



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Karine da Conceição Sousa

**Estudo do desempenho de um ciclo de refrigeração por
compressão de vapor usando nano refrigerantes**

Ouro Preto
2025

Karine da Conceição Sousa
karine.sousa@aluno.ufop.edu.br

Estudo do desempenho de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor usando nano refrigerantes

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Dr. Luís Antônio Bortolaia

Ouro preto
2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S725e Sousa, Karine da Conceicao.
Estudo do desempenho de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor usando nano refrigerantes. [manuscrito] / Karine da Conceicao Sousa. - 2025.
73 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Refrigeração - Nanorrefrigerantes. 2. Refrigeração - Ciclo de Compressão de Vapor (CCV). 3. Energia - Eficiência energética. I. Bortolaia, Luís Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Karine da Conceição Sousa

Estudo do desempenho de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor usando nanorefrigerantes

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 20 de agosto de 2025

Membros da banca

DsC. Luís Antônio Bortolaia - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DsC. Elisângela Martins Leal (Universidade Federal de Ouro Preto)
DsC. Jonathas Haniel Castro Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luís Antônio Bortolaia, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Luís Antonio Bortolaia, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/09/2025, às 20:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0974381** e o código CRC **35817D5E**.

A Deus, meu guia e força em todas as etapas da vida. A meus pais, pelo apoio sem fim e pelo incentivo constante. A todos que compartilharam conhecimento e experiências comigo, tornando essa jornada mais rica. A mim mesma, por não desistir e seguir aprendendo a cada passo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha fonte de força, sabedoria e esperança. Sem Ele, nada disso teria sido possível. Foi Sua presença que me sustentou nos momentos de dificuldade, me deu ânimo para prosseguir e me guiou em cada decisão. A Ele dedico, com gratidão profunda, esta conquista.

Aos meus pais, Josimar e Solange, por todo amor, apoio e sacrifício ao longo dessa jornada. Por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidava e por estarem sempre prontos para me amparar em qualquer circunstância.

Aos meus irmãos, Thiago e Matheus, por estarem ao meu lado, me incentivando, celebrando minhas vitórias e me lembrando que a família é um porto seguro.

A todos os professores que já passaram pela minha vida acadêmica, pela paciência e dedicação em transmitir conhecimento. À Escola de Minas e à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), por proporcionarem momentos e experiências que marcaram minha trajetória acadêmica e pessoal.

Agradeço ao professor Gustavo, que me orientou na iniciação científica e foi essencial para meu desenvolvimento nessa área. Um agradecimento muito especial ao professor Luís Antônio Bortolaia, por ter me aceitado como orientanda e por todo o auxílio eficiente, proveitoso e de qualidade, que foi decisivo para a realização deste trabalho.

À MR Consultoria e Serviços de Engenharia, pelos valiosos aprendizados adquiridos durante meu estágio, que contribuíram para minha formação profissional.

Aos meus colegas e amigos, que fizeram parte dessa caminhada. Em especial, às Alfas, que trouxeram inspiração, alegria e companheirismo para a minha vida em Ouro Preto. Um agradecimento profundo às minhas amigas Kamila e Isabella, que foram pilares nessa jornada, me apoiando, fortalecendo, celebrando minhas conquistas e fazendo-me sentir amada e acolhida.

“ Não chegamos ao fim do caminho, mas cada passo dado com fé, esforço e gratidão nos aproxima da melhor versão de nós mesmos. Hoje celebro não apenas o que conquistei, mas quem me tornei ao longo da jornada.”

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de um ciclo de compressão de vapor utilizando nanorrefrigerantes, a partir da simulação computacional por meio do *software Engineering Equation Solver* (EES). Com base em uma fundamentação teórica sobre os sistemas de refrigeração, fluidos refrigerantes e nanofluidos, realizou-se uma avaliação detalhada das propriedades termodinâmicas e dos efeitos do uso de nanopartículas nos parâmetros de eficiência do ciclo. O estudo valida o modelo computacional com dados experimentais de artigos da literatura e compara o desempenho do refrigerante R134a puro com os nanorrefrigerantes R134a/Al₂O₃ e R134a/TiO₂. Os resultados demonstram que a adição de nanopartículas pode melhorar significativamente o Coeficiente de Desempenho (COP), reduzir o trabalho de compressão e ampliar a eficiência energética do sistema. A análise gráfica mostra que fatores como fração mássica de nanopartículas, temperatura de evaporação, condensação e eficiência isentrópica do compressor exercem influência direta sobre o desempenho do ciclo. Conclui-se que os nanorrefrigerantes representam uma alternativa promissora para otimização energética de sistemas de refrigeração, com ganhos técnicos e ambientais relevantes.

Palavras-chave: nanorrefrigerantes. ciclo de compressão de vapor. COP. eficiência energética. refrigeração.

ABSTRACT

This work aims to analyze the performance of a vapor compression cycle using nanorefrigerants, through computational simulations using the Engineering Equation Solver (EES) software. Based on a theoretical framework on refrigeration systems, refrigerants, and nanofluids, a detailed evaluation was conducted of the thermodynamic properties and the effects of adding nanoparticles on cycle efficiency parameters. The computational model was validated against experimental data from the literature, and the performance of pure R134a was compared with the nanorefrigerants R134a/Al₂O₃ and R134a/TiO₂. The results show that adding nanoparticles can significantly improve the Coefficient of Performance (COP), reduce compression work, and increase the system's energy efficiency. Graphical analysis shows that factors such as nanoparticle mass fraction, evaporation and condensation temperature, and isentropic efficiency of the compressor directly influence the cycle's performance. It is concluded that nanorefrigerants represent a promising alternative for energy optimization of refrigeration systems, offering significant technical and environmental benefits.

Key-words: nanorefrigerants, vapor compression cycle, COP, energy efficiency, refrigeration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Um dos primeiros refrigeradores domésticos comercializados.....	5
Figura 2: Motor térmico de Carnot.....	7
Figura 3: Ciclo de Carnot de refrigeração.....	8
Figura 4: Diagrama T-s do ciclo de refrigeração de Carnot.....	8
Figura 5: Ciclo de refrigeração por compressão de vapor.....	9
Figura 6: Diagrama T-s do ciclo ideal de refrigeração.....	10
Figura 7: Diagrama P-h dos ciclos padrão e real de refrigeração por compressão de vapor....	11
Figura 8: Diagrama pressão-entalpia do ciclo ideal de compressão de vapor.....	12
Figura 9: Processo do fluido refrigerante nos equipamentos de refrigeração.....	17
Figura 10: Diagrama de Mollier ($P \times h$) com influência do nanorrefrigerante.....	23
Figura 11: Fluxograma com sequenciamento das etapas para realização deste trabalho.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos refrigerantes selecionados	19
Tabela 2 – Propriedades das nanopartículas selecionadas a 25 °C	20
Tabela 3 – Correlações das propriedades termofísicas dos nanorrefrigerantes	21
Tabela 4 – Variáveis e indicadores	32
Tabela 5 – Técnica de Coleta de Dados – <i>Engineering Equation Solver</i> (EES) e literatura ..	33
Tabela 6 – Comparação dos resultados obtidos no EES com os dados de Aktas	36
Tabela 7 – Erro padrão dos valores do COP	36
Tabela 8 – Comparação dos resultados obtidos no EES com os dados de Odunfa	37
Tabela 9 – Erro padrão dos valores do COP	38
Tabela 10 – Comparação dos parâmetros do ciclo com R134a e R134a/Al ₂ O ₃	38
Tabela 11 – Comparação dos parâmetros do ciclo com R134a e R134a/TiO ₂	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação do COP em função da fração mássica de Al_2O_3	41
Gráfico 2 – Variação do COP em função da fração mássica de TiO_2	42
Gráfico 3 – Variação do trabalho de compressão com a fração mássica de Al_2O_3	43
Gráfico 4 – Variação do trabalho de compressão com a fração mássica de TiO_2	43
Gráfico 5 – Influência da temperatura de evaporação no COP (Al_2O_3)	45
Gráfico 6 – Influência da temperatura de evaporação no COP (TiO_2)	45
Gráfico 7 – Influência da temperatura de condensação no COP (Al_2O_3)	46
Gráfico 8 – Influência da temperatura de condensação no COP (TiO_2)	47
Gráfico 9 – Influência da eficiência isentrópica no COP (Al_2O_3)	48
Gráfico 10 – Influência da eficiência isentrópica no COP (TiO_2)	48
Gráfico 11 – Variação da eficiência isentrópica do compressor com a fração mássica (Al_2O_3)	50
Gráfico 12 – Variação da eficiência isentrópica do compressor com a fração mássica (TiO_2)	50
Gráfico 13 – Comparação do COP entre R134a puro e R134a/ Al_2O_3	52
Gráfico 14 – Comparação do trabalho de compressão entre R134a puro e R134a/ Al_2O_3	52
Gráfico 15 – Comparação do COP entre R134a puro e R134a/ TiO_2	53
Gráfico 16 – Comparação do trabalho de compressão entre R134a puro e R134a/ TiO_2	54

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$\dot{m}$	Vazão mássica	kg/s
T	Temperatura	°C
P	Pressão	kPa
h	Entalpia específica	kJ/kg
s	Entropia específica	kJ/kg·K
COP	Coeficiente de Desempenho	adimensional
w_c	Trabalho de compressão	kJ/kg
η_{is}	Eficiência isentrópica do compressor	adimensional
q_L	Calor absorvido no evaporador	kJ/kg
q_H	Calor rejeitado no condensador	kJ/kg
W_{1-2s}	Trabalho isentrópico do compressor	kJ/kg
W_{1-2}	Trabalho real do compressor	kJ/kg
Q_{evap}	Calor absorvido no evaporador	kJ/kg
Q_{cond}	Calor rejeitado no condensador	kJ/kg
ϕ	Fração mássica de nanopartículas	%
μ	Viscosidade dinâmica	Pa·s
k	Condutividade térmica	W/m·K
ρ	Densidade	kg/m ³
C_p	Calor específico a pressão constante	kJ/kg·K
n_f	Nanofluido	-
n_p	Nanopartículas	-
b_f	Fluido base	-

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Refrigeração.....	5
2.2	Refrigeração por compressão de vapor	6
2.2.1	Ciclo de refrigeração de Carnot.....	6
2.2.2	Ciclo de refrigeração por compressão de vapor	8
2.3	Fluidos refrigerantes	13
2.3.1	Impactos Ambientais e a Transição para Alternativas	14
2.3.2	Transição para Fluidos Refrigerantes Sustentáveis	15
2.3.3	O Futuro dos Fluidos Refrigerantes.....	16
2.3.4	Refrigerantes no sistema de refrigeração.....	16
2.3.5	Tipos de Refrigerantes: Características Específicas.....	17
2.4	Nanorrefrigerante.....	19
2.4.1	Conceituação	19
2.4.2	Propriedades e Benefícios	20
2.4.3	Desafios e Considerações	20
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	Tipo de pesquisa	24
3.2	Materiais e Métodos	25
3.2.1	Código do Programa Utilizado	28
3.3	Variáveis e Indicadores	31
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	32
3.5	Tabulação de Dados.....	33
3.6	Considerações Finais do capítulo	34
4	RESULTADOS	35

4.1	Validação do programa computacional desenvolvido para simulação do ciclo	35
4.1.1	Validação com base em Aktas et al. (2014)	35
4.1.2	Validação com base em Odunfa (2021)	37
4.1.3	Análise dos resultados da validação	38
4.2	Análise preliminar dos parâmetros simulados para o nanorrefrigerante R134a/Al ₂ O ₃	38
4.3	Análise preliminar dos parâmetros simulados para o nanorrefrigerante R134a/TiO ₂	39
4.4	Análise dos resultados da simulação para os nanorrefrigerantes R134a/Al ₂ O ₃ e do R134a/TiO ₂	41
4.4.1	Influência da fração mássica de nanopartículas	41
4.4.2	Influência da temperatura de evaporação no COP	46
4.4.3	Influência da Temperatura de Condensação no COP	48
4.4.4	Influência da eficiência isentrópica do compressor no COP	49
4.5	Comparação entre os Nanorrefrigerantes R134a/Al ₂ O ₃ e R134a/TiO ₂	51
4.5.1	Variação do COP em Função da Fração Mássica	51
4.5.2	Influência da Temperatura de Evaporação	52
4.5.3	Influência da Temperatura de Condensação	53
4.5.4	Influência da Eficiência Isentrópica do Compressor	54
5	CONCLUSÃO	55
5.1	CONCLUSÕES	55
5.2	Recomendações	55
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Uma das utilidades mais importantes para o dia a dia das pessoas são os sistemas de refrigeração. Segundo Li *et al.* (2022), o ciclo de refrigeração por compressão de vapor (VCRC) é amplamente utilizado nos setores doméstico e industrial devido ao seu maior Coeficiente de Desempenho (COP), esse ciclo é essencial nas aplicações de conservação de alimentos, condicionamento de ar, em processos industriais, e consomem muita energia. Os VCRCs têm uma participação de cerca de 30% do consumo total de energia mundial, e esta proporção pode aumentar devido ao vazamento de refrigerante (GHANBARPOUR *et al.*, 2021). Uma forma de melhorar o desempenho do sistema de refrigeração é reduzindo a potência do compressor, o que proporciona uma economia de energia (ÇENGEL & BOLES, 2013).

A refrigeração é o procedimento de expulsão de calor de uma substância que deve ser resfriada (PIMENTEL, 2018). Da mesma forma, contém o caminho para diminuir e manter a temperatura de um corpo abaixo da temperatura geral de seu ambiente (SOUZA; COSTA, 2020).

Segundo Lima e Rocha (2018), nas últimas décadas, a geração e o consumo mundial de eletricidade tornaram-se um dos principais temas de discussão entre pesquisadores, políticos e ativistas ambientais, especialmente devido ao seu constante crescimento. Como afirmam Vieira e Santos (2021), "o aumento do consumo energético global está diretamente ligado a decisões políticas e pressões ambientais", o que reforça a urgência do debate. Consequentemente, afetou o custo da produção elétrica pago pelo governo em termos de subsídios aos combustíveis, o que impacta diretamente a economia pública (CARVALHO *et al.*, 2020). Além disso, a utilização de combustíveis em grandes quantidades contribuiria significativamente para o aquecimento global, conforme alertado por Souza (2017), ao destacar que "a queima de combustíveis fósseis é a principal responsável pelas emissões de gases de efeito estufa". Em relação ao consumo de energia elétrica, desconsiderando as perdas pela transmissão, o mundo consome 21.371 TWh, sendo o setor industrial responsável por 41,85% deste consumo (IEA, 2019a). *Perspectivas Energéticas Internacionais I* (2010) argumenta que a utilização combinada de energia mundial de 2007 a 2035 seja expandida em 1,4% a cada ano, portanto, em 2035, a vitalidade agregada gasta será de aproximadamente 216.500×10^{12} kW.

Com relação ao ciclo de refrigeração os refrigerantes convencionais têm papel importante no aquecimento global e na destruição da camada de ozônio. Portanto, há

necessidade de melhorar o desempenho do sistema de refrigeração por compressão de vapor. Segundo Martins e Oliveira (2020), uma forma eficaz de diminuir a potência consumida no ciclo, aumentando seu COP (Coeficiente de Desempenho), é a utilização de nano refrigerantes. De acordo com Martins e Oliveira (2020), os nano refrigerantes melhoram as propriedades termo físicas do fluido de trabalho, contribuindo para um desempenho energético mais eficiente.

Avanços recentes na nanotecnologia originaram os novos fluidos emergentes de transferência de calor chamados nano fluidos. Segundo Silva e Andrade (2021), esses fluidos têm ganhado destaque devido à sua capacidade de melhorar a eficiência térmica em sistemas diversos. Os nano fluidos são preparados dispersando e suspendendo de forma estável partículas sólidas de tamanho nanométrico em fluidos convencionais de transferência de calor. Como destacam Ribeiro et al. (2020), “a estabilidade na suspensão das nanopartículas é crucial para garantir a eficácia do nano fluido como meio de transferência de calor”. Pesquisas anteriores mostraram que uma quantidade muito pequena de nanopartículas em suspensão tem o potencial de melhorar as propriedades termo físicas, de transporte e radiativas do fluido base (FERNANDES, 2018). De acordo com Zhang, Zhang e Li (2018), “adição de nanopartículas ao refrigerante resulta em melhorias nas propriedades termo físicas e nas características de transferência de calor do refrigerante, melhorando assim o desempenho do sistema de refrigeração”.

Logo, de acordo com o contexto, tem-se a seguinte problemática:

Como determinar o desempenho de um ciclo de compressão de vapor usando nano refrigerantes?

1.2 Justificativa

Segundo a *International Energy Agency* (2021, p.15), "o mundo é confrontado com o desafio da segurança energética, com os governos de muitas nações implementando políticas energéticas sobre o uso de energia para diminuir os níveis de consumo de energia para a sustentabilidade a longo prazo". Líderes governamentais e investigadores têm deliberado sobre o problema do crescimento do consumo de energia porque a atual geração de energia acompanha a queima de combustíveis fósseis, o que contribui para o aquecimento global (DOE, 2022).

A eficiência energética em edifícios comerciais é uma preocupação crescente, visto que aproximadamente 50% do consumo de energia nesses edifícios é atribuído aos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (DEPARTMENT OF ENERGY, 2022).

A partir dessas informações vê-se a necessidade de encontrar uma alternativa para melhorar o desempenho do ciclo de refrigeração, este por sua vez é um dos maiores motivos da expansão do padrão de consumo de energia, portanto, a economia de energia é uma das melhores abordagens para superar esse problema.

Dessa forma, levando em conta a necessidade energética tanto quanto a ambiental fica nítido, dadas as capacidades de implementação do nano refrigerante e os benefícios que podem ser obtidos com o aumento do desempenho COP (Coeficiente de desempenho), a justificativa para a realização deste trabalho.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Determinar o desempenho de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor utilizando Nano refrigerantes.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o ciclo de compressão de vapor, sistemas de refrigeração, tipos de refrigerantes e nano refrigerantes;
- Desenvolver o equacionamento do ciclo de refrigeração por compressão de vapor utilizando nano refrigerantes;
- Simular o ciclo termodinâmico por meio de software específico;
- Comparar os resultados obtidos com o uso de nano refrigerantes e com o refrigerante puro no ciclo termodinâmico.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se a formulação do problema, a justificativa para a realização do estudo e os objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo aborda a fundamentação teórica, reunindo os conceitos e princípios relacionados ao ciclo de refrigeração por compressão de vapor, propriedades e tipos de fluidos

refrigerantes, nanofluidos e nanorrefrigerantes, bem como os parâmetros termodinâmicos utilizados na análise de desempenho.

O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada, contemplando o uso do software Engineering Equation Solver (EES), as condições de operação e os dados de entrada utilizados nas simulações.

O quarto capítulo apresenta e discute os resultados obtidos, comparando o desempenho do refrigerante puro R134a com as misturas contendo nanopartículas de Al_2O_3 e TiO_2 em diferentes condições operacionais.

