são informados os valores do Módulo de Young, E = 24.8GPa, e do coeficiente de Poisson, υ = 0.18.
Passo 02 – Definição da Malha	Os elementos do contorno foram assumidos como quadráticos Countinuous, com 19 elementos nos seguimentos superior e inferior, e 8 elementos em cada um dos seguimentos laterais, já o seguimento de trinca é automaticamente atrelado como quadrático Discontinuous, expresso por 4 elementos em cada uma das faces da trinca (razão 0.2-0.3-0.3-0.2), somando um total de 62 elementos.
Passo 03 – Condições de Contorno	O software apresenta condições de contorno capazes de representar trações, deslocamentos impostos e restrições de deslocamento sobre a face do elemento. As condições aplicadas para o modelo foram: deslocamento nas duas direções para o elemento 10 no nó 3 e na direção Y sobre o elemento 25 também no nó 3 e; tração no nó 1 do elemento 44 na direção Y, com módulo de 1,4274kN e no nó 3 do elemento 54 também na direção Y, com módulo de -10,9800kN.
Passo 04 – Definição da Análise e das Propriedades de Propagação da Trinca	Para a definição do modelo de Análise Elastostática são três as opções ofertadas pelo software: STANDARD BEM, WITH NO CRACKS GROWTH e WITH CRACKS GROWTH. A opção adotada será a terceira, em que, por padrão do software, é realizada predição do trincamento por meio do DBEM. Para os passos da trinca: número de incrementos igual a 10 e o valor do comprimento de cada passo como 20mm; para análise de Fadiga, os coeficientes de Paris foram assumidos como: C = 8.59e−13, m = 3.3 e a Razão de carga = 0.500.

2.1.2 Modelo 02

Este modelo apresenta uma viga de cisalhamento sob as condições de contorno e as dimensões representadas na Figura 3. Como percebido, este modelo destoa-se do anterior, tendo-se em vista que expressa imposições de deslocamento ao invés de trações sobre o contorno do elemento, o que ainda assim não impede os procedimentos empregues anteriormente, sendo os mesmos também devidamente empregues para este modelo.

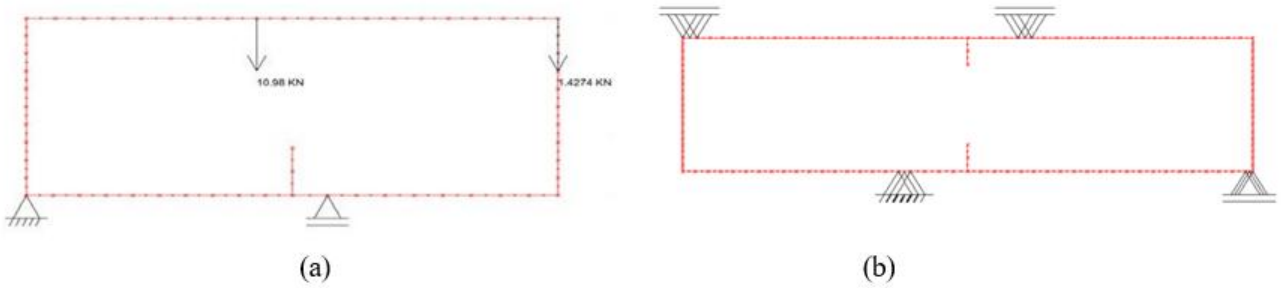
FIGURA 3: Modelo 02: (a) Dados geométricos; (b) Carregamentos e restrições: dados experimentais.



Fonte: Cordeiro (2015).

Na Figura 4 temos os modelos discretos de elementos de contorno gerados na GUI BEMLAB2D, sendo em a) Modelo 1 e, b) Modelo 2.

FIGURA 4: Modelo discreto em elementos de contorno: (a) Modelo 1; b) Modelo 2.



Fonte: Autor (2023).

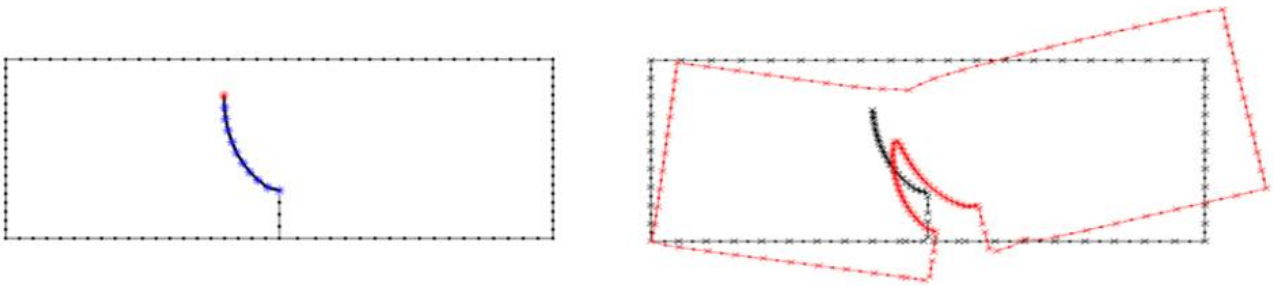
3 RESULTADOS

Os dois modelos, já explicitados no item anterior, foram acordados conforme a metodologia desenvolvida neste trabalho e expressa anteriormente. Inicialmente, a análise dos resultados foi realizada por meio da constatação visual dos dados de saída fornecidos pelo software de processamento BemCracker2D. Sendo, respectivamente, as respostas incrementais de tensão, de deformação e da geometria da malha, bem como os valores, também incrementais, das coordenadas das faces da trinca e do parâmetro K, na ponta da trinca. Sendo possível averiguar o comportamento do elemento estrutural e da trinca diretamente nos dados de saída, sem a constante necessidade de geração de representações gráficas.

Deste modo, percebida a aproximação dos resultados numéricos àqueles de referência, viabilizou-se a utilização da GUI BEMLAB2D para obter-se o resultado gráfico do caminho de propagação da trinca e

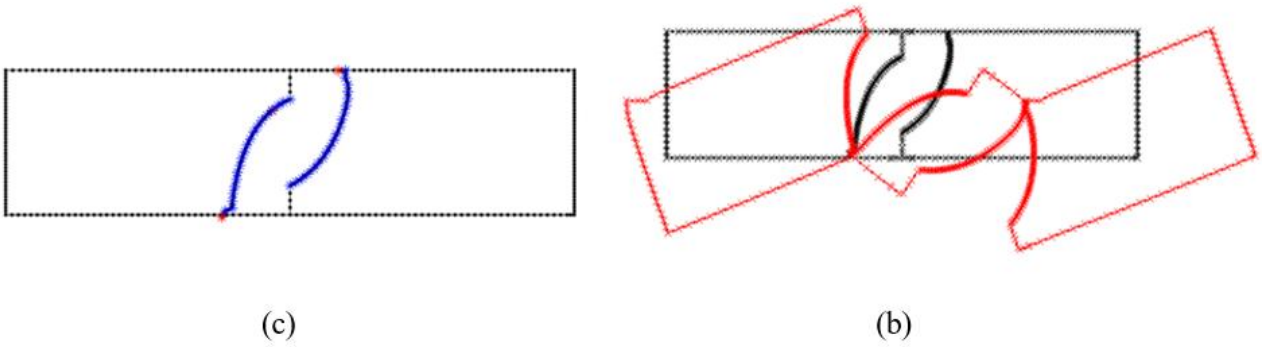
da condição deformada do elemento, respectivamente representados pelas Figuras 5 e 6. Como manifesto nas Figuras 5 (a) e 6 (a), o comportamento diagonal percebido sobre o caminho de propagação das trincas críticas enquadra-se assertivamente com o esperado para trincas propagadas em modo misto. Ressalta-se ainda nessas figuras, a visível ocorrência simultânea dos fenômenos de abertura em modo I e II com o deslizamento das faces da trinca, conforme expectado.

FIGURA 5: Modelo 01: (a) Propagação da trinca e (b) Malha deformada: dados experimentais.



Fonte: Autor (2023).

FIGURA 6: Modelo 02: (a) Propagação da trinca e (b) Malha deformada: dados experimentais.



Fonte: Autor (2023).

4 CONCLUSÕES

Por meio da metodologia apresentada neste trabalho, foi possível desenvolver os dois modelos propostos inicialmente, tidos como Modelo 01 e o Modelo 02. Deste modo, tornou-se possível concluir que o software BEMLAB2D apresentou-se suficiente para realização das fases metodológicas referentes ao pré- e pós- processamento, como é possível visualizar nas Figuras 4 e 5. De mesmo modo, o software BemCracker2D atuou de forma precisa e assertiva no processamento dos dados vindos do

software BEMLAB2D, na geração dos resultados numéricos e na determinação do comportamento do elemento estrutural frente à propagação de trincas críticas em vigas de cisalhamento.

Portanto, conclui-se que a metodologia desenvolvida apresenta a aptidão necessária para o desenvolvimento de modelos estruturais constituídos por material frágil, em especial o concreto, através do emprego dos softwares BEMLAB2D e BemCracker2D, bem como de rotina complementar desenvolvida pelo software MATLAB, para a realização de análise sobre os efeitos de Fratura Coesiva e Propagação de Múltiplas Trincas Críticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo apoio financeiro a esta pesquisa. Os autores também agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

Anderson, T. L. “Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications”. CRC Press - Taylor & Francis, Third edition, pp. 1-10, 16-17, 42-45, 103, 156-158, 219-243, 249-250, 2005.

Delgado Neto, A. M. “BEMLAB2D: Interface Gráfica de Modelagem, Visualização e Análise com Elementos de Contorno – Uma Aplicação em Problemas Elastostáticos”. MSc dissertation, University of Brasília, pp. 34, 36-63, 2017.

Gomes, G.; Miranda, A. C. O. “Analysis of Crack Growth Problems Using the Object-Oriented Program BEMCracker2D. Frattura Ed Intregrità Strutturale”, Issue 45, The International Journal of Gruppo Italiano Frattura - IGF, vol. XII, pp. 67-69, 2018.

Gomes, G.; Silva, G.; Paiva, G.; Martins, A. “Avaliação Numérica de FITs em Problemas de Múltiplas Trincas”. Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering - XXXVII, pp. 1-6, 2016.

Kumar, P. “Elements of Fracture Mechanics”. McGraw Hill, New Delhi, pp. 1-10, 35-36, 45-47, 69-71, 2009.

Miranda, A. C. O. “Propagação de Trincas por Fadiga em Geometrias 2D Complexas Sob Cargas Cíclicas Variáveis”. PhD thesis, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, pp. 1, 8-9, 17-18, 34-39, 2003.

Parvanova, S.; Gospodinov, G. “A Dual Boundary Element Procedure for Analysis of Fracture in Concrete”. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Issue 1, vol. 37, pp. 1, 1993.

Portela, A.; Aliabadi, M. H.; Rooke, D. P. “Dual Boundary Element Incremental Analysis of Crack Propagation”. Computers & Structures, vol. 46, Number 2, pp. 239, 1993.

Rodrigues, W. M. “Simulação de Coalescência com Múltiplas Trincas Usando o BEMCRACKER2D”. MSc dissertation University of Brasília, pp. 10-30, 33-34, 2018.

Rots, J. G.; Blaauwendraad, J. “Crack Models for Concrete: Discrete or Smeared? Fixed, Multi-Directional or Rotating?”. Heron, vol. 34, n. 1, pp. 7-20, 1989.

Williams, M. L. “On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack. Journal of Applied Mechanics”, pp. 113, 1957.

Capítulo 20

10.37423/251110469

ESTUDO SOBRE VARIÁVEIS DA LINHA DE SUCÇÃO DE UMA CÂMARA FRIGORÍFICA: EQUAÇÕES PARA ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL X SOFTWARE COOLPACK

Wertson da Silva Resende — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Kelyson da Silva Resende — *Universidade Potiguar (UnP) - Departamento de Engenharia Elétrica*

Edilson Marinho da Silva Júnior — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)*

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise do comportamento termodinâmico e fluidodinâmico do refrigerante R-404A em uma linha de sucção de câmara frigorífica, utilizando as equações de escoamento compressível adiabático em seção de área constante e comparando os resultados teóricos com simulações no software CoolPack. Foram realizadas medições de campo das variáveis operacionais, incluindo temperaturas, pressões e quedas de pressão, possibilitando o cálculo do superaquecimento, subresfriamento e demais propriedades termodinâmicas do ciclo. A partir desses dados, elaborou-se o diagrama pressão × entalpia e determinaram-se parâmetros como vazão mássica, número de Mach, perdas de carga e eficiência do sistema. Os resultados mostraram boa correlação entre os valores calculados e os obtidos via simulação, evidenciando a influência das perdas na linha de sucção sobre o Coeficiente de Performance (COP) e a eficiência energética. O estudo demonstra que a aplicação integrada de modelagem teórica, medições experimentais e simulação computacional é eficaz tanto para avaliação de desempenho em sistemas reais quanto como ferramenta didática no ensino de engenharia de refrigeração.

PALAVRAS-CHAVE: Escoamento compressível, adiabático, refrigeração, R404A, sistemas frigoríficos.

1 INTRODUÇÃO

O estudo do escoamento compressível em dutos de área constante apresenta ampla aplicação na engenharia, incluindo no campo da refrigeração industrial. Esse tipo de escoamento caracteriza-se por variações nas propriedades do fluido — como densidade, velocidade e entalpia — influenciadas pela presença de atrito e, em alguns casos, por trocas de calor. A análise detalhada desse comportamento é fundamental para o desenvolvimento de projetos e para a operação eficiente de sistemas térmicos e de transporte de fluidos, como os encontrados em câmaras frigoríficas (WHITE, 2017; FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2012).

No contexto de sistemas de refrigeração, as equações fundamentais do escoamento compressível adiabático fornecem ferramentas valiosas para a modelagem do comportamento de fluidos refrigerantes, como o R-404A, em linhas de sucção. Essas linhas, responsáveis pelo transporte do fluido em condições de baixa pressão e temperatura, exercem influência direta sobre o desempenho energético global do sistema (SANTOS, 2018). Parâmetros como número de Mach, variação de entropia e perdas por atrito podem ser avaliados para garantir que a operação permaneça dentro dos limites de projeto, contribuindo para otimização da eficiência.

O presente trabalho aplica as equações de continuidade, quantidade de movimento e energia, adaptadas ao caso específico de escoamento adiabático em seção de área constante, para analisar os efeitos do atrito em uma linha de sucção de câmara frigorífica. Dados experimentais foram obtidos em campo e analisados com o suporte de ferramentas computacionais, em especial o software CoolPack (DANFOSS, 2025), permitindo a validação dos cálculos teóricos e a identificação de possíveis discrepâncias. Essa abordagem prática e comparativa é aplicável tanto em atividades industriais quanto no ensino de engenharia, contribuindo para a formação e atualização técnica de profissionais da área.

Além de avaliar as condições de operação do fluido em diferentes pontos do sistema — considerando variáveis como velocidade, pressão e temperatura — este estudo classifica o escoamento, quantifica as perdas associadas ao atrito e discute a importância do dimensionamento adequado de tubulações e componentes. A análise reforça que a aplicação prática das equações de escoamento compressível não apenas amplia o entendimento dos fenômenos envolvidos, mas também fornece base sólida para projetos mais eficientes e sustentáveis no setor de refrigeração industrial.

1.1 Câmaras Frigoríficas

As câmaras frigoríficas são estruturas projetadas para o armazenamento de produtos perecíveis ou sensíveis à temperatura, com o objetivo de preservar suas propriedades e prolongar sua vida útil. São amplamente utilizadas em setores como o alimentício, farmacêutico, hospitalar e logístico, desempenhando papel essencial na garantia da qualidade e segurança de produtos (BRASIL, 2009).

Essas estruturas apresentam isolamento térmico eficiente, normalmente composto por painéis de poliuretano expandido ou poliestireno extrudado (EPS), revestidos com chapas de aço galvanizado, aço inoxidável ou alumínio, o que proporciona resistência à corrosão, facilidade de higienização e durabilidade. O piso é dimensionado para suportar baixas temperaturas e cargas elevadas, podendo incluir sistemas de aquecimento para evitar congelamento do solo em aplicações de temperatura negativa.

Elementos adicionais — como portas com vedações de borracha de alta qualidade, cortinas de ar, soleiras reforçadas e aliviadores de pressão — contribuem para minimizar a troca térmica e aumentar a eficiência energética. Internamente, o uso de prateleiras ajustáveis, estrados e, em instalações maiores, esteiras transportadoras, garante melhor aproveitamento do espaço e facilidade operacional. Sistemas de drenagem e degelo são integrados para assegurar o funcionamento adequado, mesmo em condições de operação extremas.

Figura 1. Câmara frigorífica



Fonte: HR Tedesco (2025).

1.2 Eficiência Energética e Sustentabilidade

O consumo elétrico de câmaras frigoríficas representa parcela significativa dos custos operacionais, tornando a eficiência energética um aspecto central no projeto e na operação. Nesses sistemas, a eficiência é comumente expressa pelo Coeficiente de Performance (COP), definido como a razão entre a capacidade frigorífica fornecida e a potência elétrica consumida. Um COP elevado indica melhor aproveitamento da energia elétrica para produção de frio, refletindo diretamente em menor custo operacional.

Perdas térmicas e de pressão nas linhas de sucção e líquido — resultantes de atrito, isolamento inadequado ou dimensionamento incorreto — reduzem o COP ao demandar maior esforço do compressor para manter as condições de operação. Assim, a redução dessas perdas é essencial para otimizar o desempenho. Estratégias como minimizar comprimentos desnecessários de tubulação, evitar conexões excessivas e adotar isolamentos de alto desempenho contribuem significativamente para a melhoria da eficiência global.

