



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Mestrado

**AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA E AMBIENTAL DE SISTEMAS DE
REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAS PARA ACONDICIONAMENTO TÉRMICO DE
PRODUTOS HORTIFRUTÍCOLAS NO VALE DO SÃO FRANCISCO**

por

Marcos Antônio Oliveira Lima

*Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Mecânica.*

João Pessoa - Paraíba

Julho, 2025

MARCOS ANTÔNIO OLIVEIRA LIMA

**AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA E AMBIENTAL DE SISTEMAS DE
REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAIS PARA ACONDICIONAMENTO TÉRMICO DE
PRODUTOS HORTIFRUTÍCOLAS NO VALE DO SÃO FRANCISCO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: **Professora Monica Carvalho, PhD.**

Coorientador: **Professor Raphael Abrahão, PhD.**

João Pessoa - Paraíba

2025

**Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

L732a Lima, Marcos Antônio Oliveira.

Avaliação termodinâmica e ambiental de sistemas de refrigeração industriais para acondicionamento térmico de produtos hortifrutícolas no vale do São Francisco / Marcos Antônio Oliveira Lima. - João Pessoa, 2025.

132 f. : il.

Orientação: Monica Carvalho.

Coorientação: Raphael Abrahão.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Refrigeração industrial. 2. Avaliação termodinâmica. 3. Cadeia do frio. 4. Avaliação de ciclo de vida. I. Carvalho, Monica. II. Abrahão, Raphael. III. Título.

UFPB/BC

CDU 621 (043)

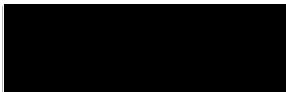
**AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA E AMBIENTAL DE
SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAS PARA
ACONDICIONAMENTO TÉRMICO DE PRODUTOS
HORTIFRUTÍCOLAS NO VALE DO SÃO FRANCISCO**

por

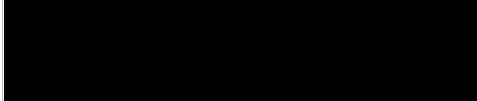
MARCOS ANTÔNIO OLIVEIRA LIMA
Dissertação aprovada em 24 de julho de 2025



Profa. Dra. MONICA CARVALHO
Orientadora – UFPB



Prof. Dr. RAPHAEL ABRAHÃO
Coorientador – UFPB



Prof. Dr. JOÃO ALVES DE LIMA
Examinador Interno – UFPB



Profa. Dra. TAYNARA GEYSA SILVA DO LAGO
Examinadora Externa – UFPB

Per ardua surgo.

“Pelas dificuldades, eu me elevo”.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer à minha filha, Mariana Lima, minha pequenina, por ser uma fonte inesgotável de amor, incentivo e inspiração.

Agradeço à minha esposa, Taciana Souza, pelo constante incentivo, suporte e dedicação ao longo de toda esta jornada. Sem você, esta realização não teria sido possível.

Agradeço aos meus pais por me ensinarem a importância de perseverar em busca dos meus sonhos, esta conquista também de vocês.

Expresso minha imensa gratidão à Professora Monica, pelo apoio, pelos ensinamentos compartilhados, pela compreensão, paciência e, sobretudo, por acreditar no meu trabalho. Para mim, foi uma honra e um prazer trabalhar contigo ao longo destes anos. Muito obrigado!

Agradeço ao Professor Raphael Abrahão pelo apoio e pelas valiosas contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho.

Estendo meus agradecimentos aos amigos que conquistei ao longo da pós-graduação, que, de forma significativa, me ajudaram nos momentos difíceis, seja com palavras de incentivo, seja como exemplos a serem seguidos.

Agradeço à GVS *Fruit Company*, em especial à equipe da Fazenda Sereníssima, pela receptividade, apoio e total disponibilidade em acolher esta pesquisa.

Agradeço à Universidade Federal da Paraíba e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade, pelos conhecimentos adquiridos e por todo o suporte prestado durante o curso.

Por fim, agradeço a mim mesmo por nunca desistir dos meus sonhos e objetivos, mesmo diante de tantas adversidades ao longo da jornada.

Mais uma vez, diante das dificuldades, venci!

AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA E AMBIENTAL DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL PARA ACONDICIONAMENTO TÉRMICO DE PRODUTOS HORTIFRUTÍCOLAS DO VALE DO SÃO FRANCISCO

RESUMO

O presente estudo realizou uma análise termodinâmica e ambiental em uma planta de refrigeração industrial para o acondicionamento térmico refrigerado de uvas no pós-colheita, numa agroindústria localizada no Submédio Vale do São Francisco (VSF). A pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho térmico e os impactos ambientais associados à operação da planta frigorífica. Por meio da aplicação das Avaliações de Ciclo de Vida (ACV) e termodinâmica através de simulações via *SimaPro* e *EES*, foi possível diagnosticar a situação atual da planta e propor alternativas energeticamente mais sustentáveis. Os resultados apontaram que a planta opera com baixo desempenho térmico, com coeficiente de desempenho (COP) de 4,82, cerca de 30% inferior ao estimado. A eficiência exergética média foi de 23%, com destaque para os túneis 01, 03 e 04 e câmaras 02 e 04, cujos rendimentos térmicos ficaram abaixo de 20%. A análise ambiental demonstrou que o cenário atual gera emissões de 80,1 t CO₂-eq/ano. Foram simulados três cenários para o uso de energia solar fotovoltaica, sendo o terceiro, com capacidade de 462 kWp sem gerador a diesel, o mais eficiente, reduzindo as emissões para 49,38 t CO₂-eq/ano, queda de 38,20%, apresentando o menor fator de emissão (0,0318 kg CO₂-eq/kWh) entre os demais cenários. A pesquisa destaca a necessidade de modernização completa da planta de refrigeração, além da incorporação do sistema fotovoltaico de modo a mitigar os impactos ambientais e energéticos deste processo produtivo. Os resultados desta pesquisa demonstram a importância de estudos que utilizem diagnósticos termodinâmicos e ambientais para as cadeias do frio de produtos hortifrutícolas, de modo a contribuir com a produção sustentável nos pontos de vista energético e ambiental.

Palavras-chave: Refrigeração industrial; Avaliação termodinâmica; Cadeia do frio; ACV.

THERMODYNAMIC AND ENVIRONMENTAL EVALUATION OF INDUSTRIAL REFRIGERATION SYSTEMS FOR THERMAL PACKAGING OF FRUIT AND VEGETABLE PRODUCTS FROM THE SÃO FRANCISCO VALLEY

ABSTRACT

This study conducted a thermodynamic and environmental analysis of an industrial refrigeration plant for the post-harvest thermal conditioning of grapes in an agro-industry located in the Submédio Vale do São Francisco (VSF). The research aimed to evaluate the thermal performance and environmental impacts associated with the operation of the refrigeration plant. Through the application of Life Cycle Assessments (LCA) and thermodynamics using simulations via SimaPro and EES, it was possible to diagnose the current situation of the plant and propose more energy-sustainable alternatives. The results showed that the plant operates with low energy performance, with an coefficient of performance (COP) of 4.82, about 30% lower than estimated in the project. The average exergy efficiency was 23%, with tunnels 01, 03, and 04 and chambers 02 and 04 standing out, whose thermal yields were below 20%. The environmental analysis showed that the current scenario generates emissions of 80.1 t CO₂-eq/year. Three scenarios were simulated for the use of photovoltaic solar energy, the third of which, with a capacity of 462 kWp and without the use of a diesel generator, was the most efficient, reducing emissions to 49.38 t CO₂-eq/year (38.20%) and presenting the lowest emission factor (0.0318 kg CO₂-eq/kWh) among the other scenarios. The research highlights the need for complete modernization of the refrigeration plant, in addition to the incorporation of the photovoltaic system in order to mitigate the environmental and energy impacts of this production process. The results of this study demonstrate the importance of studies that use thermodynamic and environmental diagnostics for the cold chains of horticultural products, in order to contribute to sustainable production from an energy and environmental point of view.

Keywords: Industrial refrigeration; Thermodynamic assessment; Cold chain; LCA.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	12
1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Geral	14
1.2.2 Específicos.....	14
 CAPÍTULO II.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Cadeia do frio e Armazenamento de produtos Hortifrutícolas.....	15
2.2. Avaliação Termodinâmica para volumes de controle	17
2.2.1 Análise energética (Primeira Lei da Termodinâmica - PLT)	17
2.2.2 Análise Exergética (Segunda Lei da Termodinâmica - SLT).....	20
2.2.3 Balanço de Exergia.....	21
2.2.3 Ciclos Frigoríficos por compressão de vapor	23
2.2.4 Análise termodinâmica nos processos de acondicionamento térmico de Hortifrutis .	25
2.3 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).....	27
2.3.1 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) no setor de acondicionamento térmico refrigerado de Hortifrútils	29
2.4. Sistemas fotovoltaicos para acondicionamento térmico de Hortifrutis	31
 CAPÍTULO III	35
3. AVALIAÇÃO EXERGÉTICA E DE CICLO DE VIDA COMO ESTRATÉGIA PARA A SUSTENTABILIDADE: APLICAÇÃO A SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAS	35
3.1 INTRODUÇÃO.....	35
3.2 METODOLOGIA.....	38

3.2.1 Fontes de Informação	39
3.2.2 Critérios de inclusão e exclusão	39
3.2.3 Seleção dos estudos	40
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
3.3.1 Características dos estudos identificados	42
3.3.2 Apresentação dos estudos identificados na pesquisa.....	48
3.4 CONCLUSÃO.....	55
 CAPÍTULO IV	59
4 ARTIGO: ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UM SISTEMA REFRIGERAÇÃO APLICADO A UMA PLANTA DE ACONDICIONAMENTO TÉRMICO DE PRODUTOS HORTIFRUTÍCOLAS	59
4.1 INTRODUÇÃO.....	60
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	62
4.2.1 Descrição do Objeto de estudo	62
4.2.2 Avaliação termodinâmica	67
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.3.1 Avaliação energética.....	72
4.3.2 Avaliação exergética.....	76
4.4 CONCLUSÃO.....	81
 CAPÍTULO V	86
5 ARTIGO: VANTAGENS AMBIENTAIS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM UM SISTEMA DE ACONDICIONAMENTO DE PRODUTOS HORTIFRUTÍCOLAS	86
5.1 INTRODUÇÃO.....	87
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	89
5.2.1 Objeto de estudo	89
5.2.2 Avaliação de Ciclo de Vida	93
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
5.4 CONCLUSÃO.....	104
 CAPÍTULO VI	110
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	110

CAPÍTULO VII.....	112
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TODA DISSERTAÇÃO	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Balanço dos fluxos de massa e energia no volume de controle.....	18
Figura 2.2- Parcelas da exergia e exergia destruída da energia total disponível.....	20
Figura 2.3 - Parcela da exergia na exergia de entrada no VC.	21
Figura 2.4 - a) Esquema de um refrigerador. b) Diagrama termodinâmico Temperatura-entropia para um ciclo Rankine de refrigeração por compressão de vapor ideal c) Diagrama termodinâmico Temperatura- entropia para um ciclo Rankine de refrigeração de compressão por vapor real.	24
Figura 2.5 - Estrutura da metodologia de ACV.	28
Figura 3.1- Etapas para a Revisão Sistemática da Literatura.	38
Figura 3.2 - Passos para obtenção dos artigos analisados.	42
Figura 3.3 - Distribuição dos estudos identificados.	43
Figura 3.4 - Nuvem de palavras dos temas dos artigos.....	48
Figura 4.1- Fluxograma do processo de resfriamento das uvas.....	62
Figura 4.2 - Sistema de resfriamento das uvas – Disposição física da Planta de Refrigeração – espaço refrigerado.	63
Figura 4.3 - Casa de máquinas da planta de refrigeração – disposição esquemática.....	64
Figura 4.4 – <i>Layout</i> de máquinas do sistema de refrigeração industrial para o resfriamento das uvas.	66
Figura 4.5 - Esquema típico das máquinas dos Túneis 01 e 03.....	67
Figura 4.6 - Esquema típico de sistema de refrigeração típico utilizado na planta.	68
Figura 4.7 - Fluxograma do ciclo de refrigeração por compressão de vapor padrão.	69
Figura 4.8 - Volumes de controle para os equipamentos do ciclo de refrigeração por compressão de vapor padrão.	70
Figura 4.9 – Eficiências exergéticas das instalações Planta de acondicionamento refrigerado.....	78
Figura 4.10 – Destrução exergética por equipamento da instalação refrigerada.....	79
Figura 5.1 - Fluxograma do processo de resfriamento das uvas.....	88

Figura 5.2 - Sistema de resfriamento das uvas – Disposição física da Planta de Refrigeração.....89

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Relação dos estudos teóricos e experimentais identificados para esta RSL.....45

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Quantitativos totais de equipamentos da Planta de Refrigeração.....	64
Tabela 4.2 – Potências dos SRI's para acondicionamento térmico da uva.....	65
Tabela 4.3 – Dados operacionais dos SRI's: Túnel de resfriamento padrão – por máquina...	65
Tabela 4.4 – Dados operacionais dos SRI's: Câmara fria padrão e instalações auxiliares – por máquina.	65
Tabela 4.5 - Balanço de massa e energia dos componentes dos SRI's da planta.....	71
Tabela 4.6 – Balanço de exergia dos componentes dos SRI's da planta – Equacionamento generalizado.....	71
Tabela 4.7 – Coeficientes de desempenho (COP) dos Túneis de resfriamento da planta....	72
Tabela 4.8 – Coeficientes de desempenho (COP) das Câmaras frias da planta.	74
Tabela 4.9 – Coeficientes de desempenho (COP) instalações complementares da planta....	75
Tabela 4.10 – Dados de balanços energéticos e exegéticos dos SRI's – Túneis de resfriamento.....	76
Tabela 4.11 – Dados de balanços energéticos e exegéticos dos SRI's – Câmaras frias.....	77
Tabela 4.12 – Dados de balanços energéticos e exegéticos dos SRI's – Corredor e Expedição.....	78
Tabela 5.1 - Quantitativo de equipamentos da Planta de Refrigeração.....	90
Tabela 5.2 - Dados de entrada de inventário: composição material do objeto de estudo.....	93
Tabela 5.3 - Esquemas energéticos propostos para o acondicionamento térmico da uva.....	94
Tabela 5.4 - Emissões associadas ao acondicionamento da uva: cenário atual.....	95
Tabela 5.5 - Emissões associadas ao acondicionamento da uva - Cenário A.....	97
Tabela 5.6 - Emissões associadas ao acondicionamento da uva - Cenário B.....	98
Tabela 5.7 - Emissões associadas ao acondicionamento da uva - Cenário C.....	99
Tabela 5.8 - Resumo das emissões totais associadas a cada cenário.....	101

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Latinos

$\frac{dE}{dt}$	Taxa de Variação temporal da energia (W)
$\frac{dV_{vc}}{dt}$	Taxa de Variação do fluxo do volume de controle no tempo (W)
\dot{E}	Energia em termo de taxa (W)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
g	Cota de elevação relativa (m)
h	Entalpia (kJ /kg)
\dot{m}	Vazão mássica (Kg/s)
P_0	Pressão no estado morto (Pa)
P_{ME}	Potência do motor elétrico
\dot{Q}	Transferência de Calor em termo de taxa (W)
s	Entropia (kJ/kg)
T_H	Temperatura ambiente (K)
T_0	Temperatura no estado morto (K)
V	Velocidade (m/s)
\dot{X}	Exergia de fluxo em termo de taxa (W)
\dot{W}_c	Trabalho do compressor em termo de taxa (W)
\dot{W}_{rev}	Trabalho reversível em termo de taxa (W)
\dot{W}_{util}	Trabalho útil em termo de taxa (W)
Gregos	
β	Coeficiente de desempenho

η	Eficiência térmica
η_{ex} / η_{II}	Eficiência exergética
ψ	Exergia específica

Siglas

ACV	Avaliação de ciclo de vida
COP	<i>Coefficient of Performance</i> (Coeficiente de Desempenho)
ECOP	Coeficiente de desempenho exergético
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Potencial de Aquecimento Global
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISO	Organização Internacional de Normatização
P&ID	<i>Piping and Instrumentation Diagram</i> (Diagrama de Tubulação e Instrumentação)
PLT	Primeira Lei da Termodinâmica
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SFV	Sistema fotovoltaico
SLT	Segunda Lei da Termodinâmica
SRI	Sistema de refrigeração industrial
TR	Tonelada de Refrigeração
TRACI	Ferramenta para redução e avaliação de impactos químicos e outros impactos ambientais
VC	Volume de controle
VSF	Vale do São Francisco

Subscritos

C	Compressor
---	------------

Cond	Condensador
dest	Destruída
e	Entrada
Evap	Evaporador
H	Alta temperatura
ger	gerada
liq	Líquido
L	Baixa temperatura
k	Estado k
o	Estado morto
real	Processo real
rev	Processo Reversível/ideal
s	Saída
tot	Total
u	Útil
VE	Válvula de expansão

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

A região do Vale do Submédio São Francisco (VSF) é um importante polo de produção hortifrutícola brasileiro, sendo responsável por grande parte da produção para o mercado externo de uvas e mangas do país. Segundo dados extraídos da Revista da Fruta (2020), a região representou, em 2019, 92% destas exportações para a manga e 97% para uva de mesa exportadas pelo país.