Por fim, o quinto capítulo reúne as conclusões do estudo, destacando as contribuições da pesquisa e apresentando recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Refrigeração

A refrigeração é uma tecnologia versátil e indispensável que exerce influência direta em diversas áreas. Segundo Pires (2017), trata-se de um processo fundamental para setores como alimentos, medicina e climatização, com impacto direto na qualidade de vida moderna. É um processo que evoluiu ao longo da história da humanidade, com evidências históricas de seu uso por civilizações antigas ao longo do tempo. Segundo Ferraz (2008), há registros que indicam que as civilizações como as chinesas, gregas e romanas, faziam uso de gelo natural colhidos no alto das montanhas, para a preservação de alimentos, com destaque para bebidas como chás.

Diferentemente de outras civilizações a egípcia, devido a sua localização geográfica e a sua condição climática, não tinha acesso ao gelo natural, empregando outro método para enfrentar o desafio do resfriamento, recorrendo a evaporação da água como técnica de obter o efeito de resfriamento com o auxílio de vasos de barro (FERRAZ, 2008).

Segundo Miller et al. (2014), por volta de 1920, um dos marcos pioneiros no desenvolvimento dos sistemas de refrigeração foi a criação da primeira unidade de refrigeração, marcando um avanço significativo em relação à prática anterior, que dependia principalmente do gelo como meio de resfriamento. Surpreendentemente, ainda nos dias atuais, alguns refrigeradores utilizam princípios semelhantes aos empregados na década de 1920. Segundo Almeida (2018), “muitas tecnologias básicas de refrigeração permanecem inalteradas, evidenciando a robustez dos conceitos originais desenvolvidos naquele período”. A figura 1 ilustra um dos primeiros refrigeradores domésticos comercializados.

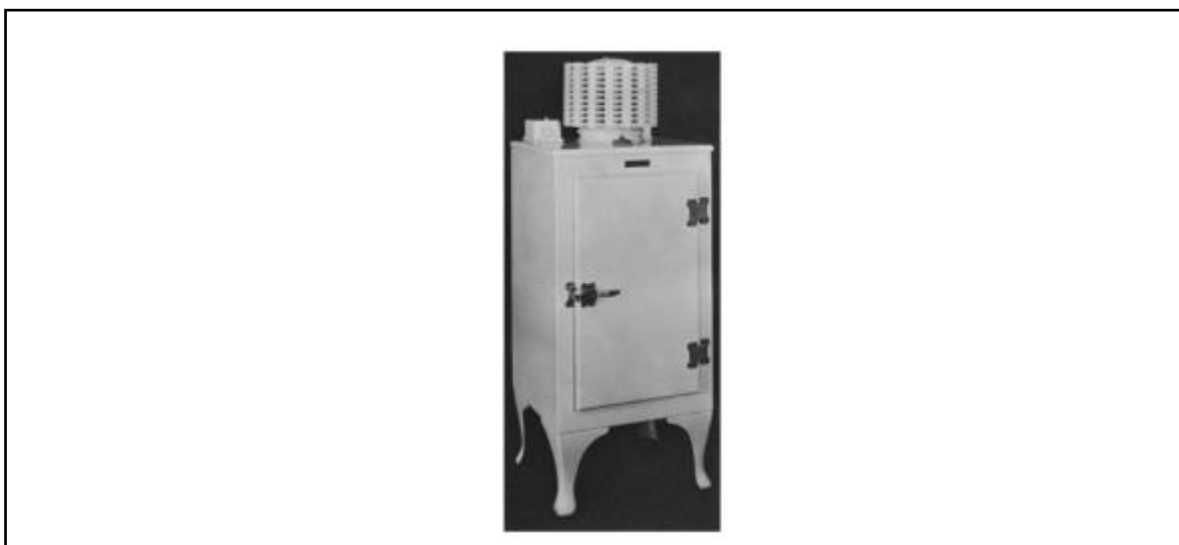


Figura 1: Um dos primeiros refrigeradores domésticos comercializados
Fonte: Miller et al (2014).

Na figura 1 observa-se um dos primeiros modelos de refrigeradores comercializados fabricados, sendo factível a observação da unidade no seu topo que o identificava como um refrigerador e não uma caixa de gelo.

De acordo com Miller et al. (2014), a refrigeração é um processo que envolve a remoção de calor de um ambiente onde sua presença é indesejável ou prejudicial com o propósito de efetuar o resfriamento desse espaço. Ainda Miller et al. (2014), exemplifica que no processo de refrigeração ainda existe uma parcela de calor transferida que é indesejada para o sistema, mas é deslocada para um local onde não prejudica o sistema de refrigeração.

Sob a ótica de Tassini (2012), a refrigeração pode ser entendida como um processo físico que envolve a transferência de energia térmica de forma contínua de um corpo, seguida pela transferência de calor extraída de outro corpo, esses processos são realizados de modo a manter ou reduzir a temperatura de forma que a mesma seja inferior a temperatura ambiente ao redor.

De acordo com Miranda (2017), a refrigeração é um processo que consiste na diferença de temperatura, isto é, se baseia na transferência de calor entre os ambientes ou corpos. Os equipamentos que geram refrigeração são conhecidos como refrigeradores, e os processos em que operam são chamados de ciclos de refrigeração. Segundo Gomes (2019), o ciclo de compressão de vapor é o mais utilizado na refrigeração, onde se faz uso de fluido refrigerante. Conforme destaca Fernandes (2021), o ciclo de compressão de vapor apresenta alta eficiência energética, sendo o padrão na maioria dos sistemas comerciais e residenciais.

2.2 Refrigeração por compressão de vapor

Este é o sistema mais utilizado para geração de efeito de refrigeração na prática. Conforme destaca Santos (2018), nele o vapor é comprimido, condensado e, em seguida, tem sua pressão diminuída para que o fluido possa evaporar em baixa pressão. Para melhor compreensão do conteúdo, analisa-se como se desenvolve o ciclo de refrigeração desde o ciclo de Carnot até o ciclo a vapor real. Segundo Carvalho e Lima (2020), “o estudo comparativo desses ciclos é fundamental para otimizar o desempenho dos sistemas reais de refrigeração”.

2.2.1 Ciclo de refrigeração de Carnot

Segundo Stoecker e Jones (1985, p. 208), “o ciclo de Carnot é aquele cuja eficiência não pode ser superada entre duas temperaturas dadas”. O ciclo de Carnot é considerado o ciclo ideal

segundo o qual opera uma máquina térmica ou motor térmico que, em altas temperaturas, converte parte da energia térmica em trabalho (SILVA; MOURA, 2019). Ele é composto, teoricamente, por quatro processos reversíveis: compressão adiabática, rejeição isotérmica de calor, expansão adiabática e recebimento isotérmico de calor (STOECKER; JONES, 1985).

Na Figura 2 ilustra-se esquematicamente o motor térmico de Carnot. No processo 1-2 ocorre o consumo de energia em forma de trabalho para a etapa de compressão adiabática; no processo 2-3 ocorre a absorção isotérmica de calor de uma fonte a alta temperatura para que haja conversão de parte dessa em energia em trabalho no processo 3-4; e, finalmente, no processo 4-1, ocorre a rejeição de uma quantidade de calor residual.

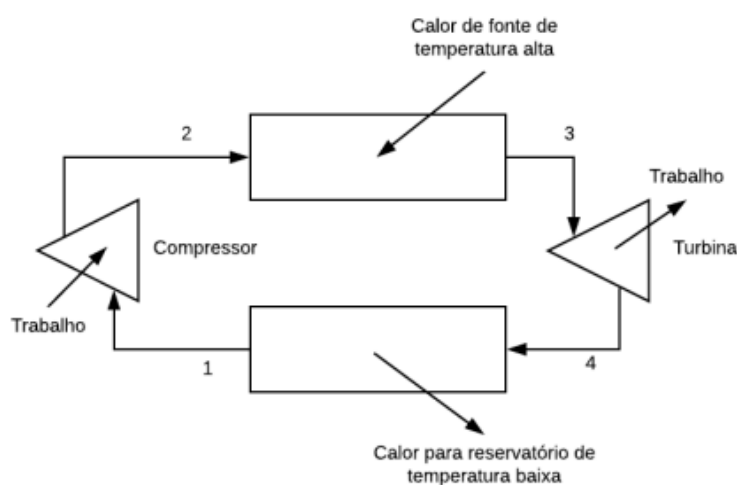


Figura 2: Motor térmico de Carnot
Fonte: Adaptado de Stoecker & Jones, 1985

O ciclo de Carnot, como demonstra a figura 2, é composto de processos reversíveis, ou seja, todos os quatro processos que o compõem podem ser invertidos (SILVA; MENEZES, 2020). Segundo Araújo e Lima (2018), ao operar no sentido inverso, ele se torna o ciclo de Carnot de refrigeração. Nele, não só os processos, mas também as direções das interações de calor e trabalho são invertidas. Conforme afirma Costa (2019, p. 112), “a inversão dos processos transforma a máquina térmica em um refrigerador ideal, mantendo a eficiência máxima entre duas temperaturas”. Isso significa que o motor térmico de Carnot recebe energia na forma de calor no ponto de mais alta temperatura, converte parte dessa energia em trabalho e rejeita o restante para um reservatório de baixa temperatura (MORAES et al., 2021). Já o refrigerador de Carnot, por sua vez, recebe calor no ponto de baixa temperatura, requer a ação de trabalho externo e libera calor no ponto de mais alta temperatura (STOECKER; JONES, 1985). Esta diferença pode ser mais facilmente visualizada comparando-se as Figuras 2 e 3 (STOECKER; JONES, 1985).

Na Figura 3 pode-se observar, esquematicamente, como opera o ciclo de Carnot de refrigeração. No processo 1-2 ocorre a compressão adiabática pelo compressor; em 2-3 calor é liberado em um reservatório de alta temperatura; em 3-4 expansão adiabática, e em 4-1 recebimento isotérmico de calor.

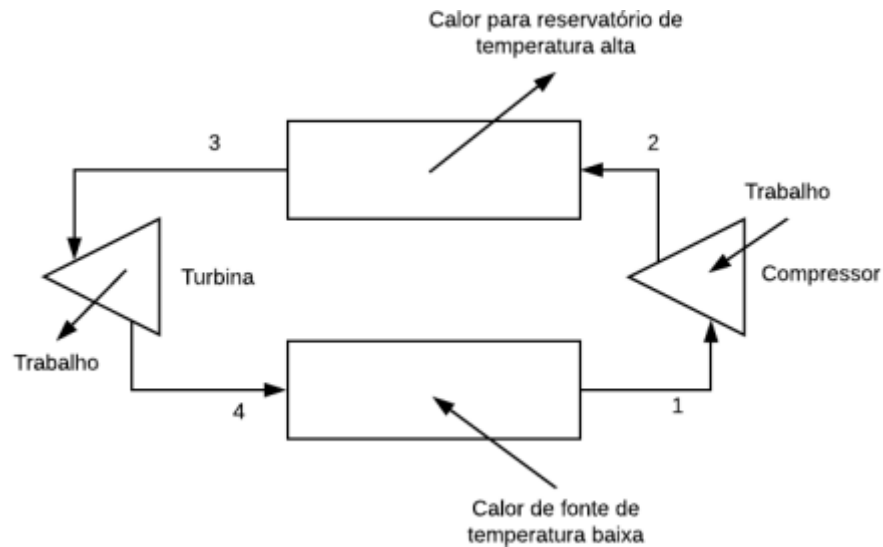


Figura 3: Ciclo de Carnot de refrigeração.
Fonte: Adaptado de Stoecker & Jones, 1985

2.2.2 Ciclo de refrigeração por compressão de vapor

Segundo Çengel & Boles (2013) o ciclo de refrigeração de Carnot, assim como o seu processo inverso são os ciclos térmicos de mais alta eficiência. No entanto, na prática, ciclos reversíveis não podem ser realizados devido às irreversibilidades de cada processo, que não podem ser eliminadas. Na Figura 4 é ilustrado o diagrama Temperatura-entropia (ou simplesmente, diagrama T-s) do ciclo de refrigeração de Carnot com seus 4 processos reversíveis.

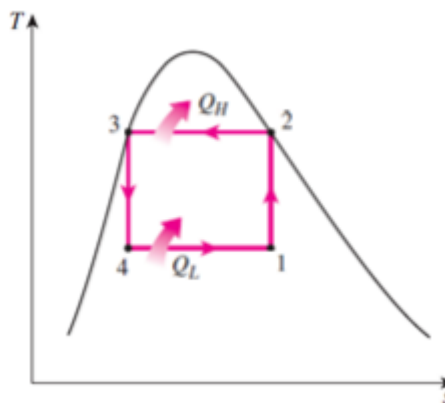


Figura 4: Diagrama T-s do ciclo de refrigeração de Carnot.
Fonte: Çengel & Boles, 2013..

Os processos de absorção e rejeição de calor isotérmicos (processos 4-1 e 2-3 da Figura 3, respectivamente) não são difíceis de realizar na prática, tendo valores muito próximos atingidos por evaporadores e condensadores reais, pois dentro da região de saturação de um fluido a pressão constante mantém automaticamente a temperatura constante.

Contudo, os processos de compressão e expansão isentrópica (1-2 e 3-4 da Figura 4, respectivamente) são mais difíceis de atingir, isso ocorre porque no processo de compressão isentrópica, por exemplo, o compressor tem que lidar com a compressão de duas fases (líquido e vapor), e no processo de expansão isentrópica, a turbina entra em contato com um alto teor de umidade. Mesmo que fosse executado fora da região de saturação ainda ter-se-ia dificuldades em manter as condições isotérmicas durante o processo de absorção e rejeição de calor. O ciclo de refrigeração de Carnot é, portanto, um modelo não realista. No entanto deve ser utilizado como modelo comparativo, visto que é o ciclo de maior eficiência (ÇENGEL & BOLES, 2013).

Alguns dos problemas do ciclo de Carnot podem ser solucionados através da vaporização completa do fluido e da substituição da turbina por um dispositivo de estrangulamento (ÇENGEL; BOLES, 2013). Segundo os mesmos autores, o ciclo resultante dessas modificações é denominado ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor. Este sistema é composto por quatro componentes principais: o condensador, o evaporador, o compressor e o dispositivo de estrangulamento (SANTOS; OLIVEIRA, 2020). O ciclo pode ser visualizado esquematicamente na Figura 5.

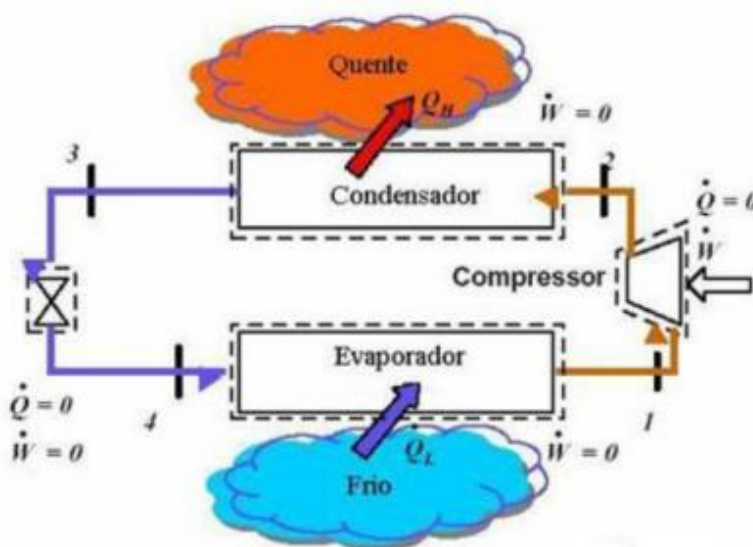


Figura 5: Ciclo de refrigeração por compressão de vapor.
Fonte: Guimarães, 2011.

Na Figura 5 ilustra-se o ciclo de refrigeração por compressão de vapor por meio de um esquema com os componentes do ciclo e as regiões de baixa e alta temperatura onde ocorrem as trocas de calor.

De acordo com Assumpção (2004), o ciclo de refrigeração por compressão de vapor funciona da seguinte forma: a partir do consumo de energia elétrica o compressor aumenta a pressão no fluido de trabalho, tal processo é considerado isentrópico no ciclo ideal. O fluido comprimido, agora em alta temperatura, passa pelo condensador, onde é realizada a transferência de calor para o meio externo (PEREIRA; SOUSA, 2019). Essa transferência de calor ocorre a pressão constante, sendo dividida em duas regiões distintas (LIMA, 2020). Conforme explicam Çengel e Boles (2013, p. 295), “a primeira é a de calor sensível, onde há diminuição da temperatura; e a segunda é a de calor latente, onde a temperatura se mantém constante, mas ocorre a mudança de fase do fluido de trabalho”. Nesse processo, o fluido passa de vapor superaquecido para líquido saturado (COSTA; ALMEIDA, 2021).

Após tal mudança de estado, o fluido de trabalho é expandido dentro da válvula de expansão num processo isentálpico, onde sua pressão sofre um decréscimo até a pressão do evaporador. Nele, o calor do meio é absorvido pelo fluido também à pressão constante, gerando assim o efeito de refrigeração do ciclo (ASSUMPÇÃO, 2004). Os processos descritos podem ser melhor visualizados através de um diagrama T-s presente na Figura 6.

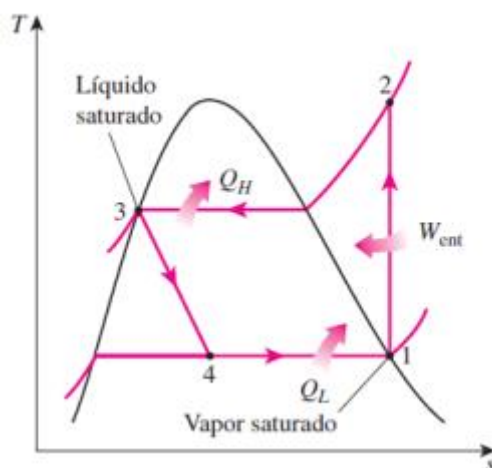


Figura 6: Diagrama T-s do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor.

Fonte: Adaptado de Çengel & Boles, 2013.

De acordo com Stoecker & Jones (1985) devido a algumas ineficiências dos processos envolvidos, o ciclo real de refrigeração por compressão de vapor apresenta diferenças em relação ao ciclo ideal (ou padrão). O diagrama Pressão-entalpia (ou simplesmente, diagrama P-

h) com a presença dos ciclos padrão e real de compressão é exibido na Figura 7, como base para comparação.

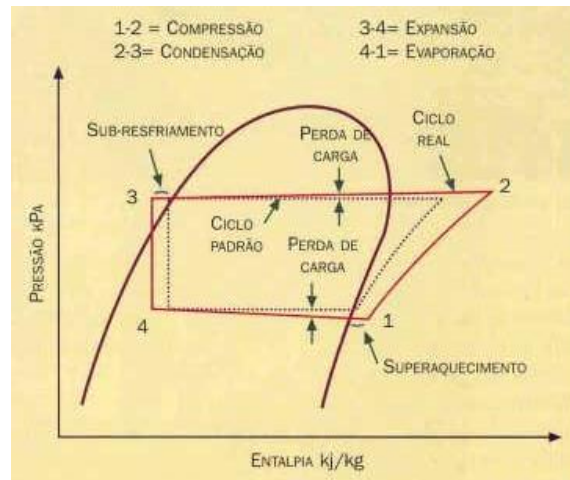


Figura 7: Diagrama P-h dos ciclos padrão e real de refrigeração por compressão de vapor.

Fonte: Stoecker & Jones, 1985.