Além do controle das perdas, tecnologias como compressores de alta eficiência, variadores de frequência, isolamento térmico aprimorado, refrigeração por zonas e uso de refrigerantes com baixo potencial de aquecimento global (GWP) favorecem a redução do consumo de energia e o atendimento a requisitos ambientais mais rigorosos (ARAÚJO, 2016; CHEMOURS, 2023). O balanceamento adequado entre projeto, seleção de equipamentos e manutenção preventiva garante não apenas maior eficiência energética, mas também maior confiabilidade e vida útil do sistema.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento termodinâmico e fluidodinâmico do fluido refrigerante R-404A em uma linha de sucção de câmara frigorífica, por meio da aplicação das equações de escoamento compressível adiabático em seção de área constante, comparando os resultados teóricos com aqueles obtidos no software CoolPack, de forma a identificar perdas, avaliar a eficiência do sistema e fornecer subsídios para otimização de projetos e práticas no ensino de engenharia de refrigeração.

1.4 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar o superaquecimento e o subresfriamento do ciclo, a partir de dados de campo.

- Plotar o diagrama pressão × entalpia (P × h) e a tabela de estados para o refrigerante R-404A, identificando as propriedades termodinâmicas em cada ponto do ciclo.

- Calcular parâmetros fluidodinâmicos da linha de sucção, como vazão mássica, vazão volumétrica, massa específica, velocidade de escoamento e número de Mach, aplicando as equações de escoamento compressível adiabático.

- Avaliar as perdas de carga e de energia associadas ao atrito nas tubulações, relacionando- as com a eficiência isentrópica do compressor e com o Coeficiente de Performance (COP) do sistema.

- Comparar os resultados teóricos obtidos com os fornecidos pelo software CoolPack, identificando divergências e discutindo suas causas.

- Validar a aplicabilidade das equações de escoamento compressível no contexto da engenharia de refrigeração industrial e no ensino da disciplina.

1.5 Justificativa

O dimensionamento e a análise de linhas de sucção em sistemas frigoríficos têm impacto direto na eficiência energética e na confiabilidade operacional de câmaras frigoríficas, especialmente em aplicações industriais. O domínio de conceitos como número de Mach, perdas de carga e comportamento termodinâmico do fluido refrigerante é fundamental para projetistas, engenheiros e técnicos que atuam na área.

No entanto, observa-se que, em cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Mecânica, Térmica ou de Refrigeração, o ensino desses conteúdos muitas vezes é restrito à teoria, sem a devida conexão com medições de campo e validação experimental.

O presente artigo justifica-se por integrar modelagem teórica, coleta de dados reais e simulação computacional, utilizando o software CoolPack como ferramenta de apoio. Essa abordagem favorece o aprendizado prático, aproxima os estudantes da realidade industrial e permite que os conceitos de escoamento compressível sejam aplicados a situações concretas do setor de refrigeração.

Ao apresentar um estudo detalhado, com dados medidos, cálculos teóricos e comparação com resultados de simulação, este trabalho contribui para o ensino de engenharia ao oferecer um exemplo aplicável em disciplinas de Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Sistemas de Refrigeração, reforçando a importância da integração entre teoria e prática para formação de profissionais mais completos e preparados para os desafios industriais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido considerando uma câmara frigorífica típica projetada para operar a 0°C de temperatura interna, equipada com um ciclo de compressão de vapor simples dimensionado para uma carga térmica de 2600 kcal/h (3,024 kW). O fluido refrigerante utilizado foi o R-404A (DuPont SUVA HP62), operando com temperatura de evaporação de –15 °C e condensação de 42 °C.

Para a caracterização do ciclo, foram realizadas medições de campo a fim de levantar as condições operacionais e elaborar o diagrama Pressão × Entalpia (P × h) com auxílio do software CoolPack. Os parâmetros medidos incluíram temperaturas e pressões nos principais pontos do sistema, além de variáveis associadas às perdas de carga no evaporador, condensador e linhas de sucção, líquido e descarga. As principais medições foram:

- Temperatura ambiente externa: 28,8°C
- Temperatura da linha de sucção: 0,766°C
- Temperatura da linha de líquido: 32,371°C
- Temperatura de evaporação: -15°C
- Temperatura de condensação: 42°C
- Temperatura de descarga: 70,04°C

- Queda de pressão no evaporador: 0,35bar
- Queda de pressão no condensador: 0,55bar
- Queda de pressão na linha de sucção: 0,15 bar
- Queda de pressão na linha de líquido: 0,15 bar
- Queda de pressão na linha de descarga: 0,20 bar
- Carga térmica/Fluxo de calor no evaporador: 3,024kW (2600Kcal/h)

A definição do superaquecimento da máquina considerou que o fluido entra no compressor superaquecido sob temperatura de sucção $Tsuc$ = 0,766°C. A temperatura de saturação na saída do evaporador $Tsat,v$ = −14,655°C, logo o superaquecimento é determinado em Sup = 16K, uma vez que:

$$Sup = T_{suc} - T_{sat,v} \quad (1)$$

Onde $T_{sat,v}$ é a temperatura de saturação do R-404A na evaporação, T_{suc} e a temperatura medida na linha de sucção da máquina cerca de 15cm da entrada do compressor.

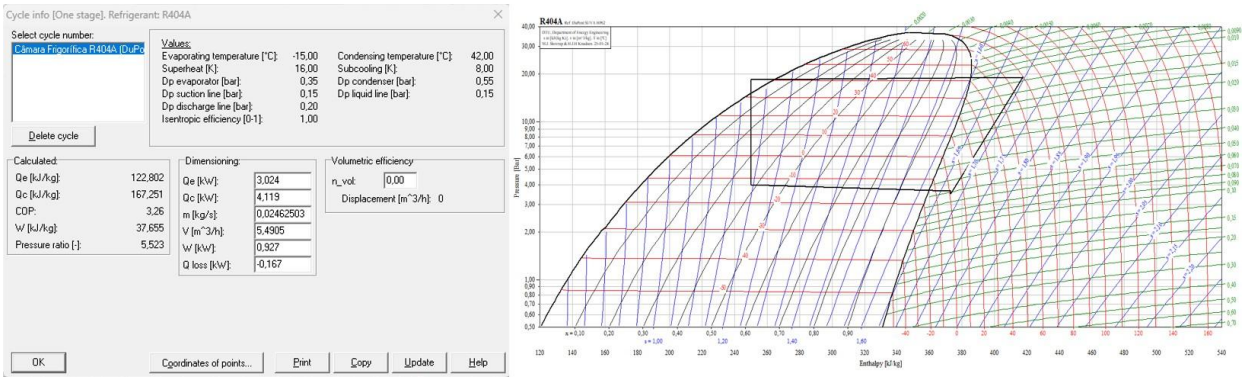
Para a condição de subresfriamento, o fluido atinge a saturação no condensador sob temperatura $T_{sat,l} = 40{,}427°C$ e chega à entrada do dispositivo de expansão com temperatura da linha de líquido em $T_{Líq} = 32{,}371°C$, logo assume $Sub \cong 8K$,uma vez que se define o subresfriamento aplicando a seguinte equação,

$$Sub = T_{sat,l} - T_{liq} \quad (2)$$

Onde $T_{sat,l}$ é a temperatura de saturação do R-404A na condensação, T_{liq} e a temperatura medida na linha de líquido na entrada da válvula de expansão termostática.

A partir destes dados iniciais, foram plotados o diagrama Pxh do ciclo com R-404A e extraída a tabela estado para os pontos que definem o sistema.

Figura 2. Distribuição do ciclo frigorífico no diagrama Pxh.



Fonte: Software CoolPack (2025).

Tabela 1. Condições de operação da câmara em função dos parâmetros de estado do R404A.

DESCRIÇÃO DO PONTO	PONTO	T[°C]	p[bar(abs)]	h [kJ/kg]	⍰ [m³/kg]	s [kJ/(kg.K)]	x
Entrada da Linha de Sucção	0	0,987	3,640	373,18	0,05912	1,673	NA
Saída da Linha de Sucção/Entrada do compressor	1	0,766	3,466	373,18	0,0623	1,677	NA
Saída do compressor/Entrada da linha de Descarga	2	70,044	19,252	417,68	0,01172	1,697	NA
linha de Descarga	3	69,767	19,036	417,68	0,01188	1,697	NA
Saída da linha de Descarga/Entrada do Condensador	4	41,747	18,915	385,39	0,00953	1,599	1,000
Saída do Condensador/Entrada da Linha de Líquido	5	40,427	18,479	264,60	0,00114	1,216	0,000
Saída da Linha de Líquido/Entrada do dispositivo de Expansão	6	32,371	18,453	250,20	NA	1,170	NA
Dispositivo de Expansão	7	32,358	15,165	250,20	0,00107	1,170	0,000
Saída do Dispositivo de Expansão/Entrada do Evaporador	8	-12,749	3,986	250,20	0,01959	1,195	0,381
Saída do Evaporador/Entrada da Linha de Sucção	9	-14,655	3,670	359,77	0,05429	1,622	1,000
REFRIGERANTE: R404A (DuPont SUVA HP62)							

Fonte: Autor (2025).

A partir dos dados medidos e calculados, com a geração do diagrama P × h (Figura 2) e da tabela de estados (Tabela 1) com entalpia, entropia, título e outras propriedades para os pontos de referência do ciclo. Deve-se, para complementar a análise, determinar:

- Eficiência isentrópica do compressor, considerando as entropias de entrada e saída e comparando com o processo isentrópico ideal;

- Vazão mássica e vazão volumétrica na linha de sucção, aplicando a equação de conservação da massa e considerando o diâmetro interno da tubulação;

- Massa específica do fluido na sucção, obtida a partir do volume específico calculado pelo software;

- Velocidade de escoamento e número de Mach, utilizando a velocidade do som para o R- 404A determinada a partir do índice adiabático e da constante específica do gás;

- Perdas por atrito no trecho de sucção (seção 9 a 0), aplicando a equação de Darcy-Weisbach adaptada para escoamento compressível adiabático;

- Diferenças de entalpia e entropia determinadas tanto pelo diagrama P × h quanto pelas equações fundamentais, comparando os erros relativos;

- Trabalho no compressor e perdas no processo, com base na Primeira Lei da Termodinâmica para escoamento compressível.

Os cálculos teóricos foram comparados com os resultados obtidos no CoolPack (Figura 1), permitindo validar os procedimentos e identificar discrepâncias decorrentes de simplificações assumidas no modelo.

3 RESULTADOS

3.1 Eficiência isentrópica

Observamos que a temperatura de entrada do fluido no compressor é $T_{suc} = 0{,}766°C$ e temperatura de descarga é $T_{suc} = 70{,}044°C$, referentes aos pontos 1 e 2, e apresentam entropias nos valores $s_1 = 1{,}677 kJ/(kg.K)$ e $s_2 = 1{,}697 kJ/(kg.K)$, logo,

$$\Delta s = s_2 - s_1 \tag{3}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = (1{,}697 - 1{,}677) kJ/(kg.K) = 0{,}020 kJ/(kg.K)$$

Podemos definir a eficiência isentrópica do compressor para este ciclo fazendo,

$$\eta_s = \frac{s_1}{s_2} \tag{4}$$

$$\eta_s = \frac{s_1}{s_2} = \frac{1{,}677}{1{,}697} \cong 0{,}98$$

3.2 Analisando inicialmente ponto 0

3.2.1 Vazão mássica

Com a definição da carga térmica, $Q_e = 3{,}024\text{kW}$, sabemos que esse fluxo de calor deve englobar todo evaporador e a linha de líquido, que compreende aos fluxos de calor entre os pontos 8 para 9, 9 para 0, e 0 para 1. Desta forma podemos determinar os ganhos de calor em cada trecho do lado de baixa pressão do sistema, ou simplesmente calcular o fluxo total do ponto 8 até o ponto 1, conforme demonstramos a seguir,

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_{8\to9} + \dot{Q}_{9\to0} + \dot{Q}_{0\to1} \tag{5}$$

$$\dot{Q}_e = \dot{m}(h_9 - h_8) + \dot{m}(h_0 - h_9) + \dot{m}(h_1 - h_0)$$

$$\dot{Q}_e = \dot{m}[(h_9 - h_8) + (h_0 - h_9) + (h_1 - h_0)$$

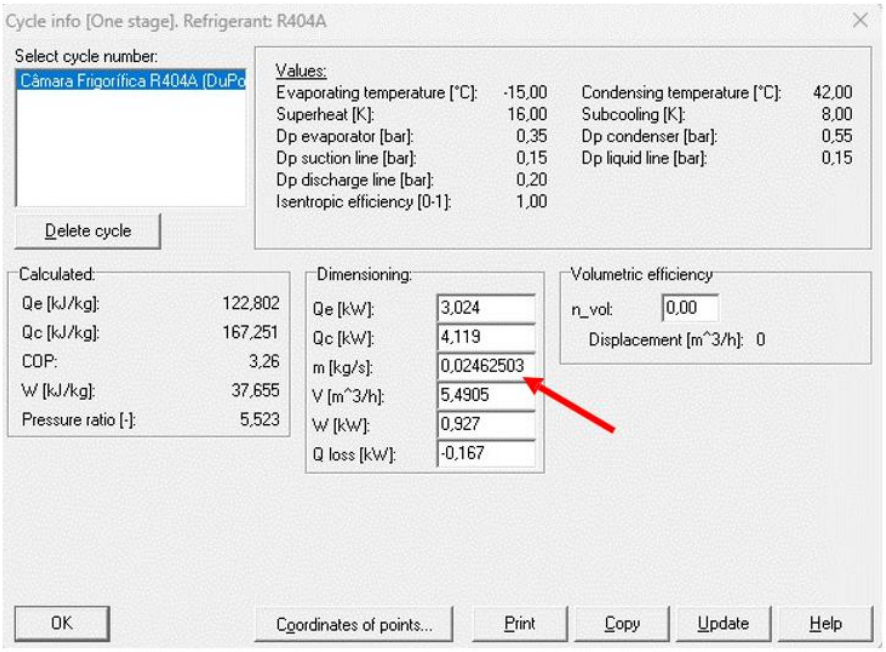
$$Q_e = \dot{m}[\cancel{h_9} - h_8 + \cancel{h_0} - \cancel{h_9} + h_1 - \cancel{h_0}]$$

$$Q_e = \dot{m}(h_1 - h_8) \tag{6}$$

$$m = \frac{Q_e}{(h_1 - h_8)} = \frac{3{,}024kW}{(373{,}18 - 250{,}2)kJ/kg} = 0{,}02458kW.\frac{kg}{kJ} \equiv 0{,}02458\,\frac{\cancel{kJ}}{s}.\frac{kg}{\cancel{kJ}}$$

O resultado confere com o obtido através do software CoolPack, conforme mostrado na figura a seguir.

Figura 3: PrintScreem da tela de informações do ciclo de um estágio com refrigerante R404A.



Fonte: Software CoolPack (2025).

3.2.2 Vazão volumétrica

Sabendo que a vazão volumétrica na linha de sucção, seção do ponto 0, é indicada pela variável $V = 5{,}4905 m^3/h$ corresponde a,

$$V_0 = 5{,}4905 \frac{m^3}{\cancel{h}} . \frac{1}{3600 \frac{s}{\cancel{h}}} \cong 1{,}52514 x 10^{-3} \frac{m^3}{s} \cong 0{,}00153 \frac{m^3}{s}$$

Ainda que,

$$V = v . \dot{m} \qquad (7)$$

Por conveniência, substituiremos a variável V por G objetivando evitar confusão com a grandeza velocidade, representada por V. Podemos conferir os valores calculados, teremos para linha de sucção,

$$\dot{G} = v_0 . \dot{m} \tag{8}$$

$$\dot{G}_0 = 0{,}05912 \frac{m^3}{\cancel{kg}} . 0{,}0246 \frac{\cancel{kg}}{s} \cong 1{,}53258x10^{-3} \frac{m^3}{s} \cong 0{,}001454 \frac{m^3}{s}$$

3.2.3 Massa específica

Dessa forma, com os dados obtidos, podemos determinar a massa específica do fluido na linha de sucção, seção do ponto 0, a partir do volume específico (v_0), fazendo,

$$\rho_0 = \frac{1}{v_0} \tag{9}$$

$$\rho_0 = \frac{1}{0{,}05912 \frac{m^3}{kg}} = 16{,}91474966 \frac{kg}{m^3} \cong 16{,}9147 \frac{kg}{m^3}$$

3.2.4 Área

Aplicando a lei da conservação da massa, sabendo que a linha de sucção apresenta diâmetro nominal de 1/2" (diâmetro externo, D, 12,7mm=0,0127m) com espessura (e) padrão de 1/32" (0,794mm=0,000794m)), podemos determinar a área de seção constante da tubulação ao longo da linha de sucção, considerando o diâmetro interno, d.

$$d = D - e \tag{10}$$

$$d = 0{,}0127 - 2.0{,}000794 = 0{,}011112m$$

Sendo,

$$A_0^{1/2"} = \frac{\pi . d_{int}^{\,2}}{4} \tag{11}$$

$$A_0^{1/2} = \frac{\pi . 0{,}011112^2}{4} = 9{,}6978x10^{-5}m^2 \cong 0{,}000096978m^2$$

3.2.5 Velocidade na linha

Aplicando a lei da conservação de massa, que expressa a relação entre a densidade (ρ), a velocidade (v) e a área da seção do tubo (A), para a seção 0, podemos determinar a velocidade do escoamento, teremos,

$$\dot{m} = \rho_0 . V_0 . A_0 \quad \therefore \quad V_0 = \frac{\dot{m}}{\rho_0 . A_0} \tag{12}$$

$$V_0 = \frac{0{,}0246 \frac{kg}{s}}{16{,}9147 \frac{kg}{m^3} . 0{,}000096978 m^2} = 14{,}99676494 m/s \cong 15 m/s$$

3.2.6 Número de Mach

Para essa velocidade temos Mach,

$$M_0 = \frac{V_0}{c^{R404A}} \tag{13}$$

Onde, M_0 é o número de Mach na seção 0 em estudo, V_0 é a velocidade o fluido escoando na seção 0 em m/s; e c^{R404A} é a velocidade do som deslocando-se no fluido R404A, em m/s.