Segundo a Revista da fruta (2021) tais estatísticas se mantêm com a produção de uva e manga no VSF registrando crescimento ano a ano, tendo sido incrementada em 17,93% no ano de 2021 comparada ao ano anterior, no auge da pandemia de Covid-19.

Neste contexto, os sistemas de refrigeração por compressão de vapor são amplamente utilizados para equipar o início da cadeia do frio, sendo compostos por câmaras frigoríficas e *packing houses* na região, tendo importância chave na cadeia produtiva de produtos hortifrutícolas, com destaque para a uva e manga.

Entretanto, segundo Spagnol *et al.* (2018), por causa das especificidades relativas aos controles de temperatura e umidade, inerentes ao processo de resfriamento e acondicionamento térmico envolvido na produção desses frutos, a exigência de sistemas bem dimensionados, controlados e manutenidos é constante.

Para Vasconcelos *et al.* (2019), devido a questões variadas como o clima da região, parâmetros para a conservação dos hortifrútiis e o tempo necessário para escoamento destes produtos até o mercado consumidor, a produção depende fundamentalmente da cadeia do frio para manter os padrões de qualidade exigidos pelos mercados.

Desse modo, os Sistemas de Refrigeração utilizados para suprir a demanda de acondicionamento térmico são necessários para a manutenção dos parâmetros de conservação da qualidade de produtos hortícolas, mas como exigem elevado consumo energético, acaba impactando diretamente no custo do produto.

Nesta perspectiva, devido ao fato da elevada demanda energética dos sistemas de câmaras frias, a adoção da energia solar é uma alternativa energeticamente sustentável como fonte de energia para tais sistemas. Assim, considerando a localização do VSF no semiárido

nordestino, a região é caracterizada pela alta incidência solar e por exibir excelentes condições para viabilização do uso de sistemas fotovoltaicos (Pereira *et al.*, 2017).

De acordo com Colakoglu (2022), os sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados como fonte energética para suprir as demandas de diversos setores produtivos, como os sistemas de refrigeração industriais, servindo como parte da estratégia para utilização de fontes renováveis podendo suprir na sua totalidade ou, em conjunto com as fontes convencionais, a demanda energética do setor.

Segundo Francesca (2022), estudos que levam em consideração avaliações energéticas de processos produtivos são de grande importância, possibilitando racionalizar e/ou otimizar o consumo energético, de modo a impactar positivamente nos custos de produção das frutas, como também reduzir impactos ambientais oriundos desta atividade produtiva.

Desse modo, frente a este cenário, ainda não se verificam estudos e investimentos adequados para o uso de sistemas de refrigeração otimizados, racionalizando o consumo energético ou que utilizem fontes energéticas sustentáveis no contexto do VSF.

Por conseguinte, estudos relacionados à temática de avaliação e de uso sustentável da energia na produção de frutas ainda carecem de maiores aprofundamentos, como também pesquisas que quantifiquem os impactos ambientais advindos desta atividade econômica na região do VSF.

Assim sendo, a presente pesquisa se propõe a realizar uma avaliação energética baseada em avaliações termodinâmica e ambiental, como ponto de partida, de forma a obter dados consistentes a respeito das instalações comumente utilizadas atualmente e verificar a possibilidade de aplicação de estratégias e práticas de otimização para racionalização do consumo energético demandado pelo sistema de refrigeração industrial que equipa as câmaras frias.

Assim, a proposta do presente trabalho se baseia tanto na escassez de estudos relacionados a avaliações energéticas e ambientais aplicadas a sistemas frigoríficos instalados na agroindústria do VSF, como também na importância da temática como parte de um conjunto de metodologias para o uso sustentável da energia e mitigação de impactos ambientais associados às atividades produtivas, sendo a produção de frutas o principal propulsor econômico da região do submédio São Francisco e uma das principais regiões produtoras do país.

1.1 JUSTIFICATIVA

A pesquisa mostra-se relevante uma vez que visa abrir caminho para o desenvolvimento de mais pesquisas relacionadas ao tema proposto, focando em outros processos ligados ao acondicionamento térmico de frutas ao longo da cadeia do frio, como o transporte refrigerado e a cadeia do frio de produtos hortícolas produzidos no VSF em si, de ponta a ponta, por exemplo.

Entende-se que o caráter inovador da proposta está na aplicação da avaliação energética e ambiental a sistemas de refrigeração utilizados para o acondicionamento térmico de frutas a nível regional.

A importância do estudo deve-se à necessidade de mensurar a eficiência de tais sistemas, as reduções no custo energético que podem ser alcançadas e a consequente redução dos impactos ambientais associados à emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs) devido à operação de tais sistemas na região do VSF.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O objetivo geral da pesquisa é realizar uma análise energética por meio de análises termodinâmicas e ambientais em um sistema de refrigeração utilizado em câmaras frias de uma agroindústria localizada na região do Vale do São Francisco.

1.2.2 Específicos

- Realizar uma revisão de literatura científica para determinar o nicho de pesquisa;
- Realizar uma análise termodinâmica da planta de refrigeração, com coleta de dados e processos do objeto de estudo;
- Dimensionar um sistema fotovoltaico para atender a demanda energética da planta de refrigeração;
- Quantificar as emissões de GEE da planta de refrigeração por meio da metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida.

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cadeia do frio e Armazenamento de produtos Hortifrutícolas

Os sistemas de refrigeração por compressão de vapor são largamente utilizados em processos de resfriamento nos mais variados setores industriais. As indústrias agrícolas voltadas para a produção de frutas e laticínios, por exemplo, fazem extenso uso desses sistemas para promover o acondicionamento térmico adequado de seus produtos com o intuito de garantir a conservação da qualidade por mais tempo (Bianco, 2022).

Em regiões onde a temperatura ambiente é alta, a utilização de sistemas frigoríficos com grande capacidade de refrigeração é justificada pela elevada variação de temperatura entre o ambiente refrigerado e o ambiente externo. No entanto, quanto maior a capacidade de refrigeração destes sistemas, maior será seu consumo energético, sendo necessária a adoção de sistemas de pré-resfriamento para remover boa parte do calor dos frutos após a colheita (Han, 2017).

De acordo com o relatório anual de Salin (2018), a capacidade frigorífica brasileira detém crescimento médio estimado em 17% anuais. Já a Associação Brasileira da Indústria de Armazenagem Frigorificada (ABIAF), através do seu trabalho de levantamento do quantitativo de unidades frigoríficas realizado em 2020, estimou um crescimento de 10% na capacidade para armazenamento em volume para a região nordeste, dos quais, incrementados em 42% e 17% nos estados da Bahia e de Pernambuco, respectivamente.

Segundo a Revista do Frio (2018), a refrigeração é responsável pela maior demanda de energia de uma instalação produtiva. No contexto do Vale do São Francisco (VSF), os armazéns frigoríficos, os quais são equipados com túneis de resfriamento e câmaras frias, na maioria das agroindústrias produtoras de Hortifrutis, em destaque uva e manga, possuem elevada demanda energética, de forma a garantir e preservar a qualidade desses produtos até o momento da expedição.

Deste modo, além do custo financeiro dispensado no consumo de energia elétrica, tais sistemas também se utilizam do fornecimento de energia oriundos de fontes auxiliares,

sendo comum o uso de geradores movidos a diesel para suprir a demanda energética em horários de ponta ou nos casos de interrupção do fornecimento pela concessionária.

Os sistemas de refrigeração por compressão de vapor que equipam as câmaras frias objeto do estudo, funcionam de acordo com o ciclo frigorífico termodinâmico. Segundo Moran e Shapiro (2018), estes equipamentos possuem rendimento térmico limitado, devido às irreversibilidades inerentes aos processos termodinâmicos que ocorrem durante seu ciclo de funcionamento.

Segundo Kroos e Potter (2015), as limitações no rendimento térmico associado a tais máquinas estão intrinsecamente ligadas às irreversibilidades, que por sua vez, são caracterizadas pelas perdas energéticas oriundas de fenômenos dissipativos que ocorrem em todo o ciclo de funcionamento da máquina térmica. Essas perdas influenciam diretamente no coeficiente de rendimento térmico do sistema como um todo. Por esse motivo, o uso de estratégias e tecnologias a fim de elevar a performance térmica deste, é uma constante.

De acordo com Bejan (2016), a exergia é conceituada como o máximo de potência ou trabalho que uma fonte energética é capaz de disponibilizar para um sistema até que este atinja o equilíbrio térmico. Assim, nos casos dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor, pode-se associar a exergia desses sistemas à máxima quantidade de trabalho mecânico que a fonte de energia disponível poderá fornecer sem excluir as irreversibilidades inerentes ao ciclo frigorífico.

Para Çengel e Boles (2013), o desenvolvimento tecnológico de sistemas térmicos mais eficientes, através das pesquisas de novos materiais, projetos e processos com o objetivo de obter reduções das perdas energéticas constituem uma mola propulsora para o desenvolvimento tecnológico e ambiental.

Segundo Hercher-Pasteur (2020), a avaliação energética, baseada nas análises da Primeira e Segunda Leis, são abordagens que se apresentam como ferramentas para avaliar os fluxos de energia associados a um processo produtivo, de modo a quantificá-los e qualificá-los, respectivamente. Essas abordagens são comumente aplicadas nas avaliações energéticas na agricultura, a fim de promover a eficiência energética, econômica e ambiental.

Desse modo, de acordo com Ibrahim *et al.* (2018), é possível avaliar a eficiência energética em determinado sistema através do balanço exergético, indicando componentes com baixa eficiência exergética cuja substituição ou otimização contribuirá para a racionalização do uso da energia.

Aliada à avaliação energética de um sistema térmico de refrigeração, está a análise exergética aplicada, que se apresenta como uma ferramenta eficiente, por meio da qual é

possível identificar e estimar a eficiência do sistema que está direta e indiretamente ligado à atividade ou ao processo produtivo. A partir dessa abordagem, tornam-se identificáveis os equipamentos que possuem maiores irreversibilidades, custos energéticos, financeiros e potencial de geração de impactos ambientais (Zhu *et al.*, 2021).

Diante disto, tais ferramentas podem ser utilizadas para avaliar a eficiência energética dos sistemas de refrigeração quanto a indicadores relativos a custos energéticos e econômicos agregados à produção de frutas, bem como ao impacto ambiental provenientes da atividade produtiva, em especial no Vale do São Francisco (VSF).

2.2. Avaliação Termodinâmica para volumes de controle

2.2.1 Análise energética (Primeira Lei da Termodinâmica - PLT)

A análise energética é uma abordagem fundamental na avaliação do desempenho de sistemas e máquinas térmicas, baseando-se no princípio da conservação de energia, postulado pela Primeira Lei da Termodinâmica (PLT).

A PLT estabelece que a energia de um volume de controle, em um processo em regime permanente, permanece constante, podendo ser transformada em calor e trabalho ou fluxo de massa, não podendo esta energia ser criada nem destruída (Bejan, 2016).

A equação 2.1 estabelece a igualdade entre as taxas de energias de entrada e de saída de um volume de controle (VC):

$$\dot{E}_e = \dot{E}_s \quad (2.1)$$

Çengel e Boles (2013), apresentam o balanço de energia para um VC em estado estacionário dado pela equação 2.2 e ilustrado conforme esquema da Figura 2.1.

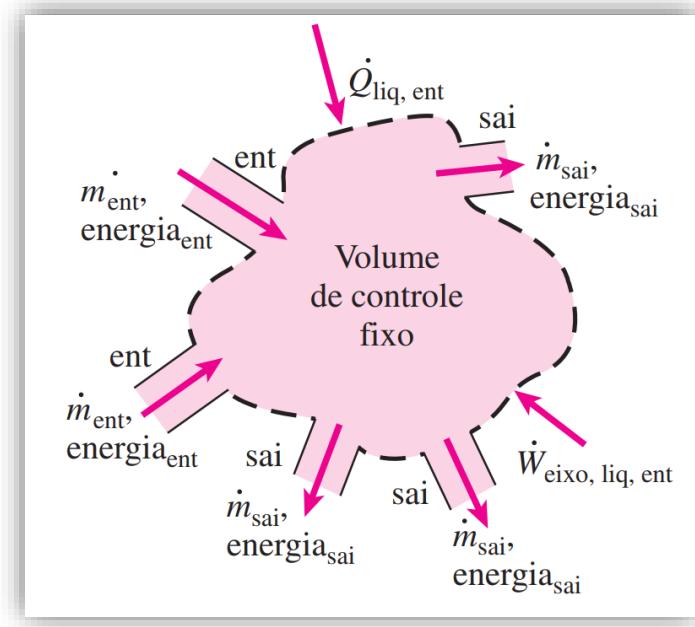
$$\dot{Q}_e + \dot{W}_e + \sum_e \dot{m} \cdot \left(h_e + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_s + \dot{W}_s + \sum_s \dot{m} \cdot \left(h_s + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (2.2)$$

Além do balanço de energia, a conservação de massa, representada pela equação 2.3 para regime permanente, estabelece que a igualdade entre os fluxos de massa que entram e os que saem do VC.

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (2.3)$$

Esta equação demonstra que não há acúmulo de massa \dot{m} no volume de controle, condição fundamental para a validade do balanço energético em sistemas industriais operando em regime estacionário.

Figura 2.1 - Balanço dos fluxos de massa e energia no Volume de controle.



Fonte: Çengel e Boles (2013).

Para VCs que operam em regime transitório, com as taxas de energia, calor, trabalho e massa variando com o tempo, a formulação da Primeira Lei para o balanço de energia, que é dada conforme a equação 2.4.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m} \cdot \left(h_e + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_s \dot{m} \cdot \left(h_s + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (2.4)$$

Em que $\frac{dE}{dt}$ é a variação da energia total no volume de controle, \dot{Q} é a taxa de calor transferido, \dot{W} é a taxa de trabalho realizado, \dot{m} representa a vazão mássica, h é a entalpia específica, $\frac{v^2}{2}$, o termo associado a energia cinética, e gz o termo associado à energia potencial gravitacional.

De acordo com Kroos e Potter (2015), para a avaliação da eficiência térmica de máquinas e sistemas baseados em ciclos termodinâmicos, o coeficiente de rendimento η , é dado por meio do quociente entre a energia em forma de trabalho líquido, o qual é dado pela

diferença entre o trabalho produzido por equipamentos produtores e consumidores de trabalho, pela energia total fornecida em forma de calor, conforme demonstrando na equação 2.5.

$$\eta = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_e} \quad (2.5)$$

Conforme Moran (2020), alternativamente, para ciclos de refrigeração, o coeficiente de desempenho – COP, β é dado pela razão entre energia pretendida \dot{Q}_L proveniente do espaço a baixa temperatura, pela energia em forma de trabalho consumida pelo ciclo, sendo umas das apresentações clássicas expressa pela equação 2.6.

$$\beta = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_e} \quad (2.6)$$

Para o mesmo autor, a análise energética permite quantificar as interações de energia entre os sistemas e sua vizinhança, além proporcionar as estimativas de desempenhos energéticos e rendimentos térmicos.

Segundo Çengel e Boles (2013), a análise energética fornece suporte essencial para o dimensionamento, a otimização e o controle de sistemas térmicos, sendo largamente utilizada na avaliação de equipamentos como compressores, turbinas, bombas, válvulas e trocadores de calor.

Este tipo de análise, portanto, é uma etapa indispensável para a compreensão dos fluxos energéticos em máquinas e instalações térmicas, propiciando através da avaliação quantitativa da energia, a identificação de oportunidades de melhoria em sistemas industriais, por exemplo (Çengel; Cimbala; Turner, 2017).

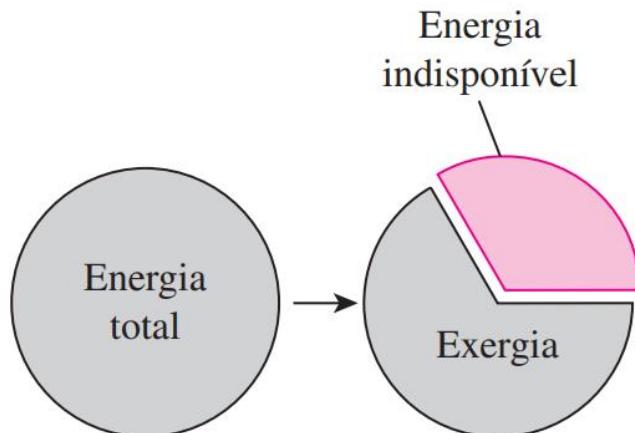
Entretanto, destaca-se que esta abordagem não é capaz de avaliar as irreversibilidades inerentes aos processos, uma vez que não considera a qualidade da energia - aspecto que será oportunamente abordado a seguir no tópico de análise exergética.