Os ciclos real e ideal de refrigeração por compressão de vapor se diferenciam principalmente nas perdas de carga no evaporador e condensador, no superaquecimento do fluido na saída do evaporador e no sub-resfriamento na saída do condensador. No ciclo padrão não são consideradas perdas de carga, mas no ciclo real elas ocorrem devido ao atrito, levando a um maior trabalho de compressão. O superaquecimento do vapor evita que o compressor entre em contato com gotículas de líquido, já o sub-resfriamento garante que o fluido que entra na válvula de expansão esteja totalmente no estado líquido. O atrito presente no ciclo real, assim como outros tipos de perda, também faz com que o processo de compressão não seja isentrópico (STOECKER & JONES, 1985).

Os parâmetros mais importantes na análise de desempenho de um ciclo de compressão de vapor ideal ou real são retirados no diagrama pressão-entalpia (P-h), que podem ser vistos nas Figuras 7 e 8. São eles: o trabalho de compressão, a taxa de rejeição de calor, o efeito de refrigeração e o coeficiente de eficácia ou coeficiente de performance (COP) (STOECKER & JONES, 1985).

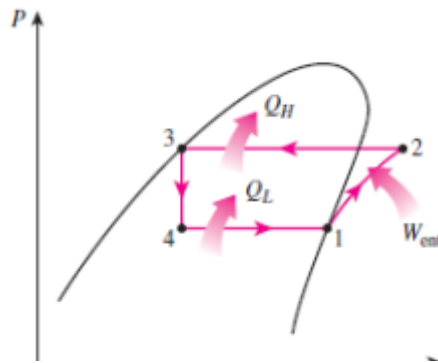


Figura 8: Diagrama pressão-entpia do ciclo ideal de compressão de vapor.
Fonte: Çengel & Boles, 2013.

O COP de um ciclo padrão (ideal) de compressão de vapor pode ser obtido pela razão entre o efeito de refrigeração e o trabalho de compressão. Segundo Çengel e Boles (2013), esse coeficiente de desempenho representa a eficiência do ciclo ao comparar a energia útil produzida com a energia fornecida ao sistema.

Para a avaliação completa do desempenho do ciclo, torna-se necessário apresentar, além das grandezas já descritas, o trabalho real do compressor, a eficiência isentrópica do compressor e o calor rejeitado no condensador.

O trabalho de compressão real é a variação de entalpia no processo de compressão (processo 1-2, Figura 8), portanto:

$$W_{1-2} = h_2 - h_1 \quad (1)$$

Onde:

- W_{1-2} é o trabalho realizado pelo compressor por unidade de massa (kJ/kg);
- h_2 é a entalpia específica real na saída do compressor (ou entrada do condensador) (kJ/kg);
- h_1 é a entalpia específica na entrada do compressor (ou saída do evaporador) (kJ/kg).

O trabalho isentrópico do compressor, W_{1-2s} , é obtido pela Equação (2):

$$W_{1-2s} = h_{2s} - h_1 \quad (2)$$

Onde:

- W_{1-2s} é o trabalho específico de compressão para um processo isentrópico (kJ/kg);
- h_{2s} é a entalpia específica na saída isentrópica do compressor (kJ/kg).

A eficiência isentrópica do compressor, η_{isen} , é definida como a razão entre o trabalho ideal e o trabalho real, conforme a Equação (3):

$$\eta_{isen} = \frac{W_{1-2s}}{W_{1-2}} = \frac{h_{2s}-h_1}{h_2-h_1} \quad (3)$$

Onde:

- η_{isen} é a eficiência isentrópica do compressor (adimensional).

Já o efeito de refrigeração, é o calor absorvido no processo de recebimento isotérmico de calor (processo 4-1, Figura 8), então:

$$q_L = h_1 - h_4 \quad (4)$$

Onde:

- q_L é a taxa de transferência de calor por unidade de massa no evaporador, para um corpo de baixa temperatura (kJ/kg);
- h_4 é a entalpia específica na entrada do evaporador (ou saída do dispositivo de expansão) (kJ/kg).

O calor rejeitado no condensador q_H , é obtido por:

$$q_H = h_2 - h_3 \quad (5)$$

Em que:

- q_h – calor específico rejeitado no condensador (kJ/kg);
- h_3 – entalpia específica na saída do condensador (kJ/kg).

Temos, portanto, o coeficiente de performance dado por:

$$COP = \frac{q_L}{w_{1-2}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (6)$$

Onde:

- COP é o coeficiente de performance do ciclo (adimensional).

2.3 Fluidos refrigerantes

Segundo Çengel e Boles (2013), o fluido refrigerante é o meio de trabalho responsável por realizar a transferência de calor no ciclo de refrigeração, circulando por seus componentes e promovendo a remoção de energia térmica do ambiente ou produto refrigerado para um meio de rejeição, como o ar atmosférico ou a água de resfriamento. Esse processo ocorre principalmente devido às mudanças de fase, nas quais o refrigerante absorve calor no evaporador durante a evaporação e o rejeita no condensador durante a condensação.

Bhushan (2013) afirma que, para ser considerado adequado, um fluido refrigerante deve apresentar propriedades termodinâmicas favoráveis, como elevado calor latente de vaporização, pressões de operação compatíveis com equipamentos comerciais e altos coeficientes de transferência de calor. Além disso, devem ser estáveis química e termicamente, de modo a evitar reações com materiais construtivos e lubrificantes.

De acordo com Johnson (1985), “a segurança operacional está diretamente relacionada à baixa toxicidade e inflamabilidade do fluido refrigerante”, sendo estas características indispensáveis para aplicações comerciais e industriais. Ainda segundo o autor, aspectos ambientais, como baixo Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP) e baixo Potencial de Aquecimento Global (GWP), devem ser considerados para atender às regulamentações vigentes.

Williams (1996) destaca que a escolha do fluido refrigerante influencia diretamente a eficiência energética do sistema, a confiabilidade operacional e a viabilidade econômica ao longo da vida útil. Em complemento, Ludema (1996) ressalta que fatores como disponibilidade comercial e custo também desempenham papel importante no processo de seleção.

Assim, a seleção criteriosa do fluido refrigerante envolve não apenas a análise de suas propriedades termofísicas, mas também a avaliação de segurança, impacto ambiental e viabilidade econômica, garantindo o melhor desempenho do sistema e a conformidade com normas e regulamentações internacionais.

2.3.1 Impactos Ambientais e a Transição para Alternativas

Embora os CFCs fossem amplamente utilizados devido à sua segurança e eficiência, nos anos 1970 foi descoberto que eles causavam danos significativos à camada de ozônio (PEREIRA; CASTRO, 2018). Em um estudo pioneiro, os cientistas Mario Molina e F. Sherwood Rowland demonstraram que os CFCs, ao se acumularem na estratosfera, eram decompostos pela radiação ultravioleta (MOLINA; ROWLAND, 1974). Essa decomposição liberava átomos de cloro que, por sua vez, destruíam moléculas de ozônio de forma contínua e catalítica (SANTOS, 2021). Essa destruição da camada de ozônio permitia a maior incidência de radiação ultravioleta nociva na superfície terrestre, aumentando os riscos de câncer de pele e outros problemas de saúde (MOLINA; ROWLAND, 1974).

Como resposta a essa descoberta, o Protocolo de Montreal foi estabelecido em 1987, propondo a eliminação gradual dos CFCs (OLIVEIRA; MARTINS, 2019). Posteriormente, também foram incluídos no protocolo os hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs), como o R22, devido ao seu impacto ambiental (FERREIRA; ALMEIDA, 2020). Esses fluidos, embora menos prejudiciais que os CFCs, ainda representavam um risco significativo para a camada de ozônio, o que levou à sua substituição por hidrofluorcarbonetos (HFCs) (UNEP, 1987). O R134a, um HFC amplamente utilizado, substituiu o R12 em muitas aplicações devido ao seu potencial de destruição do ozônio (ODP=0), mas foi posteriormente identificado como um gás

de efeito estufa, com um alto Potencial de Aquecimento Global (GWP) (PORTMANN; SOLOMON, 2007).

2.3.2 Transição para Fluidos Refrigerantes Sustentáveis

No final do século XIX, os primeiros sistemas de refrigeração utilizavam fluidos como dióxido de enxofre (SO₂), éter e amônia (NH₃) (BARBOSA; MENDES, 2017). Esses fluidos foram escolhidos devido às suas propriedades termodinâmicas favoráveis, como a capacidade de absorver e liberar calor de maneira eficiente (SOUZA, 2019). No entanto, a toxicidade e a inflamabilidade de substâncias como a amônia impunham sérios desafios, tornando esses sistemas potencialmente perigosos para os usuários (SANTOS, 2017).

Com o avanço da tecnologia, a busca por fluidos refrigerantes mais seguros levou à descoberta dos clorofluorcarbonetos (CFCs) em 1928, por Thomas Midgley Jr. O R12 (diclodifluorometano) foi um dos primeiros CFCs a ser amplamente utilizado devido às suas propriedades não inflamáveis, não tóxicas e estáveis, o que o tornou uma escolha popular para uma variedade de aplicações, incluindo refrigeradores domésticos e sistemas de ar-condicionado (BARBOSA, 2016).

No entanto, com o passar do tempo, os CFCs, como o R12, foram identificados como substâncias que prejudicavam significativamente a camada de ozônio (SILVA; PEREIRA, 2017). Segundo Martins e Oliveira (2019), essa constatação motivou a busca por alternativas menos nocivas. Por isso, houve a substituição gradual dos CFCs por hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs), como o R22, que apresentavam menor impacto ambiental (FERREIRA, 2020).

Embora os HCFCs tenham um menor Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP) em comparação com os CFCs, eles ainda causavam danos ambientais, o que levou ao desenvolvimento de novos fluidos (UNEP, 1987).

A próxima geração de refrigerantes foi baseada em hidrofluorcarbonetos (HFCs), como o R134a. Os HFCs têm zero ODP, mas possuem um alto Potencial de Aquecimento Global (GWP), o que tem impulsionado uma nova onda de transição para alternativas com menor impacto ambiental, como os hidrofluorolefinas (HFOs), incluindo o R1234yf, que combina baixa inflamabilidade com um GWP drasticamente reduzido (PATEL; DESAI, 2016).

Além disso, há também o aumento do uso de refrigerantes naturais, como o CO₂ (R744), a amônia (R717) e hidrocarbonetos como o R600a, que têm zero ODP e baixo GWP, sendo uma escolha preferida em muitas aplicações devido à sua eficiência e sustentabilidade (ROSENFELD; RADERMACHER, 2006).

2.3.3 O Futuro dos Fluidos Refrigerantes

A busca contínua por soluções que conciliem eficiência energética e sustentabilidade ambiental está impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias e fluidos refrigerantes (ALMEIDA; CARVALHO, 2021). Regulamentações internacionais, como o Regulamento Europeu F-Gas, têm sido fundamentais para acelerar a transição para fluidos com baixo potencial de aquecimento global (GWP), incentivando a pesquisa e a inovação na área de refrigeração (MINO, 2019).

De acordo com Silva (2022), tecnologias emergentes, como os sistemas de refrigeração magnética e ciclos de absorção utilizando fluidos naturais ou outros fluidos refrigerantes inovadores, prometem continuar a transformar o setor. Essas inovações visam reduzir ainda mais o impacto ambiental dos sistemas de refrigeração e climatização (FERREIRA; SANTOS, 2020).

2.3.4 Refrigerantes no sistema de refrigeração

“A substância chamada de fluido refrigerante é fundamental para a transferência de calor em um equipamento de refrigeração. Em termos práticos, um fluido refrigerante comercial é qualquer substância que evapore e vaporize a temperaturas relativamente baixas” (MILLER *et al*, 2014, p.49). E de acordo Martinelli Jr (2003), o fluido refrigerante é definido como fluido que tem como objetivo absorver calor do ambiente.

Vilain (2018) exemplifica como ocorre o funcionamento do processo de refrigeração por meio do fluido refrigerante com a utilização dos dispositivos de refrigeração. Esse processo se inicia no evaporador no qual o fluido refrigerante entra na forma de mistura saturada, ou seja, coexiste em duas fases sendo uma líquida e outra vapor, e nesse processo essa mistura é vaporizada passando para o estado de vapor (vaporização do fluido refrigerante a baixa pressão), já no compressor esse vapor é comprimido se tornando vapor superaquecido, que é um tipo de vapor que tem temperatura mais alta devido a adição de calor (VILAIN, 2018).

O condensador, diferentemente do compressor e do evaporador, tem a finalidade de realizar a mudança de estado do vapor superaquecido vindo do compressor para a forma líquida no dispositivo de expansão, onde o fluido refrigerante advindo do condensador sofre uma expansão cuja a pressão é reduzida de modo que o fluido retorne novamente para o evaporador reiniciando o ciclo (VILAIN, 2018). A figura 9 mostra o processo do fluido refrigerante nos equipamentos de refrigeração.

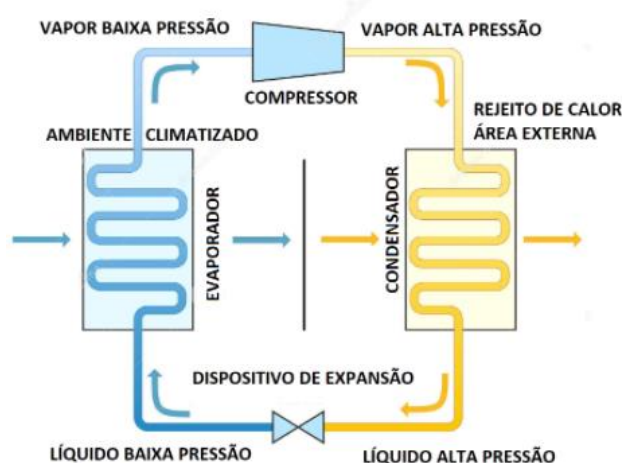


Figura 9: Processo do fluido refrigerante nos equipamentos de refrigeração
 Fonte: *Princípio Básico de Refrigeração*. SMACNA Brasil.

Na figura 9 observa-se o processo do fluido refrigerante nos equipamentos de refrigeração, sendo perceptível seus componentes e suas características de transformação ao longo do ciclo do fluido refrigerante.

Um fator importante no estudo dos fluidos refrigerantes é a quantidade necessária para que o ciclo frigorífico funcione sob ótimas condições de trabalho. Em qualquer cenário de refrigeração deve-se diminuir a carga de fluido refrigerante ao mínimo possível devido os perigos ambientais e o aumento na destruição da camada de ozônio e efeito estufa (OJEDA, 2021).

2.3.5 Tipos de Refrigerantes: Características Específicas

Os refrigerantes são fundamentais para o funcionamento eficiente dos sistemas de refrigeração e ar-condicionado (LOPES; MARTINS, 2018). Eles são classificados em diferentes categorias conforme suas propriedades químicas e termodinâmicas (GOMES, 2019). Neste tópico, serão abordadas as características específicas dos refrigerantes R600a, R134a, R1234yf e R1233zd(E), que são amplamente utilizados em diversas aplicações industriais e domésticas.

R600a (Isobutano)

O R600a, ou isobutano, é um hidrocarboneto natural que tem ganhado popularidade como refrigerante, especialmente em aplicações domésticas, como refrigeradores e freezers (SILVA; ALMEIDA, 2020). Esse fluido possui um baixo Potencial de Aquecimento Global (GWP) de apenas 3, o que o torna uma opção ambientalmente amigável (FERREIRA, 2021).

Além disso, o R600a apresenta boas propriedades termodinâmicas, como um coeficiente de performance (COP) elevado, o que contribui para a eficiência energética dos sistemas onde é aplicado (PATEL; DESAI, 2016). Contudo, sua inflamabilidade é uma desvantagem significativa, exigindo cuidados especiais na sua manipulação e uso (SANTOS; BARBOSA, 2017).

R134a (Tetrafluoroetano)

O R134a é um hidrofluorcarbono (HFC) que foi amplamente utilizado como substituto dos CFCs, especialmente o R12, após o Protocolo de Montreal (SANTOS; LIMA, 2018). Com zero Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (ODP = 0), o R134a foi adotado em diversas aplicações, incluindo sistemas automotivos e refrigeração doméstica (FERREIRA, 2019).

No entanto, seu Potencial de Aquecimento Global (GWP) é relativamente alto, em torno de 1.430, o que tem impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis devido ao impacto ambiental (PORTMANN; SOLOMON, 2007). Embora eficiente e seguro, sua utilização está sendo progressivamente reduzida em função de regulamentações internacionais (MARTINS; OLIVEIRA, 2020).

R1234yf (Tetrafluorpropano)

O R1234yf pertence à categoria dos hidrofluorolefinas (HFOs) e foi desenvolvido como uma alternativa de baixo GWP ao R134a (ALMEIDA; SOUZA, 2020). Com um GWP de apenas 4, o R1234yf é considerado muito menos impactante para o meio ambiente, sendo amplamente adotado em sistemas de ar-condicionado automotivo em conformidade com as regulamentações ambientais recentes (MINO, 2019).

Além disso, segundo Costa (2021), o R1234yf mantém propriedades termodinâmicas semelhantes às do R134a, permitindo uma transição relativamente simples entre os dois refrigerantes. Contudo, o R1234yf também é levemente inflamável, o que requer precauções adicionais durante o manuseio (FERREIRA; SANTOS, 2022).

R1233zd(E) (Dicloro-trifluoropropeno)

O R1233zd(E) é um hidrofluorolefina (HFO) utilizado principalmente em aplicações de refrigeração industrial (SILVA; PEREIRA, 2021) e em sistemas de ar condicionado de grande porte (ALMEIDA, 2022). Este fluido refrigerante possui um GWP muito baixo, inferior a 1, e zero ODP, o que o torna uma escolha ecologicamente sustentável (ROSENFELD; RADERMACHER, 2006).

O R1233zd(E) também é não inflamável, o que aumenta sua segurança operacional em comparação com outros refrigerantes da mesma classe. Além disso, sua estabilidade térmica e eficiência energética fazem dele uma opção promissora para substituições em sistemas de refrigeração e climatização de alta capacidade (SANTOS, 2017).

A tabela 1 apresenta um resumo das principais propriedades dos refrigerantes exemplificados acima.

Tabela 1: Propriedades dos refrigerantes selecionados.

Refrigerante	Massa Molar (g·mol ⁻¹)	Temperatura Crítica (°C)	Pressão Crítica (MPa)	Ponto de Ebulição (°C)	Grupo de Segurança	ODP	GWP	Classe
R600a	58,1	134,7	3,629	-11,75	A3	0	4	HC
R134a	102	101,1	4,06	-26,07	A1	0	1430	HFC
R1234yf	114,4	94,7	3,38	-29,49	A2L	0	4	HFO
R1233zd(E)	130,5	166,4	3,62	18,26	A1	<0,0004	4	HCFO

Fonte: Dados adaptados de Mwesigye et al. (2020), Zarei et al. (2022), e Yu et al. (2022).

2.4 Nanorrefrigerante

2.4.1 Conceituação

De acordo com Mahbubul et al. (2013), nanorrefrigerantes são definidos como fluidos refrigerantes convencionais aos quais se adicionam nanopartículas sólidas, geralmente com diâmetros inferiores a 100 nm, com o objetivo de melhorar suas propriedades termofísicas e, consequentemente, o desempenho do sistema de refrigeração. Essa modificação resulta da dispersão estável dessas partículas na matriz líquida, promovendo mudanças na condutividade térmica, viscosidade e capacidade calorífica.