A velocidade do som adotada na maioria dos exercícios de engenharia aplicados na academia está relacionada ao ar é aproximadamente 340 metros por segundo (m/s). No entanto, esse valor pode variar de acordo com a temperatura e o meio em que se propaga, por exemplo, no mesmo ar na condição seco a 0°C ela será 331 m/s, se a 20°C a velocidade do som será cerca de 343 m/s, já na água é de aproximadamente 1480 m/s, e no granito é de 6000 m/s. Estes são exemplos de variações dessa velocidade em função do meio e temperatura.

Sabemos que podemos determinara a velocidade do som (c) em um gás ou fluido compressível aplicando,

$$c = \sqrt{k.R.T} \tag{14}$$

Onde: k é o índice adiabático (razão entre os calores específicos cp, calor específico sob pressão constante, e cv, calor específico sob volume constante); R é a constante específica do gás avaliado, e T é a temperatura absoluta do fluido em estudo.

Para as condições operacionais descritas na seção 1, temos a temperatura,

$$T_0 = 0{,}766 + 273{,}15 = 273{,}926K$$

A constante específica de um gás pode ser obtida por,

$$R^{Gás} = \frac{R^{univ}}{M_{mol}} \quad (15)$$

Onde: $R^{Gás}$ é a constante do gás em $J/(kg.K)$; R^{univ} é a constante universal dos gases ideais, $8{,}314J/(mol.K)$; M_{mol} é a massa molecular do gás em kg/mol.

Sabendo que a massa molar média (M^{R404A}_{mol}) do R404A é aproximadamente 97,6g/mol≅0,0976kg/mol, podemos calcular a constante específica do Gás(R^{R404A}),

$$R^{R404A} = \frac{R^{univ}}{M^{R404A}_{mol}} \cong \frac{8{,}314J/(mol.K)}{0{,}0976kg/mol} \cong 85{,}18J/(kg.K)$$

Sabendo ainda que o índice adiabático para o R404A (k^{R404A}) é resultado da razão entre $c_p = 0{,}88kJ/kg.K$ e $c_v = 0{,}68kJ/kg.K$, temos,

$$k^{R404A} \cong \frac{0{,}88}{0{,}68} \cong 1{,}29$$

Logo,

$$c^{R404A} = \sqrt{k^{R404A}.R^{R404A}.T_1} = \sqrt{1{,}29.85{,}18.273{,}926} \cong 173{,}49m/s$$

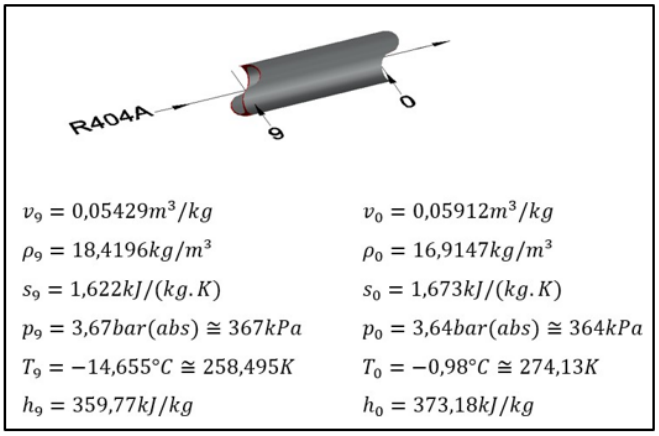
Portanto, recalculando o valor de Mach da seção 1, teremos,

$$M_0 = \frac{V_0}{c^{R404A}} = \frac{15m/s}{173{,}49m/s} \cong 0{,}08646 \cong 0{,}08$$

O escoamento na linha de sucção, seção 1, classificado como subsônico.

3.3 Equações aplicadas para a linha de sução – Seção 9 à 0

Figura 4. Tubulação de sução, seção 9 à 0.



Fonte: Autor (2025).

Considerando os dados obtidos pelo Coolpack, a diferença de entalpia pode ser obtida diretamente,

$$\Delta h = h_0 - h_9 = 373{,}18 kJ/kg - 359{,}77 kJ/kg = 13{,}41 kJ/kg$$

Aplicando a equação básica, considerando o escoamento adiabático com atrito, a entalpia pode ser determinada,

$$\Delta h = c_p . \Delta T = c_p . (T_0 - T_9) \quad (16)$$

$$\Delta h = 0{,}88 \frac{kJ}{kg.K} . (274{,}13\text{K} - 258{,}495\text{K})$$

$$\Delta h = 13{,}75 \frac{kJ}{kg}$$

O erro observado entre os métodos será,

$$Erro_{\Delta h} = \left(\frac{13{,}75 \frac{kJ}{kg}}{13{,}41 \frac{kJ}{kg}} - 1 \right) . 100\%$$

$$Erro_{\Delta h} \cong 2{,}5\%$$

A diferença de entropia, inicialmente determinada deforma direta é,

$$\Delta s = s_0 - s_9 = 1{,}673kJ/(kg.K) - 1{,}622kJ/(kg.K) = 0{,}051kJ/(kg.K)$$

Aplicando a equação básica, considerando o escoamento adiabático com atrito, a entropia pode será,

$$\Delta s = s_0 - s_9 = c_p . ln\frac{T_0}{T_9} - R^{R404A}. ln\frac{p_0}{p_9} \quad (17)$$

$$\Delta s = 0{,}88\frac{kJ}{kg.K}.ln\left(\frac{274{,}13\text{K}}{258{,}495\text{K}}\right) - 0{,}008518kJ/(kg.K).ln\left(\frac{364kPa}{367kPa}\right)$$

$$\Delta s = 0{,}051748879\frac{kJ}{kg.K} \cong 0{,}051\frac{kJ}{kg.K}$$

A verificação do comportamento da velocidade de escoamento do fluido do ponto 9 ao ponto 0 pode ser efetuada determinando $V9$,

$$\dot{m} = \rho_9.V_9.A_9 \therefore V_9 = \frac{\dot{m}}{\rho_9.A_9}; \quad (18)$$

$$A_9 = A_0^{1/2"} \cong 0{,}000096978m^2$$

$$V_9 = \frac{0{,}0246\frac{kg}{s}}{18{,}4196\frac{kg}{m^3}.0{,}000096978m^2} = 13{,}77151403m/s \cong 13{,}77m/s$$

O número de Mach na seção 9 será,

$$M_9 = \frac{V_9}{c^{R404A}} \quad (19)$$

$$M_9 \cong \frac{13{,}77m/s}{173{,}49m/s}$$

$$M_9 \cong 0{,}079370568 \cong 0{,}08$$

Podemos determinar o valor do atrito nesse trecho da tubulação, aplicando a equação,

$$R_x + A.(\rho_1 - \rho_2) = \dot{m}.(V_2 - V_1)$$
$$R_x = \dot{m}.(V_2 - V_1) - A.(\rho_1 - \rho_2) \quad (20)$$
$$R_x = 0{,}0246.(15 - 13{,}77) - 0{,}000096978.(18{,}4196 - 16{,}9147)$$
$$R_x = 0{,}0301kg/(m/s^2) \cong 0{,}0301N$$

Partindo da equação da conservação de energia, 1ª Lei da Termodinâmica para o escoamento compressível,

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + Q - W \quad (21)$$

Podemos determinar o trabalho realizado do ponto 1 ao ponto 2,

$$W_{1-2} = \Delta h - \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} - Q \quad (22)$$

$$W_{1-2} = 13{,}75 - \frac{15^2 - 13{,}77^2}{2} + 3{,}024$$

$$W_{1-2} = 0{,}91955kW \cong 0{,}920kW$$

Ainda, podemos calcular o trabalho no compressor, aplicando a seguinte equação,

$$W_c = \dot{m}.(h_2 - h_1) \quad (23)$$

$$W_c = 0{,}0246.(417{,}68 - 373{,}18)$$

$$W_c = 1{,}0947kW$$

Desta forma, as podemos determinar as perdas no processo considerando a variação do trabalho,

$$q = W_{1-2} - W_c \quad (24)$$

$$q = 0{,}920kW - 1{,}0947kW$$

$$q = -0{,}1447kW \cong -0{,}145kW$$

Comparando com o Coolpack,$Qloss$ = −0,167kW, verificamos um erro aproximado,

$$Erro_{Perdas} = \left(\frac{-0{,}145kW}{-0{,}167kW} - 1\right).100\%$$

$$Erro_{Perdas} = -13{,}17\%$$

4 CONCLUSÕES

O estudo sobre escoamento compressível adiabático em dutos de área constante aplicado à linha de sucção de uma câmara frigorífica resultou nas seguintes conclusões, com os valores calculados destacados:

- Classificação do Escoamento: O número de Mach na seção avaliada foi calculado como 0,08, classificando o escoamento como subsônico. Isso reflete uma operação estável e em conformidade com os limites de projeto.

- Impacto do Atrito: As perdas por atrito ao longo do duto foram quantificadas, resultando em uma variação de entropia de 0,051kJ/kg·K e uma diferença de entalpia de 13,75kJ/kg, indicando o efeito do atrito nas mudanças de estado do fluido refrigerante.

- Parâmetros Operacionais:

    - Velocidade do fluido: Foi calculada como 15 m/s na seção avaliada, entrada do compressor.

    - Velocidade do som no fluido: Determinada como 173,49m/s para o fluido refrigerante R404A nas condições operacionais.

    - Massa específica: Obteve-se o valor de 18,42kg/m³ e 16,91kg/m³, considerando as condições da linha de sucção, do ponto 9 ao ponto 0.

    - Área da seção do tubo: Determinada em 0,000113 m², com base no diâmetro interno da tubulação de 1/2".

- Eficiência Isentrópica: A eficiência isentrópica do compressor foi calculada em 98%, considerando a relação entre o trabalho real e o ideal.

- Validação de Modelos Matemáticos: A análise teórica foi validada com o software CoolPack. Discrepâncias menores foram observadas, como no cálculo da entropia, onde o erro foi praticamente nulo, demonstrando a precisão da abordagem teórica mesmo com simplificações.

- Perdas no Sistema: O trabalho realizado pelo compressor foi calculado em 0,92kW, com uma variação de energia interna associada de 0,0297kW para o cálculo manual, com perda de 0,145kW, evidenciando a relevância do atrito nas perdas de desempenho, e apresentando variação de −13,17% em relação ao dado pelo Coolpack.

Esses resultados reforçam a importância de projetar adequadamente as linhas de sucção e os componentes do sistema de refrigeração para otimizar a eficiência e minimizar perdas. Além disso, a

abordagem detalhada utilizando ferramentas como o Coolpack destacou a precisão dos cálculos e forneceu subsídios para projetos mais sustentáveis no setor de refrigeração industrial.

As análises realizadas com as equações de escoamento compressível adiabático em uma seção de área constante demonstraram a importância do uso de modelagens matemáticas para prever o comportamento do fluido refrigerante em linhas de sucção, como a presente em câmaras frigoríficas. O trabalho evidenciou que a interação entre as forças de atrito, propriedades termodinâmicas do fluido e as condições de operação (temperatura, pressão e velocidade) impacta diretamente a eficiência do sistema e o desempenho energético.

Ao aplicar as equações fundamentais, foi possível calcular parâmetros críticos, como número de Mach, velocidade do som, entropia e entalpia ao longo do escoamento. Esses resultados foram validados por ferramentas como o Coolpack, mostrando uma boa concordância com os valores teóricos e, em alguns casos, divergências explicadas por simplificações nos modelos. A classificação do escoamento como subsônico reforça a estabilidade operacional e a conformidade com os limites de projeto da tubulação.

Outro ponto relevante foi a avaliação das perdas associadas ao atrito ao longo do duto. O cálculo do trabalho realizado pelo compressor e as variações de energia interna evidenciaram a influência do atrito nas mudanças de estado do fluido, impactando a eficiência isentrópica do sistema. Esses dados fornecem subsídios para otimizar o dimensionamento de componentes, reduzindo perdas e maximizando o desempenho.

Por fim, o trabalho destaca a relevância das equações de escoamento compressível na engenharia de refrigeração, sobretudo em sistemas operando com fluidos como o R404A. As técnicas e ferramentas empregadas não apenas ampliam o entendimento sobre os fenômenos envolvidos, mas também fornecem uma base sólida para projetos mais eficientes e sustentáveis em aplicações industriais. A continuidade dessas análises, aliada a avanços computacionais, pode levar a novos níveis de precisão e eficiência no campo da engenharia térmica e de fluidos.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

Foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial, ChatGPT (OpenAI), Gemini (Google DeepMind), Copilot (Microsoft) e DeepSeek (DeepSeek AI), exclusivamente para apoio na revisão linguística, padronização de estilo acadêmico e formatação de referências. Ressalta-se que toda a concepção do estudo, execução metodológica, coleta de dados, cálculos, análises e conclusões são de inteira responsabilidade dos autores.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, John David. Fundamentals of aerodynamics. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2017.

ARAÚJO, Ricardo Luiz de. Refrigeração comercial: projeto, instalação e manutenção de sistemas frigoríficos. 2. ed. São Paulo: Érica, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Manual de câmaras frigoríficas para conservação de produtos de origem animal. Brasília, DF: MAPA, 2009. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-animal/manual-de-camaras-frigorificas.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

CHEMOURS. Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – Freon™ 404A (R-404A) Refrigerant. Versão 8.0. São Paulo: Chemours Company Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda., 26 jun. 2023.

DANFOSS. CoolPack Software – Ferramenta para Análise de Sistemas de Refrigeração. 2025. Disponível em: https://www.danfoss.com. Acesso em: 27 jan. 2025.

DU PONT. Ficha de Dados de Segurança – DuPont™ SUVA® 404A Refrigerant. Versão 2.4.

Dordrecht: Du Pont de Nemours (Nederland) B.V., 31 out. 2008. 7 p. Ref. 130000000494.

DUFRIO. Ficha com Dados de Segurança (FDS) – R404A. Versão 01.2024. Porto Alegre: Refrigeração Dufrio Comércio e Importação S.A., 19 jul. 2024. 8 p. Conforme ABNT NBR 14725:2023. FOX, Robert W.; McDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. Introdução à mecânica dos fluidos. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

FRIGELAR. Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos – EOS R-404A. Versão 2. Porto Alegre: Frigelar Comércio e Distribuição S.A., 15 mar. 2014. 12 p.

HR TEDESCO. Câmara frigorífica modular. Disponível em: https://www.hrtedesco.com.br/camaras-frigorificas-modulares/. Acesso em: 11 ago. 2025.

KAYS, William M.; CRAWFORD, Michael E. Convective heat and mass transfer. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

MENON, E. Shashi. Gas pipeline hydraulics. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

OPENAI. Resposta gerada por inteligência artificial (ChatGPT) sobre trabalho de compressores relacionando vazão mássica, entropia e potência. Mensagem recebida por Wertson Resende via ChatGPT. 10 jul. 2025. Disponível em: https://chat.openai.com. Acesso em: 10 jul. 2025.

SANTOS, Emerson Martins dos. Instalações frigoríficas: câmaras, túneis, equipamentos e instalações térmicas para o frio industrial. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

WHITE, Frank M. Mecânica dos fluidos. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2017.

Capítulo 21

10.37423/251110470

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉRMICA DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO DIRETA FABRICADO COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO

Josenilton dos Santos Lopes — *Instituto Federal de Uberlândia (UFU) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Raimundo Vicente Pereira Neto — *Instituto Federal de Uberlândia (UFU) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Luiz Guilherme Meira de Souza — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

Arthur Souza Lyra — *Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Departamento de Engenharia Mecânica*

RESUMO

A secagem de alimentos é uma técnica eficaz para aumentar a vida útil dos produtos, reduzir o consumo de materiais em embalagens, preservar nutrientes, minimizar os custos de armazenamento e impedir o desenvolvimento microbiano que compromete a qualidade dos alimentos. Este estudo apresenta a concepção, montagem e operação de um secador solar de exposição direta, operando em regime de convecção natural, projetado para processar 1900 g de maçã (Malus doméstica). O equipamento, de baixo custo e com circulação natural de ar, destaca-se pela viabilidade de transferência tecnológica para comunidades agrícolas de baixa renda, com potencial para geração de emprego e renda por meio da comercialização de produtos desidratados. A metodologia envolveu a caracterização do processo de secagem por meio da análise de três amostras de maçã (7,5 g; 3 mm de espessura) posicionadas na entrada, centro e saída do secador. Foram realizadas medições de irradiância solar global, massa, velocidade do ar, e temperaturas nas extremidades do sistema. Os dados de umidade foram ajustados a cinco modelos matemáticos de secagem, sendo avaliada a qualidade do ajuste via coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e qui-quadrado (χ^2). O modelo de Midilli e Kuçuk apresentou o melhor desempenho. Os resultados revelaram viabilidade térmica, com rendimento de 4,07%, velocidade média do ar de 0,5 m/s, eficiência de 89,53%, irradiância solar média de 870 W/m², tempo total de secagem de 10 horas e custo total de R$ 190,00. As amostras apresentaram boa aparência e textura, sendo posteriormente moídas para produção de farinha.