2.2.2 Análise Exergética (Segunda Lei da Termodinâmica - SLT)

A Segunda Lei da Termodinâmica introduz a noção de irreversibilidade dos processos naturais e estabelece que toda transformação real ocorre com aumento da entropia no universo. Esse princípio impõe limitações à conversão de energia em trabalho útil, diferentemente da Primeira Lei, que trata apenas da conservação de energia (Çengel; Boles, 2013).

A Figura 2.2 exemplifica a participação da exergia dentro do total de energia disponível para um sistema ou volume de controle. A parcela da energia indisponível não podendo ser aproveitada por nenhuma máquina térmica, mesmo que reversível, estando este quantitativo diretamente associado às irreversibilidades que ocorrem nos processos reais de transferência de calor, realização de trabalho, escoamentos e conversões em uma forma de energia em outra, dentro de um sistema ou volume de controle (Potter, 2015).

Figura 2.2- Parcelas da exergia e exergia destruída na energia total disponível.



Fonte: Çengel e Boles (2013).

De acordo com Bejan (2016), a Segunda Lei permite compreender que nem toda energia é igualmente útil, sendo necessário avaliar não apenas sua quantidade, mas também sua qualidade. Desse fato, surge o conceito de exergia, que representa a quantidade máxima de trabalho útil que um sistema pode fornecer à medida que entra em equilíbrio com o estado de referência.

A exergia, portanto, quantifica o potencial de realização de trabalho de uma dada quantidade de energia, considerando as limitações impostas pela irreversibilidade e pelas condições do meio. Quando um sistema atinge o chamado estado morto, isto é, quando

alcança o equilíbrio térmico, mecânico e químico com o meio ambiente, sua exergia torna-se zero (Van Wylen; Sonntag; Borgnakke, 2003).

2.2.3 Balanço de Exergia

De acordo com Dincer (2020), a exergia pode ser decomposta em diferentes formas: exergia física, química, cinética e potencial. Na maioria dos sistemas térmicos, a análise concentra-se na exergia física, que depende da temperatura e da pressão do sistema em relação ao ambiente.

Desta forma, de acordo com Ozturk e Dincer (2018), o balanço exergético pode ser definido pelo fluxo de energia, entropia e exergia que entra na fronteira de um volume controle, sendo composto pelas taxas de transferência de exergia de fluxo de massa, calor e trabalho menos a taxa de exergia destruída, devido as irreversibilidades que ocorrem nos processos termodinâmicos dentro do VC, conforme ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Parcada da exergia na exergia de entrada no VC.



Fonte: Çengel e Boles (2013).

Conforme Çengel e Boles (2013), a seguir são apresentadas as principais equações termodinâmicas para transferência de exergia de um fluxo de massa, exergia associada ao fluxo de calor e trabalho, respectivamente.

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz \quad (2.7)$$

$$\dot{X}_{massa} = \dot{m} \cdot (\psi) \quad (2.8)$$

$$\dot{X}_{calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \cdot \dot{Q}_k \quad (2.9)$$

$$\dot{W}_{rev} = \dot{m} \cdot (\psi_1 - \psi_2) + \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \cdot \dot{Q}_k \quad (2.10)$$

Onde:

- ψ é a taxa de exergia específica de escoamento em um VC;
- \dot{X}_{massa} é a taxa de exergia de fluxo de massa pela fronteira do VC;
- \dot{X}_{calor} é a taxa de exergia associada a transferência de calor;
- \dot{W}_{rev} é a potência reversível que entra ou sai do VC.

Já, de acordo com Çengel; Cimbala e Turner (2017), o termo relacionado a destruição de exergia é diretamente proporcional à geração de entropia e representa as perdas decorrentes dos processos irreversíveis dentro das fronteiras do VC, estando ligados a irreversibilidades nos processos termodinâmicos e influenciando negativamente a qualidade da exergia dentro do VC, dada pela equação 2.11.

$$\dot{X}_{dest} = \dot{m} \cdot T_0 \cdot [S_{ger}] \quad (2.11)$$

Onde S_{ger} representa a entropia gerada devido as irreversibilidades provenientes dos trabalhos de fluxo, de eixo, perdas relacionadas a transferência de calor, de modo geral.

O balanço de exergia para um escoamento em regime permanente pode ser expresso conforme Bejan (2016) e Moran et al. (2020) como:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m} \cdot (\psi_e) - \sum_s \dot{m} \cdot (\psi_s) - \dot{X}_{dest.} = 0 \quad (2.12)$$

Para o balanço exergético em regime transitório, tem-se a variação da exergia no volume de controle ao longo do tempo, como mostrado na equação 2.13.

$$\frac{d\dot{\psi}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \cdot \psi_e - \sum_s \dot{m}_s \cdot \psi_s + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \sum (\dot{W} - P_0 \cdot \frac{dV_{vc}}{dt}) - \dot{X}_{dest.} \quad (2.13)$$

A eficiência de segunda lei, ou eficiência exergética, é definida como a razão entre a exergia útil obtida e a exergia fornecida ao volume de controle:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_u}{\dot{X}_1 - \dot{X}_2} \quad (2.14)$$

Segundo Moran (2020), este indicador permite avaliar o quanto um sistema se aproxima do ideal reversível, sendo, portanto, uma medida que estima o percentual de aproveitamento qualitativo da energia e o potencial de otimização no desempenho de uma máquina térmica que opera de acordo com um ciclo termodinâmico.

Alternativamente, para dispositivos que consomem trabalho, como refrigeradores e bombas de calor, a eficiência exergética é dada conforme a equação 2.14:

$$\eta_{II} = \frac{COP_{real}}{COP_{rev}} \quad (2.15)$$

Em que a eficiência exergética de tais dispositivos é dada pelo quociente entre o coeficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração operando em condições reais, pelo coeficiente deste mesmo ciclo operando de forma reversível.

2.2.3 Ciclos Frigoríficos por compressão de vapor

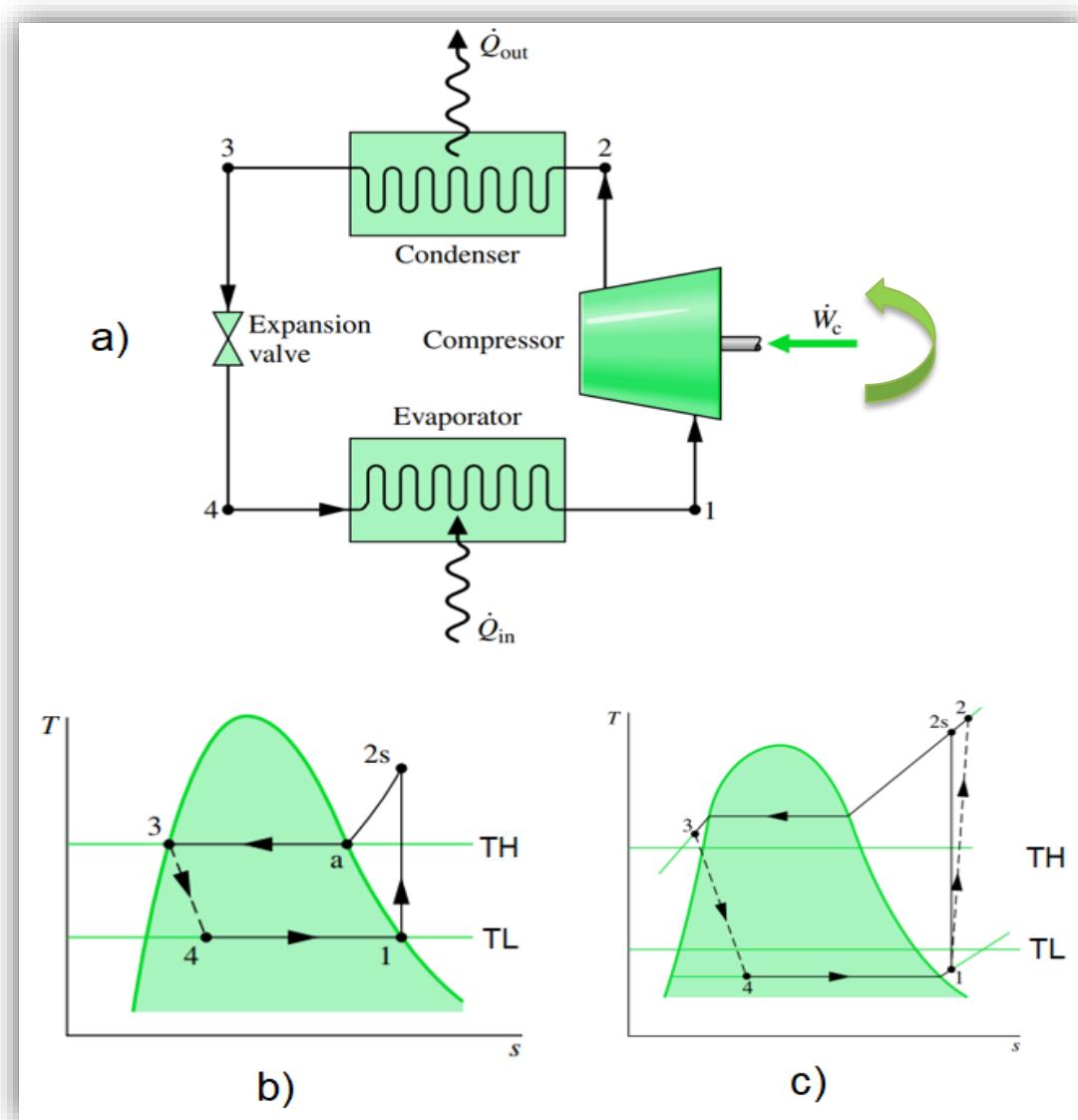
Um ciclo frigorífico por compressão de vapor é modelado por meio do ciclo Rankine para refrigeração, composto por quatro processos, onde o fluido de trabalho apresenta mudança de fase durante um ciclo de funcionamento completo, podendo operar como um ciclo de refrigeração, cuja finalidade básica é a produção de frio, mantendo a temperatura de um espaço refrigerado menor que a temperatura ambiente, ou como bomba de calor, mantendo a temperatura de um espaço qualquer acima da temperatura ambiente (Van Wylen; Sonntag; Borgnakke, 2003).

Um ciclo frigorífico ideal é aquele que opera com dois processos de transferência de calor a pressão e temperatura constantes no condensador e evaporador, com os outros 2 processos de compressão e expansão adiabáticos, conforme a figura 2.4b.

No compressor ocorre o processo de compressão do fluido refrigerante sem transferências de calor e a entropia constante, sendo chamado de processo isentrópico e adiabático.

Na válvula de expansão, o escoamento de fluido refrigerante a alta pressão e temperatura é submetido a uma restrição severa, onde a pressão e temperatura caem bruscamente, este processo ocorre a entalpia constante e sem transferência de calor da válvula para o ambiente, sendo assim isentalpico e adiabático (Moran, 2020).

Figura 2.4 - a) Esquema de um refrigerador. b) Diagrama termodinâmico Temperatura-entropia para um ciclo Rankine de refrigeração por compressão de vapor ideal c) Diagrama termodinâmico temperatura - entropia para um ciclo Rankine de refrigeração por compressão de vapor real.



Fonte: Adaptado Moran (2020).

Na figura 2.4c, o ciclo frigorífico é o real, ou seja, os efeitos das irreversibilidades devido aos processos reais durante o funcionamento da máquina frigorífica se impõem, sendo os principais desvios em relação ao ciclo ideal: perdas por conta de atrito nas tubulações do sistema, perdas por conta do atrito mecânico dos componentes internos do compressor e quedas nas pressurizações dos trocadores de calor, por exemplo.

Conforme a figura 2.4.c, o processo de compressão, (1-2s), não é isentrópico e nem adiabático, assumindo-se na prática um termo denominado “eficiência isentrópica”, no qual o processo de compressão ocorre o mais próximo possível do processo reversível. Além disso, há rejeição de calor no compressor, o que também promove perdas energéticas e consequentemente de eficiência térmica.

No processo de evaporação (4-1'), normalmente há o superaquecimento do refrigerante na saída do evaporador, com elevação do volume específico do fluido na temperatura de entrada no compressor, que por sua vez resultará no aumento do trabalho realizado por este equipamento e mais rejeição de calor ao ambiente afetando a eficiência térmica do sistema.

2.2.4 Análise termodinâmica nos processos de acondicionamento térmico de Hortifrutis

A análise termodinâmica é baseada no estudo sistemático dos processos de conversão e transferência de energia dentro de sistemas físicos, fundamentando-se nas leis da termodinâmica. Seu principal objetivo é avaliar o desempenho de sistemas energéticos, identificando *hot-spots*, ou seja, processos ou equipamentos que geram perdas energéticas, de modo a propor melhorias que aumentem as eficiências térmica e energética, contribuindo para a redução dos custos energéticos, econômicos e ambientais (Lima *et al.*, 2023).

Nesse contexto, segundo Tantekin (2025), a análise exergética surge como uma ferramenta importante, capaz de identificar, localizar e quantificar as irreversibilidades presentes nos sistemas térmicos, contribuindo com informações importantes para a otimização do desempenho dos sistemas térmicos, seja em melhoria de projeto de equipamentos, inovações tecnológicas, desempenho de fluidos refrigerantes, como também avaliações de processos termodinâmicos.

Dessa forma, enquanto a análise energética permite avaliar a energia de forma quantitativa, a análise exergética, de modo qualitativo em termos de qualidade da energia disponível, permite a identificação de onde ocorrem as principais destruições exergéticas em

um determinado sistema térmico, permitindo assim, uma visão mais completa das oportunidades de otimização (Wang e Alam, 2022).

Conforme Cavalcanti *et.al.* (2020), a análise termodinâmica e exergética é fundamental para o avanço de tecnológico de sistemas térmicos mais eficientes e sustentáveis, especialmente frente às preocupações e demandas ambientais associadas ao consumo racional da energia e emissões de gases de efeito estufa.

Solanki *et.al.* (2023), destacam as contribuições que esta ferramenta proporciona, através de avaliações de desempenho térmico de equipamentos operando com fluidos ecologicamente corretos, alternativas energéticas sustentáveis, análises de processos de conversão energética e instalações térmicas, de modo a indicar soluções energeticamente sustentáveis com baixo potencial de aquecimento global (GWP).

No contexto associado ao condicionamento térmico de Hortifrutis, os sistemas de refrigeração por compressão de vapor desempenham papel de destaque, uma vez que são amplamente utilizados em espaços refrigerados para promover a conserva refrigerada, redução de perdas pós-colheita, manutenção da qualidade e aumento da produtividade dos produtos hortifruticolas (Hossain *et.al.*, 2024).

De acordo com Çengel e Boles (2013), devido ao fato destes sistemas possuírem custos de aquisição e manutenção significativamente menores quando comparados a outros sistemas de refrigeração, além de não necessitarem de grandes infraestruturas para acomodação de equipamentos, eles são empregados em grande escala para equipar a cadeia do frio hortifrutícola, desde a etapa de conserva refrigerada na agroindústria até os supermercados (Balogun *et. al.*, 2025).

De acordo com Gao *et.al.* (2021) e Wike *et.al.* (2023), nos últimos anos, as pesquisas sobre essa temática têm se concentrado na avaliação do desempenho térmico de sistemas de refrigeração utilizados em instalações frigoríficas para o acondicionamento de frutas e vegetais.

Esses estudos abordam aspectos técnicos, econômicos e ambientais, além de realizar análises termodinâmicas de fluidos refrigerantes ambientalmente amigáveis e do controle dos parâmetros operacionais dos sistemas frigoríficos. Além disso, incluem trabalhos voltados à otimização e ao desenvolvimento de projetos, com foco no aumento do COP, na redução do consumo de energia e na mitigação dos impactos ambientais associados (Hendry e Wafa, 2025).

Apesar do uso em larga escala de instalações de câmaras frias de pequeno a grande porte na região do Vale do São Francisco, observa-se uma grande limitação em pesquisas voltadas para análise termodinâmica aplicada à cadeia do frio na região.

Os estudos mais recentes abordando relacionados a influência climática na qualidade de frutos no interior dos espaços refrigerados, a controle de temperatura e umidade dentro câmaras frias e túneis de resfriamento rápido, conforme os trabalhos de Miranda (2020) e Ferreira (2021).