Bhushan (2013) explica que, quando um refrigerante puro, como o R134a, é combinado com nanopartículas metálicas ou de óxidos metálicos — por exemplo, Al₂O₃ ou TiO₂ —, obtém-se o chamado nanorrefrigerante. Segundo o autor, “a adição de nanopartículas pode aumentar significativamente a eficiência da troca térmica e, em muitos casos, reduzir o consumo energético do sistema” (BHUSHAN, 2013).

Ainda conforme Aktas et al. (2014), o uso de nanorrefrigerantes representa uma alternativa promissora para atender às demandas atuais de eficiência energética e redução de impactos ambientais, pois possibilita melhorar a capacidade de refrigeração sem alterações drásticas no projeto do ciclo.

Portanto, pode-se conceituar o nanorrefrigerante como a mistura formada pela combinação de um fluido refrigerante puro com nanopartículas em suspensão estável, cuja finalidade é potencializar as trocas de calor no ciclo de refrigeração, elevando o desempenho

global do sistema e, ao mesmo tempo, viabilizando soluções mais sustentáveis e eficientes para aplicações industriais e comerciais.

2.4.2 Propriedades e Benefícios

As propriedades dos nanorrefrigerantes dependem das características das nanopartículas e do refrigerante base. As nanopartículas, que podem incluir metais (como Al_2O_3 , CuO e SiO_2), óxidos metálicos e polímeros condutores, são adicionadas ao refrigerante para melhorar a condutividade térmica e a eficiência na transferência de calor (RAO et al., 2021). A porcentagem das NPs mais preferidas é resumida na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades das nanopartículas selecionadas a uma temperatura de 25 °C

Nanopartícula	Condutividade Térmica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	Densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Calor Específico ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	Tamanho das Partículas (nm)	Preço Médio ($\text{\$}\cdot\text{g}^{-1}$)	Distribuição Percentual
Cu	396,5	8958	0,239	50	0,6	0,0316
Al_2O_3	38,7	3970	0,765	48	0,69	0,3684
CuO	33	6315	0,53	77	0,41	0,1263
ZnO	27,2	5630	0,494	30–50	0,6	0,0316
TiO_2	8,4	3900	0,692	28	0,94	0,1684
SiO_2	1,38	2400	0,968	55–75	0,41	0,0947

Fonte: Kosmadakis & Neofytou (2019).

Uma das principais vantagens dos nanorrefrigerantes é a sua capacidade de melhorar a eficiência energética dos sistemas de refrigeração (GONÇALVES; LIMA, 2020). Estudos mostram que a adição de nanopartículas pode aumentar a condutividade térmica dos refrigerantes, resultando em melhor desempenho dos sistemas de troca de calor e, consequentemente, em menor consumo de energia (KUMAR et al., 2021). Além disso, os nanorrefrigerantes podem ajudar a reduzir o impacto ambiental dos sistemas de refrigeração ao permitir o uso de refrigerantes com menor potencial de aquecimento global (GWP) e menor impacto sobre a camada de ozônio (LI et al., 2022).

2.4.3 Desafios e Considerações

Apesar dos benefícios, a aplicação de nanorrefrigerantes enfrenta alguns desafios. A principal dificuldade é a uniformidade e a estabilidade das nanopartículas no refrigerante. A aglomeração das partículas pode comprometer a eficácia do nanorrefrigerante e a operação dos sistemas de refrigeração (SHARMA; VERMA, 2020). Além disso, a compatibilidade das nanopartículas com os materiais dos componentes do sistema de refrigeração deve ser

cuidadosamente avaliada para evitar possíveis reações químicas ou degradação dos materiais (PARK et al., 2020).

Outro aspecto importante é o custo. A produção e a incorporação de nanopartículas em refrigerantes podem ser mais caras do que o uso de refrigerantes tradicionais, o que pode limitar a adoção generalizada dessa tecnologia (WANG et al., 2022). Contudo, com o avanço da tecnologia e a redução dos custos de fabricação, espera-se que os nanorrefrigerantes se tornem uma alternativa viável e econômica para melhorar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas de refrigeração.

Nanorrefrigerantes (NRs) podem ser preparados adicionando material carbonáceo, metal, óxidos metálicos, polímeros condutores, nanocompósitos ou nanopartículas híbridas ao refrigerante puro (SOUZA; ALMEIDA, 2021). As propriedades termofísicas dos NRs dependem das propriedades termofísicas do refrigerante puro e das nanopartículas, incluindo densidade, calor específico, condutividade térmica, viscosidade, proporção da mistura e concentração (FERREIRA, 2022).

A NP preferida é de longe o Al_2O_3 , com 36,84% dos trabalhos de pesquisa; outras NPs comumente usadas incluem CuO , TiO_2 e SiO_2 (RAO et al., 2021). A condutividade térmica, densidade e calor específico das NPs não dependem do seu tamanho. Como mostrado na Tabela 3, a fração de volume (ϕ) é comumente usada para calcular as propriedades termofísicas das NPs. Devido à dificuldade de medir o volume exato das NPs, a fração de volume (ϕ) pode ser corrigida pela fração de massa (ω) (KUMAR et al., 2021).

Tabela 3: Correlações das propriedades termofísicas dos nano-refrigerantes

Propriedade dos Nanorrefrigerantes	Correlação
Densidade (ρ_{nr})	$\rho_{nr} = (\phi \cdot \rho_{np} + (1 - \phi) \cdot \rho_r) / (\omega \cdot \rho_{np} + (1 - \omega) \cdot \rho_r)$
Entalpia específica (h_{nr})	$h_{nr} = \omega \cdot h_{np} + (1 - \omega) \cdot h_r$
Calor específico ($c_{p,nr}$)	$c_{p,nr} = (\phi \cdot \rho_{np} \cdot c_{p,np} + (1 - \phi) \cdot \rho_r \cdot c_{p,r}) / \rho_{nr}$
Viscosidade dinâmica (μ_{nr})	$\mu_{nr} = \mu_r \cdot (1 + 7.3 \cdot \phi + 123 \cdot \phi^2)$
Condutividade térmica (k_{nr})	$k_{nr} = k_r \cdot [k_{np} + (\eta - 1)k_r - (\eta - 1)\phi(k_r - k_{nr})] / [k_{np} + (\eta - 1)k_r + \phi(k_r - k_{nr})]$

Fonte: Bhattad (2018); Mahbubul et al. (2015); Maïga (2005); Hamilton & Crosser (1962).

As equações apresentadas na Tabela 3 permitem estimar com precisão as propriedades termofísicas dos nanorrefrigerantes, considerando diferentes frações de volume e massa das

nanopartículas (ZHANG et al., 2020). Tais correlações são essenciais para prever o comportamento térmico e a eficiência dos sistemas de refrigeração que utilizam NRs, conforme apontam estudos recentes (PEREIRA; LIMA, 2019).

Observa-se que, à medida que se modifica a concentração de nanopartículas no fluido base, que propriedades como viscosidade, calor específico e condutividade térmica sofrem alterações significativas, impactando diretamente o desempenho do sistema (ALMAZAN et al., 2018).

Dessa forma, o conhecimento e a aplicação adequada dessas correlações são fundamentais para o desenvolvimento e a otimização de nanorrefrigerantes em aplicações reais (KUMAR; SINGH, 2021). Conclui-se, portanto, que, apesar dos desafios relacionados à estabilidade, custo e compatibilidade, os NRs apresentam grande potencial como solução inovadora e eficiente para a melhoria de sistemas de refrigeração (YADAV; TIWARI, 2020).

No estudo do ciclo de compressão de vapor, o diagrama de Mollier ($P \times h$) é uma ferramenta fundamental para representar graficamente as transformações termodinâmicas sofridas pelo refrigerante. Segundo Çengel e Boles (2013), esse diagrama permite visualizar de forma clara os estados de entrada e saída de cada componente do sistema, assim como o trabalho de compressão e as trocas de calor no evaporador e no condensador.

Quando se adicionam nanopartículas ao refrigerante, formando o nanorrefrigerante, há alterações nas propriedades termofísicas do fluido, como condutividade térmica e viscosidade, que impactam diretamente os pontos de operação no diagrama. Conforme discutido por Mahbubul et al. (2013), tais modificações podem deslocar as linhas de processo no diagrama de Mollier, refletindo ganhos no Coeficiente de Performance (COP) e mudanças no trabalho específico do compressor.

A Figura 10 apresenta o diagrama de Mollier ($P \times h$) com a representação comparativa entre o refrigerante puro R134a e o nanorrefrigerante, evidenciando as diferenças nos parâmetros termodinâmicos do ciclo e a influência positiva da adição de nanopartículas sobre seu desempenho.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo tem a finalidade de descrever o desenvolvimento da pesquisa, suas características, o método com que é realizado o trabalho, as variáveis e indicadores presentes e demais considerações acerca do desenvolvimento deste estudo.

3.1 Tipo de pesquisa

Para Rampazzo (2005) a pesquisa nos possibilita descobrir novos fatos ou informações, respostas ou leis em qualquer área do conhecimento em razão de um procedimento reflexivo, controlado, sistemático e crítico. Pode ser compreendida como um procedimento de construção de conhecimento, quanto procedimento de aprendizagem (DEMO *apud* PRODANOV & FREITAS, 2013).

Conforme relata Minayo (2002), existem dois métodos de pesquisa: a qualitativa e a quantitativa. A pesquisa qualitativa está relacionada ao espaço das ações e relações, diz respeito a crenças, valores e atitudes, algo que não pode ser operacionalizado ou quantificado. Já a pesquisa quantitativa é visível e concreta, captável em equações, médias e estatísticas. Expressa generalizações de forma precisa e objetiva.

Cada pesquisa tem um objetivo específico, segundo Gil (2008). No entanto, é possível classificar os objetivos de cada pesquisa em três diferentes grupos: descritivas, explicativas e exploratórias (CAMPOS; SANTOS, 2015). As pesquisas descritivas têm por finalidade a descrição de características de um determinado grupo ou fenômeno (MARTINS, 2017). Algumas delas levantam dados e realizam estudos acerca das características de um determinado grupo, opiniões, crenças e atitudes (OLIVEIRA; PEREIRA, 2016). Podem também relacionar diferentes dados de uma pesquisa, como, por exemplo, pesquisas eleitorais que relacionam preferências políticas e o grau de instrução (RODRIGUES, 2018). Uma característica desse tipo de pesquisa são as técnicas padronizadas de coleta de informações (FERREIRA; LIMA, 2019).

Já as pesquisas explicativas são aquelas que buscam encontrar as razões para a ocorrência dos fatos (MARTINS; SILVA, 2017). Elas aprofundam o conhecimento da realidade, pois visam esclarecer a razão dos acontecimentos (OLIVEIRA, 2018). De outra forma, o grupo das pesquisas exploratórias busca criar, alterar e desvendar conceitos e ideias (RODRIGUES; SANTOS, 2016). Esse tipo de pesquisa propicia uma visão mais abrangente sobre um tema pouco explorado e com dificuldade em formular hipóteses (GIL, 2008). Geralmente, as pesquisas exploratórias possuem levantamento bibliográfico e documental, coletas de dados não padronizadas e estudos de caso (GIL, 2008).

Em relação aos procedimentos técnicos, ainda de acordo com Gil (2008), a pesquisa bibliográfica é feita a partir de um material já formado e realizada principalmente a partir de livros e artigos científicos. A pesquisa documental, semelhante à bibliográfica, se difere pelo fato de que a fonte utilizada ainda não passou por uma análise científica ou tratamento analítico (GIL, 2008). A pesquisa experimental, por outro lado, seleciona um objeto de estudo, estabelece quais variáveis podem influenciá-lo e analisa o efeito gerado sobre o objeto (MARCONI; LAKATOS, 2017).

O estudo de caso, segundo Prodanov & Freitas (2013) se dá quando existe um estudo aprofundado de um ou poucos objetos de forma que o conhecimento sobre ele seja bem detalhado. Buscam uma aplicação prática de conhecimentos de forma imediata para solução de problemas, levando o desenvolvimento de teorias.

A partir dos conceitos apresentados, o presente trabalho é classificado, com relação ao método de pesquisa, como quantitativo, visto que são usados nele equacionamentos, dados estatísticos, valores médios, isto é, dados concretos e problemas equacionáveis. Quanto ao objetivo dessa pesquisa, pode-se dizer que ela tem natureza exploratória, são criadas ideias a partir de um tema não muito explorado, a partir de uma coleta de dados não padronizados e um levantamento bibliográfico, documental e estudo de caso. O presente trabalho abrange ainda uma pesquisa de caráter bibliográfico, tendo em vista sua fundamentação em livros, artigos e dissertações e teses.

3.2 Materiais e Métodos

O desenvolvimento deste trabalho segue uma sequência estruturada em etapas, com o objetivo de elencar como o procedimento é realizado. O fluxograma é mostrado na figura 11.

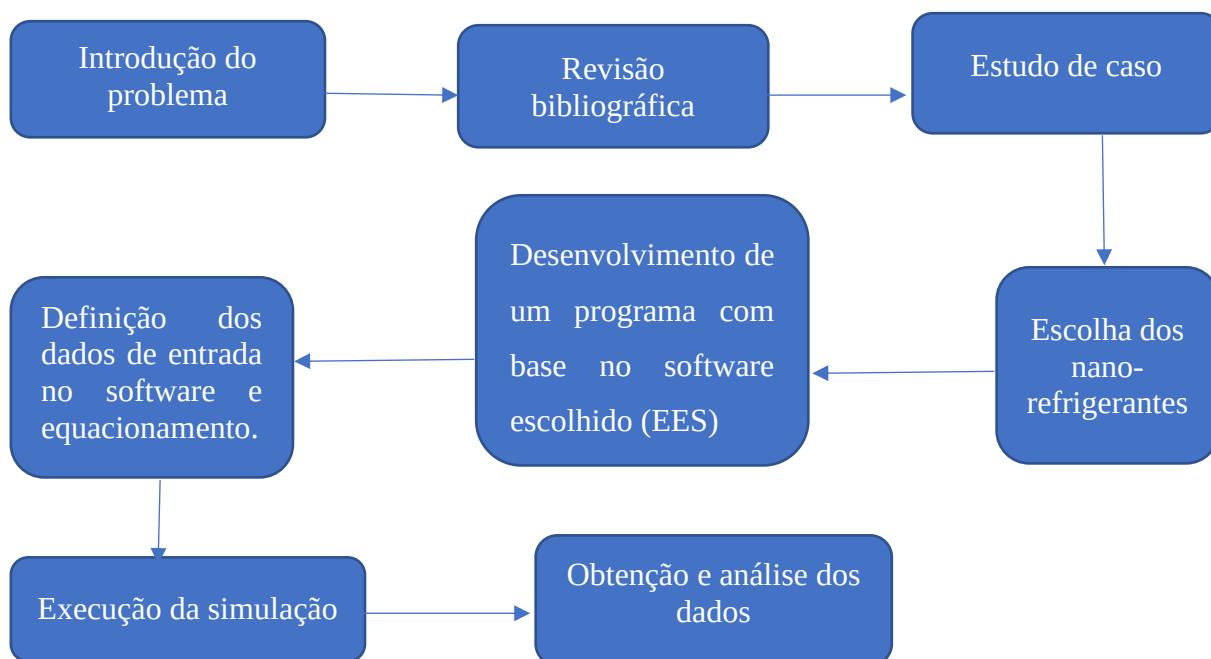


Figura 11: Fluxograma com sequenciamento das etapas para realização deste trabalho.

Fonte: Pesquisa Direta, 2025.

Primeiramente, é feita a introdução do problema, na qual discute-se a relevância dos ciclos de compressão de vapor no consumo global de energia. São apresentados dados que indicam a importância desses ciclos em sistemas de refrigeração e condicionamento de ar, tanto no setor doméstico quanto industrial, além dos desafios associados ao uso de refrigerantes convencionais. O foco é direcionado à necessidade de otimização desses ciclos, destacando o uso de nano-refrigerantes como uma alternativa promissora para melhorar a eficiência energética.

Em seguida, é apresentada a justificativa do trabalho, que se fundamenta na crescente demanda por soluções energéticas mais eficientes e sustentáveis. O objetivo central é discutir como a introdução de nanopartículas em fluidos refrigerantes pode aumentar a eficiência dos sistemas de refrigeração. A partir disso, os objetivos específicos são definidos, incluindo a revisão bibliográfica sobre os conceitos envolvidos, a elaboração de equacionamentos para o ciclo de compressão de vapor com nano-refrigerantes, e a realização de simulações para comparação de resultados.

Na etapa de revisão bibliográfica, é explorado o desenvolvimento histórico da refrigeração, com foco nos sistemas de compressão de vapor e nas diferentes categorias de fluidos refrigerantes utilizados ao longo do tempo. Além disso, é discutida a evolução tecnológica dos nano-refrigerantes, que são caracterizados por conter nanopartículas que aumentam a capacidade de transferência de calor. A revisão dá embasamento teórico para o desenvolvimento das etapas subsequentes.

Em seguida, é realizado um estudo de caso, no qual é selecionado um exemplo prático de aplicação de nano-refrigerantes em um ciclo de compressão de vapor. Esse estudo permite a aplicação dos conceitos desenvolvidos, utilizando um cenário real ou simulado para testar a metodologia.

A elaboração do programa será feita utilizando o *software Engineering Equation Solver (EES)*, uma ferramenta amplamente utilizada para resolver equações relacionadas a ciclos termodinâmicos. Nesse programa, são inseridos os dados termodinâmicos dos refrigerantes e nano-refrigerantes, bem como as equações que regem o funcionamento do ciclo de compressão de vapor. O objetivo é realizar simulações precisas que permitam avaliar a eficiência energética e o comportamento dos nano-refrigerantes em diferentes condições operacionais.

Durante o desenvolvimento do programa, é feita a escolha dos nano-refrigerantes com base em suas propriedades físicas e termodinâmicas, como condutividade térmica, viscosidade, e capacidade calorífica. Esses refrigerantes são então inseridos no modelo para que se possa analisar como influenciam o desempenho do ciclo.

Na definição dos dados de entrada, são determinados os parâmetros necessários para a simulação, como pressões de evaporação e condensação, temperaturas de operação, e características dos nano-refrigerantes. Em seguida, as equações são ajustadas para refletir as condições de operação do ciclo de compressão de vapor.

A execução da simulação é a etapa em que os dados inseridos no programa são processados. A simulação permite verificar os efeitos do uso de nano-refrigerantes no ciclo, como o impacto sobre o Coeficiente de Performance (COP) e a quantidade de energia economizada.

Após a simulação, os dados obtidos são analisados, comparando-se os resultados do ciclo utilizando refrigerantes convencionais com aqueles que utilizam nano-refrigerantes. É avaliado o ganho de eficiência, a redução no consumo de energia e a melhoria na transferência de calor, demonstrando os benefícios da adoção dos nano-refrigerantes.

Finalmente, os resultados e discussões são apresentados, detalhando as principais descobertas do estudo. É feita uma comparação entre os diferentes cenários simulados, discutindo os ganhos de eficiência energética e os impactos ambientais do uso de nano-refrigerantes.