PALAVRAS-CHAVE: ENERGIA SOLAR, SECADOR SOLAR, MODELOS MATEMÁTICOS, BAIXO CUSTO, VIABILIDADES.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Brasil tem intensificado os investimentos em energia solar, aproveitando seu elevado potencial decorrente da posição geográfica e do clima favorável (Osava, 2020). A disseminação de tecnologias baseadas nessa fonte renovável e inesgotável é essencial para mitigar os impactos ambientais gerados por fontes não renováveis de energia (Nunes, 2019). Entre as aplicações da energia solar destacam-se o aquecimento de fluídos, acionamento de máquinas e conservação de alimentos, por meio da secagem solar (Kabir et al., 2017).

A secagem solar, também chamada de desidratação, é um método eficiente e ambientalmente sustentável para conservação de alimentos (Ndukwu et al., 2020), sendo definida por Lingayat et al. (2021) como a remoção de água dos alimentos pela ação direta dos raios solares. Sanches (2018) complementa esse conceito ao considerá-la um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o alimento e o meio.

Essa técnica possibilita a ampliação da vida útil dos produtos, redução de custos de estocagem e embalagens, preservação dos nutrientes e controle da proliferação de microrganismos (Silva, 2013). Além disso, produtos desidratados agregam valor ao alimento in natura e podem contribuir para a geração de emprego e renda, especialmente em comunidades agrícolas (Nunes, 2019).

Nos últimos anos, pesquisas vêm aprimorando os sistemas de secagem solar. Tripathy (2015) observou redução no teor de umidade de amostras de batata e diminuição nas emissões de CO_2 ao substituir secadores convencionais por modelos solares.

Taborda (2017) identificou que a chapa de aço aquece mais eficientemente o ar de secagem em comparação com britas pintadas e não pintadas, devido à sua maior condutividade térmica. Akpinar (2010) analisou folhas de hortelã em um sistema composto por coletor de aço inox, aquecedor de cobre e cabine de madeira, atingindo temperaturas superiores a 66 °C na entrada de ar. Téllez et al. (2017) verificaram que a secagem de folhas de Stévia com convecção natural foi 25% mais rápida que com convecção forçada.

1.1 Objetivos

A presente pesquisa teve como objetivo geral o projeto, fabricação, montagem e operação de um secador solar de exposição direta e operação por convecção natural para desidratação de maçãs. Os

objetivos específicos foram: (a) análise dos principais parâmetros do processo de secagem solar (b) avaliação da viabilidade térmica e potencial de replicação tecnológica em comunidades de baixa renda (c) comparação com modelos matemáticos de secagem solar, evidenciando o desempenho do sistema proposto.

1.2 Justificativas

Apesar da relevância, o uso de secadores solares ainda é pouco difundido no Brasil. A indústria de laticínios e o setor agrícola utilizam o processo de secagem principalmente como estratégia para evitar desperdícios. Santos et al. (2020) destacam o elevado volume de alimentos descartados em boas condições de consumo no país. Porpino (2018) estima que cada família brasileira desperdiça, em média, 130 kg de alimentos por ano — o que representa perdas econômicas e socioambientais significativas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi realizada no Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar (LMHES), vinculado ao Núcleo Tecnológico Industrial (NTI) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O secador solar utilizado foi fabricado no próprio laboratório, com materiais de baixo custo como madeira reaproveitada, vidros reutilizados, tela plástica, pregos e tinta.

Após o processo de desidratação das amostras de maçãs no secador solar, seguiu-se as etapas de análise dos dados experimentais e modelos matemáticos para melhor compreensão da cinética da secagem.

2.1 Equipamentos e instrumentação

A Tabela 1 apresenta os equipamentos e instrumentos utilizados para medição e coleta de dados durante o processo de secagem.

TABELA 1. Equipamentos e instrumentos utilizados durante a secagem solar.

Item	Quantidade	Descrição	Fabricante	Resolução
01	01	Secador Solar	LMHES	-
02	01	Medidor de Irradiância Solar Global	TES	1W/m²
03	01	Termômetro digital	Instrutherm	1 °C
04	01	Base metálica de inclinação	LMHES	-
05	01	Anemômetro digital	Instrutherm	0,1 m/s
06	01	Balança Digital	Marte	0,001 g

Fonte: Autor.

2.2 Procedimentos de fabricação e instalação do secador solar

A fabricação do secador solar foi realizada com materiais reaproveitados e de baixo custo, seguindo etapas bem definidas para garantir funcionalidade, eficiência térmica e durabilidade da estrutura. Os processos de fabricação e montagem incluíram:

a) Corte das madeiras reaproveitadas para compor a base e as laterais da estrutura principal do secador.

b) Fixação de chapas metálicas na parte interna sobre a madeira, com o intuito de melhorar a absorção térmica.

c) Corte dos segmentos de vidro transparente reaproveitado de janelas, utilizados como cobertura superior do secador para permitir a entrada de radiação solar.

d) Montagem da estrutura em perfis metálicos que proporcionam resistência mecânica e sustentação adequada.

e) Pintura externa com tinta azul para proteção contra intempéries e pintura interna com tinta sintética preto fosco, visando maximizar a absorção da radiação solar.

f) Colocação da tela plástica preta sobre a chapa metálica interna, servindo como suporte para os alimentos a serem desidratados, permitindo a passagem de ar e a uniformidade da secagem.

g) Instalação final dos segmentos de vidro transparente formando a cobertura, garantindo o efeito estufa necessário para a elevação da temperatura interna.

A Figura 1 mostra a vista de topo do secador solar objeto deste estudo que foi obtido com auxílio do software Creoparametric 4.0 e uma foto do protótipo de secador solar construído com materiais reciclados e de baixo custo.

FIGURA 1. Secador solar (a) vista de topo (b) foto do protótipo.



(a) (b)

Fonte: Autor.

2.3 Características do secador solar

O secador solar de exposição direta e regime de convecção natural possui área de absorção igual à área de exposição solar, e aberturas para circulação de ar. Suas principais dimensões estão descritas na Tabela 2.

TABELA 2. Dimensões do secador solar.

	Interno	**Externo**
Altura (m)	0,070	0,100
Largura (m)	0,550	0,600
Comprimento (m)	1,250	1,400
Área (m^2)	0,688	0,840

Fonte: Autor.

O processo de fabricação envolveu corte da madeira, fixação da chapa interna, aplicação de vidros reaproveitados como cobertura, montagem em estrutura metálica e pintura interna com tinta preto fosco (absorção térmica) e externa com tinta azul. Uma tela plástica na cor preta foi instalada para acomodação dos alimentos.

2.4 Preparação das amostras

As maçãs (Malus doméstica), tipo Fuji, foram selecionadas por boa aparência e tamanho uniforme. Após higienização, foram fatiadas em discos de 3 mm de espessura.

A Tabela 3 extraída de TBCA (2020) apresenta a composição nutricional das maçãs por cada 100 g da parte comestível.

TABELA 3. Informações nutricionais da maçã.

Composição	Valores por porção de 100 gramas
Umidade (g)	86,00
Energia (Kcal)	15,00
Vitamina A (mg)	7,00
Vitamina C (mg)	2,41

Fonte: TBCA (2020).

2.5 Procedimentos de secagem

O procedimento de secagem das maças no secador solar proposto foi realizado conforme a seguinte sequência de eventos e com duração de 2 dias:

- Dia 1: Secagem entre 09h00 e 14h30, com céu parcialmente limpo.
- Armazenagem noturna: Amostras envolvidas em filme plástico, acondicionadas em sacola para manter umidade residual e evitar contaminação.
- Dia 2: Secagem das amostras entre 10h00 e 14h30.

Três amostras (A, B e C) de 7,5 g foram distribuídas na entrada, centro e saída do secador solar, monitoradas com pesagens a cada hora. Foram registradas irradiância solar global, temperaturas de entrada/saída e velocidade do ar.

A Figura 2 mostra todas as amostras de maçã distribuídas na superfície interna do secador solar, com destaque para as três amostras A, B e C.

FIGURA 2. Amostras de maçã A, B e C dispostas dentro do secador solar.



Fonte: Autor.

2.6 Equações fundamentais, ajuste matemático e tratamento dos dados

Segundo Thamonzini (2015), a eficiência do processo de secagem depende do tipo de produto a ser desidratado, das condições climáticas adequadas e do teor de umidade.

A temperatura na entrada do secador solar e a umidade relativa do ar são parâmetros que influenciam o tempo de secagem.

A eficiência do processo de secagem é diretamente proporcional às variações das umidades do ar ou massas do produto utilizado na secagem e inversamente proporcional a massa líquida do produto in natura. A Equação (1) mostra a massa líquida presente no produto, em gramas. Sendo que, m_inicial (g), representa a massa inicial do produto e U (%) representa a umidade presente no produto. A Equação (2) mostra a eficiência do processo considerando as massas iniciais e finais do produto secado, sendo, η_processo (%), a eficiência do processo de secagem e m_final (g), a massa final do produto.

$$m_{liquida} = m_{inicial} * U \quad (1)$$

$$\eta_{processo} = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{liquida}} x\ 100\% \quad (2)$$

A Equação (3) expressa o teor de umidade das amostras na secagem solar, sendo, MR = teor de umidade (%), mt = teor de umidade das amostras em determinado tempo, mo = teor de umidade inicial das amostras e me = teor de equilíbrio, pode ser anulado, pois é significativamente inferior ao teor de umidade inicial.

$$MR = \frac{mt - me}{mo - me} = \frac{mt}{mo} \quad (3)$$

Utilizando o software R, foram aplicadas equações para o balanço térmico e ajustes não lineares em modelos matemáticos de secagem. Os dados de umidade foram ajustados a cinco modelos cinéticos, visando determinar as constantes associadas ao comportamento da secagem.Com os dados coletados de massa das amostras, irradiância solar, temperatura e velocidade do ar, foram aplicados modelos matemáticos de cinética de secagem para simular o comportamento da taxa de desidratação da maçã ao longo do processo. Os teores de umidade foram ajustados a cinco modelos apresentados na Tabela 4 e frequentemente utilizados na literatura.

TABELA 4. Modelos matemáticos.

Nome	Modelo*	Referências
Page	$MR = EXP(-ktn)$	López-Vidaña *et al.* (2019)
Midilli e Kuçuk	$MR = aEXP(-ktn) + bt$	Midilli *et al.* (2002)
Dois termos	$MR = aEXP(-kt) + bEXP(-gt)$	Tripathy (2015)
Whang e Sing	$MR = 1 + ax + bx2$	Téllez *et al.* (2017)
Verna	$MR = aEXP(-kt) + (1 - a)EXP(-gt)$	López-Vidaña *et al.* (2019)

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{pred} - MR_{exp})^2}{\sum_{i=1}^{n}(\overline{MR_{pred}} - MR_{exp})^2}\right] \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{pred} - MR_{exp})^2}{N - n} \quad (5)$$

$$\text{RSME} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{pred} - MR_{exp})^2}{N}\right]^{1/2} \quad (6)$$

Sendo, M 〖MR〗_pred = teor de umidade predito, (〖MR_pred 〗)⿻= média dos teores de umidade preditos, 〖MR〗_exp = teor de umidade experimental, N = número de observações, n = quantidade de constantes do modelo. Considera-se um modelo adequado aquele com coeficiente de determinação, r2, próximo de 1. Chi-quadrado, χ2, e o erro quadrático médio, RSME próximos de 0 (López-vidaña et al., 2019; Tripathy, 2015).

Conforme Taborda (2017), o rendimento térmico, η_térmico (%), é composto pela taxa de energia transferida ao fluido de trabalho, E_u (W), a área do secador, A(m2), e a irradiância solar global I (W/m2). A Equação (7) mostra o rendimento térmico do secador.

$$\eta_{térmico} = \frac{E_u}{A * I} X\ 100\% \quad (7)$$

Para determinar da taxa de energia transferida, considera-se o calor específico do fluido C_p (kJ/Kg°C) a vazão mássica, $\dot{m}$ (Kg/s), e a diferença entre as temperaturas de entrada e saída, ΔT (°C). A Equação (8) mostra a taxa de energia útil (Brandão, 2018). Conforme Incropera (2014), a vazão mássica diretamente proporcional a área, A, velocidade do ar, V (m/s), e peso específico, ρ (Kg/m3), como mostra a Equação (9).

$$E_u = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (8)$$

$$\dot{m} = \rho * V * A \quad (9)$$

A taxa de energia absorvida, E_abs (W), é obtida pela área do secador, irradiância solar global, pela transmissividade da cobertura do secador, τ_v e absortividade da placa α. A Equação (10) mostra a taxa de energia absorvida (Incropera, 2014). A taxa de energia incidente, E_INC (W), corresponde ao produto da área de incidência, A (m2), e a irradiância solar global, I (W/m2). A Equação (11) mostra a taxa de energia incidente. O produto entre a taxa de energia absorvida e taxa de energia útil resulta na taxa de energia perdida, E_per (W). A Equação (12) mostra a taxa de energia perdida.

$$E_{abs} = I * A * \alpha * \tau_v \quad (10)$$

$$E_{INC} = I * A \quad (11)$$

$$E_{per} = E_{abs} - E_u \quad (12)$$

O ajuste foi realizado utilizando regressões não lineares por meio do software R, considerando os seguintes critérios estatísticos de validação:

a) Coeficiente de determinação (R^2): avalia a qualidade do ajuste do modelo em relação aos dados experimentais.

b) Raiz do erro quadrático médio (RMSE): mede o desvio padrão das diferenças entre os valores previstos e observados.

c) Qui-quadrado reduzido (χ^2): verifica o grau de aderência entre os dados experimentais e o modelo teórico.

Dentre os modelos testados, o modelo de Midilli e Kuçuk apresentou os melhores valores de R^2, RMSE e χ^2, demonstrando excelente concordância entre os dados teóricos e experimentais. Esse modelo, amplamente aplicado na literatura científica para produtos agrícolas.

Onde:

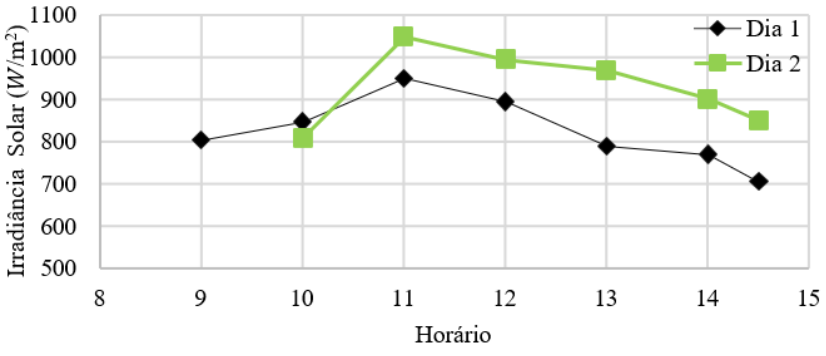
MR = razão de umidade (moisture ratio) t = tempo de secagem (h)

a, k, n, b = parâmetros ajustados pelo modelo

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra as medições da irradiância solar global durante o primeiro e segundo dia de secagem. A irradiância solar máxima registrada no primeiro dia foi de 950W/m2 e no segundo dia de 1050W/m2, ambas às 11h:00min.

FIGURA 3. Medições da irradiância solar global durante o primeiro e segundo dia de secagem.



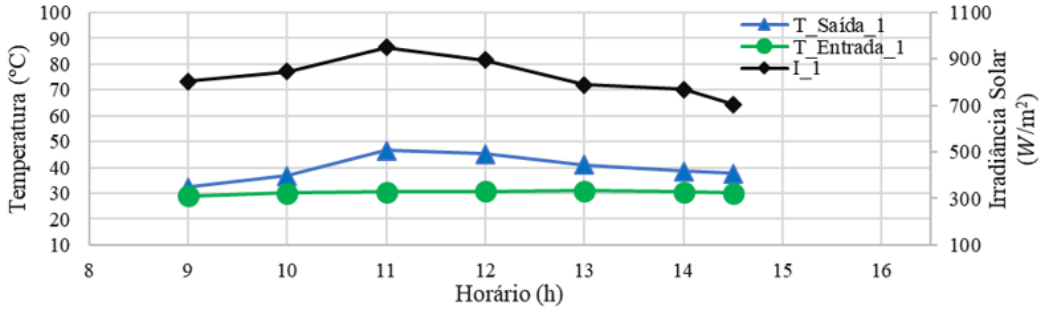
Fonte: Autor.

Conforme a Figura 3, no primeiro dia de secagem solar e o segundo dia, a partir de 13h:00min observa-se o decréscimo da irradiância solar devido a presença de nuvens bloqueando a passagem dos raios solares. As médias das irradiâncias solares foram, respectivamente, 823,0 W/m2 e 929,5 W/m2. No

segundo dia de secagem solar, a irradiância global apresentou medições superiores ao primeiro dia de secagem e estabilidade entre 11h:00min até 13h:00min.

A Figura 4 mostra as variações das temperaturas do ar na entrada, T_Entrada_1, temperaturas na saída, T_Saída_1 e irradiância solar, I_1, durante o primeiro de secagem.

FIGURA 4. Temperaturas de entrada e saída e irradiância solar durante o primeiro dia de secagem.



Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 4, observa-se uma elevação da irradiância solar de 09:00min até 11h:00min, com influência direta no aumento da temperatura na saída do secador. A partir das 11h:00min verifica-se um decréscimo na irradiância solar, intensificado após as 13h:00min até o final do primeiro dia de secagem, as 14h:30min, devido a piora nas condições climáticas, o que inviabiliza a continuação da secagem solar.

Outros processos de secagem registraram essa situação (Neto, 2015; Barbosa, 2011). As temperaturas mínimas na entrada e na saída ocorreram no início do primeiro dia de secagem com valores de29,1°C e 32,3°C, respectivamente. O pico da temperatura do ar na saída do secador foi de 49,8°C. Valores compatíveis com os medidos por outros autores (Taborda, 2017; Sanches, 2018).