Estudos voltados a aplicação dessa ferramenta aliada à avaliação de impactos ambientais associados ao processo de acondicionamento refrigerado extremamente escassa, haja visto que trabalhos nesta área apresentam grande potencial para inovação, auxílio em diagnósticos de sistemas existentes e projetos futuros, de modo a contribuir para otimização de instalações e plantas de refrigeração mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

2.3 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

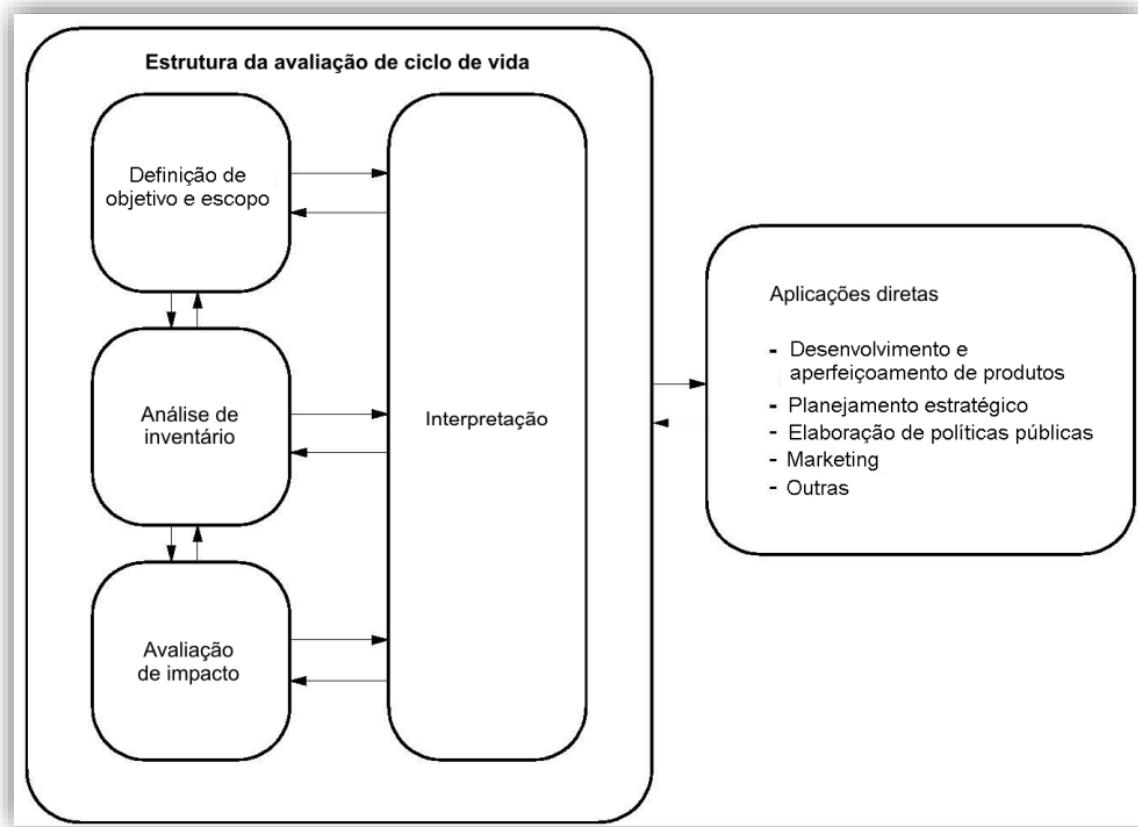
A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta científica de avaliação ambiental amplamente empregada na análise de sustentabilidade ambiental, permitindo mensurar e comparar impactos ambientais associados a produtos, processos e serviços ao longo de todo os seus ciclos de vida (Wahrlich *et al.*, 2020).

A padronização da ACV ocorreu a partir da publicação das normas ISO 14040 (2014) e ISO 14044 (2014), as quais definem os princípios, requisitos e procedimentos essenciais para sua aplicação. No Brasil, essas normas foram traduzidas, ajustadas e oficializadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR ISO 14040, 2014a; ABNT NBR ISO 14044, 2014b).

A ACV é estruturada em 4 etapas, sendo estas: (i) definição do objetivo e escopo; (ii) análise do inventário do ciclo de vida (ICV); (iii) avaliação de impactos ambientais; e (iv) interpretação dos resultados. Na primeira etapa, são definidos os limites do sistema e a unidade funcional, elemento que garante a base de comparação entre diferentes cenários (ABNT NBR 14044, 2014b).

A segunda etapa, o inventário, consiste na coleta de dados sobre os fluxos de entrada (massa e energia) e saída (emissões, efluentes, resíduos) também em termos de massa e energia, a partir da extração das matérias primas até o descarte do objeto de estudo (Diniz e Carvalho, 2024).

Figura 2.5 - Estrutura da metodologia de ACV.



Fonte: ABNT NBR ISO 14040 (2014a).

Já na terceira etapa, os dados do inventário são tratados por métodos de caracterização de impacto. Os métodos mais aplicados na literatura incluem o ReCiPe, CML 2001, TRACI e o IPCC GWP 100a, segundo Goedkoop *et al.* (2013). O ReCiPe, por exemplo, permite avaliar tantas categorias intermediárias (como aquecimento global, formação de ozônio fotoquímico, acidificação do solo) quanto categorias finais (danos à saúde humana, ecossistemas e recursos).

Já o IPCC GWP 100a, voltado especificamente à emissão de gases de efeito estufa, é amplamente utilizado na mensuração da pegada de carbono de produtos e serviços. Os indicadores de impacto ambiental derivados da terceira etapa são essenciais para traduzir dados técnicos em resultados interpretáveis e comparáveis (IPCC, 2021).

Santos, Carvalho e Barbosa-Pávova (2022), destacam que a escolha adequada dos métodos de caracterização e a interpretação criteriosa dos indicadores são determinantes para uma avaliação robusta, sendo possível, por exemplo, comparar diferentes tecnologias, rotas de produção ou processos logísticos com base em seu desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida.

A interpretação é a fase final da ACV, que integra os resultados do inventário e da avaliação de impacto, considerando as incertezas, limitações metodológicas e os objetivos definidos no início do estudo. De acordo com Diniz (2024), a interpretação deve identificar as contribuições mais significativas para os impactos, verificar a consistência dos dados e fornecer subsídios para decisões e recomendações a respeito dos impactos ambientais devidamente fundamentadas (Bispo Júnior, 2022).

Deste modo, a ACV se apresenta como uma abordagem cientificamente consolidada e normatizada, sendo amplamente utilizada e recomendada em processos de certificação ambiental, elaboração de políticas públicas e desenvolvimento de produtos sustentáveis.

O uso sistemático da ACV tem crescido especialmente nos setores industrial, agrícola e de energia, onde há maior complexidade de fluxos de materiais e energia, e consequente relevância dos impactos potenciais.

2.3.1 Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) no setor de acondicionamento térmico refrigerado de hortifrútis

Para Claudino e Talamini (2013), a aplicação da ACV é particularmente relevante em setores de alto impacto ambiental, como o agroindustrial. No caso do setor de hortifrútis, e especialmente na cadeia produtiva da uva, a ACV tem sido empregada para avaliar os impactos ambientais nas etapas pós-colheita, com ênfase no acondicionamento térmico refrigerado (Santos, 2024).

Estudos mostram que esse processo, essencial para manter a qualidade dos frutos, representa significativa parcela do consumo energético e pode estar associado a elevadas emissões de gases de efeito estufa (Cimini *et al.*, 2016).

Diniz (2019), ao aplicar a metodologia da ACV em processos industriais com elevada demanda de refrigeração, como em cervejarias (por exemplo), demonstrou que o uso de eletricidade oriunda de fontes renováveis, como a solar fotovoltaica, contribui para uma expressiva redução na pegada de carbono. A mesma abordagem pode ser estendida para o setor de hortifrútis, com benefícios relevantes.

Nesse sentido, a ACV não apenas quantifica os impactos ambientais associados ao uso de tecnologias de acondicionamento, mas também fornece subsídios para decisões que promovam a sustentabilidade. A inserção de sistemas fotovoltaicos nos processos de refrigeração, por exemplo, além de ambientalmente benéfica, pode apresentar viabilidade econômica, conforme indicam estudos de dimensionamento e retorno financeiro em sistemas residenciais e comerciais (Magalhães *et al.*, 2021).

Deste modo, a cultura da uva, em particular, exige cuidados rigorosos com a conservação pós-colheita devido à sua elevada perecibilidade e sensibilidade à temperatura. O resfriamento imediato após a colheita é essencial para preservar a qualidade dos Hortifrutis, reduzir perdas e manter o valor de mercado da fruta (Silva *et al.*, 2018). No entanto, esse processo implica elevados custos energéticos, tornando-se uma oportunidade para aplicação da ACV.

Ao aplicar a metodologia da ACV nesse contexto, é possível avaliar de forma detalhada os impactos ambientais associados à refrigeração, transporte e armazenamento dos Hortifrutis. Isso inclui o levantamento de dados sobre o consumo de energia elétrica, instalações físicas, materiais para embalagens, emissões atmosféricas associadas ao consumo de combustíveis fósseis, fluidos refrigerantes e descarte de resíduos ao longo de toda a cadeia de produção (Saadi *et.al.*, 2024)

Segundo Daniel *et al.* (2019), a utilização de energia elétrica da rede convencional em atividades de refrigeração pode resultar em significativa emissão de gases de efeito estufa (GEE), especialmente em países onde a matriz energética ainda possui elevada participação de combustíveis fósseis.

De acordo com Silva *et al.* (2020), essa alternativa se mostra particularmente viável em regiões com alta incidência solar, como o Vale do São Francisco, importante polo produtor de uvas de mesa e para vinicultura no Brasil. Além disso, a ACV contribui para a tomada de decisões mais sustentáveis em termos de escolha de tecnologias de refrigeração, dimensionamento de sistemas energéticos e planejamento logístico (Cimini *et al.*, 2016).

Essa metodologia permite identificar quais etapas do processo têm maior peso ambiental, ou “hot-spots” e como esses impactos podem ser minimizados sem comprometer a qualidade do produto, podendo ser aplicada também à cultura da uva, de modo a avaliar os impactos ambientais associados ao seu processo produtivo.

De acordo com a Embrapa (2024), a região do Vale do São Francisco destaca-se como um dos principais polos de fruticultura irrigada do Brasil, com expressiva produção e exportação de frutas como manga, uva, melão e goiaba.

Entretanto, devido a intensificação das atividades agrícolas, associadas ao uso intensivo de recursos naturais, em especial à água e energia elétrica, ampliaram a necessidade de práticas agrícolas mais sustentáveis (Santos *et al.*, 2023). Nesse contexto, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta estratégica na gestão ambiental da cadeia produtiva agrícola regional.

Na agricultura do Vale do São Francisco, a aplicação da ACV tem sido crescente, especialmente para avaliar os impactos da produção irrigada, do uso de fertilizantes, defensivos e da matriz energética nos sistemas de produção (Lima *et al.*, 2022).

Estudos recentes indicam que os principais *hotspots* ambientais na fruticultura irrigada da região estão relacionados ao uso intensivo de energia elétrica — sobretudo nas etapas de irrigação e climatização em pós-colheita — além da emissão de gases de efeito estufa (GEE) oriundos do uso de fertilizantes nitrogenados e combustíveis fósseis (Medeiros *et al.*, 2024).

Adicionalmente, a aplicação da ACV tem sido integrada a certificações de sustentabilidade exigidas por mercados internacionais, como o Global G.A.P e *Rainforest Alliance*, ampliando a competitividade dos produtos agrícolas do Vale no cenário global (Souza *et al.*, 2021). Empresas e cooperativas locais têm investido em estudos de ACV para melhorar seus processos e acessar mercados que exigem rigor ambiental.

De acordo com o mesmo autor, apesar dos avanços, os desafios ainda são relevantes, principalmente pela carência de inventários regionais de dados primários, além de limitações técnicas na internalização dos resultados da ACV na gestão operacional das propriedades. Contudo, com o avanço das políticas de sustentabilidade, a tendência é de expansão do uso da ACV como ferramenta essencial para a tomada de decisão, planejamento sustentável e valorização dos produtos agrícolas da região.

Portanto, o panorama atual evidencia que a Avaliação de Ciclo de Vida não apenas ajuda a promover a sustentabilidade ambiental da agricultura no Vale do São Francisco, mas também agrega valor econômico aos produtos, fortalece a imagem socioambiental da região e contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à produção responsável e combate às mudanças climáticas.

2.4. Sistemas fotovoltaicos para acondicionamento térmico de Hortifrutis

A energia solar, por se tratar de uma fonte renovável e sustentável, tem despertado interesse e sido alvo de pesquisas e inovações ao longo dos anos. Desde que Edmond Becquerel identificou o efeito fotovoltaico em 1839, muitos avanços têm contribuído para o desenvolvimento dos Sistemas de Geração Fotovoltaica, que hoje se consolidam como uma alternativa viável e crescente para a produção de eletricidade.

Esse avanço é impulsionado por diversos fatores, como o aprimoramento das tecnologias de fabricação das células fotovoltaicas, a queda nos custos de produção e o aumento da conscientização ambiental quanto à importância do uso de fontes de energia limpas e renováveis (Paixão; Sausen; Abaide, 2024).

A estimativa da energia elétrica produzida por um sistema fotovoltaico é fundamental por diversas razões, como o correto dimensionamento da instalação, o apoio em decisões de investimento e a elaboração de estudos de planejamento energético.

Melhorar a eficiência energética de uma instalação envolve o uso otimizado das fontes disponíveis, o que se traduz no conceito de uso racional da energia. Essa abordagem consiste em alcançar o mesmo resultado energético com um consumo menor, promovendo uma gestão estratégica voltada à eficiência operacional (Moreira, 2024; Ahmed *et al.*, 2024).

A cadeia produtiva de Hortifrutis, por sua vez, é altamente sensível à deterioração pós-colheita, principalmente em regiões de clima tropical e subtropical. A ausência de sistemas eficientes de resfriamento e conservação impacta diretamente a qualidade, o valor comercial e a segurança alimentar. Diante disso, o uso de fontes renováveis de energia, especialmente a solar fotovoltaica, surge como uma alternativa viável e sustentável para o acondicionamento térmico desses alimentos (Batalha, *et al.*, 2018).

A perda de alimentos é um desafio global, com implicações econômicas, ambientais e sociais. No Brasil, estima-se que as perdas de frutas e hortaliças atinjam entre 30% e 35% desde a produção até o consumidor final (Luckesi, *et al.*, 2024).

Segundo estimativa recente da FAO - *Food and Agriculture Organization* (2024), os números são ainda mais preocupantes, o desperdício de alimentos, especialmente Hortifrutis, representa uma das maiores perdas na cadeia produtiva agrícola brasileira, chegando a té 30% da produção total (Santos *et al.*, 2020).

Dentre os inúmeros fatores envolvidos nas perdas, destaca-se o resfriamento e conservação desses produtos, etapa que implica em um alto custo para os produtores. Boa parte dessas perdas também ocorre devido à ausência de estrutura adequada para o acondicionamento térmico logo após a colheita.

Segundo Basu e Ganguly (2015), em regiões rurais, onde muitas vezes não há acesso contínuo à energia elétrica da rede convencional, os sistemas fotovoltaicos se destacam nesse cenário como solução tecnológica sustentável e redutora de custos no processo de refrigeração e armazenamento, principalmente em se tratando de frutas e hortaliças.

Além disso, a adoção dessa tecnologia contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, promove a autonomia energética dos produtores e fortalece práticas agroecológicas (Luckesi, *et al.*, 2024).

A crescente demanda por energia sustentável tem impulsionado o uso de fontes renováveis no setor agrícola, especialmente na região do Vale do São Francisco. Esta região, caracterizada por um clima semiárido, forte radiação solar e escassez hídrica, tornou-se referência na produção irrigada de frutas, destacando-se como um dos maiores polos de fruticultura tropical irrigada do Brasil e do mundo (Silva *et al.*, 2023).

O uso da energia fotovoltaica na agricultura local surge como uma solução estratégica para reduzir custos operacionais, garantir maior autonomia energética e promover sustentabilidade ambiental.

A matriz energética da região, historicamente dependente de fontes convencionais, como hidroeletricidade e energia térmica, vem sendo complementada por sistemas fotovoltaicos, especialmente em propriedades rurais, agroindústrias e sistemas de irrigação (Lima *et al.*, 2022).

Na prática agrícola, a energia solar tem sido aplicada em diversas frentes: abastecimento de sistemas de irrigação pressurizada, bombeamento de água, climatização de câmaras frias, refrigeração no pós-colheita e até na eletrificação de instalações rurais.