Por fim, o trabalho é concluído com uma avaliação geral do impacto do uso de nano-refrigerantes em ciclos de compressão de vapor, destacando as principais contribuições deste estudo para o campo da engenharia de refrigeração e propondo recomendações para pesquisas futuras.

3.2.1 Código do Programa Utilizado

As simulações computacionais foram realizadas por meio do software Engineering Equation Solver (EES), selecionado devido à sua robustez na resolução de sistemas de equações algébricas e diferenciais não lineares, além de sua capacidade de manipular propriedades termodinâmicas de fluidos com elevada precisão. O uso desse programa possibilitou a implementação de modelos matemáticos do ciclo de compressão de vapor, tanto para o fluido refrigerante puro (R134a) quanto para os nanorrefrigerantes obtidos pela adição de nanopartículas (Al_2O_3 e TiO_2).

Para assegurar a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados, foram desenvolvidos dois códigos distintos:

- um destinado ao ciclo de compressão de vapor utilizando apenas o refrigerante base (R134a), sem nanopartículas;
- outro contemplando os nanorrefrigerantes, nos quais as propriedades termofísicas foram modificadas a partir das correlações apresentadas no capítulo de Revisão Bibliográfica.

O código foi estruturado de forma a contemplar as etapas do ciclo de refrigeração, incluindo: compressão, condensação, expansão e evaporação. A partir dele, foi possível calcular parâmetros fundamentais, como o trabalho de compressão, o calor absorvido no evaporador, o calor rejeitado no condensador e o Coeficiente de Desempenho (COP).

Os dados de entrada variaram conforme o objetivo de cada simulação, incluindo:

- Temperatura de evaporação (T_1);
- Temperatura de condensação (T_3);
- Eficiência isentrópica do compressor (η_{is});
- Fração mássica de nanopartículas (ω)
- Densidade das nanopartículas (ρ_{np}), essencial para o cálculo da densidade e da entalpia do nanorrefrigerante.

As condições de contorno foram definidas com base em faixas operacionais realistas de sistemas de refrigeração e em valores adotados em trabalhos experimentais previamente publicados. Isso permitiu não apenas validar o programa frente a dados da literatura, mas também realizar comparações consistentes entre os desempenhos do refrigerante puro e dos nanorrefrigerantes.

A seguir, apresenta-se o código-fonte desenvolvido no EES, referente às simulações realizadas:

"Modelagem e simulação para o refrigerante R134a puro"

"Temperatura de evaporação: T1 =T4=Tevap"

```

T[1]= #[C]
x[1]=1

P_sat1=P_sat(R134a;T=T[1])
P[1]=P_sat1
h[1]=Enthalpy(R134a;T=T[1];x=x[1])
s[1]=Entropy(R134a;T=T[1];x=x[1])
rho[1]=Density(R134a;T=T[1];x=x[1])

T[3]=#[C]
x[3]=0

P_sat3=P_sat(R134a;T=T[3])
P[3]=P_sat3
h[3]=Enthalpy(R134a;T=T[3];x=x[3])
s[3]=Entropy(R134a;T=T[3];x=x[3])
rho[3]=Density(R134a;T=T[3];x=x[3])

P[2]=P[3]
s21=s[1]

h21=Enthalpy(R134a;s=s21;P=P[2])
T21=Temperature(R134a;P=P[2];s=s21)
rho21=Density(R134a;T=T21;h=h21)
P21=Pressure(R134a;T=T21;h=h21)

etac=#

h[2]=h[1]+(h21-h[1])/etac
s[2]=Entropy(R134a;P=P[2];h=h[2])
T[2]=Temperature(R134a;P=P[2];h=h[2])
rho[2]=Density(R134a;P=P[2];h=h[2])

h[4]=h[3]
P[4]=P[1]

x[4]=Quality(R134a;P=P[4];h=h[4])
T[4]=Temperature(R134a;P=P[4];h=h[4])
s[4]=Entropy(R134a;P=P[4];h=h[4])
rho[4]=Density(R134a;P=P[4];h=h[4])

qevap=h[1]-h[4]

wc=h[2]-h[1]

qcond=h[2]-h[3]

COP=qevap/wc

```

"Modelagem e simulação para o refrigerante R134a puro com nanopartículas"

"Temperatura de evaporação: T1 =T4=Tevap"

```

T11= # [C]
x[1]=1

```

```

P_sat11=P_sat(R134a;T=T11)
P11=P_sat11
h11=Enthalpy(R134a;T=T11;x=x[1])
s11=Entropy(R134a;T=T11;x=x[1])
rho11=Density(R134a;T=T11;x=x[1])

rho[1]=w*rho_np+(1-w)*rho11

v[1]=1/rho[1]
h[1]=Enthalpy(R134a;v=v[1];x=x[1])
s[1]=Entropy(R134a;v=v[1];x=x[1])
T[1]=Temperature(R134a;v=v[1];x=x[1])
P[1]=Pressure(R134a;v=v[1];x=x[1])

T31= # [C]
x[3]=0

w= # [-] " Fração em massa da nanopartícula "
rho_np= # [kg/m^3]

P_sat31=P_sat(R134a;T=T31)
P31=P_sat31
h31=Enthalpy(R134a;T=T31;x=x[3])
s31=Entropy(R134a;T=T31;x=x[3])
rho31=Density(R134a;T=T31;x=x[3])

rho[3]=w*rho_np+(1-w)*rho31

v[3]=1/rho[3]
h[3]=Enthalpy(R134a;v=v[3];x=x[3])
s[3]=Entropy(R134a;v=v[3];x=x[3])
T[3]=Temperature(R134a;v=v[3];x=x[3])
P[3]=Pressure(R134a;v=v[3];x=x[3])

P21=P31
s21=s11

h21=Enthalpy(R134a;s=s21;P=P21)
T21=Temperature(R134a;P=P21;s=s21)
rho21=Density(R134a;T=T21;h=h21)
P22=Pressure(R134a;T=T21;h=h21)

etac= #

h[2]=h[1]+(h21-h[1])/etac
s[2]=Entropy(R134a;P=P22;h=h[2])
T[2]=Temperature(R134a;P=P22;h=h[2])
rho[2]=Density(R134a;P=P22;h=h[2])
P[2]=P[3]

h[2]=h22

h[4]=h[3]
P[4]=P[1]

x41=Quality(R134a;P=P11;h=h31)
T41=Temperature(R134a;P=P11;h=h31)
s41=Entropy(R134a;P=P11;h=h31)
rho41=Density(R134a;P=P11;h=h31)

rho[4]=w*rho_np+(1-w)*rho41

```

```

v[4]=1/rho[4]
s[4]=Entropy(R134a;v=v[4];h=h[4])
T[4]=Temperature(R134a;v=v[4];h=h[4])
x[4]=Quality(R134a;v=v[4];h=h[4])

qevap=h[1]-h[4]

wc=h[2]-h[1]

qcond=h[2]-h[3]

COP=qevap/wc

```

Destaca-se que a estrutura do código foi elaborada de forma modular, possibilitando ajustes diretos nas variáveis de entrada, o que garantiu flexibilidade durante o processo de simulação. Além disso, os resultados obtidos foram organizados em tabelas e gráficos comparativos, discutidos detalhadamente no capítulo de Resultados.

3.3 Variáveis e Indicadores

No contexto da pesquisa científica, a compreensão e a definição clara das variáveis e dos indicadores são essenciais para a construção de uma metodologia sólida e a análise de dados eficaz. As variáveis representam os aspectos que são observados, medidos ou manipulados no estudo, enquanto os indicadores são parâmetros específicos utilizados para avaliar essas variáveis.

Vergara (2003) define variáveis como características ou propriedades que podem assumir diferentes valores e que são passíveis de medição ou observação. Essas variáveis são fundamentais para a construção de hipóteses e a realização de análises quantitativas e qualitativas. Em um estudo sobre ciclos de refrigeração por compressão de vapor e nano-refrigerantes, as variáveis podem incluir parâmetros como a eficiência do ciclo e as propriedades dos nano-refrigerantes.

A definição de indicadores é crucial para a avaliação precisa das variáveis. Indicadores são medidas específicas que fornecem informações sobre o estado ou a performance de uma variável, Gil (2008). No caso do ciclo de refrigeração, indicadores como o Coeficiente de Performance (COP) e a carga térmica são utilizados para avaliar o sistema de refrigeração. Para os nano-refrigerantes, indicadores como a concentração de nanopartículas e a capacidade calorífica fornecem dados relevantes sobre o desempenho e as propriedades do refrigerante. Na tabela 4 são mostrados as variáveis e os indicadores e suas descrições relacionadas ao trabalho.

Tabela 4: Variáveis e indicadores

Variável	Indicador	Descrição
Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor	Eficiência do Ciclo (COP)	Coeficiente de Performance, que mede a eficiência do ciclo de refrigeração.
	Temperatura de Condensação (T_{cond})	Temperatura na qual o refrigerante condensa no condensador.
	Temperatura de Evaporação (T_{evap})	Temperatura na qual o refrigerante evapora no evaporador.
	Pressão de Condensação (P_{cond})	Pressão do refrigerante no condensador.
	Pressão de Evaporação (P_{evap})	Pressão do refrigerante no evaporador.
	Carga Térmica (Q_{in})	Quantidade de calor absorvida pelo refrigerante no evaporador.
	Potência Elétrica Consumida (W)	Potência elétrica utilizada pelo compressor.
Nanorefrigerantes	Concentração de Nanopartículas (C_{np})	Quantidade de nanopartículas presentes no refrigerante, geralmente medida em % em massa ou volume.
	Viscosidade (η)	Medida da resistência ao fluxo do nanorefrigerante.
	Capacidade Calorífica (C_p)	Quantidade de calor que o nanorefrigerante pode absorver por unidade de temperatura.
	Condutividade Térmica (k)	Medida da capacidade do nanorefrigerante de conduzir calor.
	Densidade (ρ)	Massa por unidade de volume do nanorefrigerante.
	Propriedades Termodinâmicas	Inclui parâmetros como entalpia e entropia específicos do nanorefrigerante.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

De acordo com o tema proposto, com finalidade de se obter um embasamento necessário para realização da pesquisa, é realizada uma coleta de dados. Sabendo que esta pesquisa é de natureza quantitativa, exploratória e é de caráter bibliográfico, os principais instrumentos de coleta de dados são na literatura, teses, livros e artigos e principalmente no *Software EES*. Associada a estes, uma observação direta a fim de reunir dados práticos e um estudo de caso também fornece informações pertinentes para a análise do efeito gerado pelo ciclo.

A tabela 5 fornece as principais vantagens e desvantagens das técnicas de coleta de dados citados.

Tabela 5: Técnica de Coleta de Dados - *Engineering Equation Solver* (EES) e literatura.

Técnica de Coleta	Vantagens	Desvantagens
Engineering Equation Solver (EES)	Interface intuitiva que facilita a configuração e execução de equações complexas.	Pode exigir um tempo de aprendizado inicial para usuários inexperientes.
	Resolve sistemas de equações não lineares e realiza análises paramétricas de forma eficiente.	Pode ser limitado em casos altamente especializados não suportados pelo software.
	Permite a criação de gráficos e visualizações dos resultados, facilitando a interpretação dos dados.	Opções de personalização gráfica podem ser limitadas em comparação com softwares especializados.
	Suporta uma ampla gama de propriedades de fluidos e ciclos termodinâmicos.	Precisão depende da qualidade e atualização das propriedades e dados inseridos.
	Capacidade de importar e exportar dados, facilitando a integração com outros softwares e sistemas de análise.	A integração com alguns formatos de dados pode exigir ajustes ou conversões adicionais.
	Geralmente mais acessível do que outros softwares de simulação complexos, com opções de licença para estudantes e acadêmicos.	Versões mais avançadas ou completas podem ser caras para instituições ou usuários individuais.
Literatura	Oferece uma visão geral e diversificada sobre o tema de pesquisa, cobrindo diferentes aspectos e abordagens.	A grande quantidade de informações pode dificultar a seleção e análise dos dados relevantes.
	Artigos e teses frequentemente fornecem dados e descobertas recentes, refletindo os avanços mais recentes na área de estudo.	Livros e algumas teses podem estar desatualizados, especialmente em áreas que evoluem rapidamente.
	Teses e livros oferecem análises profundas e metodologias extensivas, proporcionando uma base sólida para a pesquisa.	A profundidade pode aumentar a complexidade na análise e interpretação dos dados.
	Fontes acadêmicas geralmente são revisadas por pares e publicadas por editoras respeitáveis, garantindo maior confiabilidade.	A qualidade das fontes pode variar; é necessário realizar uma avaliação crítica para assegurar a qualidade.
	Fornecer uma base sólida de referências e fundamentação teórica, essencial para o desenvolvimento e suporte da pesquisa.	A pesquisa pode ficar sobrecarregada com uma quantidade excessiva de referências, dificultando a síntese.
	Muitos materiais estão acessíveis online e em bibliotecas acadêmicas, facilitando o acesso às informações.	O acesso a algumas teses e livros pode ser restrito, dependendo das permissões e da disponibilidade.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

3.5 Tabulação de Dados

A partir dos dados obtidos na literatura, é montado no *Software EES* a modelagem matemática do ciclo, realizada uma simulação para análise de performance e condições de

operação. Este também é utilizado para montagem de tabelas e gráficos do ciclo juntamente ao *Software de planilha Microsoft Excel*. Ao mesmo tempo é utilizado o *software Microsoft Word* para relato e discussão dos resultados.

3.6 Considerações Finais do capítulo

Neste capítulo foram detalhadas as metodologias e ferramentas utilizadas para o desenvolvimento das simulações no ciclo de compressão de vapor com nano-refrigerantes. A escolha dos nano-refrigerantes, assim como as variáveis de entrada e os equacionamentos aplicados no *software EES*, foram discutidos, garantindo que o processo esteja alinhado com os objetivos do estudo.

No próximo capítulo, são apresentados os resultados das simulações, onde são avaliadas a eficiência energética e os impactos do uso de nano-refrigerantes em comparação com refrigerantes tradicionais.

4 RESULTADOS

Este capítulo tem por objetivo analisar o desempenho do ciclo de compressão de vapor, por meio de simulações realizadas no software EES. Através dessas simulações, investigou-se a influência dos nanorrefrigerantes sobre o comportamento termodinâmico do sistema, com ênfase na variação do Coeficiente de Performance (COP), trabalho de compressão, carga térmica e outras grandezas relevantes. As análises são fundamentadas por uma comparação direta com os dados obtidos nos estudos de Odunfa (2021) e Aktas et al. (2014).

4.1 Validação do programa computacional desenvolvido para simulação do ciclo

Com o intuito de assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos na simulação do ciclo de compressão de vapor utilizando nano refrigerantes, foi realizada uma etapa de validação por meio da comparação dos resultados gerados no programa desenvolvido no *software Engineering Equation Solver* (EES) com os resultados encontrados na literatura científica. Para tanto, selecionaram-se dois estudos de referência: o artigo de Aktas et al. (2014) e o de Odunfa (2021), ambos reconhecidos por investigarem o desempenho de ciclos termodinâmicos com o refrigerante R134a e sua combinação com nanopartículas de Al_2O_3 .

A metodologia de validação consistiu em reproduzir, no ambiente do EES, as mesmas condições operacionais descritas nos artigos e comparar parâmetros fundamentais de desempenho, como entalpias específicas, entropias, trabalho de compressão, calor absorvido, calor rejeitado e o Coeficiente de Performance (COP). A seguir, apresentam-se as análises comparativas entre os resultados simulados e os dados dos estudos mencionados.

4.1.1 Validação com base em Aktas et al. (2014)

O artigo de Aktas et al. (2014) apresenta os resultados do ciclo de compressão de vapor para dois cenários: utilizando o refrigerante puro R134a e com a adição de nanopartículas de Al_2O_3 . Os dados de entrada dessa comparação foram:

- Temperatura de evaporação do fluido refrigerante: $T_1 = -7^\circ\text{C}$;
- Temperatura de condensação do fluido refrigerante: $T_3 = 45^\circ\text{C}$;
- Eficiência isentrópica do compressor: $\eta_{is} = 0,51$;
- Fração em massa de nanopartículas: $w = 0,06\% = 0,0006$

A Tabela 6 apresenta um comparativo entre os dados do artigo e os obtidos neste trabalho por meio do EES.

Tabela 6 – Comparação dos Resultados obtidos no EES com os dados de Aktas.

Parâmetro	R134a (Artigo)	R134a (EES)	R134a/Al ₂ O ₃ (Artigo)	R134a/Al ₂ O ₃ (EES)
T ₁ (°C)	-7	-7	-3,96	-3,96
T ₂ (°C)	81,21	81,21	78,21	79,57
T ₃ (°C)	45	45	44,85	44,85
P ₃ = P ₂ (bar)	11,60	11,605	10,09	11,561
h ₁ (kJ/kg)	394,47	246,3	396,28	248,12
h ₂ (kJ/kg)	461,41	313,2	458,30	311,51
h ₃ = h ₄ (kJ/kg)	263,44	115,8	263,23	115,57
s ₁ (kJ/kg·K)	1,7313	0,9356	1,7294	0,9337
q _e (kJ/kg)	131,03	130,5	133,05	132,5
q _c (kJ/kg)	197,97	197,5	195,07	195,9
w _{comp} (kJ/kg)	66,94	66,93	62,02	63,39
COP	1,96	1,95	2,15	2,091

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Ao analisar os dados são observadas algumas diferenças que podem ser atribuídas a pequenas variações nos bancos de dados termodinâmicos utilizados ou na resolução numérica adotada pelos autores, como observa-se na tabela 7.

Tabela 7– Erro padrão dos valores do COP.

	R134a	R134a/Al ₂ O ₃
COP_EES	1,96	2,091
COP_Artigo	1,95	2,15
Diferença	0,51%	2,74%

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na tabela 7 destaca-se, em especial, a proximidade dos valores de COP, sendo 1,95 e 2,091 nos dados simulados, contra 1,96 e 2,15 no artigo, respectivamente para o refrigerante puro e para o nanorefrigerante.

A comparação entre os resultados obtidos e os apresentados por Aktas et al. (2014) evidenciou diferenças nos valores absolutos de entalpia isentrópica (h_s). Essas diferenças decorrem, sobretudo, das tabelas de propriedades ou correlações termodinâmicas utilizadas pelo banco de dados do software EES, que podem não coincidir integralmente com aquelas empregadas pelos autores da literatura. Dessa forma, o valor absoluto de h_s em um dado estado depende diretamente da base de dados adotada.

Entretanto, ao avaliar a variação de entalpia (Δh) entre os pontos do ciclo, observa-se que os resultados mantêm proximidade em relação aos dados de referência. Isso ocorre porque, mesmo havendo deslocamentos nos valores absolutos de h_s, a diferença entre estados consecutivos é preservada em magnitude compatível. Como consequência, os cálculos do

trabalho de compressão e do Coeficiente de Desempenho (COP) não sofrem alterações significativas.

Portanto, as divergências identificadas nos valores absolutos de h_s refletem apenas diferenças de banco de dados, não comprometendo a confiabilidade da simulação. O parâmetro Δh apresenta variação dentro de limites adequados, assegurando consistência no modelo e permitindo sua validação frente aos dados experimentais.