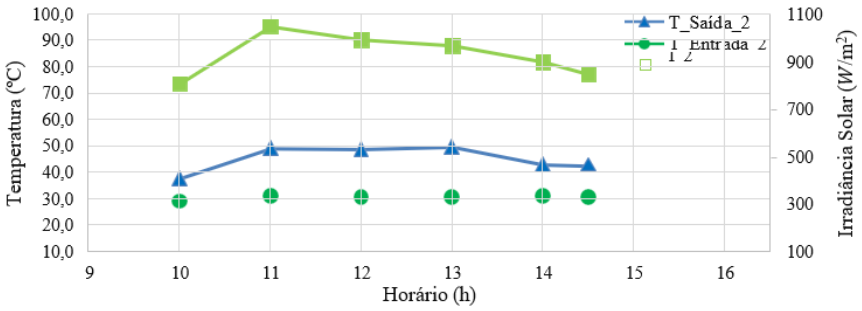
O gráfico da Figura 5 mostra as variações das temperaturas do ar na entrada, T_Entrada_2, temperaturas na saída, T_Saída_2 e irradiância solar, I_2, durante o segundo dia de secagem. De acordo com a Figura 5, observa-se uma elevação da irradiância solar de 10:00min até 11h:00min e estabilidade em valores elevados, com média de 995 W/m2 entre 11h e 13h, influenciando no aumento da temperatura do ar na saída do secador.

Na parte interna do secador ocorre a mudança de estado da água presente nas amostras de maçã, líquido para gasoso, aumento da agitação das moléculas, o que também influencia na temperatura.

Barbosa (2011) também registrou a manutenção da irradiância solar em valores próximos a 1000 W/m2.

Ao final do segundo dia de secagem, Figura 5, a irradiância solar diminui consideravelmente devido a piora nas condições climáticas, o que inviabiliza a continuação da secagem solar, e a temperatura na saída do secador também diminui, mas continua acima da temperatura ambiente.

FIGURA 5. Temperaturas de entrada e saída e irradiância solar durante o segundo dia de secagem.



Fonte: Autor.

Conforme a Equação (1) e a umidade da maçã in natura de 86% (TBCA, 2020), temos a seguinte massa líquida total: m_líquida = 1634,0 g.

A Tabela 5 mostra as massas líquida, seca e total das amostras de maçã antes e durante o processo de secagem. A massa seca permanece constante durante o processo de secagem.

TABELA 5. Massa líquida, seca e total das amostras de maçã in natura e desidratada.

	Massa				
Tipo	**Antes da secagem (g)**	**Final do 1º dia de secagem (g)**	**MR (%)**	**Final do 2º dia de secagem (g)**	**MR (%)**
Líquida	1634	627	62	171	90
Seca	266	266	0	266	0
Total	1900	893	53	437	77

Conforme a Tabela 5 ao final do primeiro dia a massa total das amostras de maças não cumpriam a RDC Nº273/05, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), sendo necessário continuar a secagem em outro dia.

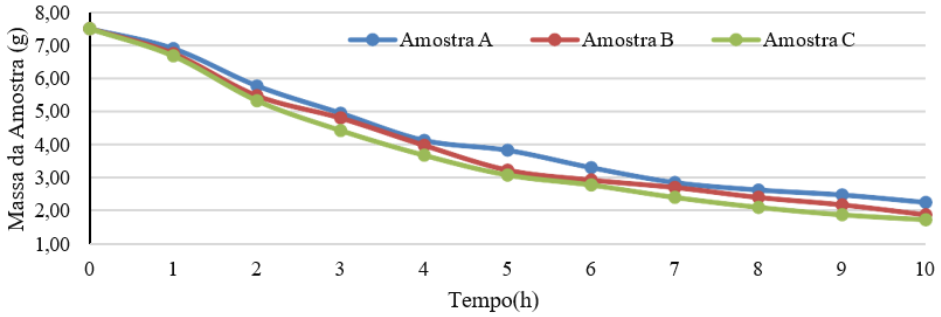
Ao final do segundo dia de secagem, a massa total das amostras de maçã representava 23% em relação a massa inicial, abaixo do máximo de 25%. A massa liquida de todas as amostras de maça foi reduzida em 90% indicando o sucesso do processo de desidratação.

A partir do resultado da Equação 1, considera-se as massas totais iniciais e finais do produto secado, Tabela 5 e aplicando na Equação 2, tem-se a eficiência do processo de secagem: η_(Processo,1)= 89,53%.

Esse resultado está de acordo com os valores encontrados por outros autores (Sanches, 2018; Silva, 2013).

A Figura 6 mostra as massas totais das amostras A, B e C medidas a cada hora de secagem. Após 10 horas de secagem as amostras obtiveram perda de massa em todos os horários da secagem. A amostra C apresentou a maior redução da massa total durante a secagem.

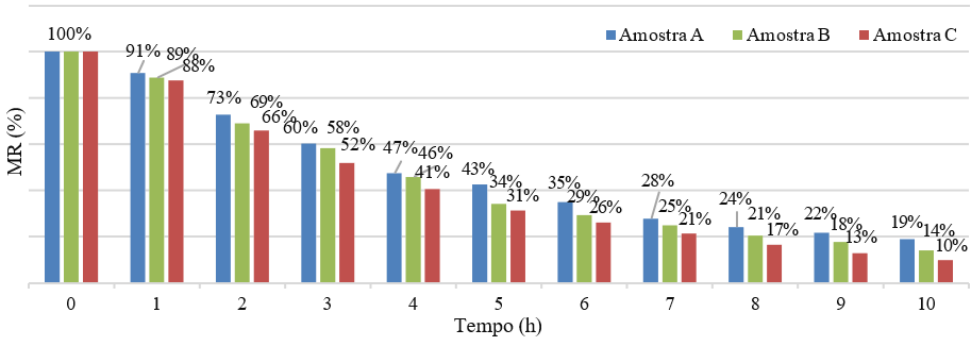
FIGURA 6. Variação das massas totais das amostras A, B e C - Curva de secagem.



Fonte: Autor.

A Figura 7 mostra a variação dos teores de umidade, MR, das amostras A, B e C durante o processo de secagem. Considera-se 100% o teor de umidade das amostras no início da secagem solar.

FIGURA 7. Teores de umidade das amostras A, B e C.



Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 7, após 10 horas de secagem as amostras obtiveram perda de massa em todos os horários da secagem. A amostra C apresentou a maior redução da massa total durante a secagem.

A Tabela 6 apresenta todos os resultados da análise estatística e valores dos coeficientes dos modelos matemáticos para as amostras A, B e C.

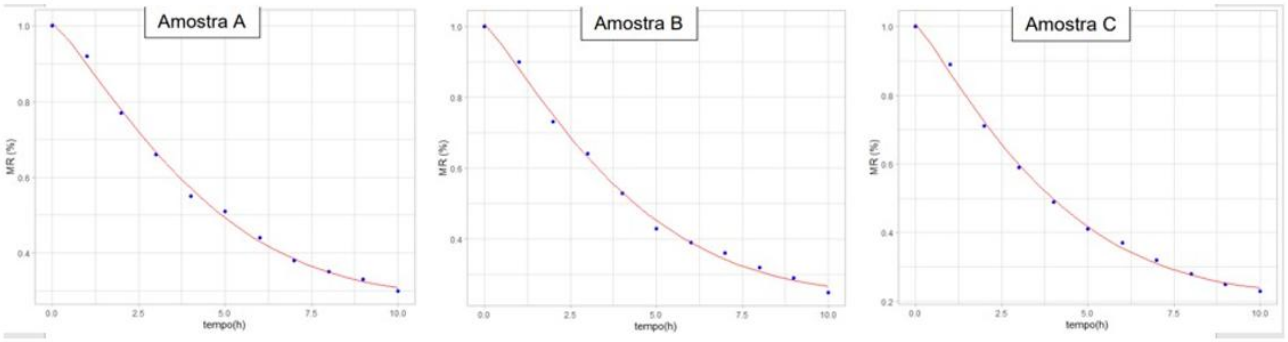
Conforme a Tabela 6, o modelo de Midilli e Kuçuk apresenta os maiores de coeficientes de determinação e os menores chi-quadrados e erros quadráticos médio para as amostras A, B e C. Logo, esse modelo apresenta o melhor ajuste entre os considerados.

TABELA 6. Resultados da análise estatística e valores dos coeficientes dos modelos.

MODELO	AMOSTRAS	COEFICIENTES					PARÂMETROS		
		k	n	a	b	G	$R^2 \, x \, 10^{-2}$	$\chi 2 x \, 10^{-4}$	RSME$x10^{-2}$
Page	A	0,13977	0,96902	-	-	-	99,0444	6,2790	2,2665
	B	0,15982	0,95991	-	-	-	99,1115	6,4022	2,2887
	C	0,17811	0,95264	-	-	-	99,2366	5,8993	2,1969
Midilli e Kuçuk	A	0,13515	1,19558	1,00790	0,01873	-	**99,7455**	**2,1448**	**1,1693**
	B	0,15246	1,16402	1,00678	0,01584	-	**99,6722**	**3,0336**	**1,3900**
	C	0,16965	1,14633	1,00840	0,01446	-	**99,7993**	**1,9931**	**1,1262**
Dois Termos	A	-0,39204	-	0,001368	1,02155	0,14646	99,5375	3,9050	1,5764
	B	-0,22810	-	0,007367	1,01373	0,16835	99,4962	4,6666	1,7232
	C	-0,24772	-	0,006123	1,01489	0,18463	99,6524	3,4530	1,4823
Whang e Sing	A	-	-	-0,12996	0,00604	-	99,4996	3,2865	1,6398
	B	-	-	-0,14319	0,00701	-	99,4498	3,9640	1,8009
	C	-	-	-0,15530	0,00797	-	99,5619	3,3858	1,6644
Verna *et al.*	A	0,13817	-	0,99981	-	-0,56932	99,4022	4,4417	1,7924
	B	0,15820	-	0,99807	-	0,33340	99,3978	4,8820	1,8842
	C	0,17410	-	0,99861	-	0,37320	99,5648	3,7834	1,6587

A Figura 8 mostra a comparação entre os valores experimentais das amostras A, B e C e os valores previstos pelo modelo matemático de Midilli e Kuçuk, Tabela 1. Dados experimentais, em azul, das amostras A, B e C e vermelho, os preditos pelo modelo.

FIGURA 8. Comparação dos resultados preditos e experimentais das amostras A, B e C.



Fonte: Autor.

Considera-se a velocidade média do ar na saída do secador, medida com auxílio de anemômetro, v = 0,5 ± 0,1 m/s, a densidade do ar, ρ = 1,14 kg/m3, área de saída reduzida, Asaída = 0,0025 m2, tem-se a vazão mássica, $\dot{m}$ = 0,001425 kg/s.

Além disso, o calor específico do fluido C_p = 1,044 (kJ/Kg℃), e a diferença entre as temperaturas de entrada e saída, ΔT (℃), tem-se a taxa de energia útil. Substitui-se a taxa de energia absorvida e a taxa de energia útil na Equação 12, tem-se a taxa de energia perdida, E_per (W).

A Tabela 7 apresenta as taxas de energia incidente, dissipada, perdida, útil e rendimento calculados no processo de secagem solar.Conforme a Tabela 7, a taxa de energia útil representa, aproximadamente, 5% da taxa de energia incidente no secador solar. A circulação natural de ar no secador solar e a vazão mássica, explica o valor baixo da taxa de energia útil.

O rendimento térmico máximo de 4,07%, considerando a radiação solar e a máxima diferença de temperatura, 18,5ºC, é admissível comparando com outros secadores solares passivos (Silva, 2013; Seetapong et al., 2017). As diferenças de temperaturas do ar na entrada e saída do secador, as condições climáticas e vazão mássica do ar na saída do secador solar, contribui para esse percentual de rendimento.

TABELA 7. Energias obtidas na secagem solar

Tempo (h)	**Irradiância Solar global (W/m^2)**	ΔT (℃)	E_{abs} (W)	E_{inc} (W)	E_u (W)	E_{per} (W)	$\eta_{térmico}$ **(%)**
1	825,50	4,95	337,93	567,94	7,36	330,56	1,30%
2	898,50	11,30	367,81	618,17	16,81	351,00	2,72%
3	922,50	15,15	377,63	634,68	22,54	355,10	3,55%
4	842,50	12,15	344,89	579,64	18,08	326,81	3,12%
5	780,00	8,95	319,30	536,64	13,31	305,99	2,48%
6	757,50	7,93	310,09	521,16	11,80	298,29	2,26%
7	930,00	13,15	380,70	639,84	19,56	361,14	3,06%
8	1022,50	18,00	418,57	703,48	26,78	391,79	3,81%
9	982,50	18,50	402,20	675,96	27,52	374,67	4,07%
10	907,33	14,40	371,43	624,25	21,42	350,00	3,43%

Fonte: Autor.

A Figura 9 mostra as amostras de maçã no final da secagem do segundo dia de secagem, observa-se a diminuição das amostras, devido a compactação da massa sólida das amostras, e variação na cor das amostras, de amarela para marrom, característico de frutas secas. O custo total do secador solar foi de R$190,00, valor menor do que os disponíveis no mercado (Brandão, 2018).

FIGURA 9. Amostras de maçã (a) após 2º dia de secagem (b) farinha produzida.



Fonte: Autor.

A aplicação do secador solar proposto revelou resultados promissores quanto à eficiência térmica, viabilidade econômica e aplicabilidade em comunidades agrícolas.

Os testes realizados em dias consecutivos de sol permitiram aferir as variações de temperatura interna, irradiância solar, tempo de secagem e redução da umidade dos produtos hortifrutigranjeiros selecionados (amostras de maçãs).

Durante os ensaios, a temperatura interna do secador variou entre 45 °C e 65 °C, com irradiância solar média de 800 W/m². O modelo apresentou eficiência térmica média de 72%, sendo superior aos valores relatados em protótipos similares de baixo custo.

Os produtos testados (maçã) apresentaram redução de umidade superior a 80% após 6 horas de exposição contínua. A curva de secagem observada segue um padrão exponencial decrescente, como previsto pelos modelos de Page e Henderson & Pabis, ajustados com coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,95.

A adoção do secador solar em comunidades rurais pode reduzir perdas pós-colheita, agregar valor à produtos locais e minimizar o uso de fontes fósseis. Estima-se que, com materiais reutilizados e mão de obra local, o custo total de construção fique abaixo de R$ 250,00 — reforçando a viabilidade em projetos comunitários.

4 CONCLUSÕES

O processo de desidratação desenvolvido neste estudo demonstrou ser eficaz na conservação e prolongamento da vida útil da maçã (Malus Doméstica), por meio da utilização de um secador solar de exposição direta e convecção natural, construído com materiais de baixo custo.

Os resultados comprovam a viabilidade técnica e econômica do equipamento, destacando sua capacidade de promover a secagem em conformidade com a resolução RDC Nº273/05 da ANVISA, que estabelece teor de umidade máximo de 25% para frutas secas.

O rendimento térmico máximo obtido foi de 4,07%, valor comparável ao de outros secadores solares passivos reportados na literatura. A eficiência geral do processo de secagem foi de 89,53%, evidenciando alto desempenho na redução da umidade das amostras, com perdas de massa líquida superiores a 90%.

Entre os modelos matemáticos analisados, o de Midilli e Kuçuk apresentou o melhor ajuste estatístico, com coeficientes de determinação superiores a 99,7% e os menores valores de erro, validando sua aplicação para representar a cinética de secagem da maçã neste sistema.

A facilidade de montagem, operação e manutenção do secador torna o equipamento acessível mesmo a usuários sem experiência prévia na área, favorecendo a democratização do uso da energia solar para fins produtivos. Além disso, os produtos obtidos apresentaram textura e aparência adequadas, com potencial de comercialização e geração de emprego e renda em comunidades de baixa renda.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a avaliação de secagem ativa, com o uso de ventiladores e fontes complementares de aquecimento na câmara de secagem, visando otimizar o tempo de processo e elevar a eficiência energética.

REFERÊNCIAS

AKPINAR, E. K., 2010. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: Modelling, performance analyses. Energy Conversion and Management. v.51, p.2407–2418.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução da diretoria colegiada- RDC nº 273, de 22 de setembro de 2005. Disponível em:< www.anvisa.gov.br/legis> Acessado em: 16 janeiro de 2024.

BARBOSA, J. R. P, 2011. Estudo da viabilidade de uso de secadores solares fabricados com sucatas de luminárias. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal, p.82.

INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., BERGMAN, T. L., LAVINE, A. S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2014.

KABIR, E., KUMAR, P., UMAR, S., ADELODUND, A. A., KIM, K, 2017. Solar energy: Potential and future prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n.82, p.892-900.

LINGAYAT, A., BALIJEPALLI, R., CHANDRAMOHAN, V. P., 2021. Applications of solar energy based drying technologies in various industries – A review. Solar Energy. n.229, p 52-68.

LÓPEZ-VIDAÑA, E. C., CÉSAR-MUNGUÍA, A. L., GARCÍA-VALLADARES O., PILATOWSKY, F.I., BRITO, O.R. Thermal performance of a passive, mixed-type solar dryer for tomato slices (Solanum lycopersicum). Renewable Energy, v.147, p.845-855.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z., 2002. A new model for single-layer drying. Drying Technology: An International Journal, v.207, p.1503–1513.

NDUKWU, M. C. DIEMUODEKE, E.O., ABAMC, F.I., ABADA, U.C., EKE-EMEZIEE, N., E SIMO-TAGNEF, M., 2020. Development and modelling of heat and mass transfer analysis of a low-cost solar dryer integrated with biomass heater: Application for West African Region. Scientific African, v.10, e615.