Segundo estudos recentes, a adoção desses sistemas no Vale do São Francisco tem contribuído diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a diminuição da pegada de carbono da produção agrícola (Ferreira *et al.*, 2024).

Além dos benefícios ambientais, o aspecto econômico também é um fator decisivo. A implementação de sistemas fotovoltaicos permite uma economia média de 40% a 70% nas contas de energia elétrica dos produtores, dependendo do porte da instalação e do perfil de consumo (Santos *et al.*, 2021).

Isso se torna especialmente relevante em atividades que possuem elevada demanda energética, como o funcionamento de câmaras frigoríficas destinadas ao armazenamento de frutas, que são fundamentais para manter a qualidade pós-colheita.

Apesar do avanço, alguns desafios ainda limitam a expansão plena da energia solar na região, como os altos custos iniciais de instalação, a necessidade de linhas de financiamento específicas e capacitação técnica para operação e manutenção dos sistemas. No entanto, políticas públicas como o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia (ProGD) e incentivos estaduais têm impulsionado essa transição (Moura *et al.*, 2023).

Em síntese, o uso da energia fotovoltaica na agricultura do Vale do São Francisco representa uma tendência irreversível, alinhada aos princípios da sustentabilidade econômica e ambiental. O potencial solar da região, aliado à necessidade de soluções energéticas eficientes, consolida essa tecnologia como uma ferramenta estratégica para fortalecer a competitividade do agronegócio local e mitigar impactos ambientais.

CAPÍTULO III

3. AVALIAÇÃO EXERGÉTICA E DE CICLO DE VIDA COMO ESTRATÉGIA PARA A SUSTENTABILIDADE: APLICAÇÃO A SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAS

RESUMO:

A necessidade de análise de sustentabilidade surge à medida que o avanço tecnológico dos sistemas de refrigeração avança. Os processos envolvidos em sistemas de refrigeração industrial são altamente intensivos em energia. A racionalização do consumo de energia para esses sistemas representa um desafio de sustentabilidade. Portanto, existem inúmeros estudos realizados para minimizar o consumo de energia e o impacto ambiental desses sistemas. O presente estudo consiste em uma Revisão Sistemática da Literatura sobre pesquisas que abordam análises exergéticas e avaliações de ciclo de vida (ACV) aplicadas a sistemas de refrigeração industrial. A revisão resultou na afirmação da eficácia do emprego de métodos de análise exergética e avaliação de ciclo de vida para a otimização do consumo de energia e mitigação de emissões. Finalmente, a combinação da análise exergética com a ACV é importante para uma avaliação mais abrangente e holística dos impactos ambientais e de recursos de produtos, processos e sistemas.

Palavras-chave: Refrigeração industrial; Exergia; ACV.

3.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração como um todo possuem importância fundamental na vida moderna. As demandas relacionadas com a produção de frio e climatização para as variadas aplicações é uma constante (Antonie *et al.*, 2022). De fato, Wu *et al.* (2019) demonstram de modo exemplar como a cadeia do frio está integralmente associada ao processo de produção e acondicionamento térmico de alimentos. Independentemente da sua origem, o produto necessita de ser mantido em um ambiente refrigerado desde o momento em que é produzido até o seu consumo (Sadi; Arabkoohsar, 2020).

Por outro lado, de acordo com Randazzo *et al.* (2020), a demanda da refrigeração aplicada a sistemas de climatização e aquecimento também está em processo de crescimento, devido à exigência de conforto térmico, maior acesso à tecnologia e como consequência decorrente das mudanças climáticas, com o processo de aquecimento global sendo uma constante ao longo dos anos (Alrobain, 2023).

A refrigeração industrial é um ramo dos sistemas térmicos que tem como função a produção de frio em grande escala, de modo a atender a demandas de resfriamento ou de climatização.

De acordo com Zu *et al.* (2021), os sistemas de refrigeração industriais evoluíram conforme a evolução tecnológica e devido ao aumento da demanda por sistemas mais robustos para atender às demandas que vão se apresentando ao longo do tempo, de modo que atualmente é possível contar com diversos arranjos de equipamentos e sistemas para atender aplicações variadas.

Na esteira da evolução tecnológica dos sistemas de refrigeração e seus correlatos, surge também a necessidade de avaliar os impactos energéticos, econômicos e ambientais associados à produção, à operação e ao descarte de tais sistemas (Liu *et al.*, 2020).

Uma vez que os processos de refrigeração industriais são grandes consumidores de energia, é necessário racionalizar o consumo associado à sua operação (Terehovics *et al.*, 2018) como estratégia de apoio para melhorar os níveis de eficiência energética e sustentabilidade.

A crescente demanda de energia, o crescimento econômico e a preocupação com impactos ambientais evidenciam a necessidade de buscar-se soluções tecnológicas que permitam o desenvolvimento sustentável, considerando o cenário atual.

Para tanto, Colakoglu e Durmayaz (2022) defendem que a aplicação de metodologias de avaliação exergética pode ajudar a racionalizar a demanda energética desses sistemas, quer seja na fase de projeto, quer seja na otimização de plantas em operação, como também na utilização de fontes energéticas renováveis em alternativa ao consumo de energia proveniente das fontes tradicionais.

A avaliação exergética apresenta-se como uma ferramenta relevante para a análise quantitativa e qualitativa de todo e qualquer processo em que há trocas e transformação de energia (Ibrahim *et al.*, 2018). A análise exergética possibilita analisar a eficiência de uma fonte energética, como também indicar pontos de melhoria da eficiência de um sistema ou processo.

Assim, a sua finalidade é a de promover a otimização, propiciando a redução das perdas, sendo também o elemento basilar para as avaliações termoeconômicas e ambientais (Saini, *et al.*, 2018).

Neste contexto, as discussões na literatura têm se intensificado de forma considerável nas temáticas relacionadas com a avaliação exergética e ambiental aplicadas como metodologia de análise nos mais variados processos produtivos, a exemplo dos processos de geração de potência, calor e resfriamento (Fu *et al.*, 2022).

De acordo com Marques *et al.* (2021), estudos relacionados com estes sistemas têm sido recorrentes, pois há motivos plausíveis que tornam necessária a adoção de metodologias de avaliação termoambientais, tais como o uso sustentável da energia, a redução de emissões associados à operação de sistemas de refrigeração, o uso de fontes energéticas renováveis e o aumento do rendimento térmico, além da avaliação de impacto econômico relacionada com os processos de conversão energética.

A temática é bastante relevante dada a dinâmica do consumo energético, impacto ambiental associado a emissões de gases de efeito estufa e custos econômicos relacionados com sistemas de refrigeração industrial (Alsaman *et al.*, 2022). Nesta direção, Abreu *et al.* (2022) desenvolveram análises termoeconômicas e ambientais para um sistema de climatização em um centro comercial (*shopping center*) de João Pessoa (PB), traçando um panorama de custos energéticos, econômicos e ambientais requisitados pelo sistema de climatização do prédio.

Deste modo, o objetivo deste estudo é realizar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para compreender o estado da arte recente quanto às discussões acerca da análise exergética e avaliação de ciclo de vida para refrigeração industrial. Assim, a RSL visou mapear os estudos primários que possuíam relação com a seguinte questão de pesquisa: **Qual o cenário atual sobre estudos aplicados à análise exergética e avaliação de ciclo de vida para refrigeração industrial considerando o período de 2018 a 2022?**

Para tanto, com a RSL procurou-se destacar as principais discussões na literatura acerca da temática em estudo. Posteriormente, são delineados os procedimentos metodológicos utilizados nesta RSL contendo uma síntese dos estudos primários identificados.

Por fim, a partir dos resultados obtidos com a realização da revisão sistemática, são feitas as considerações finais, destacando-se os principais resultados e recomendações para pesquisas futuras.

3.2 METODOLOGIA

Kitchenham (2004) evidencia que através da revisão sistemática é possível avaliar e compreender as pesquisas relevantes para uma questão específica de pesquisa, área ou fenômeno de relevância. Assim, ao tomarem por base uma estratégia de pesquisa delimitada, as revisões sistemáticas direcionam para a localização do máximo de estudos relevantes.

Ainda segundo a autora, as revisões sistemáticas possibilitam a identificação das principais evidências acerca de um tema mediante o uso de uma metodologia rigorosa, transparente e auditável.

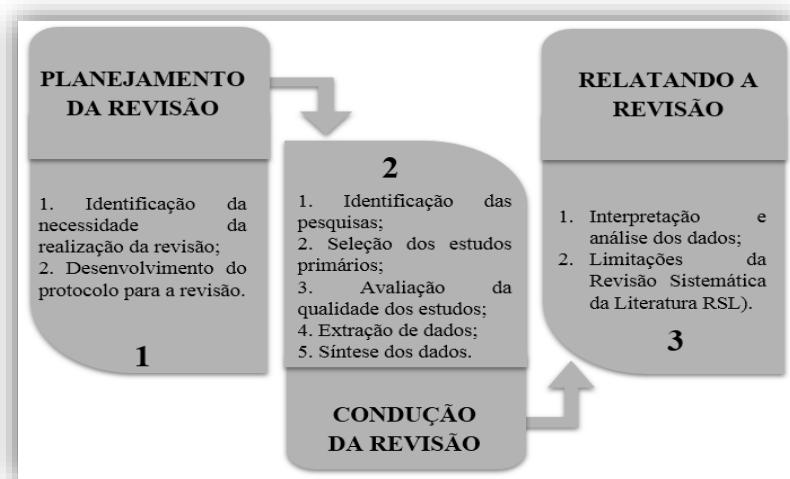
Portanto, uma revisão sistemática possibilita novos encaminhamentos de pesquisa, seja para sustentar ou refutar hipóteses de pesquisa, bem como desenvolver hipóteses diferentes ou adicionais para discussões.

Brereton *et al.* (2007) destacam que a definição do protocolo na revisão sistemática minimiza o viés no estudo, sendo necessário especificar os processos que serão seguidos.

Na mesma direção, Aguinis, Ramani e Alabduljader (2018) enfatizam a importância de a revisão sistemática ser descrita de forma detalhada e com procedimentos metodológicos transparentes, para que outros pesquisadores consigam reproduzir o protocolo definido.

Neste estudo, fez-se uso das diretrizes propostas por Kitchenham (2004) para a construção da revisão sistemática. Para a autora, tal procedimento abrange as seguintes fases: i) planejamento, ii) condução e iii) relato. A Figura 3.1 resume o processo conduzido para a execução da RSL:

Figura 3.1- Etapas para a Revisão Sistemática da Literatura.



Fonte: Autoria própria (2023), com base em Kitchenham (2004).

Após a definição do protocolo, estabeleceram-se como panorama de análise os estudos que foram realizados no período de 2018 a 2022, a fim de evidenciar as principais discussões sobre análise exergética e avaliação de ciclo de vida para refrigeração industrial.

3.2.1 Fontes de Informação

Para a busca dos artigos relacionados com o objetivo da pesquisa, foram utilizadas três bases de dados: *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*. É válido salientar que, para a identificação dos artigos nas referidas bases, a busca ocorreu de forma manual a partir das seguintes palavras-chave: “*Refrigeration*”, “*Exergy*”, “*Cold rooms*”, “*Life cicle assessment*”, “*Carbon footprint*”, “*Greenhouse gases*” acompanhadas dos operadores booleanos AND ou OR. Ressalte-se que a coleta nestas bases de dados ocorreu entre os meses de maio e junho de 2023.

3.2.2 Critérios de inclusão e exclusão

Para este estudo, foram considerados somente os artigos que possuíam acesso aberto e estavam disponíveis para transferência, de modo que os trabalhos que não atenderam a este critério foram eliminados da análise.

Para a seleção dos estudos, foram utilizadas as bases de dados *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*, sendo que a pesquisa dos artigos ocorreu através dos títulos, visando identificar aqueles que possuíssem relação com “Refrigeração industrial”, “Exergia”, “Câmaras frias”, “Avaliação de Ciclo de Vida”, “pegada de carbono” e “gases do efeito estufa”. Assim, foram incluídos os artigos que versavam sobre a análise exergética para refrigeração industrial e Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

Em relação à delimitação temporal para a busca dos artigos, foram considerados os artigos publicados entre 2018 e 2022, a fim de realizar-se um levantamento do estado da arte acerca das discussões sobre análise exergética para refrigeração industrial e Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). É importante frisar que não foi incluída nesta revisão a chamada “literatura cinzenta¹”, sendo, portanto, analisados apenas artigos científicos.

¹ A literatura cinzenta refere-se aos trabalhos que não foram publicados, como monografias, dissertações e teses.

Ainda no processo de exclusão dos artigos, destaca-se que foram considerados somente aqueles que estavam no idioma inglês. Portanto, os trabalhos em outros idiomas que não estavam dentro do recorte temporal (2018 a 2022) foram sumariamente excluídos.

A escolha pela delimitação de tempo para os últimos cinco anos nas buscas dos artigos deveu-se ao fato de que os métodos discutidos nos artigos evoluem de forma muito rápida (Aguinis; Ramani; Alabduljader, 2018), razão pela qual é importante definir um lapso temporal razoável para análise do estado da arte e, assim, obter as discussões mais recentes acerca de determinado assunto.

Quanto à avaliação da qualidade dos artigos, os periódicos que possuíam Fator de Impacto (JCR) menor que 1 foram excluídos. Além disso, os artigos que estavam duplicados nas bases de dados também foram suprimidos.

3.2.3 Seleção dos estudos

A seleção dos artigos foi feita no idioma em inglês e foram utilizadas as seguintes *strings* de busca na pesquisa avançada nas bases de dados *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*: “*Refrigeration*”, “*Exergy*”, “*Cold rooms*”, “*Life cicle assessement*”, “*Carbon footprint*”, “*Greenhouse gases*”.

Dessa forma, as buscas nas bases de dados ocorreram da seguinte forma: TS= ((“*Refrigeration*” OR “*cooling*” OR “*cold room*” OR “*cold chain*”) AND (“*exergy*”) AND (“*life cycle assessment*” OR “*carbon footprint*” OR “*greenhouse gases*” OR “*GHG*”)) – sendo o idioma em inglês, o recorte temporal de 5 anos (2018 a 2022), delimitado para alcançar o estado da arte a respeito do tema proposto pela RSL, o tipo de estudo selecionado foi “artigo de pesquisa” e somente trabalhos com acesso aberto foram considerados.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos critérios estabelecidos anteriormente, utilizou-se como recorte temporal o período de 2018 a 2022 e, a partir daí, foi verificado se os resultados apresentados eram somente artigos com acesso aberto, de modo que foram identificados 290 documentos, dos quais 116 estudos foram obtidos na *Scopus*, 96 artigos na *Web of Science* e 78 artigos na *Science Direct*.

Em seguida, realizou-se a leitura dos títulos dos artigos, a fim de analisar se estavam alinhados com a questão de pesquisa. Uma vez que não possuíam relação direta com a temática investigada, 239 artigos foram excluídos, resultando em 51 trabalhos.

Destaca-se que os artigos indisponíveis por completo para *download* foram excluídos, resultando em 49 estudos. É oportuno evidenciar que a filtragem com a leitura dos títulos e resumos dos trabalhos teve o propósito de identificar os estudos primários que possuíam relação com a questão de pesquisa delimitada nesta revisão sistemática.