4.1.2 Validação com base em Odunfa (2021)

De modo semelhante, realizou-se uma segunda validação utilizando os dados do estudo conduzido por Odunfa (2021). As simulações no EES foram ajustadas para refletir os mesmos parâmetros operacionais descritos no artigo. Os dados de entrada dessa comparação foram:

- Temperatura de evaporação do fluido refrigerante: $T_1 = -7,7^\circ\text{C}$;
- Temperatura de condensação do fluido refrigerante: $T_3 = 45,6^\circ\text{C}$;
- Eficiência isentrópica do compressor: $\eta_{is} = 0,53$;
- Fração em massa de nanopartículas: $w = 0,06\% = 0,0006$

A Tabela 8 apresenta a comparação entre os resultados.

Tabela 8 – Comparação dos Resultados obtidos no EES com os dados de Odunfa.

Parâmetro	R134a (Artigo)	R134a (EES)	R134a/Al ₂ O ₃ (Artigo)	R134a/Al ₂ O ₃ (EES)
T_1 (°C)	-7,7	-7,7	-1,93	-4,6
T_2 (°C)	81,5	80,28	81,1	78,74
T_3 (°C)	45,6	45,6	45,45	45,45
$P_3 = P_2$ (bar)	11,8	11,787	11,76	11,742
h_1 (kJ/kg)	245,87	245,9	249,32	247,74
h_2 (kJ/kg)	312,99	312	312,57	310,36
$h_3 = h_4$ (kJ/kg)	116,73	116,7	116,49	116,49
s_1 (kJ/kg·K)	0,9362	0,9361	0,9341	0,9341
q_e (kJ/kg)	129,14	129,2	132,83	131,3
q_c (kJ/kg)	205,26	195,3	196,08	193,9
w_{comp} (kJ/kg)	67,12	66,1	63,25	62,61
COP	1,92	1,954	2,1	2,096

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A análise dos dados comparativos com o artigo de Odunfa também demonstra uma concordância entre os valores obtidos via simulação e os apresentados na literatura. As diferenças percentuais são demonstradas na tabela 9:

Tabela 9– Erro padrão dos valores do COP.

	R134a	R134a/Al₂O₃
COP EES	1,954	2,096
COP Artigo	1,920	2,1
Diferença	1,77%	0,19%

Fonte: Pesquisa direta (2025).

O valor do COP para o refrigerante puro foi de 1,954 no EES e 1,92 no artigo, enquanto para o nanorrefrigerante, o valor simulado foi de 2,096 contra 2,1 no estudo de referência, confirmando a validade dos cálculos realizados.

4.1.3 Análise dos resultados da validação

As validações realizadas demonstram que o modelo implementado no software EES é capaz de reproduzir os dados encontrados na literatura. Dessa forma, comprova-se a confiabilidade do equacionamento utilizado para representar o ciclo de compressão de vapor com e sem adição de nanopartículas, fornecendo base sólida para a análise dos resultados a serem apresentados nas seções seguintes.

4.2 Análise preliminar dos parâmetros simulados para o nanorrefrigerante R134a/Al₂O₃

A Tabela 10 apresenta os principais parâmetros termodinâmicos simulados no ciclo de compressão de vapor, tanto para o R134a quanto para o nanorrefrigerante R134a/Al₂O₃, com base nos dados de Odunfa (2021).

Tabela 10 – Comparação dos parâmetros do ciclo com R134a e R134a/Al₂O₃.

Parâmetro	R134a (EES)	R134a/Al₂O₃ (EES)
T₁ (°C)	−7,7	−4,6
T₂ (°C)	80,28	78,74
T₃ (°C)	45,6	45,45
P₃ = P₂ (bar)	11,787	11,742
P₁=P₄ (KPa)	219,6	247,2
h₁ (kJ/kg)	245,9	247,74
h₂ (kJ/kg)	312	310,36
h₃ = h₄ (kJ/kg)	116,7	116,49
s₁ (kJ/kg·K)	0,9361	0,9341
q_e (kJ/kg)	129,2	131,3
q_c (kJ/kg)	195,3	193,9
w_{comp} (kJ/kg)	66,1	62,61
COP	1,954	2,096

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A análise dos dados revela que o uso do nanorrefrigerante altera de forma significativa algumas variáveis do ciclo. A pressão de evaporação ($P_1 = P_4$) aumenta de 2,196 bar para 2,472 bar, enquanto a pressão de condensação ($P_3 = P_2$) reduz levemente de 11,787 bar para 11,76 bar. Essa alteração de pressões pode estar relacionada ao aumento da capacidade de transferência térmica proporcionada pela adição das nanopartículas.

A temperatura na entrada do compressor (T_1) é mais alta no caso do nanorrefrigerante ($-4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$), refletindo uma maior absorção de calor no evaporador. Essa característica é reforçada pelo valor de entalpia na entrada do compressor (h_1), que passa de 245,9 kJ/kg (R134a) para 247,74 kJ/kg (R134a/ Al_2O_3). Um comportamento inverso é observado na entalpia de saída do compressor (h_2), onde verifica-se uma diminuição significativa, de 312 para 310,36 kJ/kg, devido ao resfriamento provocado pela absorção de calor pelas nanopartículas, o que reflete na diminuição da temperatura na saída do compressor.

Ao contrário das pressões, temperaturas e entalpias da saída do evaporador/entrada do compressor (índice 1) e saída do compressor (índice 2), a variação na pressão, temperatura e entalpia na saída do condensador são bastante pequenas. Além disso, observa-se um aumento na carga térmica absorvida no evaporador (q_e), que evolui de 129,2 kJ/kg para 131,3 kJ/kg com o uso de nanopartículas, evidenciando maior eficiência na absorção de calor. O calor rejeitado no condensador (q_c), por sua vez, mostra uma redução, de 195,3 kJ/kg para 193,9 kJ/kg, indicando uma alteração no equilíbrio térmico do ciclo.

Quanto ao trabalho de compressão (w_{comp}), nota-se uma redução, passando de 66,1 kJ/kg para 62,61 kJ/kg. Esse resultado sugere que o nanorrefrigerante contribui para a diminuição do esforço exigido pelo compressor, favorecendo a eficiência energética do sistema.

O Coeficiente de Performance (COP) também apresenta uma melhoria significativa, aumentando de 1,954 para 2,1. Essa elevação no COP reflete diretamente a melhoria no aproveitamento da energia fornecida ao ciclo, confirmando o potencial dos nanorrefrigerantes para aplicações em sistemas de refrigeração mais eficientes.

4.3 Análise preliminar dos parâmetros simulados para o nanorrefrigerante R134a/ TiO_2

A Tabela 11 apresenta os principais parâmetros termodinâmicos simulados no ciclo de compressão de vapor, tanto para o fluido puro R134a quanto para o nanorrefrigerante R134a/ TiO_2 . Para as simulações foram adotados os seguintes valores de entrada no programa computacional:

- Temperatura de evaporação do fluido refrigerante: $T_1 = -7,7^{\circ}\text{C}$;

- Temperatura de condensação do fluido refrigerante: $T_3 = 45,6^\circ\text{C}$;
- Eficiência isentrópica do compressor: $\eta_{is} = 0,53$;
- Fração em massa de nanopartículas: $w = 0,06\% = 0,0006$

Tabela 11: Comparação dos parâmetros do ciclo com R134a e R134a/TiO₂.

Parâmetro	R134a (EES)	R134a/TiO ₂ (EES)
T_1 (°C)	-7,7	-1,928
T_2 (°C)	80,28	77,44
T_3 (°C)	45,6	45,18
$P_3 = P_2$ (bar)	11,787	11,6587
$P_1 = P_4$ (bar)	219,6	273,08
h_1 (kJ/kg)	245,9	249,32
h_2 (kJ/kg)	312	308,96
$h_3 = h_4$ (kJ/kg)	116,7	116,07
s_1 (kJ/kg·K)	0,9361	0,9325
q_c (kJ/kg)	129,2	133,3
q_c (kJ/kg)	195,3	192,9
w_{comp} (kJ/kg)	66,1	59,64
COP	1,954	2,234

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A substituição do R134a puro pelo nanorrefrigerante contendo TiO₂ provoca mudanças expressivas no comportamento termodinâmico do ciclo. A temperatura na entrada do compressor (T_1), por exemplo, passa de $-7,7^\circ\text{C}$ para $-1,928^\circ\text{C}$, revelando um ganho no processo de absorção de calor no evaporador. Essa diferença está diretamente ligada ao aumento da capacidade térmica da mistura nanofluida, como evidenciado por Mahbubul et al. (2015), que atribuem esse comportamento à elevação da condutividade térmica proporcionada pelo TiO₂.

Os valores de entalpia (h_1 e h_2) também confirmam essa tendência: a entalpia na entrada do compressor sobe para 249,32 kJ/kg, e na saída, embora reduza em relação ao refrigerante puro (passando de 312 para 308,96 kJ/kg), ainda se mantém dentro de uma faixa de eficiência energética elevada. Essa redução está associada ao menor trabalho exigido pelo compressor (w_{comp}), que cai de 66,1 para 59,64 kJ/kg, representando uma economia energética de aproximadamente 9,77%.

Em relação às pressões, a pressão de evaporação ($P_1 = P_4$) aumenta de 2,196 bar para 2,738 bar enquanto verifica-se uma leve redução na pressão de condensação ($P_3 = P_2$) com a presença do TiO₂, comportamento esperado, segundo Odunfa et al. (2021), devido à melhoria no escoamento térmico do fluido e à eficiência na rejeição de calor durante a condensação.

No que diz respeito à carga térmica absorvida no evaporador (q_e), há um aumento perceptível, de 129,2 para 133,3 kJ/kg, reforçando a capacidade do nanorrefrigerante em intensificar a troca de calor na etapa de evaporação. Paralelamente, o calor rejeitado no condensador (q_c) apresenta leve redução, o que pode indicar uma melhor distribuição interna de energia e menor sobrecarga térmica no fluido.

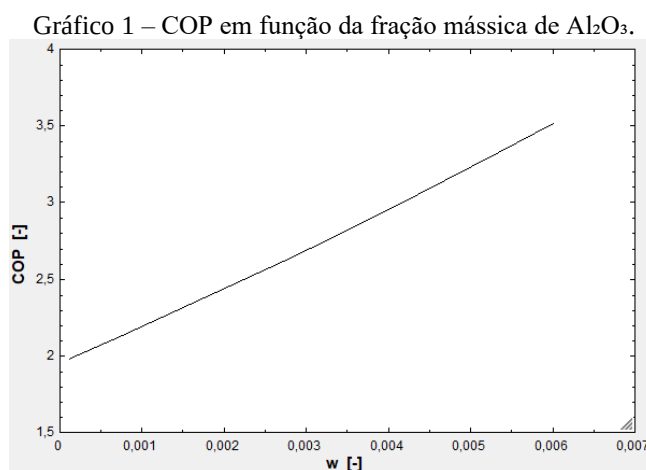
A consequência mais relevante dessas alterações é observada no Coeficiente de Performance (COP), que passa de 1,954 para 2,234 — um ganho de 12,53%, indicando que o sistema com R134a/TiO₂ opera de forma mais eficiente sob as mesmas condições operacionais. Esse aumento é especialmente relevante para aplicações que exigem alta eficiência energética, como sistemas de refrigeração de precisão, e confirma os resultados obtidos experimentalmente por Aktas e Arici (2014), que destacaram o TiO₂ como uma das nanopartículas mais promissoras para aplicação em ciclos de compressão de vapor.

4.4 Análise dos resultados da simulação para os nanorrefrigerantes R134a/Al₂O₃ e do R134a/TiO₂

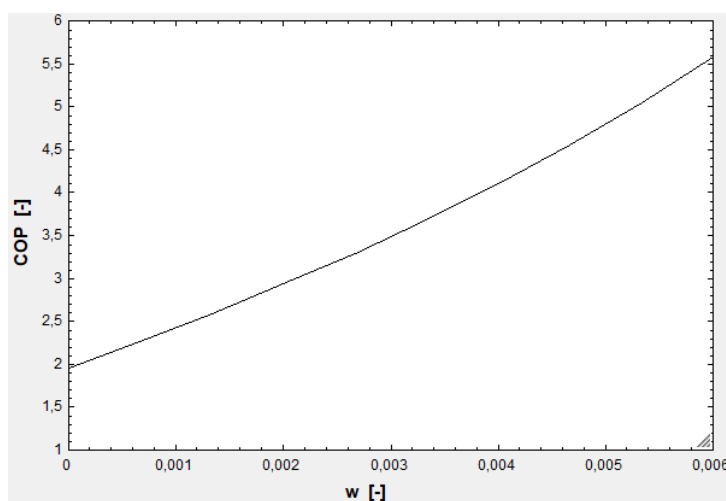
Para melhor visualização e interpretação dos resultados, são apresentados a seguir os gráficos das principais grandezas de desempenho do ciclo de refrigeração em função da variação da fração mássica de nanopartículas. Cada gráfico apresenta uma comparação direta entre os dois fluidos estudados.

4.4.1 Influência da fração mássica de nanopartículas

Os Gráficos 1 e 2 apresentam a variação do Coeficiente de Performance (COP) do ciclo de compressão de vapor em função da fração mássica dispersos no fluido refrigerante.



Fonte: Pesquisa direta (2025).

Gráfico 2 – COP em função da fração mássica de TiO_2 

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Observa-se uma tendência linear crescente ao longo do domínio analisado, que varia entre aproximadamente 0,001 (0,1%) e 0,006 (0,6%) da fração mássica.

Este comportamento demonstra que a adição de nanopartículas ao fluido refrigerante contribui significativamente para o aumento da eficiência térmica do sistema. A eficiência é mensurada por meio do COP, que representa a razão entre a capacidade de refrigeração e o trabalho de compressão necessário. A elevação do COP com o aumento da fração mássica sugere que a presença de nanopartículas melhora as propriedades termofísicas do fluido de trabalho, como a condutividade térmica e a capacidade térmica, facilitando a troca de calor e reduzindo perdas irreversíveis no ciclo.

Segundo Aktas e Arici (2014), a melhoria das propriedades térmicas devido à adição de nanopartículas pode influenciar diretamente no desempenho dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor. Esses autores mostraram que a dispersão de nanopartículas metálicas no fluido refrigerante reduz a viscosidade relativa e melhora o coeficiente global de transferência de calor. Essa conclusão é compatível com os dados do presente trabalho, que apontam um aumento do COP de cerca de 1,9 para 3,6 para o Al_2O_3 e no TiO_2 o COP evolui de cerca de 2,0 para aproximadamente 5,6 indicando um aumento superior a 180% na eficiência do ciclo ao longo do incremento da fração mássica considerada.

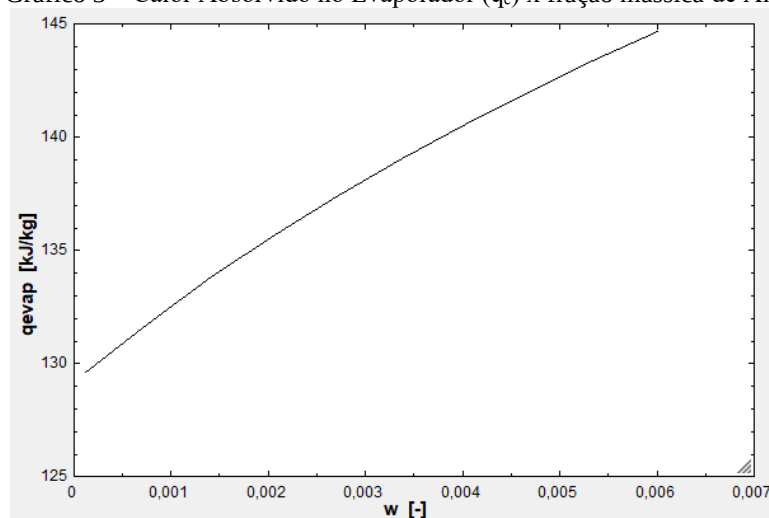
Além disso, conforme Odunfa et al. (2021), os nano-refrigerantes possuem a capacidade de estabilizar o gradiente de temperatura nos trocadores de calor, reduzindo a entropia gerada no processo e otimizando a conversão de energia. Isso contribui para ciclos mais eficientes, como evidenciado no gráfico analisado.

Portanto, a análise dos Gráficos 1 e 2 confirmam que a adição da nanopartícula ao fluido refrigerante melhora o desempenho do sistema de refrigeração, tornando-o mais eficiente

energeticamente. No entanto, é importante ressaltar que a elevação da fração mássica deve ser realizada de forma controlada, pois frações muito elevadas podem comprometer a estabilidade do fluido e aumentar os custos operacionais e de manutenção do sistema (BHUSHAN, 2013).

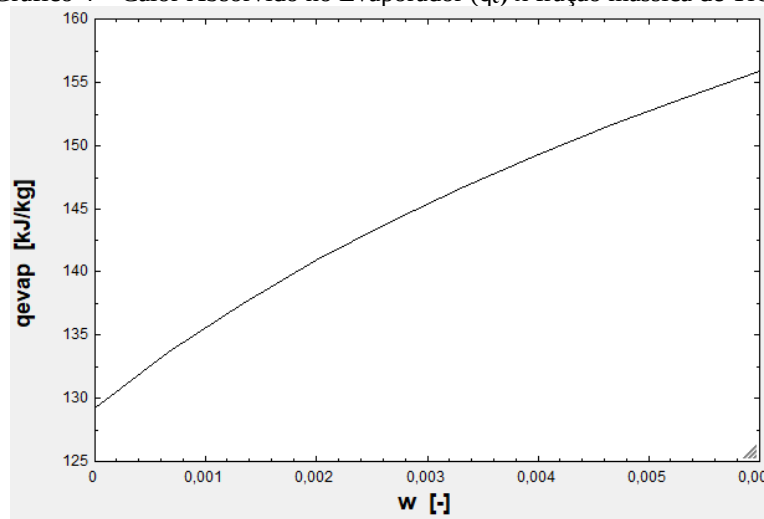
Os Gráficos 3 e 4 mostram a influência da fração mássica de no calor absorvido (q_e) pelo fluido refrigerante no evaporador. A curva apresentada é crescente e suavemente inclinada, evidenciando que o aumento da concentração de nanopartículas promove um acréscimo no calor absorvido por unidade de massa.

Gráfico 3 – Calor Absorvido no Evaporador (q_e) x fração mássica de Al_2O_3 .



Fonte: Pesquisa direta (2025).

Gráfico 4 – Calor Absorvido no Evaporador (q_e) x fração mássica de TiO_2 .



Fonte: Pesquisa direta (2025).

De forma quantitativa, verifica-se que o valor de q_e sobe de aproximadamente 129 kJ/kg para cerca de 144 kJ/kg à medida que a fração mássica (w) de Al_2O_3 cresce de 0 para 0,006. Já

no TiO_2 observa-se uma tendência crescente, na qual o valor de q_e se eleva de aproximadamente 128 kJ/kg até atingir cerca de 157 kJ/kg.

Este aumento de aproximadamente 11,6% e 22,65%, respectivamente, no calor absorvido representa uma melhora significativa na capacidade frigorífica do sistema.