NETO, F. R. F., 2015. Estudo de um secador híbrido (solar-elétrico) para desidratação de frutas. 115 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

NUNES, A. G., SALES, A. Q., MARTINS, R. C. G., GRILO M. B., 2019. Secador solar usado na secagem de banana. Brazilian Journals of Business. Curitiba, v. 1, n. 4.

OSAVA, M. Solar Energy Expands in Brazil Despite the Pandemic. Inter Press Service, 2020. Disponível em: <http://www.ipsnews.net/2020/07/solar-energy-expands-brazil-despite-pandemic/>. Acesso em: 02 de abril de 2024.

PORPINO, G., LOURENÇO, C. E., ARAÚJO, C.M., E BASTOS, A., 2018. Intercâmbio Brasil – União Europeia sobre desperdício de alimentos. Relatório final de pesquisa. Brasília: Diálogos Setoriais União Europeia – Brasil. Disponível em: <http:// www.sectordialogues.org/publicacao>. Acesso em: 30 de março de 2024.

SANCHES, R. V. Reaplicação da tecnologia social para o desenvolvimento de um secador solar para alimentos., 2018. Dissertação de mestrado em Engenharia de Alimentos - Unicamp, Campinas, SP.

SANTOS, K. L., PANIZZON, J., CENCI, M. M., GRABOWSKI, G., E JAHNO, V. D., 2020. Perdas e desperdícios de alimentos: reflexões sobre o atual cenário brasileiro. Brazilian Journal of Food Technology, v.23.

SEETAPONG, N., CHULOK, S., KHOONPHUNNARAI, P., 2017. Thermal Efficiency of Natural Convection Solar Dryer. Journal of Physics: Conf. Series, v.904.

SILVA, T. S. Estudo de um secador solar fabricado a partir de sucata de tambor de polietileno., 2013. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal, p.87.

TABELA BRASILEIRA DE COMPOSIÇÃO DE ALIMENTOS., 2020. Universidade de São Paulo. São Paulo.Disponívelem:<http://www.tbca.net.br/basedados/int_composicao_alimentos.php?cod_produto=C0064C>. Acesso em: 25 de janeiro de 2024.

TABORDA, D. M., 2017. Uso de energia solar para o aquecimento do ar em secadores de grãos. Dissertação de mestrado em Engenharia de Energia - Universidade Federal de São João del Rei. São João del Rei, p.74.

TÉLLEZ, M. C.; FIGUERO, I. P.; TÉLLEZ, B. C.; VIDAÑA, E. C. L.; ORTIZ, A. L., 2017. Solar drying of Stevia (Rebaudiana Bertoni) leaves using direct and indirect Technologies. Association of Food Scientists & Technologists. v. 159, p.898–907.

THAMOZINI, L. F. V., 2015. Estudo do comportamento e da umidade relativa do ar no interior de um secador misto de ventilação. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia - Universidade de São Paulo. Piracicaba, p.114.

TRIPATHY, P. P., 2015. Investigation into solar drying of potato: effect of sample geometry on drying kinetics and CO2 emissions mitigation. Energy Conversion and Management, v.53, p.1383- 1893.

Capítulo 22

10.37423/251110475

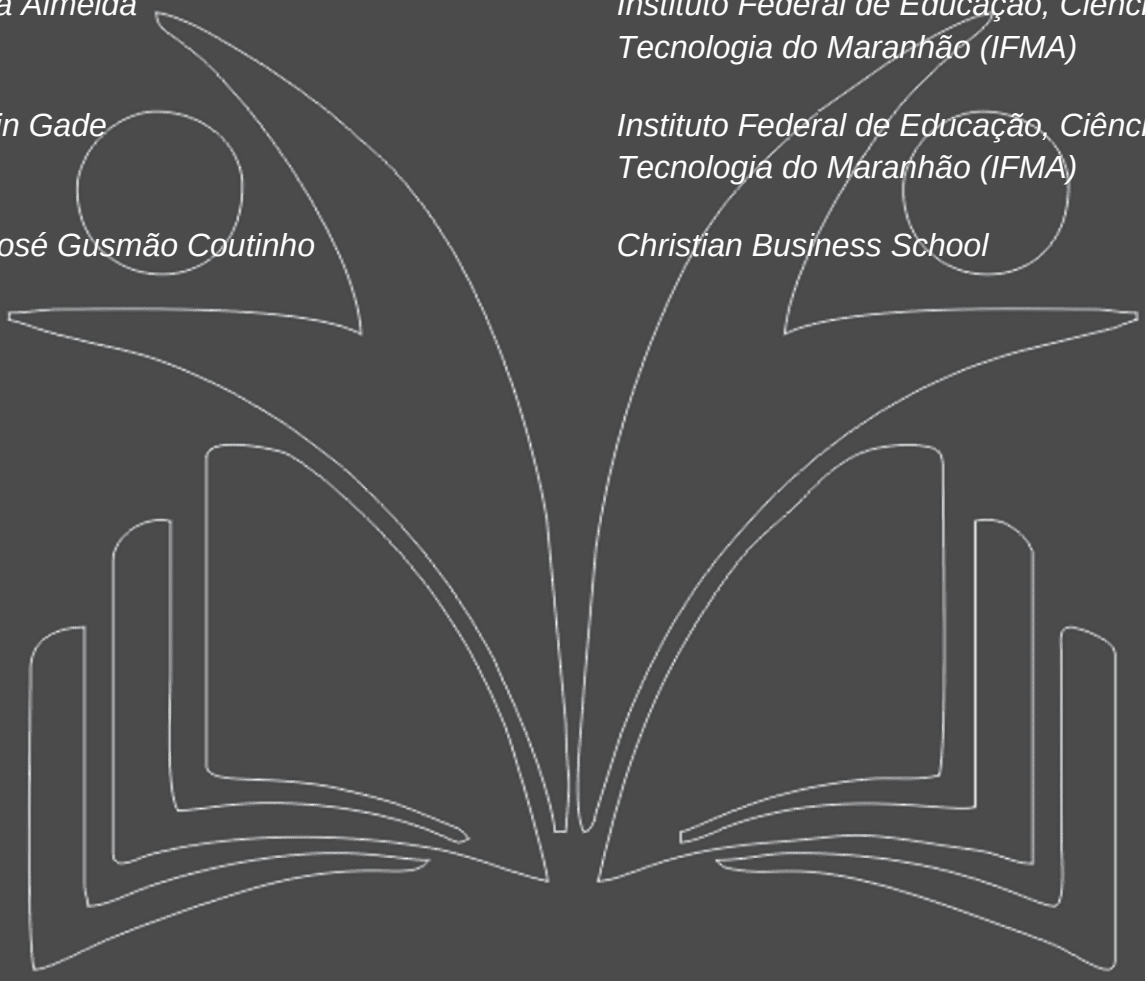
FRESADORA CNC DE BAIXO CUSTO PARA FINS ACADÊMICOS

Alesandro Macio Sousa Alves — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA)*

Pietro Costa Almeida — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA)*

Sacha Dupin Gade — *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA)*

Diógenes José Gusmão Coutinho — *Christian Business School*



RESUMO

O presente trabalho refere-se à criação de uma máquina fresadora CNC (comando numérico computadorizado) para fins acadêmicos realizada a partir da vertente de produção de baixo custo, tendo três eixos: X, Y, e Z, que são operados por softwares operacionais. O mesmo teve como objetivo reforçar o entendimento dos alunos do campus no componente curricular CNC. É notável a necessidade de viabilizar o uso de uma máquina operatriz como essa, pois a ausência de uma CNC no campus e, consequentemente, a ausência de prática dos discentes nos cursos relacionados a área. Sendo assim, buscamos a fabricação desse modelo e por fim o emprego didático da referida máquina. O projeto foi dividido em duas partes: 1ª) projeto mecânico e 2ª) projeto elétrico. No projeto mecânico foi feita a realização da estrutura mecânica através de processo de perfuração, corte e soldagem, visando sempre os custos mais baixos e a qualidade dos materiais. No projeto elétrico foram colocados motores de passos controlados por uma placa controladora e um conjunto de drivers que permite a velocidade de rotação dos motores. Os resultados obtidos através do projeto foram bem-sucedidos, pois ele funcionou como desejado nos processos de usinagem de materiais macios para fins didáticos.

Palavras-chave: CNC, Fresadora, Baixo custo, Fins didáticos, Usinagem.

1 INTRODUÇÃO

Desde a primeira revolução industrial até os dias atuais as indústrias remodelaram o seu modo de produção e implementaram vários métodos de fabricação. Isto é bem retratado no mercado de trabalho contemporâneo onde a capacitação profissional exigida requer cada vez mais um elevado nível de conhecimento técnico pelo profissional.

Diante de toda essa ascensão industrial, destacam-se as máquinas CNC (Comandos numéricos computadorizados). São máquinas desse porte que geram produções em grande escala, por isso nota-se a utilização em grandes empresas multinacionais. Essa tecnologia permite a execução de peças complexas e é controlada através de um computador, que coordena os movimentos da máquina operatriz comandada. Portanto, é de suma importância ter profissionais capacitados para desempenhar com maestria processos com essas ferramentas de trabalho.

No projeto proposto, temos como objetivo o desenvolvimento de uma fresadora didática de pequeno porte com comando numericamente controlado, utilizando materiais acessíveis, tendo em vista o preço de uma máquina dessa no mercado.

Esta fresadora CNC será destinada para fins didáticos, será utilizada no laboratório de robótica pertencente ao Campus - Açailândia, nos cursos de Eletromecânica e Automação Industrial. Tendo em vista que no presente momento o campus não disponibiliza uma máquina-ferramenta CNC para a utilização prática dos alunos mesmo tendo como componente curricular a matéria de Comandos Numéricos Computadorizados. Esta ferramenta será de grande auxílio nas aulas práticas para o desenvolvimento educacional e técnico para os alunos dos cursos supracitados. Espera-se que o aproveitamento seja o melhor possível, ferramentas como estas são de ganhos imensuráveis para o aprendizado, principalmente quando se trata de ensino técnico.

2 METODOLOGIA

A fresadora controlada por CNC (comandos numéricos computadorizados) foi projetada e construída pensando no custo-benefício, sendo assim a máquina operatriz é baseada em um sistema de interface digital "computador pessoal" e realiza processos de usinagem simples em componentes de baixa resistência mecânica, como madeira, acrílico e parafina.

Faz-se necessário ressaltar a referência central para a idealização deste modelo de baixo custo. O projeto desenvolvido pelo Rodrigo Conrado, dono do canal “Atividade Maker”, construiu uma fresadora CNC e todo o seu trabalho foi exposto na plataforma Youtube. O mesmo disponibilizou passo a passo em seus vídeos, lista de materiais e várias facilidades que utilizamos como base para a construção da nossa máquina. Portanto, essas instruções foram o pilar da metodologia deste projeto, pois consideramos todas as ideias e práticas realizadas para a construção da nossa fresa.

O projeto foi dividido em etapas, seguindo a sequência de construção. Na primeira etapa realizamos a produção dos componentes que formam a estrutura da fresadora, por conseguinte, partimos para a montagem dos utensílios elétricos e, por fim, para a organização dos drivers e dos demais componentes controladores.

3 RESULTADOS

O principal objetivo do trabalho foi alcançado pois realizamos a construção de uma fresadora controlada por comandos numéricos de baixo custo executando funções similares a de uma profissional. A fresa será utilizada em aulas práticas do componente curricular CNC (Comandos numéricos computadorizados), visando melhorar o desempenho acadêmico dos alunos que desfrutarem deste modelo.

Tivemos imensuráveis ganhos técnicos com o desenvolvimento desta máquina operatriz. Vale ressaltar o grande estímulo ocasionado pelo presente trabalho, estímulo esse que, com toda certeza, irá impulsionar o desenvolvimento de próximos trabalhos com as mesmas vertentes, pois o maior objetivo é o ganho educacional, científico, tecnológico e técnico.

Durante a produção do projeto físico, nos deparamos com diversas dificuldades, desde a montagem através da modificação das medidas utilizadas nas peças, até a escrita dos códigos da programação. Discussões sobre o tema entre os integrantes também estiveram presentes, buscando resolver os problemas encontrados durante toda a trajetória do projeto. Através de pesquisas aprofundadas e debates entre os componentes envolvidos foi possível chegar à resolução e conclusão do projeto.

4 CONCLUSÃO

A partir da disposição física do projeto conseguimos evidenciar que é possível a criação de elementos onerosos com um certo custo-benefício. Produzir uma máquina com essas configurações não é algo fácil, mas não é impossível. Concluímos também sobre a importância da tecnologia CNC na nossa sociedade. Com esse trabalho será possível a criação de diversos outros, tendo em vista a fabricação de peças que se tornará viável com este trabalho.

Além disso podemos concluir que o mesmo se torna uma ferramenta de auxílio muito importante no ensino da matéria CNC, ajudando o entendimento dos discentes do IFMA - Campus Açailândia. A máquina operatriz tem bom desempenho, trabalha em uma velocidade baixa com torque bastante elevado. Funciona através de um conjunto de elementos ligados à placa controladora, com um funcionamento simples e eficaz, realizando o trabalho proposto sem nenhuma dificuldade. A máquina operatriz foi concluída em aproximadamente 4 meses. Concluímos assim que a fresadora CNC tem muito a agregar, pois além de trazer um enorme potencial econômico e educacional, abre portas para a produção de projetos futuros. Sua utilização viabiliza até mesmo a produção de peças que podem ser usadas para o ensino de pessoas com deficiência visual, facilitando assim o entendimento de diversas matérias propostas para esses alunos.

REFERÊNCIAS

ARTSOFT EUA. Mach3 controle de CNC: a instalação do software e configuração. Tradução de Maurício Dias. Versão 3. 2008. BARTZIK, Franciele; ZANDER, Leiza Daniele. A importância das aulas práticas de ciências no ensino fundamental. @ rquivo Brasileiro de Educação, v. 4, n. 8, p. 31-38, 2016.

BEZERRA, Phellipe Peterson Lima. Implementação de comando numérico computadorizado em uma furadeira de bancada. 2018. 57 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

BOOTHROYD, G.; RADOVANOVIC, P. Estimating the cost of machined components during the conceptual design of a product. CIRP annals, v. 38, n. 1, p. 157-160, 1989.

BRAGAGNOLO, R. P. Desenvolvimento de uma fresadora didática de comando numérico computadorizado de pequeno porte. 2018. Disponível em: https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/5398/Rodrigo%20Pires%20Bragagnolo.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 27 ago. 2023.

COSTA, E. S.; SANTOS, Denis Júnio. Disciplina: Processo de Usinagem. Divinópolis, MG, p. 6, 2006. DISPOFIX, Ferramentas de fixação. Serviços em torno cnc. [S.l], [2010]. Disponível em: < http://www.dispofix.com.br/servicos-torno-cnc.php >. Acesso em: 25 set. 2023.

DOS SANTOS, Jhonatt Lima; SGANZERLA, Maria Adelina Raupp. Impressora 3D de baixo custo para auxiliar cegos e/ou baixa visão na construção de sólidos geométricos: Projeto mark. Revista de Iniciação Científica da ULBRA, v. 1, n. 16, 2018.

DROZDA, Thomas J. (Ed.). Tool and manufacturing engineers handbook: machining. Society of Manufacturing Engineers, 1983.

FERRARESI, Dino. Usinagem dos metais: Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: E. Blücher, 1970. 751 p., il.

FREIRE, Jose de Mendonça. Tecnologia mecânica. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1976-1978 5 v.

FROTA-PESSOA, Oswaldo; GEVERTZ, Rachel; SILVA, Ayrton Gonçalves da. Como ensinar ciências. 5.ed. São Paulo: Nacional, 1985, 218.

GUIA: ENTENDO A FRESADORA CNC. MEDIUM, 2017. Disponível em: < https://medium.com/bsbfablab/guia-entendendo-a-fresadora-cnc-583fa153ef98 >. Acesso em 17 set. 2023.

Junior, J. L. R., Cruz, L. M. & Sarmanho, A. P. S. (2018). Impressora 3d no desenvolvimento de pesquisas com próteses. Rev. Interinst. Bras. Ter. Ocup, 2(2), 398 – 413 KORTECH. Disponível em: < http://www.kortech.com.br/index.php?_action=felinha&id_linha=46#.Wy70SbgsrRS >. Acesso em: 19 set. 2023.

LESSA, José. Plano Cartesiano. INFOESCOLA. Disponivel em: < https://www.infoescola.com/matematica/plano-cartesiano/# >. Acesso em: 28 set. 2023.

LYRA, Pablo Vinícius Apolinário. Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT. TG-nº. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 123p, 2010.

MORETTO, E. G.; REICHEL, M. & PISTORI, H. Rastreamento dinâmico de objetos: Um experimento didático integrando conceitos de hardware e software. In: 7o Workshop Software Livre, Porto Alegre, 2006.

OCANHA, Denis. Projeto e construção de uma fresadora numericamente controlada. São Paulo: Universidade São Francisco, 2009.

SANCHES, J. M. (2008). Desenvolvimento de uma fresadora CNC de baixo custo para fins didáticos. 96 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SIMÕES, A. S. & RICCHETTI, P. F., Projeto e implementação de um braço robótico de baixo custo: Uma plataforma multidisciplinar para a motivação de trabalho SOUZA, Clayton Emílio Duarte de. Vantagens e desvantagens do controle numérico computadorizado (CNC). 2018.

VASCONCELLOS, C. D. S. Planejamento: plano de ensino: aprendizagem e projeto educativo. 4.ed. São Paulo: Libertad, 1995.