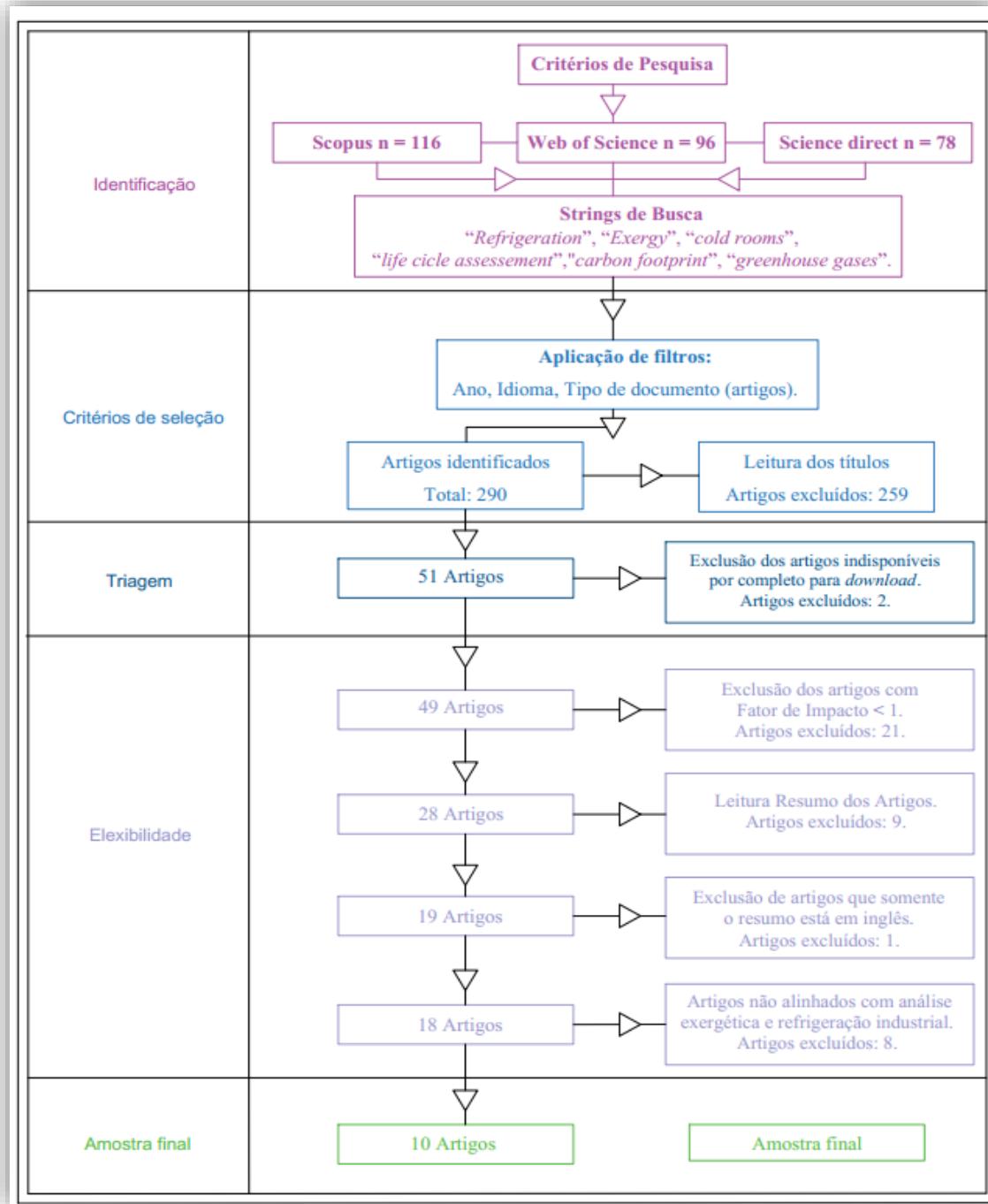
Também foram utilizados como critério de exclusão os artigos que tinham fator de impacto menor que 1 e/ou que eram estudos secundários, totalizando 28 artigos primários.

Por conseguinte, após a leitura dos resumos destes trabalhos, foram excluídos 9 estudos que não estavam diretamente relacionados com o objetivo da pesquisa, restando, assim, 19 artigos.

Ainda nesta etapa, identificou-se um artigo em que somente o resumo encontrava-se na língua inglesa e o trabalho por completo estava escrito em outro idioma, razão pela qual foi desconsiderado, restando um quantitativo de 18 artigos para leitura da introdução, metodologia e conclusão.

Após esta etapa de triagem, foram excluídos os artigos que não correlacionaram análise exergética e refrigeração industrial, sendo eliminados 8 trabalhos. Por fim, na última etapa, foi feita a leitura integral dos 10 artigos remanescentes, visto que eles se enquadram nos critérios estabelecidos para esta RSL. O processo de extração dos artigos foi organizado conforme consta na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Passos para obtenção dos artigos analisados.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.3.1 Características dos estudos identificados

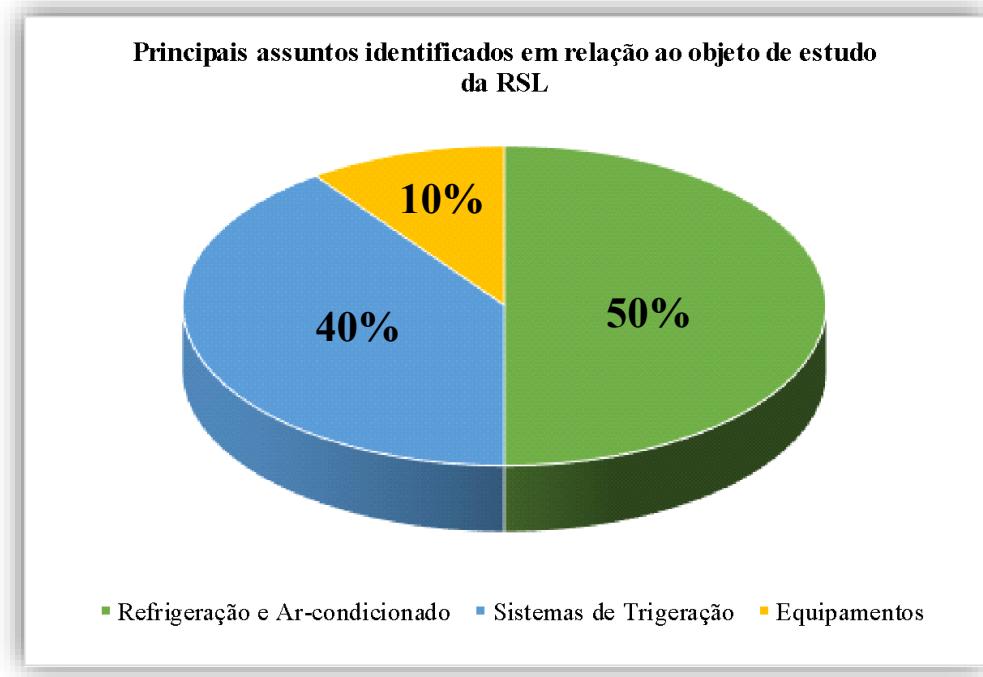
A partir dos artigos identificados nesta revisão sistemática, constatou-se que os trabalhos focaram no uso das análises exergeticas e ambientais, utilizando tanto metodologias consagradas de avaliação termoeconômica e ambiental como propondo novos métodos de combinação entre estas, como ferramenta de diagnóstico de sistemas térmicos

aplicados a processos conversão de energia, resfriamento e aquecimento. De fato, dos 10 trabalhos triados, 9 deles tratam diretamente de análises termoeconômicas e ambientais em plantas térmicas.

Entre os principais assuntos abordados nos artigos identificados, verificou-se preponderância para avaliação de desempenho exergético e ambiental e, mais especificamente, para os seguintes temas: análise exergética, ciclo de vida (ACV) e refrigeração e emissões de gases de efeito estufa, respectivamente, estando os trabalhos bem alinhados acerca do objetivo definido para esta revisão.

Em relação ao objeto de estudo dos trabalhos triados, identificou-se a concentração das discussões em avaliações termoeconômica e ambientais aplicadas a sistemas de refrigeração e ar-condicionado (50%), trigeração (40%) e a fluidos refrigerantes utilizados em equipamentos (10%), conforme a figura 3.3.

Figura 3.3 - Distribuição dos estudos identificados.



Fonte: Autoria própria (2023).

Esses estudos aplicam metodologias termoeconômicas e ambientais, isoladas ou combinadas, para analisar as eficiências dos sistemas sob a perspectiva energética, econômica e ambiental, além de propor alternativas sustentáveis, considerando os cenários específicos de cada objeto de estudo.

Em relação aos periódicos nos quais os artigos foram publicados, sete artigos possuem Fator de Impacto (JCR) maior que 8,857. É válido salientar que, dos 10 artigos identificados, somente um possui Fator de Impacto menor que cinco, o que demonstra a relevância e o nível dos trabalhos produzidos acerca da temática de avaliações exergéticas e ambientais, como ferramentas para otimização de sistemas térmicos aplicados na produção de potência, resfriamento e aquecimento.

Entre os autores dos estudos identificados, somente um autor publicou mais de um trabalho na mesma temática de avaliação termoeconômica e ambiental, utilizando as ferramentas de análise exergética e de ACV para estudar sistemas térmicos (Chen *et. al.*, 2021; Chen *et. al.*, 2022). Assim, entende-se que a análise a respeito do assunto tem sido evidenciada na literatura, mas que ainda não se esgotaram as discussões.

Esta observação se justifica, quando se considera o lapso temporal do recorte da RSL, no qual os trabalhos identificados apresentaram uma distribuição regular de publicações ao longo dos anos do recorte temporal definido nesta pesquisa. O ano de 2022 se destacou como o período com mais trabalhos publicados, totalizando três artigos (Abreu *et al.* 2022; Wenzel; Radgen, 2022; Chen, 2022).

Já o ano de 2020 apresentou somente um trabalho (Wang, 2020), mantendo sempre a tendência referente à temática do uso da análise exergética e de ACV como ferramenta de avaliação aplicada a processos de transformação de fontes energéticas em potência, resfriamento e calor e os impactos ambientais gerados por estes.

De acordo com a avaliação dos trabalhos identificados, observa-se que há o uso por parte dos autores de metodologias consagradas de avaliação termoeconômica e ambiental de sistemas térmicos nas mais variadas aplicações, desde plantas de trigeração a análise de equipamentos.

Também há estudos propondo metodologias com combinações alternativas entre os métodos de avaliação, objetivando tornar as análises mais acuradas com resultados mais refinados e personalizadas para um objeto de estudo específico.

No Quadro 3.1, é detalhada a relação dos trabalhos identificados nesta RSL, ordenados de forma crescente consoante o ano de publicação.

Quadro 3.1 - Relação dos estudos teóricos e experimentais identificados para RSL.

Título	Ano	Journals	Fator de Impacto (JCR)	Autores
<i>Life cycle assessment and comparative exergoenvironmental evaluation of a micro-trigeneration system</i>	2018	Energy	8,857	Adriano S. Marques; Monica Carvalho; Alvaro A.V. Ochoa; Raphael Abrahao; Carlos A.C. Santos
<i>An integrated approach based on Life Cycle Assessment and Thermoconomics: application to a water-cooled chiller for an air conditioning plant</i>	2018	Energy	8,857	P. Catrini, M. Cellura; F. Guarino; D. Panno, A. Piacentino
<i>A comprehensive exergy-based evaluation on cascade absorption-compression refrigeration system for low temperature applications - exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental assessments</i>	2019	Journal of Cleaner Production	11,072	Seyed Ali Mousavi; Mehdi Mehrpooya
<i>Advanced exergy, exergo-economic and exergo-environmental analyses of a solar based trigeneration energy system</i>	2019	Applied Thermal Engineering	6,465	Hadis Montazerinejad; Pouria Ahmadi; Zeynab Montazerinejad
<i>Environmental impact assessment of office building heating and cooling sources: A life cycle approach</i>	2020	Journal of Cleaner Production	11,072	Chendong Wang; Anqi Xu; Shifei Jiao; Zhihua Zhou; Debao Zhang; Junwei Liu; Jihong Ling; Feng Gao;

				Raufdeen Rameezdeen; Like Wang; Yuan Wang; Jian Zuo
<i>Exergo-economic assessment and sensitivity analysis of a solar-driven combined cooling, heating and power system with organic Rankine cycle and absorption heat pump</i>	202 1	<i>Energy</i>	8,857	Yuzhu Chen; Jinzhao Xu; Dandan Zhao; Jun Wang; Peter D. Lund
<i>Performance studies of low GWP refrigerants as environmental alternatives for R134a in low-temperature applications</i>	202 1	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	5,19	Saji Raveendran Padmavathy; Murugan Paradesi Chockalingam; Nithyanandhan Kamaraj; Godwin Gliven; Venkatesh Thangaraj; Bharathiraja Moorthy
<i>Thermoeconomic and thermoenvironmental analysis of the chilled water system in a shopping mall</i>	202 2	<i>International Journal of Refrigeration</i>	4,14	Renata Portela Abreu; Victor Hugo Lobo Correia; Atílio Barbosa Lourenço; Adriano da Silva Marques; Monica Carvalho
<i>Multi-Criteria Comparison of Energy and Environmental Assessment Approaches for the Example of Cooling Towers</i>	202 2	<i>Appl. Syst. Innov.</i>	5,18	Paula M. Wenzel; Peter Radgen

<i>Techno-economic cost assessment of a combined cooling heating and power system coupled to organic Rankine cycle with life cycle method</i>	202 2	<i>Energy</i>	8,857	Yuzhu Chen; Huilian Hua; Jinzha Xu; Zhonghua Yun; Jun Wang; Peter D. Lund
---	----------	---------------	-------	--

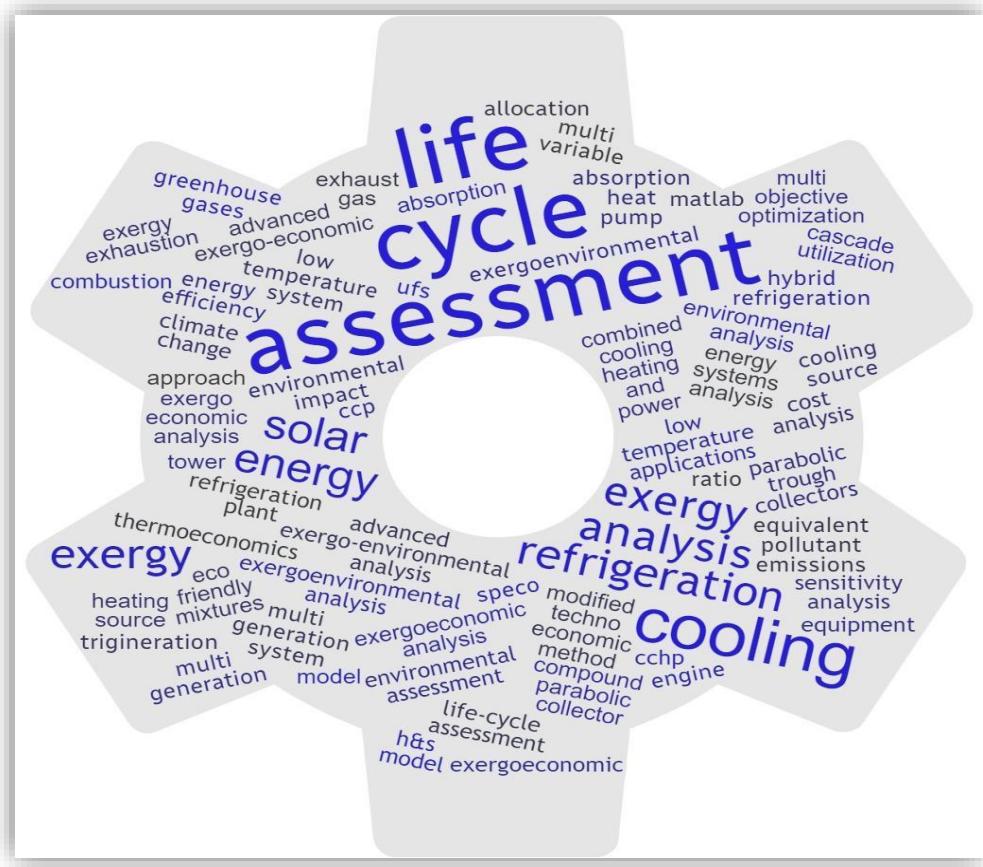
Fonte: Autoria própria (2023).

A partir da análise dos 10 artigos identificados com a RSL, observaram-se maiores discussões voltadas para os seguintes temas: Análise Exergética, Avaliação de Ciclo de Vida, Refrigeração, Resfriamento e Eficiência Energética, Avaliação Exergoeconômica e Exergoambiental, que serão abordados de forma mais pormenorizada na próxima seção, na apresentação qualitativa dos trabalhos identificados na presente revisão sistemática.

Para uma melhor visualização dos temas identificados, procedeu-se à construção de uma nuvem de palavras, sendo utilizadas as palavras-chave contidas nos 10 artigos analisados. Destaca-se que a repetição das palavras nos artigos está relacionada com o tamanho, de modo que, quanto maior o tamanho da palavra na nuvem, mais vezes ela apareceu entre os 10 artigos selecionados.

Dessa forma, as palavras em evidência dão ênfase para maior compreensão dos principais assuntos levantados nos artigos triados, conforme ilustrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Nuvem de palavras dos temas dos artigos.



Fonte: Autoria própria (2023).

É oportuno salientar que com a nuvem de palavras formada percebeu-se a recorrência dos termos para: Avaliação de Ciclo de Vida, Resfriamento, Análise Exergética, Exergia e Energia Solar. Outras palavras-chave como: Emissões, Plantas de Refrigeração, Trigeração, Exergoeconomia e Exergoambiental também são recorrentes na nuvem e nos trabalhos, demonstrando, assim, o alinhamento dos estudos com o tema desta RSL.

3.3.2 Apresentação dos estudos identificados na pesquisa

A seguir, são apresentados por ordem temporal os dez estudos identificados a partir da elaboração desta revisão sistemática, que teve como foco as principais discussões sobre a análise exergética e avaliação de ciclo de vida para sistemas de refrigeração. De forma sumária, serão apresentados os objetivos, métodos de coleta de dados, resultados e as principais contribuições para cada um dos dez estudos.