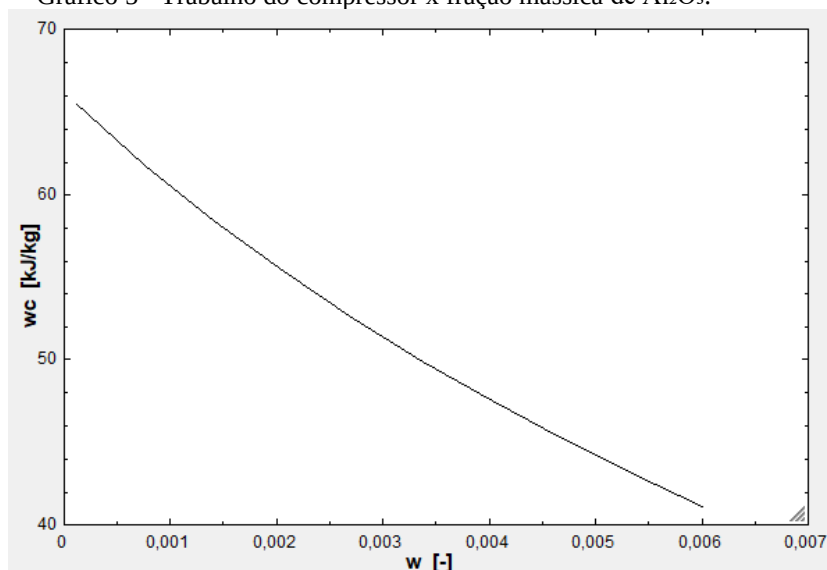
Esse comportamento pode ser atribuído à elevação da capacidade térmica efetiva da mistura refrigerante-nanopartícula. A adição de nanopartículas metálicas, melhoram a condutividade térmica e a difusão de calor no fluido de trabalho, tornando o processo de evaporação mais eficiente. Segundo Odunfa et al. (2021), os nano-refrigerantes apresentam maior capacidade de armazenar e transferir energia térmica na fase de evaporação, devido à interação das partículas com as moléculas do refrigerante base.

Além disso, Mahbubul et al. (2015) observaram que fluidos com nanopartículas dispersas podem alterar o comportamento da ebulição e promover a formação de núcleos de vaporização mais intensos, o que favorece a absorção de calor em menor tempo e com maior uniformidade.

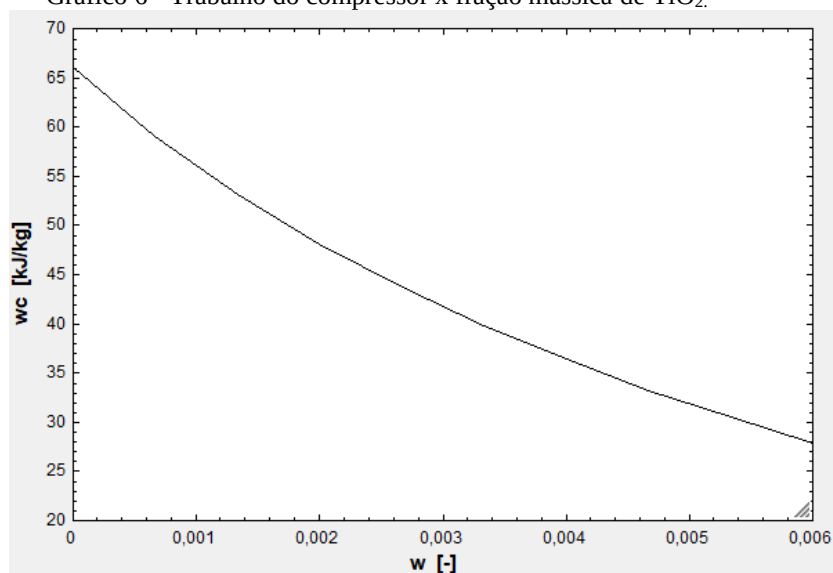
A elevação de q_e tem impacto direto sobre o desempenho global do ciclo, pois contribui para o aumento do efeito frigorífico. Quando associada à redução do trabalho de compressão, essa melhoria resulta em um Coeficiente de Performance (COP) mais elevado, indicando uma operação mais eficiente e econômica.

No entanto, é importante destacar que a eficácia do processo depende da dispersão estável das nanopartículas na matriz do refrigerante. Concentrações elevadas, se não bem controladas, podem levar à sedimentação ou ao aumento excessivo da viscosidade, o que comprometeria o desempenho do sistema (AKTAS; ARICI, 2014).

Os Gráficos 5 e 6 demonstram a relação entre a fração mássica (w) de nanopartículas adicionadas ao fluido refrigerante e o trabalho específico de compressão (w_c) requerido pelo ciclo de compressão de vapor. A curva apresentada possui uma tendência claramente decrescente, indicando que o aumento da fração de nanopartículas leva à redução do esforço energético do compressor.

Gráfico 5 - Trabalho do compressor x fração mássica de Al_2O_3 .

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Gráfico 6 - Trabalho do compressor x fração mássica de TiO_2 .

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Com base na escala do gráfico, o trabalho de compressão diminui de cerca de 66 kJ/kg para aproximadamente 42 kJ/kg e de 27 kJ/kg respectivamente, à medida que a fração mássica aumenta de 0 para 0,006. Isso representa uma queda de cerca de 36% e 59% no trabalho necessário para realizar a compressão do fluido, um impacto direto e relevante na melhoria da eficiência energética do sistema.

Essa redução pode ser explicada por diversos fatores termodinâmicos e físicos. A presença das nanopartículas aumenta a condutividade térmica do fluido refrigerante, facilitando a troca de calor nos trocadores térmicos e permitindo que o processo de evaporação ocorra com maior eficiência e a temperaturas mais elevadas. Consequentemente, a pressão de entrada no

compressor se eleva, diminuindo o desnível de pressão necessário para atingir as condições de condensação, o que reduz a energia mecânica requerida para a compressão.

De acordo com Odunfa et al. (2021), nano-refrigerantes promovem maior estabilidade térmica, menor formação de gradientes térmicos abruptos e melhora na eficiência volumétrica dos compressores, o que justifica a expressiva redução no trabalho de compressão observada neste estudo.

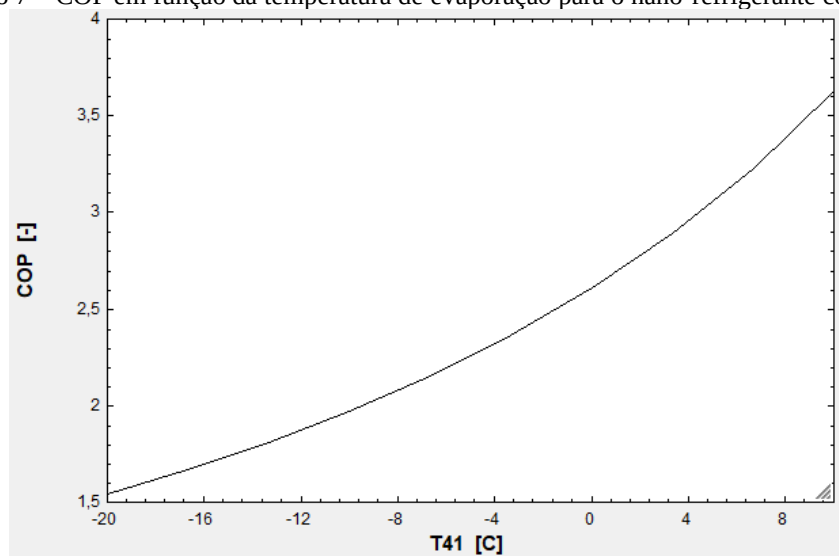
Ainda segundo Aktas e Arici (2014), a viscosidade dinâmica dos nano-refrigerantes tende a se manter relativamente controlada dentro de certas faixas de concentração, o que permite a circulação adequada do fluido sem sobrecarregar os componentes mecânicos. Isso torna o sistema não apenas mais eficiente, mas também mais confiável e com potencial de maior vida útil.

A diminuição do trabalho de compressão está diretamente ligada ao aumento do Coeficiente de Performance (COP), pois o COP é definido pela razão entre o calor absorvido e o trabalho consumido. Assim, quanto menor for o trabalho requerido, maior será a eficiência do ciclo como um todo (MAHBUBUL et al., 2015).

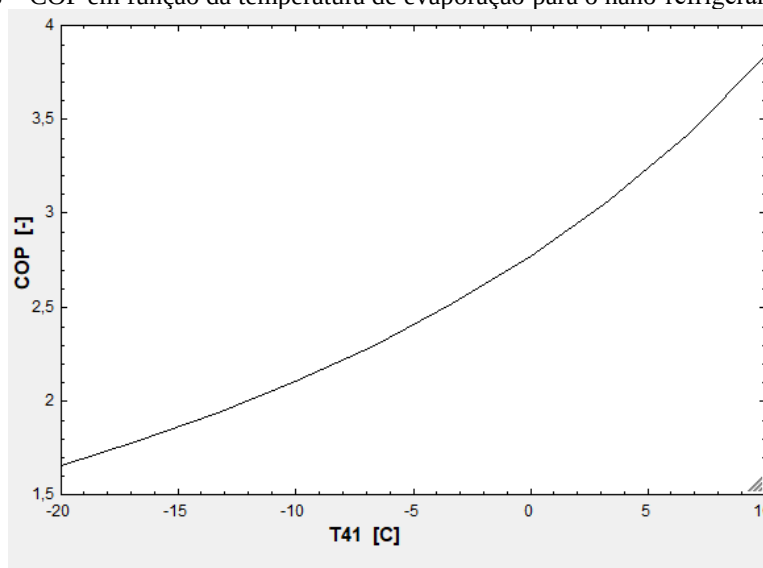
4.4.2 Influência da temperatura de evaporação no COP

Os Gráficos 7 e 8 mostram que a elevação da temperatura de evaporação (T_{41}) exerce um impacto positivo sobre o Coeficiente de Performance (COP) do ciclo de compressão de vapor. Observa-se que, ao variar a temperatura de aproximadamente $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, o COP aumenta de cerca de 1,5 para 3,7 e de cerca de 1,5 e alcançando valores próximos a 3,9 revelando um comportamento ascendente de natureza exponencial.

Gráfico 7 – COP em função da temperatura de evaporação para o nano-refrigerante com Al_2O_3 .



Fonte: Pesquisa direta (2025).

Gráfico 8 – COP em função da temperatura de evaporação para o nano-refrigerante com TiO_2 .

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Esse efeito pode ser explicado pela redução do desnível de pressão no compressor. Quando o fluido refrigerante entra no compressor em uma temperatura mais elevada, o processo de compressão demanda menos energia. Como destacado por Aktas e Arici (2014), esse efeito é particularmente relevante em sistemas com nano-refrigerantes, uma vez que esses fluidos apresentam propriedades térmicas aprimoradas, especialmente em relação à condutividade e à absorção de calor.

Além disso, o aumento da temperatura de evaporação implica que o fluido absorveu calor em uma condição termodinâmica mais favorável, o que significa que menos trabalho mecânico é necessário para comprimir o fluido até o estado de condensação. Esse fenômeno é corroborado por Mahbubul et al. (2015), ao apontarem que nano-refrigerantes reduzem perdas termodinâmicas internas e melhoram a eficiência volumétrica do ciclo.

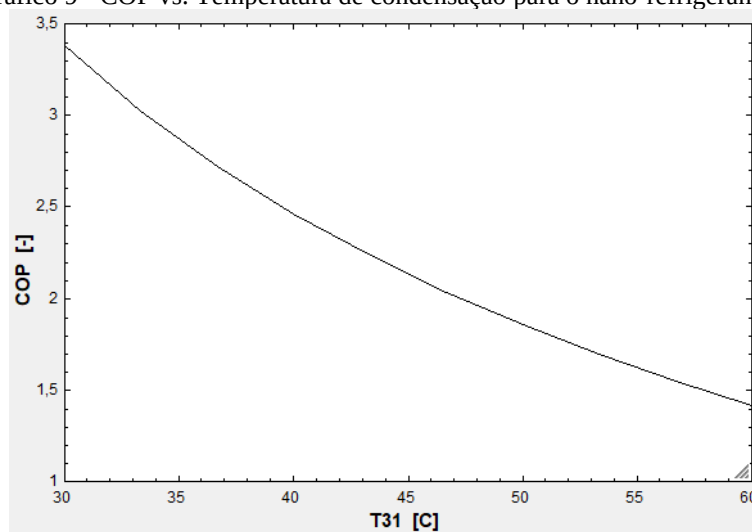
É importante lembrar, contudo, que embora temperaturas de evaporação mais altas favoreçam o COP, nem sempre são viáveis do ponto de vista operacional, pois podem comprometer a capacidade de refrigeração em aplicações onde há necessidade de resfriamento mais intenso. Assim, a escolha da faixa de operação ideal deve considerar uma análise termoenergética completa do sistema, conforme recomendado por Odunfa et al. (2021).

Portanto, a elevação da temperatura de evaporação apresenta-se como uma estratégia eficaz para a maximização do COP, sobretudo em ciclos otimizados com a adição de nanopartículas metálicas. Contudo, tal ajuste deve ser ponderado dentro dos limites da aplicação prática e da estabilidade do nano-refrigerante.

4.4.3 Influência da Temperatura de Condensação no COP

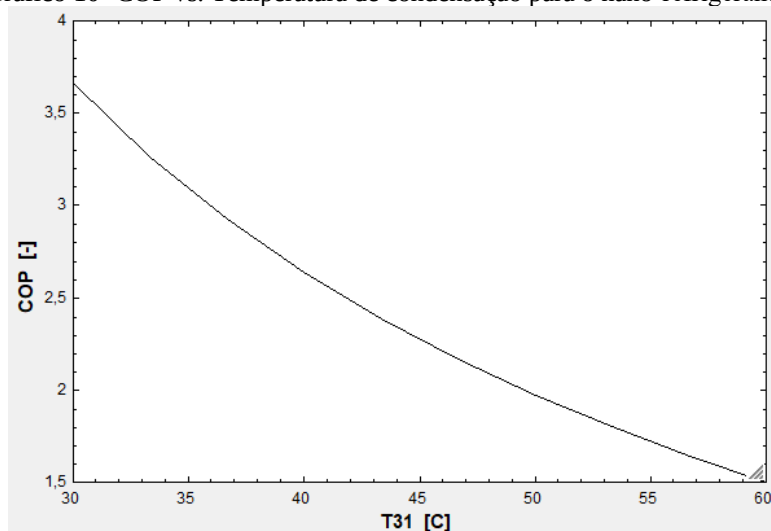
Nos Gráficos 9 e 10, observa-se uma tendência decrescente do Coeficiente de Performance (COP) à medida que a temperatura de condensação (T_{31}) aumenta. Quando a T_{31} se eleva de 30 °C para 60 °C, o COP sofre uma redução significativa, caindo de aproximadamente 3,4 para valores próximos a 1,4 para o Al_2O_3 e de 3,6 para 1,5 no TiO_2 . A curva apresentada tem comportamento suavemente exponencial negativo, o que revela uma perda progressiva de eficiência.

Gráfico 9 - COP vs. Temperatura de condensação para o nano-refrigerante com Al_2O_3



Fonte: Pesquisa direta (2025).

Gráfico 10- COP vs. Temperatura de condensação para o nano-refrigerante com TiO_2 .



Fonte: Pesquisa direta (2025).

A justificativa para essa queda reside na termodinâmica do ciclo de compressão de vapor. À medida que a temperatura de condensação se eleva, o compressor precisa exercer um trabalho maior para alcançar a pressão correspondente ao novo ponto de condensação. Como

resultado, a energia requerida pelo ciclo aumenta, enquanto a quantidade de calor absorvido no evaporador permanece praticamente constante. Essa diferença reduz diretamente o COP, conforme descrito por Mahbubul et al. (2015), que explicam que a eficiência energética de sistemas com nano-refrigerantes também é sensível ao gradiente térmico entre evaporação e condensação.

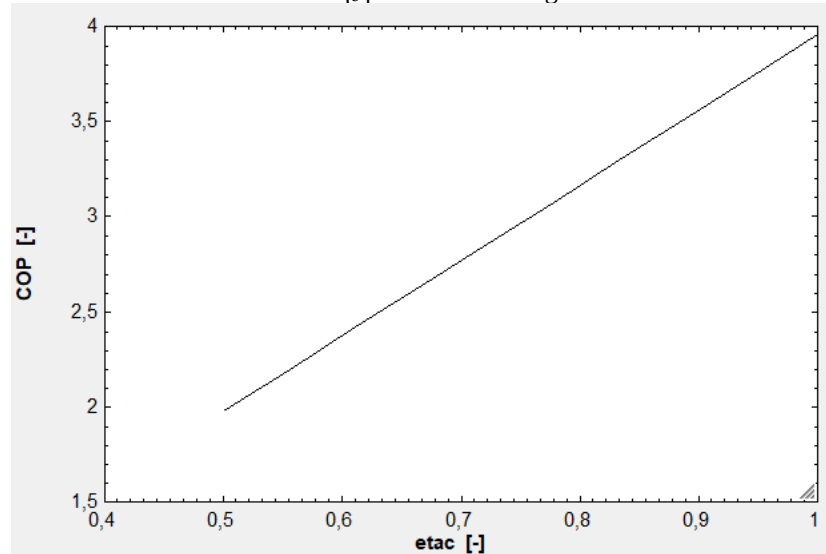
Odunfa et al. (2021) reforçam que, mesmo com o uso de nanopartículas, que melhoram a troca térmica e o transporte de calor, a elevação da temperatura de condensação gera penalidades significativas no desempenho global do sistema. Isso ocorre porque a alta temperatura no condensador representa uma barreira térmica mais difícil de ser superada, exigindo mais esforço do compressor para manter o ciclo funcionando dentro dos limites operacionais.

Outro aspecto relevante é que o aumento da T31 impacta diretamente a densidade e a entalpia do fluido na saída do compressor, o que agrava ainda mais o trabalho de compressão. Embora os nano-refrigerantes contribuam para a estabilidade térmica e aumento da condutividade, como demonstrado por Aktas e Arici (2014), eles não são capazes de compensar totalmente os efeitos adversos causados por uma alta temperatura de condensação.

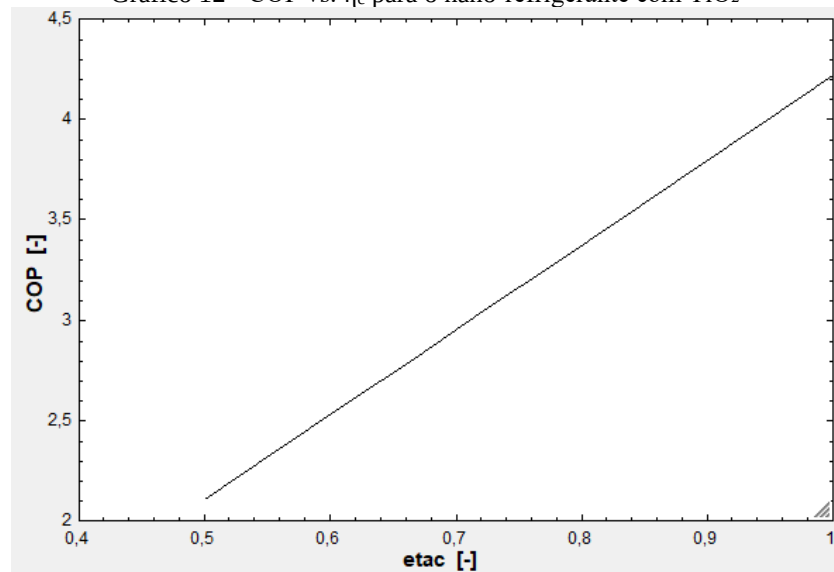
Em síntese, os resultados indicam que a eficiência do ciclo é fortemente penalizada por condições de condensação mais elevadas, sendo recomendável manter a T31 em níveis moderados, especialmente em aplicações que visam a máxima eficiência energética. A otimização desse parâmetro, quando combinada ao uso de nano-refrigerantes, pode proporcionar ganhos consideráveis no desempenho do sistema.