VENEZIANI, Glauco Rogério. Desenvolvimento de um objeto simulador Canis Morphic utilizando impressora 3D para aplicação em dosimetria na área de radioterapia veterinária. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo

Capítulo 23

10.37423/251110512

SELEÇÃO DE DISPOSITIVOS DE MONITORAMENTO DE GLICOSE COM O MÉTODO COCOSO: UM OLHAR INOVADOR NO GERENCIAMENTO DO DIABETES

Antonio Sergio da Silva — *Universidade Federal Fluminense - UFF*

Fábio Henrique Martins Queiroz — *Universidade Federal Fluminense - UFF*

Miguel Barrella Neto — *DAKTUS HEALTH*

Humberto Weber — *UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO DE JANEIRO*

Carlos Francisco Simões Gomes — *UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE - UFF*

Marcos dos Santos — *UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE - UFF*

RESUMO

O objetivo deste estudo é implementar o método Combined Compromise Solution (CoCoSo) para auxiliar o tomador de decisão na seleção de um dispositivo para o monitoramento contínuo de glicose (MCG) que permita o gerenciamento eficaz de pessoas com diabetes. O método CoCoso é um método Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA) para selecionar a melhor alternativa entre as disponíveis, considerando a importância relativa entre os critérios. No presente estudo, sete tipos diferentes de dispositivos para MCG, são examinados considerando os critérios precisão, custo, número de plataformas compatíveis, número de recursos adicionais e tempo de configuração. O método Preference Selection Index (PSI) foi usado para determinar a importância relativa dos critérios. Foram realizados testes de sensibilidade, ajustando o valor do parâmetro λ entre 0,25 e 0,75. Os resultados demonstraram uma consistência significativa, evidenciada pelos coeficientes de correlação de Spearman, que se mantiveram acima de 0,96. Este alto nível de correlação indica que, apesar das variações no valor de λ, as classificações das alternativas permaneceram estáveis, reforçando a confiabilidade e a validade do modelo utilizado no estudo. O estudo concluiu que o dispositivo FreeStyle Libre 2 é a alternativa melhor classificada.

Palavras-Chaves: CoCoSo, PSI, MCDA, Monitoramento Contínuo de Glicose

1 INTRODUÇÃO

Diabetes, uma condição crônica que afeta milhões globalmente, é marcada pela incapacidade do corpo de regular adequadamente os níveis de glicose no sangue. Essa doença, que assume formas como diabetes tipo 1, tipo 2 e gestacional, tem implicações significativas para a saúde e o bem-estar. O gerenciamento eficaz do diabetes é crucial para evitar complicações a longo prazo, como doenças cardíacas, insuficiência renal e perda de visão. Neste cenário, o monitoramento regular dos níveis de glicose torna-se uma pedra angular no controle da doença, permitindo intervenções oportunas e ajustes no estilo de vida e na medicação (Sly; Taylor, 2023).

Com o avanço da tecnologia, os dispositivos de monitoramento de glicose emergiram como ferramentas fundamentais no manejo do diabetes. Esses dispositivos, que incluem sistemas de Monitoramento Contínuo de Glicose (MCG), permitem a medição em tempo real dos níveis de glicose, oferecendo aos pacientes uma visão mais abrangente e contínua de suas condições metabólicas. A natureza não invasiva e a facilidade de uso desses dispositivos revolucionaram o modo como os pacientes e os profissionais de saúde abordam o monitoramento do diabetes, transformando-o em um processo menos doloroso e mais informativo.

A escolha de um dispositivo para monitoramento de glicose se fundamenta na saúde do paciente e no seu estilo de vida, suas preferências pessoais, sua habilidade para manusear o dispositivo, bem como o tipo de tratamento que está recebendo (Smith et al, 2023; Sly ; Taylor, 2023). Contudo, a variedade de dispositivos disponíveis no mercado traz o desafio de selecionar o mais adequado, onde o método Combined Compromise Solution (CoCoSo) emerge como uma abordagem sistemática e eficaz para essa escolha crítica.

Diante desse cenário, surge uma questão crucial: como o método CoCoSo pode ser efetivamente aplicado para selecionar dispositivos de MCG, assegurando que as necessidades individuais dos pacientes sejam atendidas, enquanto se maximiza a eficácia e a eficiência no gerenciamento do diabetes? Este estudo se propõe a explorar essa questão, analisando a aplicabilidade do método CoCoSo na seleção desses dispositivos vitais, considerando múltiplos critérios para garantir uma decisão equilibrada e informada.

O propósito deste estudo é investigar como o método CoCoSo pode ser aplicado na escolha de dispositivos de monitoramento remoto de glicose, uma decisão crítica no manejo eficiente do diabetes. Buscamos desvendar o potencial deste método de Análise de Decisão Multicritério (MCDA)

em equilibrar diversos fatores como precisão, custo, número de plataformas compatíveis, número de recursos adicionais e tempo de configuração, para identificar as soluções mais adequadas e personalizadas para pacientes diabéticos. Ao realizar uma análise com o método CoCoSo, dos dispositivos disponíveis e utilizando critérios estabelecidos, o estudo visa proporcionar insights valiosos para pacientes, profissionais de saúde e decisores no campo da saúde, ilustrando como uma metodologia estruturada pode aprimorar a tomada de decisões no âmbito do cuidado com o diabetes. Através desta abordagem, pretendemos contribuir para a otimização do gerenciamento do diabetes, promovendo melhores resultados de saúde e melhor qualidade de vida para os pacientes.

Este artigo é organizado em seções cuidadosamente estruturadas para proporcionar uma compreensão do tema. Inicialmente, apresentamos uma fundamentação teórica sobre o diabetes e a importância do monitoramento contínuo da glicose, estabelecendo o contexto para a discussão subsequente. Segue-se uma análise de diferentes tipos de dispositivos de monitoramento remoto de glicose, destacando suas características e funcionalidades. A seção principal do artigo se concentra na aplicação do método CoCoSo, explicando como ele funciona e como pode ser utilizado para avaliar e selecionar dispositivos de monitoramento de glicose. Esta análise inclui uma demonstração prática da metodologia com exemplos reais de dispositivos. Posteriormente, discutimos as implicações dessa seleção para pacientes e profissionais de saúde, bem como os potenciais desafios e limitações. A conclusão resume os principais achados e reflete sobre o impacto futuro dessas tecnologias no gerenciamento do diabetes. Ao longo do artigo, procuramos apresentar informações de maneira clara e acessível, garantindo que tanto leitores especializados quanto o público geral possam se beneficiar de seu conteúdo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Monitoramento do Diabetes

Diabetes é uma doença crônica caracterizada pela incapacidade do corpo em regular adequadamente os níveis de glicose no sangue. Classificada principalmente em diabetes tipo 1, tipo 2 e gestacional, esta condição afeta milhões de pessoas em todo o mundo. No diabetes tipo 1, o corpo não produz insulina suficiente, enquanto no tipo 2, o mais comum, o corpo não usa insulina de forma eficaz. A gestão efetiva dessa doença é crucial para prevenir complicações graves como doenças cardiovasculares, danos nos rins, perda de visão e neuropatia (Smith et al, 2023).

O monitoramento regular dos níveis de glicose no sangue é fundamental no manejo do diabetes. A manutenção de níveis glicêmicos dentro de um intervalo alvo pode prevenir ou retardar as complicações associadas ao diabetes. Este controle é especialmente crítico para pessoas que usam insulina ou outros medicamentos que podem causar hipoglicemia. O monitoramento fornece informações valiosas que ajudam na tomada de decisões sobre dieta, exercícios e medicação (Smith et al, 2023).

Tradicionalmente, o monitoramento da glicose envolve picadas frequentes no dedo, um método que pode ser doloroso e inconveniente. Além disso, oferece apenas dados pontuais, não capturando flutuações importantes ao longo do dia ou durante a noite, deixando os pacientes vulneráveis a episódios de hipoglicemia ou hiperglicemia sem aviso (Smith et al, 2023).

O advento dos sistemas MCG transformou o gerenciamento do diabetes. Estes dispositivos proporcionam uma visão contínua e detalhada dos níveis de glicose, monitorando-os 24 horas por dia. Eles alertam os usuários sobre tendências ascendentes ou descendentes em seus níveis de glicose, permitindo intervenções rápidas para evitar extremos perigosos. Além disso, os dados acumulados ajudam a entender melhor como diferentes atividades e alimentos afetam os níveis de glicose, permitindo um plano de gerenciamento mais personalizado e eficaz (Smith et al, 2023).

Este cenário estabelece um pano de fundo para a discussão subsequente sobre a importância de selecionar o dispositivo de monitoramento de glicose mais adequado para cada indivíduo. Com a diversidade de opções disponíveis e as necessidades específicas de cada paciente com diabetes, a aplicação de uma abordagem estruturada e sistemática, como o método CoCoSo, torna-se essencial para garantir a melhor escolha possível.

2.2 Monitoramento Contínuo de Glicose

O MCG é uma inovação revolucionária no tratamento do diabetes, proporcionando medições quase instantâneas dos níveis de glicose no sangue. Esta tecnologia utiliza um sensor discreto, geralmente implantado no abdômen ou no braço, que mede a glicose no fluido intersticial e envia esses dados para um dispositivo de leitura, como um smartphone ou um monitor específico (Kilvert; Fo, 2023; Sly; Taylor, 2023).

O MCG traz benefícios notáveis, como a capacidade de monitorar constantemente as tendências da glicose ao longo do dia e da noite, oferecendo uma percepção profunda sobre padrões ocultos que métodos pontuais de medição podem não revelar. Com alertas integrados para níveis anormais de glicose, os sistemas MCG são ferramentas cruciais para evitar episódios críticos de hipoglicemia ou hiperglicemia. Outro benefício significativo é a redução da necessidade de testes de picada no dedo, aumentando o conforto e a praticidade para o usuário (Kilvert; Fo, 2023).

Entretanto, a adoção do MCG não está isenta de desafios. O aspecto financeiro é uma grande preocupação, visto que os sensores e transmissores necessários podem ser onerosos e nem sempre são cobertos por seguros. A manutenção regular, incluindo a troca de sensores, também pode ser um fardo. Além disso, alguns usuários podem enfrentar dificuldades ou desconforto com o uso contínuo do sensor, o que demanda consideração cuidadosa (Smith et al, 2023).

Os desafios do MCG no gerenciamento do diabetes são complexos, abrangendo desde questões práticas até de acessibilidade. O custo dos sensores, essenciais para a medição, representa uma barreira significativa, assim como a necessidade de manutenção constante. A curva de aprendizado para a operação e interpretação dos dados também pode ser desafiadora, especialmente para aqueles menos familiarizados com tecnologias digitais. Além disso, a dependência de dispositivos eletrônicos suscita preocupações sobre a confiabilidade e continuidade do monitoramento em casos de falhas de conectividade ou energia. Esses desafios ressaltam a importância de uma abordagem equilibrada no tratamento do diabetes, onde os benefícios da tecnologia devem ser avaliados frente às suas limitações práticas e financeiras (Kilvert; Fox, 2023; Smith et al, 2023).

O monitoramento contínuo de glicose, juntamente com os dispositivos de monitoramento remoto, marca um avanço significativo no tratamento do diabetes, proporcionando aos usuários maior controle e conveniência. No entanto, é crucial levar em conta fatores como custos, facilidade de uso e integração na rotina diária ao escolher o dispositivo mais adequado (Kilvert; Fox, 2023; Sly; Taylor, 2023). Nesse contexto, o método CoCoSo emerge como uma ferramenta valiosa, permitindo uma avaliação equilibrada de diversos critérios para atender às necessidades específicas de cada paciente.

2.3 Critérios para a Seleção de Dispositivos para o Monitoramento Remoto de Glicose

Ao selecionar dispositivos para o monitoramento remoto de glicose, a escolha dos critérios é um processo que deve ser cuidadosamente adaptado aos interesses e necessidades específicas do

tomador de decisão, seja este um paciente, um profissional de saúde ou um gestor de sistema de saúde. Esses critérios não são estáticos, mas sim mutáveis e flexíveis, evoluindo conforme as mudanças nas tecnologias, nas políticas de saúde, nas condições econômicas e nas prioridades pessoais (Smith et al, 2023). Por exemplo, enquanto um paciente pode priorizar a facilidade de uso e o conforto devido à frequência de monitoramento necessária, um gestor de saúde pode focar mais no custo e na eficiência a longo prazo. Da mesma forma, um profissional de saúde pode valorizar a precisão e a confiabilidade acima de tudo para garantir um tratamento eficaz. Além disso, o que é considerado um critério prioritário hoje pode mudar com o tempo, devido ao desenvolvimento de novas tecnologias, alterações nos custos dos dispositivos ou mudanças nas necessidades de saúde do paciente. Assim, a seleção de critérios é um processo dinâmico e adaptativo, refletindo um equilíbrio entre as demandas atuais e as perspectivas futuras no gerenciamento do diabetes.

Os critérios utilizados neste artigo para selecionar dispositivos de monitoramento remoto de glicose foram escolhidos pelos autores com um propósito didático, visando explorar e exemplificar o uso do método CoCoSo na tomada de decisão neste cenário específico. Essa escolha não reflete necessariamente uma lista exaustiva ou as únicas considerações relevantes, mas serve como um modelo para demonstrar como o método CoCoSo pode ser aplicado de maneira prática e eficaz. Através da seleção dos critérios precisão, custo, número de plataformas compatíveis, número de recursos adicionais e tempo de configuração, pretendemos oferecer uma visão abrangente e equilibrada que ilustra como diferentes aspectos podem ser ponderados e comparados na escolha de um dispositivo. Este enfoque didático é especialmente útil para realçar a versatilidade e a aplicabilidade do método CoCoSo na avaliação de tecnologias de saúde, proporcionando aos leitores uma compreensão mais profunda de como critérios multifacetados podem ser integrados em um processo de decisão coerente e informado.

O quadro 1 apresenta uma visão organizada dos critérios de seleção escolhidos pelos autores para a avaliação de dispositivos para o monitoramento remoto de glicose, utilizando o método CoCoSo. Esta tabela serve como um guia para entender como cada um desses critérios pode ser medido e comparado, facilitando uma análise estruturada e objetiva dos dispositivos disponíveis. Com esse recurso, procuramos ilustrar um método prático e eficiente para que profissionais de saúde, pacientes e gestores possam tomar decisões informadas, equilibrando as necessidades clínicas, financeiras e de usabilidade no contexto do monitoramento do diabetes.

Quadro 1 - Critérios para Seleção de Dispositivos para Monitoramento de Glicose

Critério	Definição	Como medir
Precisão	Capacidade do dispositivo de fornecer leituras que refletem com precisão os níveis de glicose.	Comparação das leituras do dispositivo com um padrão de ouro, como um teste laboratorial.
Custo	Preço de compra inicial e custos recorrentes do dispositivo.	Preço de varejo e custo de consumíveis, considerando cobertura de seguro e programas de assistência.
Número de plataformas compatíveis	Quantidade de sistemas e aplicativos diferentes com os quais o dispositivo pode se integrar.	Contagem do número de plataformas (iOS, Android etc.) e aplicativos de terceiros compatíveis.
Número de recursos adicionais	Funcionalidades extras oferecidas pelo disposto além do monitoramento básico de glicose.	Listagem e quantificação dos recursos adicionais como alertas de glicose e relatórios de tendências.
Tempo de configuração	Período necessário para configurar o dispositivo para uso após a aquisição.	Medição do tempo desde a abertura da embalagem até o dispositivo estar operacional, incluindo calibrações.

Fonte: Os Autores (2024)

2.4 Dispositivos para Monitoramento Remoto de Glicose

No universo do monitoramento de glicose, existem diversos dispositivos, cada um com suas peculiaridades e funcionalidades únicas. Estes dispositivos vão desde sistemas de MCG até soluções mais tradicionais, como monitores de glicose no sangue (Sly; Taylor, 2023). Entre os mais renomados, temos o FreeStyle Libre 2, que oferece monitoramento contínuo sem a necessidade de picadas frequentes; o Dexcom G6, conhecido por sua precisão e alertas em tempo real; o Guardian da Medtronic, que se destaca pela integração com bombas de insulina; o Accu-Chek Guide, famoso por sua facilidade de uso; o OneTouch Verio Flex, que oferece um sistema de feedback simples; o Contour Next Link, com sua alta precisão e facilidade de manuseio; e o True Metrix Air, conhecido por sua acessibilidade e confiabilidade básica. Cada um desses dispositivos possui características distintas em termos de precisão, custo, compatibilidade com plataformas, recursos adicionais e tempo de configuração, que estão descritas na tabela 2, proporcionando uma visão abrangente que auxilia na escolha do dispositivo mais adequado para cada necessidade específica de monitoramento de glicose.

3 METODOLOGIA

O sistema de gestão de saúde é uma das estruturas mais afetadas do ponto de vista da tomada de decisão devido ao envolvimento de vários critérios conflitantes, tornando o sistema propenso a erros na solução final. Sabe-se que, na saúde, esses processos de tomada de decisão são multifacetados, pois envolvem fatores humanos juntamente com questões técnicas e econômicas, dificultando todo o processo. Para apoiar a confiabilidade e credibilidade da decisão final tomada pelos formuladores de políticas, modelos MCDA, tal como o método CoCoSo, desempenham um papel estratégico importante (Yazdani; Torkayesh; Chatterjee; 2020).

O método CoCoSo integra técnicas tais como o "*Simple Additive Weighting*" (SAW), o "*Weighted Aggregated Sum Product Assesment*" (WASPAS) e o "*Multiplicative Exponential Weighting*" (MEW). Esta integração permite ao CoCoSo sintetizar dados de maneira eficaz, resultando em modelos mais robustos e decisões mais acuradas. Dada a sua flexibilidade, o método CoCoSo é aplicável em diversas áreas, inclusive na área da saúde (Yazdani et al, 2019; Torkayesh et al, 2021).