Marques *et al.* (2018) realizaram um estudo comparativo de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e exergoambiental de um sistema de microtrigeração a gás natural. Para a

avaliação de ACV, utilizaram duas metodologias, o Eco-indicator 99 e o ReCiPe. Para tanto, os dados ambientais foram estimados através do levantamento de fluxos energéticos dos equipamentos do sistema, os quais serviram como base para a análise exergética detalhada utilizada na avaliação exergoambiental.

Como resultado, o estudo desenvolveu um modelo de avaliação exergoambiental para o sistema de microtrigeração, além de um estudo comparativo entre as metodologias utilizadas na etapa de ACV. Embora os resultados apresentem magnitudes diferentes na quantificação do impacto ambiental associado ao sistema, eles indicam um comportamento semelhante.

Em ambos os casos, os principais pontos de melhoria estão focalizados nos equipamentos com maior potencial de destruição exergética, como o Motor a Combustão Interna (MCI) e o gerador de vapor, que também se destacaram pelo maior custo energético e exergético na avaliação exergoambiental.

Já Catrini *et al.* (2018) desenvolveram um estudo integrado baseado no método de avaliação TEC-LCA, aplicado a um Chiller refrigerado a água para fins de climatização. O estudo teve como objetivo aplicar a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) aliada à termoeconomia como ferramenta para analisar o perfil exergoambiental de sistemas energéticos, utilizando as capacidades das duas técnicas para avaliar simultaneamente os aspectos termodinâmicos dos processos de conversão de energia e os impactos ambientais associados ao ciclo de vida do equipamento.

A metodologia delineada pelos autores focou em contabilizar os custos exergéticos, para tanto, realizaram um balanço exergético dos fluxos de energia do sistema como um todo. A análise exergética, por sua vez, abriu caminho para a análise termoeconômica, onde foram quantificados os custos associados aos fluxos exergéticos relacionados com os recursos consumidos e produtos gerados pelo sistema.

Para as análises da primeira e segunda lei, os autores utilizaram o *software Engineering Equation Solver* (EES) e o simulador de planta térmica *IMST-ART®*. Esses recursos permitiram modelar a transferência de calor entre a água e o fluido refrigerante no circuito evaporador-condensador. A etapa de ACV foi baseada segundo a série ISO 14040 para avaliar e quantificar os impactos ambientais gerados pelo Chiller ao longo do seu ciclo de vida.

O estudo trouxe como resultados avaliações de cenários de funcionamento com o Chiller em plantas térmicas modificadas, considerando a tecnologia e planos de manutenção distintos. Conclui-se que o método de abordagem integrada TEC-LCA fornece uma visão

abrangente dos impactos ambientais através da contabilização de ACV e custos termoeconômicos para sistemas de conversão de energia. Os cenários que apresentaram os impactos mais significativos foram aqueles em que a torre de resfriamento estava subdimensionada na etapa de construção e a manutenção precarizada para a etapa de uso. Além disso, observou-se que a adoção de uma matriz energética descarbonizada contribui em até 70% para a redução dos indicadores associados à ACV (Catrini *et al.*, 2018).

Mousavi e Mehrpooya (2019) realizaram um estudo abrangente a respeito de um novo sistema de refrigeração por absorção-compressão em cascata, onde avaliaram, através da avaliação exergética, o processo de refrigeração em sua totalidade, em que conseguiram estimar a eficiência exergética total, taxa de destruição de exergia global e coeficiente de desempenho do sistema.

Para realizarem o estudo, os autores simularam o sistema em *softwares* combinados, onde analisaram detalhadamente os fluxos exergéticos através de balanços de massa e energia. A avaliação exergoambiental foi baseada na ACV utilizando o Ecoindicador 99, considerando o período de vida útil do sistema. Já a avaliação exergoambiental foi feita através da análise do custo de aquisição e operação do equipamento.

Como resultado, identificaram fontes de irreversibilidades associadas ao sistema devido ao compressor e trocadores de calor, assim como pontos de otimização, através da avaliação paramétrica que realizaram, tendo estas irreversibilidades impactado significativamente nos resultados das avaliações exergoeconômicas e ambientais. Além disso, os autores comprovaram neste estudo a viabilidade do uso de análises paramétricas como ferramenta avançada para avaliar sistemas de absorção-compressão em cascata para fins de refrigeração.

Montazerinejad, Ahmadi e Montazerinejad (2019), propuseram um novo sistema que combina resfriamento, aquecimento e energia (*Combined Cooling, Heating and Power - CCHP*) através do uso da energia solar. O sistema foi analisado sob o ponto de vista termodinâmico e termoeconômico, incluindo avaliações exergéticas, exergoeconômicas e exergoambientais. Para isso, os autores desenvolveram códigos no *software Engineering Equation Solver* (EES), realizaram a análise exergética e identificaram que o tanque de armazenamento possui a maior taxa de destruição de exergia e o maior custo associado a essa de destruição.

Wang *et al.* (2020) desenvolveram uma avaliação de impacto ambiental de fontes de aquecimento e refrigeração em edifícios empresariais, objetivando, através destas investigações, auxiliar os projetistas a escolherem com maior assertividade fontes de

aquecimento e resfriamento ecologicamente corretas e economicamente viáveis, além de contribuir para a formulação de políticas de incentivo para o uso de fontes de energia sustentáveis junto às entidades governamentais.

Os autores escolheram um prédio comercial em Tianjin, China, o qual era equipado com um sistema de climatização. Com isso, selecionaram sete fontes energéticas para avaliar e comparar os impactos ambientais associados a cada fonte em diferentes combinações de uso, de forma a verificar a mais economicamente viável e ambientalmente mais sustentável para o uso no prédio. Para realizar as avaliações, os autores efetuaram análises de primeira e segunda lei e extraíram a taxa de eficiência térmica e exergética das fontes e a partir desses resultados, basearam a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

Os resultados do estudo mostraram que as análises exergéticas das fontes de aquecimento e resfriamento selecionadas evidenciaram que as taxas de eficiência para o aquecimento são显著mente maiores em relação às de resfriamento, devido aos distintos poderes caloríficos das fontes energéticas (óleo, gás e carvão) e às diferenças entre as quantidades de energia consumida para suprir as demandas térmicas da edificação.

Em relação aos impactos ambientais, o estudo traz resultados importantes, já que indica as melhores combinações entre as fontes e sistemas disponíveis, demonstrando que sistemas de cogeração a gás e bombas de calor com fonte geotérmica combinados a sistema de refrigeração convencional resultaram nas melhores opções em relação à eficiência térmica, econômica e de impacto ambiental associado (Wang *et al.*, 2020).

Chen *et al.* (2021) realizaram uma avaliação exergoeconômica e de sensibilidade para um sistema combinado de refrigeração, aquecimento e energia CCHP movido a energia solar acoplado ao ciclo orgânico de Rankine (ORC) e uma bomba de calor por absorção (AHP). Para o desenvolvimento do estudo, foram feitas modelagens matemáticas do sistema e dos seus parâmetros de funcionamento, como também as considerações termodinâmicas aplicadas.

Esta modelagem foi necessária para efetuar a avaliação exergética do sistema, onde, através do balanço de massa e energia, seus resultados serviram como base para as avaliações exergoeconômica, que ao utilizar o método do retorno simples, possibilitou estimar os custos associados ao sistema.

Os autores também efetuaram simulações através do *Software Energy Plus*, utilizando parâmetros climáticos da região de Pequim, China, como irradiação solar e temperaturas médias anuais, de forma a simular cenários distintos e combinados das

condições de trabalho do sistema em consequência da demanda térmica da edificação na qual o sistema equipa ao longo do ano.

O estudo de Chen *et al.* (2021), mostrou que o sistema apresenta eficiência energética mais baixa e eficiência exergética máxima operando no modo de resfriamento – demanda de refrigeração, ao passo que operando no modo de aquecimento, exibe eficiência energética máxima e, operando de forma híbrida, apresenta baixas eficiências energética e exergética.

Os resultados do estudo mostram que a unidade AHP que equipa o sistema de trigeração tem sua eficiência melhorada quando utiliza calor proveniente do aquecimento solar e da fonte geotérmica, com COP entre 1,38 e 2, dependendo do modo de operação, como também concluiu que o custo exergético específico do sistema como um todo é da ordem de 0,31 \$/kWh, além de possuir um *payback* de 3,5 anos.

Padmavathy *et al.* (2021) realizaram um estudo comparativo para o desempenho energético e de potencial de emissões de gases de efeito estufa para diferentes misturas ecológicas de fluido refrigerantes com baixo GWP (*Global Warming Potential*) como alternativa ao uso do R134a. O objetivo era indicar, através de simulações e testes experimentais com diferentes misturas de fluidos refrigerantes, um fluido equivalente ao R134a que possuísse baixo GWP. Assim, desenvolveram modelagens matemáticas dos balanços de massa e energia para um sistema de refrigeração doméstico avaliando a eficiência energética e exergética através de simulações de cenários de funcionamento e composição com diversos fluidos refrigerantes, através dos *Softwares* MATLAB E REFPROP. Em paralelo, realizaram testes experimentais com refrigerador doméstico das misturas analisadas, foram selecionadas as consideradas menos poluentes.

Os resultados obtidos denotam que entre as misturas R1234ze/R134a observou-se a melhora do COP em até 20% comparado ao R134a, apesar da melhora da eficiência exergética em até 16% e queda da irreversibilidade geral do sistema em 12,4%.

Para além disso, em relação aos índices de TEWI (*Total Equivalent Warming Impact*), o R1234ze/R134a apresentou desempenho melhor que o R134a, demonstrando ser um bom substituto deste em aplicações de baixa temperatura e sendo capaz de atender às expectativas do Protocolo de Montreal e Quioto referente às emissões de GWP (Padmavathy *et al.*, 2021).

Abreu *et al.* (2022) realizaram uma avaliação de um sistema de Chillers para produção de água gelada em um *Shopping Center*, combinando avaliação termoeconômica e termoambiental para estimar os custos energéticos, financeiros e ambientais relacionados com o processo de produção de frio para fins de climatização.

Para avaliar a central de água gelada da edificação, utilizaram os dados operacionais da planta durante a etapa de coleta de dados na planta objeto de estudo, como também se basearam nos dados técnicos dos equipamentos constituintes do sistema, onde puderam determinar pela análise exergética através do *software Engineering Equation Solver* (EES) a avaliação exergoeconômica os custos monetários associados à produção de água gelada.

Por outro lado, o estudo termoambiental foi desenvolvido através da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), baseando-se na norma ISO 14040 e utilizando o *software SimaPro®* e o banco de dados *Ecoinvent* para estimar o impacto ambiental associado ao processo produtivo da produção dos equipamentos do sistema até seu descarte.

O estudo trouxe como resultado os quantitativos relativos aos custos energéticos, financeiros e ambientais devidos à atividade, como também apresentou a viabilidade da aplicação combinada da avaliação termoeconômica e ambiental focada em análise de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) em um caso real de produção e armazenamento de água gelada para fins de condicionamento térmico de uma edificação de grande porte, além de disseminar através dos resultados do estudo a abordagem utilizada como alternativa viável para avaliar outros sistemas de refrigeração (Abreu *et al.*, 2022).

Wenzel e Radgen (2022) efetuaram uma análise multicritério comparando as abordagens dos métodos de avaliação exergéticas e ambientais utilizando torres de resfriamento como objeto de estudo. O trabalho elaborou critérios de comparação sistemáticos adequados ao equipamento e posteriormente usou tais critérios como comparativo entre análise de fluxo de material, análise de energia, inventário e Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), pegada ambiental, análise exergética, entre outros.

Os autores realizaram uma revisão comparada entre os estudos das abordagens baseadas em critérios para métodos de avaliação de energia e ambientais aplicados a sistemas de refrigeração, classificando através de um fluxograma lógico os objetivos, critérios, adequações, conhecimento, exame dos métodos de análise e ponderações necessárias relacionadas ao objeto de estudo e classificando os resultados encontrados.

Através dos critérios relacionados à ACV, Wenzel e Radgen (2022) desenvolveram em seu estudo, um método mais adequado para avaliação energética e ambiental para torres de resfriamento, onde foi observado que a área de aplicação, perspectiva de ciclo de vida, quantidades físicas inventariadas, categorias de impacto e análise de eficiência são os principais fatores que influenciam fortemente na aplicação das metodologias de avaliação energética e ambiental.

Como resultado principal, o estudo mostrou que a avaliação multicritério, combinando sistematicamente os métodos de avaliação energética e ambiental, levando em consideração os objetivos específicos de cada caso podem ser utilizados e, consequentemente, para o estudo de caso em questão, os métodos que compreendem a avaliação de fluxos energéticos através da análise exergética, são os mais adequados.

Chen *et al.* (2022) propuseram um método técnico-econômico modificado combinado com Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), utilizando como objeto de estudo um sistema de trigeração acionado por um motor de combustão interna acoplado a uma unidade de Ciclo Rankine equipada com um trocador de calor por absorção. Para isso, utilizaram critérios e indicadores de avaliação relacionados com a energia/exergia, meio ambiente e economia, uma vez que o método proposto leva em consideração todos estes fatores.

A partir daí, desenvolveram modelos térmicos para avaliar a eficiência térmica e exergética do sistema em sua totalidade, como também seus componentes em separado.

Já para quantificar o desempenho ambiental do sistema, usaram o método de avaliação do berço ao túmulo para quantificar as contribuições relacionadas com as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) devidas à matéria-prima, construção dos componentes e sistema, operação, reciclagem do material após o fim da vida útil, transporte e consumo de combustíveis.

Também utilizaram o método de emissões equivalentes para quantificar o impacto relacionado com as emissões de poluentes no meio ambiente relativo à operação do sistema para cada tipo de combustível analisado.

Já para a avaliação termoeconômica, fizeram o uso da metodologia convencional, combinando o custo equivalente de emissão oriundo da ACV. Os resultados mostraram, através da análise detalhada do sistema, que a etapa de operação deste é a responsável pelo maior consumo de combustível.

Além disso, constataram que o custo específico da eletricidade gerada por este sistema é o menor, 0,145 \$/kWh, enquanto o custo referente à produção de frio é o maior, 0,663 \$/kWh, e que o custo da produção de energia através do ORC é menor do que o do ICE.

Assim, a partir dos resultados obtidos, o método proposto para avaliar este sistema energético é viável, apresentando-se como uma ferramenta eficaz para avaliar sistemas similares, de modo a contribuir com o consumo racional da energia concomitante com menores impactos ambientais e custos econômicos (Chen *et al.*, 2022).

Finalmente, a partir da análise dos artigos verificou-se que as discussões se concentram na avaliação exergética como análise inicial para investigações mais detalhadas do ponto de vista termodinâmico, principalmente com a combinação de critérios ambientais.

Reconhecendo que a sustentabilidade é um termo que engloba aspectos sociais, econômicos e ambientais, a maioria das ferramentas para quantificar a sustentabilidade envolve indicadores baseados em fluxos de energia.

Deste modo, o potencial da combinação da análise exergética e de ciclo de vida no tratamento de questões de sustentabilidade e na solução de problemas ambientais é considerável.

3.4 CONCLUSÃO

A partir da análise dos artigos observou-se, com a revisão sistemática, que as discussões atuais se concentram na análise exergética como ferramenta de partida para investigações exergoambiental e exergoeconômicas de sistemas térmicos de potência, aquecimento e resfriamento.

Os trabalhos identificados na RSL abordaram tanto o uso de métodos consagrados de avaliação termoeconômica e ambiental por meio da análise exergética, combinação de metodologias de avaliação e até mesmo a elaboração de métodos derivados dos métodos tradicionais.

A análise dos estudos identificados mostrou uma tendência para pesquisas relacionadas com a aplicação de métodos de avaliação exergoeconômicos e ambientais modificados para melhor explorar variáveis e especificidades dos sistemas térmicos de potência, aquecimento e resfriamento.

De modo a contribuir com maior assertividade nas avaliações quando comparados aos métodos tradicionais, evidencia-se a versatilidade e importância da combinação e modificação das metodologias de avaliação como meio para obtenção resultados de eficiência térmica, econômica e ambiental mais precisos.

A contribuição deste trabalho foi demonstrar, através dos estudos identificados, os desdobramentos das pesquisas atuais relacionadas com a aplicação das metodologias de avaliação termoambientais e termoeconômicas para sistemas térmicos, em especial para a refrigeração industrial.

Assim, foi demonstrada a importância da temática como parte dos esforços para o uso racional da energia, aumento de eficiência térmica, mitigação e/ou racionalização de impactos ambientais e econômicos associados à operação destes sistemas.