4.4.4 Influência da eficiência isentrópica do compressor no COP

Nos Gráficos 11 e 12, observa-se uma relação linear positiva entre a eficiência isentrópica do compressor e o Coeficiente de Performance (COP) do ciclo de compressão de vapor com nano-refrigerante. À medida que varia de 0,5 a 1,0, o COP se eleva consideravelmente, passando de aproximadamente 2,0 para cerca de 4,0 para o Al_2O_3 e de 2,2 até ultrapassar 4,3 para TiO_2 . Essa variação reforça a importância da eficiência mecânica do compressor no desempenho geral do sistema.

Gráfico 11 - COP vs. η_c para o nano-refrigerante com Al_2O_3 

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Gráfico 12 - COP vs. η_c para o nano-refrigerante com TiO_2 

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A eficiência isentrópica está diretamente relacionada ao trabalho efetivo que o compressor realiza em comparação com o trabalho ideal (reversível). Um valor mais alto de η_p indica que menos energia é desperdiçada em processos irreversíveis, como atrito, aquecimento interno e perdas volumétricas. Como consequência, o trabalho de compressão (w_c) diminui e o COP aumenta, já que $\text{COP} = q_e/w_c$. Mahbubul et al. (2015) destacam que essa variável é particularmente crítica quando se utilizam nano-refrigerantes, pois a presença das nanopartículas pode interferir levemente no comportamento do fluido dentro do compressor.

A presença de nanopartículas no refrigerante não altera diretamente a eficiência mecânica do compressor, mas pode impactar positivamente o seu desempenho indireto. Isso

ocorre porque a melhoria nas propriedades térmicas do fluido, como aumento da condutividade térmica e maior capacidade de remoção de calor, reduz a carga térmica sobre o sistema, promovendo um regime de operação mais estável e próximo da idealidade. Conforme argumentado por Saidur et al. (2011), a utilização de nanorrefrigerantes contribui para a estabilização térmica e para a uniformidade de temperatura durante a compressão, o que pode reduzir os efeitos negativos da dissipação de calor e da fricção interna.

Além disso, Mahbubul et al. (2015) destacam que o uso de nanorrefrigerantes favorece a distribuição de temperatura ao longo do sistema, o que tende a minimizar gradientes térmicos e, consequentemente, reduzir as irreversibilidades. Isso, por sua vez, contribui para o aumento da eficiência global do ciclo, reforçando os benefícios de uma maior η_c .

Por fim, como salientado por Odunfa et al. (2021), melhorar a eficiência isentrópica do compressor é uma das estratégias mais diretas e eficazes para a elevação do desempenho energético de sistemas de refrigeração. Quando combinada com a aplicação de nanorrefrigerantes, essa estratégia potencializa ainda mais os ganhos de COP, contribuindo para um funcionamento mais eficiente e sustentável do sistema.

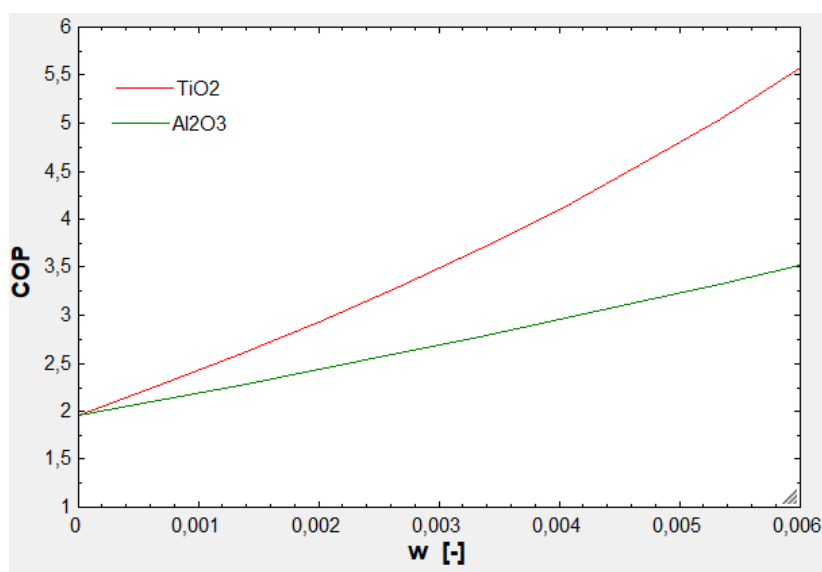
Em resumo, a elevação da eficiência isentrópica do compressor impacta significativamente o desempenho do ciclo de compressão de vapor, com um aumento linear do COP observado na presença dos nano-refrigerantes R134a/ Al_2O_3 e R134a/ TiO_2 . Essa sinergia entre desempenho mecânico e propriedades térmicas avançadas reforça a relevância do uso de nanopartículas na otimização de sistemas de refrigeração.

4.5 Comparação entre os Nanorrefrigerantes R134a/ Al_2O_3 e R134a/ TiO_2

Este item apresenta uma comparação direta entre os nanorrefrigerantes R134a/ Al_2O_3 e R134a/ TiO_2 aplicados ao ciclo de compressão de vapor. A análise foi feita com base nos resultados gráficos obtidos anteriormente, considerando as mesmas condições de simulação e parâmetros operacionais. Para isso, os principais fatores que influenciam o desempenho do sistema foram comparados lado a lado: fração mássica, temperatura de evaporação, temperatura de condensação e eficiência isentrópica do compressor.

4.5.1 Variação do COP em Função da Fração Mássica

A fração mássica das nanopartículas é uma das variáveis mais influentes no comportamento do nanorrefrigerante. O gráfico 13 apresenta a variação do COP em função da fração mássica para os dois nanorrefrigerantes analisados.

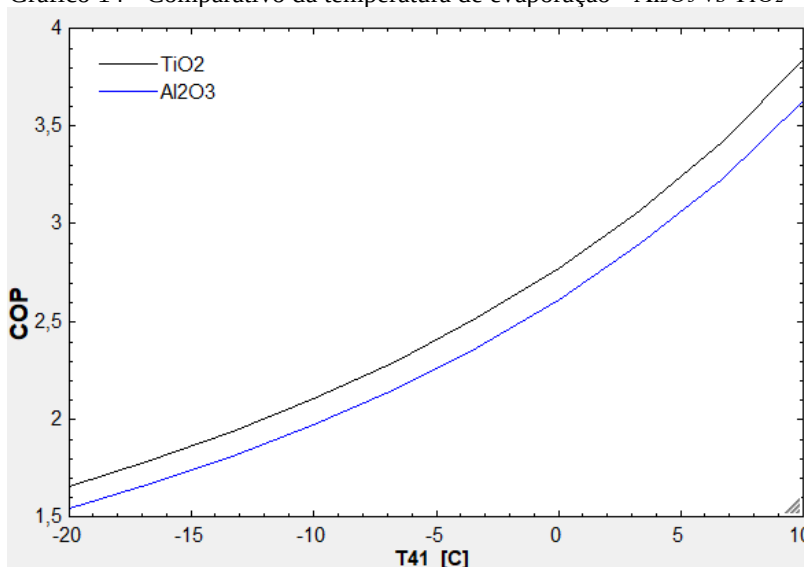
Gráfico 13 - Comparativo da fração mássica - Al_2O_3 vs TiO_2 

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Observa-se que, dentro da faixa analisada nas simulações, ambos os nanorrefrigerantes promovem aumento do COP à medida que ω cresce, porém com comportamento distinto entre eles: o R134a/ Al_2O_3 exibe um aumento mais progressivo e quase linear ao longo da faixa estudada, enquanto o R134a/ TiO_2 apresenta um ganho mais acentuado em concentrações baixas seguido de tendência à estabilização em concentrações maiores.

4.5.2 Influência da Temperatura de Evaporação

Na Figura 14, são comparadas as curvas de variação do COP em função da temperatura de evaporação para os dois nanorrefrigerantes.

Gráfico 14 - Comparativo da temperatura de evaporação - Al_2O_3 vs TiO_2 

Fonte: Pesquisa direta (2025).

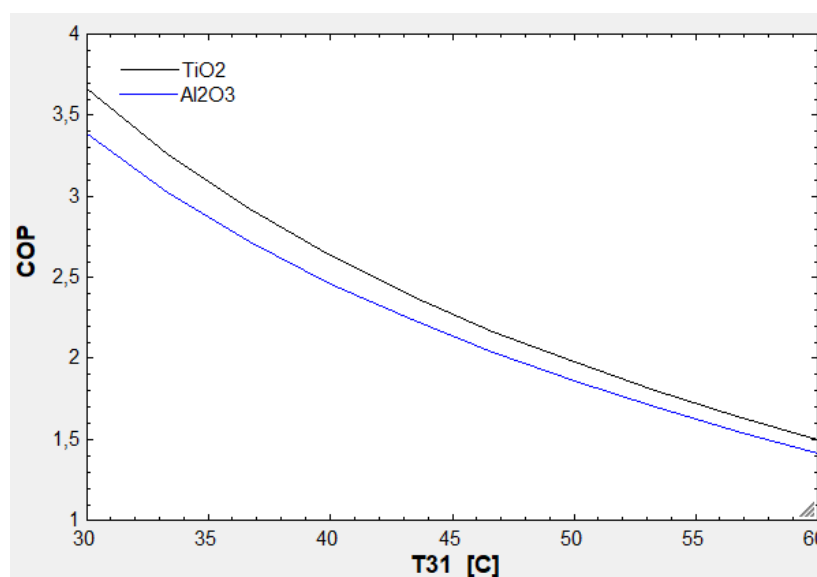
Esse comportamento é previsto pela termodinâmica dos ciclos de compressão de vapor: elevar T_{evap} reduz a razão de pressão e o trabalho de compressão necessário para alcançar a pressão de condensação, aumentando, portanto, a razão $\dot{q}_e/w_{\text{comp}}$ (COP) fundamento clássico descrito em textos como Çengel & Boles.

Nos resultados simulados, o R134a/TiO₂ apresentou ganhos mais pronunciados em faixas de baixa temperatura de 0 °C a 10 °C. Em suma, o aumento de T_{evap} melhora o COP, as nanopartículas ampliam esse efeito, com magnitude dependente do tipo de partícula e da faixa de temperatura.

4.5.3 Influência da Temperatura de Condensação

A Figura 15 compara o desempenho dos dois nanorrefrigerantes à medida que a temperatura de condensação aumenta.

Gráfico 15 - Comparativo da temperatura de condensação - Al₂O₃ vs TiO₂



Fonte: Pesquisa direta (2025).

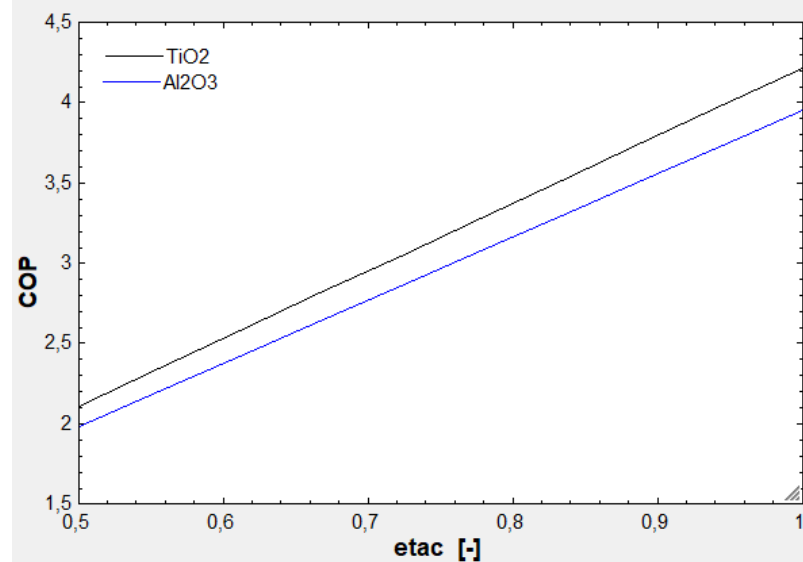
Esse resultado decorre do aumento da pressão de condensação e, conseqüentemente, do aumento do trabalho específico do compressor quando T_{cond} é elevado, efeito termodinâmico clássico e bem documentado na literatura.

A interpretação consistente é que, embora as nanopartículas melhorem a troca térmica, o aumento de T_{cond} introduz uma penalidade termodinâmica fundamental, maior razão de compressão, que nem sempre é completamente compensada pelos ganhos de transferência de calor, o efeito líquido depende do tipo e da concentração de nanopartículas e do projeto do trocador.

4.5.4 Influência da Eficiência Isentrópica do Compressor

A eficiência isentrópica é uma variável fundamental no desempenho do sistema. O gráfico 16 apresenta a variação do COP em função da eficiência isentrópica do compressor.

Gráfico 16 - Comparativo da eficiência isentrópica - Al_2O_3 vs TiO_2



Fonte: Pesquisa direta (2025).

Como esperado, o COP aumenta com a melhoria da eficiência isentrópica em ambos os casos: um compressor mais eficiente aproxima o processo real do ideal, reduzindo perdas irreversíveis e o trabalho efetivo exigido pela compressão (diminui w_{comp}), o que eleva $\text{COP} = \dot{q}_e / w_{\text{comp}}$. Nos resultados da simulação, os ganhos são percebíveis em ambas as misturas.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo, apresenta-se as conclusões referentes ao estudo, bem como recomendações para futuros trabalhos relacionados ao tema abordado.

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal determinar o desempenho de um ciclo de compressão de vapor utilizando nanorrefrigerantes, avaliando sua viabilidade como alternativa para a melhoria da eficiência energética de sistemas de refrigeração. Para tal, foram realizadas simulações computacionais no software *Engineering Equation Solver* (EES), considerando diferentes frações mássicas de nanopartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3) e dióxido de titânio (TiO_2) dispersas no refrigerante R134a.

Os resultados demonstraram que a adição de nanopartículas altera de forma significativa as propriedades termofísicas do fluido refrigerante, refletindo diretamente no desempenho do ciclo. Em particular, observou-se aumento do Coeficiente de Performance (COP) com a elevação da fração mássica, dentro de limites específicos, devido à melhoria na transferência de calor e à redução relativa do trabalho de compressão. Verificou-se ainda que variáveis operacionais, como eficiência isentrópica do compressor e temperaturas de evaporação e condensação, exercem influência decisiva sobre o rendimento global do sistema.

As simulações indicaram que os nanorrefrigerantes podem reduzir o trabalho específico de compressão e aumentar a capacidade de refrigeração, contribuindo para um funcionamento mais eficiente. Tanto o R134a/ Al_2O_3 quanto o R134a/ TiO_2 apresentaram desempenho superior ao refrigerante puro.

Conclui-se, portanto, que os nanorrefrigerantes representam uma solução tecnicamente viável para a otimização energética de sistemas de compressão de vapor, com potencial para reduzir o consumo de energia elétrica e mitigar impactos ambientais associados ao uso de refrigerantes convencionais, desde que sejam observados limites de concentração e condições adequadas de operação.

5.2 Recomendações

Com base nos resultados e nas limitações encontradas durante o desenvolvimento deste trabalho, são recomendadas as seguintes direções para estudos futuros:

- Avaliação experimental do desempenho de nanorrefrigerantes em protótipos de sistemas reais, visando validar os dados obtidos nas simulações;

- Análise de estabilidade a longo prazo da suspensão de nanopartículas nos refrigerantes, considerando possíveis sedimentações e perda de desempenho;
- Investigação do comportamento do ciclo com diferentes materiais de nanopartículas;
- Consideração de custos operacionais e de manutenção associados à utilização de nanorrefrigerantes em escala comercial;
- Avaliação comparativa entre sistemas que utilizam nanorrefrigerantes e sistemas de refrigeração por absorção em termos de desempenho térmico e impacto ambiental.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AKTAS, M.; BILIR, S.; DEMIR, H. Experimental investigation of the effect of nanoparticle-enhanced refrigerant on performance of refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, v. 44, p. 318–329, 2014.
- ALAM, T. et al. A review on the effect of nanoparticles on the performance of refrigeration systems. *Energy Reports*, v. 7, p. 3191–3206, 2021.
- ALMEIDA, A. R. Manual de refrigeração industrial. 3. ed. São Paulo: [s.n.], 2018.
- ASSUMPÇÃO, R. G. Fundamentos de Refrigeração. São Paulo: Érica, 2004.
- BHATTAD, A. Study of nano-refrigerants and their applications. *International Journal of Mechanical Engineering*, v. 3, n. 5, p. 18–25, 2018.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. *Termodinâmica*. 7. ed. São Paulo: AMGH, 2013.
- FERREIRA, R. J. Nanorrefrigerantes e aplicações. *Revista Científica de Termodinâmica Aplicada*, v. 18, n. 2, p. 31–40, 2022.
- GOMES, L. R. Fundamentos da Refrigeração. São Paulo: LTC, 2019.
- HAMILTON, R. L.; CROSSER, D. A. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, v. 1, p. 187–191, 1962.
- KOSMADAKIS, G.; NEOFYTOU, P. Thermophysical properties of nanorefrigerants. *Applied Thermal Engineering*, v. 150, p. 473–483, 2019.
- KUMAR, R.; SINGH, A. Review on thermal performance of nanorefrigerants. *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 24, p. 100925, 2021.
- LI, J. et al. Energy and exergy analysis of vapor compression systems with nanorefrigerants. *International Journal of Refrigeration*, v. 134, p. 77–86, 2022.
- MAHUBUL, I. M. et al. Properties of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, p. 584–596, 2015.
- MAÏGA, S. E. B. Viscosity of nanofluids: theoretical models and experimental results. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 44, p. 548–555, 2005.
- MILLER, A. F. et al. Refrigeração: fundamentos e aplicações. São Paulo: Érica, 2014.
- MOLINA, M.; ROWLAND, F. S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, v. 249, p. 810–812, 1974.
- ODUNFA, M. K. et al. Performance assessment of vapor compression refrigeration system using TiO₂ nanolubricant and R134a refrigerant. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 27, 101306, 2021.

PARK, Y. et al. Nanoparticle dispersion stability in refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, v. 117, p. 53–61, 2020.

SILVA, J. B.; ANDRADE, M. A. Nanotecnologia aplicada a sistemas térmicos. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica*, v. 33, p. 47–58, 2021.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. *Refrigeração e Ar Condicionado*. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.

UNEP – United Nations Environment Programme. *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Montreal, 1987.

WANG, X. et al. Economic evaluation of nanorefrigerants. *Energy Reports*, v. 8, p. 2121–2134, 2022.

YADAV, A.; TIWARI, A. K. Recent developments on nanorefrigerants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 127, p. 109891, 2020.

ZHANG, Y. et al. Influence of nanoparticles on refrigerant properties. *Thermal Science*, v. 24, p. 1903–1914, 2020.