Para resolver um problema de decisão com o método CoCoSo, após se determinar as alternativas e os critérios relacionados, são realizadas as etapas descritas por Yazdani et al (2018):

a) Definição da matriz de decisão.

b) Padronização da matriz de decisão. Equação (1)

$$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum a_{ij}} \quad (1)$$

c) Normalização da matriz padronizada. Equações (2) e (3)

Para critério de benefício (maximização): $$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (2)$$

Para critério de custo(minimização): $$r_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (3)$$

d) Criação da matriz de sequência de comparabilidade ponderada Si. Equação (4)

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} (w_{ij} r_{ij}) \quad (4)$$

e) Criação da matriz de sequência de comparabilidade ponderada exponencial Pi. Equação (5)

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} (r_{ij})^{w_{ij}} \quad (5)$$

f) Desenvolvimento de três classificações de avaliações agregadas para determinar os pesos das alternativas. Equações (6), (7) e (8).

$$k_{ia} = \frac{P_i + S_i}{\sum_{i=1}^{m} (P_i + S_i)} \quad (6)$$

$$k_{ib} = \frac{S_i}{\min_i S_i} + \frac{P_i}{\min_i P_i} \quad (7)$$

$$k_{ic} = \frac{\lambda (S_i) + (1 - \lambda)(P_i)}{\left(\lambda \max_i S_i + (1 - \lambda) \max_i P_i\right)} \quad (8)$$

g) Classificação final das alternativas. Equação (9)

$$k_i = (k_{ia} k_{ib} k_{ic})^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3}(k_{ia} + k_{ib} + k_{ic}) \quad (9)$$

O método CoCoSo pode ser implementado por meio de um pacote do CRAN: cocosoR Este pacote pode ser acessado por meio do link CoCoSo Method (shinyapps.io) (Santos; Floquet, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira etapa inicia com a formação da matriz de decisão inicial. A figura 1 representa a matriz dos dispositivos para monitoramento de glicose e os critérios relacionados para a análise.

Figura 1 – Dispositivos para Monitoramento Remoto de Glicose

Critérios de decisão	Precisão (%)	Custo (USD)	Número de plataformas compatíveis	Número de recursos adicionais	Tempo de configuração (minutos)
Monoticidade	MAX	MIN	MAX	MAX	MIN
FreeSyle Libre 2	98	75	4	6	5
Dexcom G6	98,5	100	5	8	10
Medtronic Guardian	98	95	4	5	15
Accu-Chek Guide	97,5	60	3	4	7
One Touch Verio Flex	97	50	2	3	5
Contour Next Link	98	55	3	4	8
True Metrix Air	96,5	40	1	2	4

Fonte: Os Autores (2024)

A figura 1 permite uma visão clara e estruturada, facilitando a compreensão das características distintas de cada dispositivo. Desde opções de alta precisão e com recursos avançados, como o Dexcom G6, até dispositivos mais acessíveis como o True Metrix Air, a tabela abrange uma gama diversificada de escolhas disponíveis para usuários e profissionais de saúde. Ao apresentar essas informações de forma concisa, buscamos auxiliar na tomada de decisão informada, proporcionando uma base sólida para a seleção do dispositivo de monitoramento de glicose mais adequado às necessidades e preferências individuais. Os valores da tabela 2 são variáveis a depender dos locais e das versões dos modelos disponíveis no mercado.

Os critérios na figura 2 estão classificados quanto à sua monoticidade em critérios de benefício (MAX) ou de custo (MIN).

A segunda etapa consiste na padronização da matriz de decisão. No método CoCoSo, essa padronização se faz conforme a equação (1). O resultado deste procedimento pode ser visto na figura 2.

Figura 2 - Matriz de Decisão Padronizada

Critérios de decisão	**Precisão (%)**	**Custo (USD)**	**Número de plataformas compatíveis**	**Número de recursos adicionais**	**Tempo de configuração (minutos)**
Monoticidade	MAX	MIN	MAX	MAX	MIN
FreeSyle Libre 2	0,1434	0,1579	0,1818	0,1875	0,0926
Dexcom G6	0,1441	0,2105	0,2273	0,2500	0,1852
Medtronic Guardian	0,1434	0,2000	0,1818	0,1563	0,2778
Accu-Chek Guide	0,1426	0,1263	0,1364	0,1250	0,1296
One Touch Verio Flex	0,1419	0,1053	0,0909	0,0938	0,0926
Contour Next Link	0,1434	0,1158	0,1364	0,1250	0,1481
True Metrix Air	0,1412	0,0842	0,0455	0,0625	0,0741

Fonte: Os Autores (2024)

A terceira etapa consiste na normalização da matriz padronizada por meio das equações (2) e (3), formando a matriz de sequência de comparabilidade (figura 3).

Figura 3 - Matriz de Sequência de Comparabilidade

Critérios de decisão	Precisão (%)	Custo (USD)	Número de plataformas compatíveis	Número de recursos adicionais	Tempo de configuração (minutos)
Monoticidade	MAX	MIN	MAX	MAX	MIN
FreeSyle Libre 2	0,7500	0,4167	0,7500	0,6667	0,9091
Dexcom G6	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,4545
Medtronic Guardian	0,7500	0,0833	0,7500	0,5000	0,0000
Accu-Chek Guide	0,5000	0,6667	0,5000	0,3333	0,7273
One Touch Verio Flex	0,2500	0,8333	0,2500	0,1667	0,9091
Contour Next Link	0,7500	0,7500	0,5000	0,3333	0,6364
True Metrix Air	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000

Fonte: Os Autores (2024)

A quarta etapa consiste na criação da matriz de sequência de comparabilidade ponderada Si (figura 4), por meio da equação (4).

Figura 4 – Matriz de Sequência de Comparabilidade Ponderada Si

Critérios	Precisão (%)	Custo (USD)	Número de plataformas compatíveis	Número de recursos adicionais	Tempo de configuração (minutos)	S_i
Peso	0,2843	0,2048	0,1609	0,1790	0,1709	
FreeSyle Libre 2	0,2133	0,0854	0,1207	0,1194	0,1553	0,6940
Dexcom G6	0,2843	0,0000	0,1609	0,1790	0,0777	0,7019
Medtronic Guardian	0,2133	0,0171	0,1207	0,0895	0,0000	0,4405
Accu-Chek Guide	0,1422	0,1366	0,0805	0,0597	0,1243	0,5431
One Touch Verio Flex	0,0711	0,1707	0,0402	0,0298	0,1553	0,4672
Contour Next Link	0,2133	0,1536	0,0805	0,0597	0,1087	0,6158
True Metrix Air	0,0000	0,2048	0,0000	0,0000	0,1709	0,3757

Fonte: Os Autores (2024)

Na segunda linha da figura 4 constam os pesos atribuídos para cada critério. O método CoCoSo não estabelece critérios para atribuição destes pesos. Cabe ao decisor atribuí-los. Neste estudo, estes pesos foram gerados por meio do método Preference Selection Index (PSI). O PSI é um método útil se houver conflitos na determinação da importância relativa entre os critérios. No método PSI, os resultados são

obtidos com cálculos mínimos e simples, pois são baseados em conceitos estatísticos (Maniya; Bhatt, 2010; Sahir et al, 2018).

A quinta etapa consiste na criação da matriz de sequência de comparabilidade ponderada exponencial Pi (figura 5) por meio da equação (5).

Figura 5 – Matriz de Sequência de Comparabilidade Ponderada Exponencial Pi

Critérios de decisão	Precisão (%)	Custo (USD)	Número de plataformas compatíveis	Número de recursos adicionais	Tempo de configuração (minutos)	P_i
Peso	0,2843	0,2048	0,1609	0,1790	0,1709	
FreeSyle Libre 2	0,9215	0,8358	0,9548	0,9300	0,9838	4,6259
Dexcom G6	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,8740	3,8740
Medtronic Guardian	0,9215	0,6011	0,9548	0,8833	0,0000	3,3606
Accu-Chek Guide	0,8211	0,9203	0,8945	0,8214	0,9470	4,4044
One Touch Verio Flex	0,6742	0,9633	0,8001	0,7256	0,9838	4,1471
Contour Next Link	0,9215	0,9428	0,8945	0,8214	0,9257	4,5058
True Metrix Air	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	2,0000

Fonte: Os Autores (2024)

A sexta etapa consiste no desenvolvimento de três classificações de avaliações agregadas para determinar os pesos das alternativas por meio das equações (6), (7) e (8).

A equação (6) representa a média aritmética dos somatórios dos escores do WSM (Weighted Sum Method) e do WPM (Weighted Product Method). Por outro lado, a equação (7) representa a soma dos escores do WSM e WPM em comparação com a opção mais vantajosa. Quanto a equação (8), ela é utilizada para calcular a pontuação de compromisso balanceado entre os modelos WSM e WPM. Embora o valor de λ na equação (8) possa oscilar entre 0 e 1, em geral, adota-se o valor padrão inicial de 0,5. A partir de então, altera-se o valor de λ abaixo ou acima de 0,5 para realizar uma análise de sensibilidade (Yazdani et al, 2018; Chen; Li, 2023; Ordu; Der, 2023).

A partir de equação (9) se determina a classificação final das alternativas. Os resultados dos cálculos destas quatro equações podem ser vistos na figura 6.

Figura 6 – Ranking das Alternativas

Dispositivo	K_{ia}	Ranks	K_{ib}	Ranks	K_{ic}	Ranks	K	Final Ranks
FreeSyle Libre 2	0,1730	1	4,1600	1	0,9985	1	2,6728	1
Dexcom G6	0,1488	5	3,8052	3	0,8589	5	2,3906	4
Medtronic Guardian	0,1236	6	2,8527	6	0,7134	6	1,8612	6
Accu-Chek Guide	0,1609	3	3,6477	4	0,9286	3	2,3959	3
One Touch Verio Flex	0,1500	4	3,3170	5	0,8661	4	2,1997	5
Contour Next Link	0,1665	2	3,8918	2	0,9613	2	2,5273	2
True Metrix Air	0,0772	7	2,0000	7	0,4459	7	1,2510	7

Fonte: Os Autores

O λ no método CoCoSo é geralmente utilizado para equilibrar entre diferentes sub-métodos ou componentes do CoCoSo. Por exemplo, em algumas implementações do CoCoSo, diferentes métodos como o método WSM e o método WPM são combinados, e o λ pode ser usado para ajustar a influência relativa de cada um desses sub-métodos no resultado (Yazdani et al, 2018).

Essencialmente, o valor de λ pode variar de 0 a 1, onde diferentes valores indicam diferentes pesos para os sub-métodos dentro do CoCoSo. Por exemplo, um λ próximo de 0 pode dar mais peso ao WSM, enquanto um valor próximo de 1 pode dar mais peso ao WPM. A escolha de λ pode depender do contexto específico da decisão e das preferências do tomador de decisão (Torkayesh et al, 2021).

A análise de sensibilidade para $\lambda_1 = 0,25$, $\lambda_2 = 0,50$ e $\lambda_3 = 0,75$ não alterou a classificação da primeira alternativa (figura 7).

Figura 7 – Análise de Sensibilidade

Modelo	$\lambda_1 = 0,25$	$\lambda_2 = 0,50$	$\lambda_3 = 0,75$
FreeStyle Libre 2	1	1	1
Dexcom G6	4	4	3
Medtronic Guardian	6	6	6
Accu-Chek Guide	3	3	4
One Touch Verio Flex	5	5	5
Contour Next Link	2	2	2
True Metrix Air	7	7	7

Fonte: Os Autores (2024)

Os coeficientes de correlação de Spearman para λ1 & λ2 e λ2 & λ3 são 1 e 0,96 respectivamente. Não obstante o número de testes ser pequeno, os resultados mostram níveis muito aceitáveis de similaridade entre a classificação original (λ2) e cada teste de sensibilidade dado que os coeficientes de foram Spearman ≥ 0,80 (Yazdani et al, 2018).

Os resultados obtidos por meio das equações descritas por Yazdani et al (2018) foram idênticos aos resultados obtidos por meio da ferramenta CoCoSo Method (shinyapps.io) (Santos; Floquet, 2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seleção de dispositivos para MCG usando o método CoCoSo tem implicações importantes tanto para pacientes quanto para profissionais de saúde. Este método, sendo uma técnica de tomada de decisão multicritério, ajuda a identificar o dispositivo mais adequado com base em uma variedade de critérios, o que pode incluir precisão, custo, facilidade de uso, compatibilidade com outras tecnologias, entre outros. Neste estudo o método CoCoSo classificou o FreeStyle Libre 2 como o dispositivo MCG que melhor atende aos critérios estabelecidos.

Para os pacientes, o método CoCoSo pode oferecer implicações significativas na escolha de dispositivos para MCG, favorecendo uma seleção personalizada que atende às suas necessidades individuais, levando em conta fatores como estilo de vida, sensibilidade à dor, precisão e custo. Essa abordagem personalizada pode resultar em uma maior adesão ao tratamento, visto que os pacientes tendem a utilizar dispositivos que se alinham melhor com suas rotinas diárias e preferências pessoais. Além disso, a escolha do dispositivo mais adequado tem o potencial de melhorar significativamente a qualidade de vida dos pacientes, proporcionando um controle mais efetivo do diabetes e minimizando os riscos de complicações no longo prazo.

Para profissionais de saúde, o uso do método CoCoSo implica em decisões baseadas em evidências, pois facilita recomendações fundamentadas em avaliações objetivas e abrangentes de diversos dispositivos, promovendo escolhas mais informadas e focadas no paciente. Além disso, ao identificar dispositivos que são eficazes e econômicos, os profissionais podem otimizar a gestão de recursos, melhorando a eficiência tanto em termos financeiros quanto de tempo, o que é essencial na área da saúde.

No entanto, é importante notar que, apesar dos benefícios teóricos apresentados, existe uma necessidade crucial de pesquisas futuras para validar empiricamente essas vantagens. Estudos adicionais poderiam focar na aplicação prática do método CoCoSo em ambientes clínicos reais para verificar se as recomendações geradas realmente resultam em melhores resultados de saúde para os pacientes, além de examinar a eficiência de custo e tempo para os profissionais de saúde.

A pesquisa futura também deve considerar a adaptabilidade do método às rápidas mudanças tecnológicas e aos diferentes contextos de saúde, garantindo assim que as recomendações do CoCoSo se mantenham relevantes, práticas e acessíveis. Essa validação empírica é fundamental para fortalecer a confiança no método CoCoSo como uma ferramenta eficaz na seleção de dispositivos de MCG.

Os desafios e limitações do método CoCoSo incluem a complexidade e a necessidade de conhecimento técnico para sua implementação eficaz, o que pode ser desafiador para pacientes e profissionais de saúde, no entanto a disponibilização da ferramenta CoCoSo Method (shinyapps.io) facilita a aplicação do método; a rápida evolução das tecnologias de MCG, que dificulta manter o método atualizado com critérios novos e relevantes; a subjetividade na ponderação dos critérios, que pode comprometer a objetividade das decisões; e questões de acesso e disponibilidade, visto que as recomendações do CoCoSo podem não ser viáveis em todos os contextos, especialmente se os dispositivos sugeridos não estiverem facilmente acessíveis ou forem economicamente proibitivos para alguns pacientes. Parte superior do formulário

REFERÊNCIAS

CHEN, Jiayi; LI, Xihua. Doctors ranking through heterogeneous information: The new score functions considering patients' emotional intensity. Expert Systems with Applications, v. 219, p. 119620, 2023.

KILVERT, Anne; FOX, Charles. The impact of diabetes technology advances on quality of life: addressing the barriers to uptake. Practical Diabetes, v. 40, n. 5, p. 23-28, 2023.

MANIYA, Kalpesh; BHATT, Mangal Guido. A selection of material using a novel type of decision-making method: Preference selection index method. Materials & Design, v. 31, n. 4, p. 1785-1789, 2010.

ORDU, Muhammed; DER, Oguzhan. Polymeric materials selection for flexible pulsating heat pipe manufacturing using a comparative hybrid MCDM approach. Polymers, v. 15, n. 13, p. 2933, 2023.

SAHIR, Syafrida Hafni et al. The Preference Selection Index method in determining the location of used laptop marketing. Int. J. Eng. Technol, v. 7, n. 3.4, p. 260-263, 2018.

SANTOS, Marcos dos.; FLOQUET, Sergio. cocosoR in R (v.1) 2023.

SLY, Benjamin; TAYLOR, Janet. Blood glucose monitoring devices: current considerations. Australian Prescriber, v. 46, n. 3, 2023.

SMITH, Ian P. et al. Diabetes patient preferences for glucose-monitoring technologies: results from a discrete choice experiment in Poland and the Netherlands. BMJ Open Diabetes Research and Care, v. 11, n. 1, p. e003025, 2023.

TORKAYESH, Ali Ebadi et al. An integrated BWM-LBWA-CoCoSo framework for evaluation of healthcare sectors in Eastern Europe. Socio-Economic Planning Sciences, v. 78, p. 101052, 2021.

YAZDANI, Morteza et al. A combined compromise solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems. Management Decision, v. 57, n. 9, p. 2501-2519, 2018.

YAZDANI, Morteza et al. A grey combined compromise solution (CoCoSo-G) method for supplier selection in construction management. Journal of Civil Engineering and Management, v. 25, n. 8, p. 858-874, 2019.

YAZDANI, Morteza; TORKAYESH, Ali Ebadi; CHATTERJEE, Prasenjit. An integrated decision-making model for supplier evaluation in public healthcare system: the case study of a Spanish hospital. Journal of Enterprise Information Management, v. 33, n. 5, p. 965-989, 2020.

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

conhecimentolivre.org/home
contato@conhecimentolivre.org
editoraconhecimentolivre



ENGENHARIA:
A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XXI