Dessa forma, os estudos retornados e que foram selecionados para análise destacam a importância de direcionar maiores investigações para a temática da análise exergética, aliada às avaliações termoeconômicas e ambientais como ferramenta de diagnóstico de sistemas térmicos de potência, aquecimento e resfriamento, objetivando aumento de eficiência energética, econômica e ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABREU, R. P. *et al. Thermo-economic and thermoenvironmental analysis of the chilled water system in a shopping mall.* International Journal of Refrigeration, volume 134, 2022, Pages 304-311, ISSN 0140-7007. doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.11.011.
- AGUINIS, H.; RAMANI, R. S.; ALABDULJADER, N. **What You See Is What You Get? Enhancing Methodological Transparency in Management Research.** Academy of Management Annals, 12(1), 83–110, 2018. doi:10.5465/annals.2016.0011.
- ALROBAIAN, A. A. **Impact of optimal sizing and integration of thermal energy storage in solar assisted energy systems.** Renewable Energy, Elsevier, vol. 211(C), pages 761-771, 2023. doi: 10.1016/j.renene.2023.05.010.
- ALSAMAN, A.S. **Hybrid Solar-Driven Desalination/Cooling Systems: Current Situation and Future Trend.** *Energies.* 15(21):8099, 2022. doi: doi.org/10.3390/en15218099.
- ANTOINE. P. *et al. Thermodynamic performance's analysis of a cold production by hybrid compressor-based thermochemical sorption processes using ammoniated salts.* Energy Conversion and Management, volume 267, ISSN 0196-8904, 2022. doi: doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115931.
- BRERETON, *et al. Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain.* Journal of Systems and Software, 80(4), 571–583, 2007. doi: 10.1016/j.jss.2006.07.009.
- CATRINI *et al. An integrated approach based on Life Cycle Assessment and Thermoconomics: Application to a water-cooled chiller for an air conditioning plant.* Energy, 160, 72–86, 2018. doi: 10.1016/j.energy.2018.06.223.
- CHEN, Y. *et al. Techno-economic cost assessment of a combined cooling heating and power system coupled to organic Rankine cycle with life cycle method.* Energy, 239, 121939, 2022. doi: 10.1016/j.energy.2021.121939.

CHEN *et al.* **Exergo-economic assessment and sensitivity analysis of a solar-driven combined cooling, heating and power system with organic Rankine cycle and absorption heat pump.** Energy, 230, 120717, 2021. doi: 10.1016/j.energy.2021.120717.

COLAKOGLU, M.; DURMAYAZ, A. **Energy, exergy, economic and emission saving analysis and multiobjective optimization of a new multi-generation system based on a solar tower with triple combined power cycle.** Sustainable Energy Technologies and Assessments, volume 52, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102289>.

FU, C.; SHEN, Q.; WU, T. **Exergo-economic comparisons of solar cooling systems coupled to series/parallel absorption chiller types considering the lowest heat transfer area.** Case Studies in Thermal Engineering, volume 39, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102456>.

IBRAHIM, T. K. *et al.* **A comprehensive review on the exergy analysis of combined cycle power plants.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 90, Pages 835-850, ISSN 1364-0321, 2018. DOI: doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.072.

KITCHENHAM, B. **Procedures for Undertaking Systematic Review.** Joint Technical Report, Computer Science Department, Keele University and ICT National Australia, 2004.

LIU, X. *et al.* **Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of an integrated process combining CO₂ capture and storage, an organic Rankine cycle and an absorption refrigeration cycle.** Energy Conversion and Management, volume 210, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112738>.

MARQUES *et al.* **Life cycle assessment and comparative exergoenvironmental evaluation of a micro-trigeneration system.** Energy, 216, 119310, 2021. doi: [10.1016/j.energy.2020.119310](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119310).

MONTAZERINEJAD, H.; AHMADI, P.; MONTAZERINEJAD, Z. **Advanced Exergy, Exergo-economic and Exrgo-environmental analyses of a Solar based Trigeneration Energy System.** Applied Thermal Engineering, 2019. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2019.119005](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.119005).

MOUSAJI, S. A.; MEHRPOOYA. **A comprehensive exergy-based evaluation on cascade absorption-compression refrigeration system for low temperature applications - exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental assessments.** Journal of Cleaner Production, 246, 119005, 2020. doi: [10.1016/j.jclepro.2019.119005](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119005).

PADMAVATHY *et al.* **Performance studies of low GWP refrigerants as environmental alternatives for R134a in low-temperature applications.** Environmental Science and Pollution Research, 2021. doi: [10.1007/s11356-021-15875-2](https://doi.org/10.1007/s11356-021-15875-2).

RANDAZZO, T.; CIAN, E.; MISTRY, M. N. **Air conditioning and electricity expenditure:** The role of climate in temperate countries, Economic Modelling, volume 90, 2020. doi: doi.org/10.1016/j.econmod.2020.05.001.

SADI, M.; ARABKOOHSAR, A. **Techno-economic analysis of off-grid solar-driven cold storage systems for preventing the waste of agricultural products in hot and humid climates.** Journal of Cleaner Production, volume 275, 2020. doi: doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124143.

SAINI, S. K. *et al.* **Comparative study of Exergetic and Economic analysis of Multi-evaporator NH₃ and NH₃-CO₂ CRS for a Seafood Processing Plant.** International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 2130, 2021. <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/2130>.

TEREHOVICS, E. *et al.* **Analysis of fish refrigeration electricity consumption,** *Energy Procedia.* volume 147, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.084>.

ZANDI, S. *et al.* **Energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analyses and multi-objective optimization of a CPC driven solar combined cooling and power cycle with different working fluids.** *International Journal of Thermodynamics*, 24 (2), 151-170, 2021. doi: 10.5541/ijot.873456.

WANG *et al.* **Environmental impact assessment of office building heating and cooling sources:** A life cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 121140, 2020. doi: [10.1016/j.jclepro.2020.121140](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121140).

WENZEL, P. M.; PETER, R. **Multi-Criteria Comparison of Energy and Environmental Assessment Approaches for the Example of Cooling Towers.** *Applied System Innovation*, n. 5, 89, 2022. doi.org/10.3390/asi5050089.

ZHU, Y. D. *et al.* **Thermodynamic analysis of a novel multi-target-temperature cascade cycle for refrigeration.** *Energy Conversion and Management*, volume 243, 2021. doi: doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114380.

WU, W. *et al.* **Environmental trade-offs in fresh-fruit cold chains by combining virtual cold chains with life cycle assessment.** *Applied Energy*, volume 254, 2019. doi: doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113586.

CAPÍTULO IV

4 ARTIGO: ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UM SISTEMA REFRIGERAÇÃO APLICADO A UMA PLANTA DE ACONDICIONAMENTO TÉRMICO DE PRODUTOS HORTIFRUTÍCOLAS

RESUMO

O presente estudo realizou uma avaliação termodinâmica de uma planta frigorífica destinada ao acondicionamento térmico de uvas na região do Submédio Vale do São Francisco. A planta, composta por túneis de resfriamento, câmaras frias e instalações auxiliares, opera com sistemas de refrigeração por compressão de vapor, utilizando o fluido refrigerante R22. Os dados operacionais foram coletados durante o período de safra de verão, sob condições de elevada temperatura ambiente, e analisados por meio de modelagem computacional no software *Engineering Equation Solver* (EES). Os resultados indicaram desempenhos térmicos e exergéticos significativamente inferiores aos estimados em projeto. O coeficiente de desempenho (COP) apresentou reduções de até 41% nos túneis de resfriamento e 54% nas câmaras frias, em relação aos valores de projeto. A eficiência exergética global da planta foi de 23%, com destaque para os túneis 01, 03 e 04, e câmaras 02 e 04, cujas eficiências ficaram abaixo de 20%. A análise exergética evidenciou que os evaporadores e condensadores foram responsáveis por 67% da destruição total de exergia na planta. As principais causas identificadas para os baixos rendimentos foram a obsolescência dos equipamentos (com mais de 25 anos de operação), deficiências nas manutenções, elevadas cargas térmicas e falhas nos procedimentos operacionais, como infiltração de calor durante operações de carga e descarga dos espaços refrigerados. Assim, conclui-se que há necessidade urgente de modernização dos sistemas frigoríficos, com foco na substituição de trocadores de calor, aprimoramento do isolamento térmico e melhorias na gestão operacional da planta. Essas ações são fundamentais para aumentar a eficiência energética e exergética, reduzir custos operacionais e mitigar os impactos ambientais decorrentes do elevado consumo de energia demandado pela planta de refrigeração.

Palavras-chave: Refrigeração; Análise exergética; Eficiência energética; Cadeia do frio; Conservação pós-colheita.

4.1 INTRODUÇÃO

A região do Submédio Vale do São Francisco, localizada na divisa entre Bahia e Pernambuco, no Nordeste do Brasil, é destaque internacional na produção de produtos hortifrutícolas, com ênfase no cultivo de uvas. Sua característica singular de permitir duas safras anuais impulsiona a produção, que, em 2024, atingiu 58,9 mil toneladas, gerando uma receita estimada em US\$ 151,4 milhões (EMBRAPA, 2024).

De acordo com Zheng e Cao (2020), a demanda por sistemas de refrigeração para diversas aplicações nos processos produtivos é constante e, ao longo dos últimos anos, tem apresentado um aumento significativo, devido às necessidades das cadeiras produtivas, em especial para as cadeias do frio de produtos alimentícios (AL KHIRO; BOUKHANOUF, 2025).

Segundo Tomar e Pradhan (2024), o aquecimento global, o crescimento populacional e o aumento da produção de alimentos são fatores que impactam diretamente a demanda de produção de frio nas cadeias produtivas desses produtos. Assim, as alterações climáticas têm provocado uma elevação significativa das temperaturas médias em diversas regiões do globo, tornando a dependência de sistemas de refrigeração para o acondicionamento térmico de produtos alimentícios uma necessidade constante (FORTE *et al.*, 2025).

Neste contexto, conforme Xu *et al.*, (2024), observa-se, nos últimos anos, o aumento gradual da demanda por espaços refrigerados para o acondicionamento térmico de produtos alimentícios em consonância ao crescimento da produção de alimentos. Por consequência, a necessidade de câmaras frias e túneis de resfriamento se torna premente, pois essas instalações são responsáveis pela conserva térmica dos produtos hortifrutícolas durante a etapa de produção até a sua oferta aos mercados consumidores.

No setor agroalimentício, a cadeia do frio desempenha um papel fundamental na produção como um todo. De acordo com Han *et al.*, (2021), ela é importante, pois garante a conserva dos produtos hortifrutícolas através do controle térmico, como também contribui para a preservação da qualidade destes produtos por mais tempo. Isso impacta diretamente no aumento da produção, devido à redução das perdas ocasionadas pelo processo de amadurecimento acelerado dos produtos hortifrutícolas, por exemplo (HMIDA *et al.*, 2019).

Em particular, a região do submédio Vale do São Francisco depende extensivamente de sistemas de refrigeração por compressão de vapor para armazenamento e distribuição dos produtos hortifrutícolas que produz. Há constantes investimentos por parte dos produtores

na modernização e ampliação dos espaços refrigerados para acomodar a produção em constante crescimento.

Entretanto, de acordo com D'Agaro *et al.*, (2025), apesar dos avanços tecnológicos no desenvolvimento de fluidos refrigerantes, máquinas e materiais para sistemas frigoríficos mais eficientes, bem como da produção em larga escala desses sistemas, o consumo energético demandado pela refrigeração é considerável. Segundo Terehovics *et al.*, (2018), estimativas apontam em até 70% do consumo de energia elétrica destinado ao armazenamento refrigerado, contribuindo, dessa forma, para impactos significativos do ponto de vista energético e ambiental (SAOUD *et.al.*, 2023).

Assim, Mokaya, Wakiru e Tanui (2024) destacam que algumas variáveis podem ser apontadas como fatores que elevam o consumo energético demandado por sistemas de refrigeração utilizados na cadeia de frio das agroindústrias. Entre esses fatores, incluem-se as condições de manutenção das instalações, o *layout*, os procedimentos de carga e descarga nos ambientes refrigerados, as infiltrações de ar ambiente e até mesmo sistemas subdimensionados.

Neste sentido, a avaliação termodinâmica pode ser utilizada como uma ferramenta de análise da eficiência térmica de sistemas de refrigeração por compressão de vapor (RCV). Essa metodologia permite avaliar os fluxos de massa e energia através da modelagem das equações de 1^a e 2^a leis da termodinâmica, aplicadas ponto a ponto de um sistema térmico. Dessa forma, é possível determinar as eficiências térmicas de cada equipamento constituinte, como também avaliar a eficiência térmica global do sistema térmico em questão (ALSHAMMARI, 2025)

Deste modo, através do uso da análise termodinâmica servindo como base para avaliações mais aprofundadas, como as análises exergética, exergoeconômica e exergoambiental, é possível estimar custos térmicos, energéticos, econômicos e ambientais de um determinado processo produção de frio, contribuindo assim para a otimização dos indicadores energéticos, ambientais e econômicos (ABREU *et al.*, 2022).

Este trabalho tem como objetivo avaliar termodinamicamente uma planta de refrigeração por compressão de vapor utilizada no acondicionamento térmico refrigerado pós-colheita de uvas cultivadas na região do Submédio São Francisco.

Por meio da modelagem dos fluxos e dos balanços de massa e energia nos equipamentos da planta frigorífica, o estudo busca identificar pontos críticos, analisar a eficiência térmica global de cada espaço refrigerado e propor melhorias para otimizar o

consumo energético da unidade. Essa abordagem faz parte de uma estratégia voltada para a redução das emissões de GEE nesta etapa do processo produtivo da uva.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

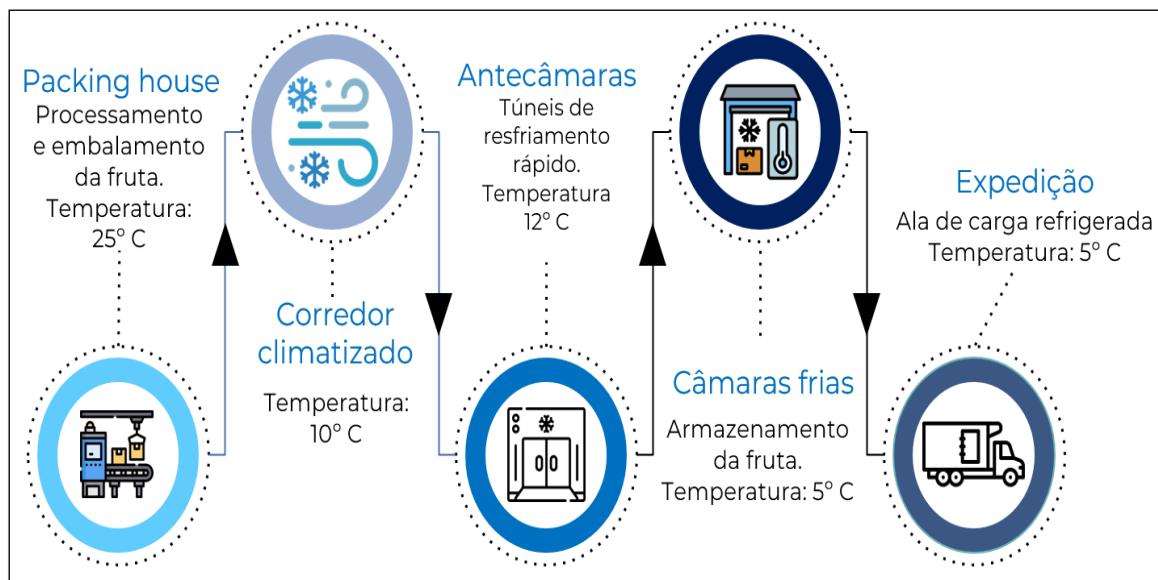
4.2.1 Descrição do Objeto de estudo

A planta de refrigeração estudada neste trabalho é utilizada para o acondicionamento refrigerado da produção de uvas de mesa pertencente a uma agroindústria instalada na zona rural da cidade de Lagoa Grande, Pernambuco, na região do Submédio Vale do São Francisco.

A instalação frigorífica é composta sistemas de refrigeração industriais (SRI's), sendo quatro Antecâmaras para resfriamento rápido das frutas e quatro Câmaras frias de médio porte para conservação de temperatura dos carregamentos da fruta, além de um corredor central e ala de expedição climatizados.

Por questões logísticas e de melhor aproveitamento térmico, a instalação frigorífica é adjacente ao *Packing house*, onde os carregamentos de uva são processados, embalados e remetidos às antecâmaras, dando início à cadeia do frio da fruta, cujo fluxo produtivo é ilustrado na Figura 4.1.

Figura 4.1- Fluxograma do processo de resfriamento das uvas.



Fonte: Autoria própria (2025).

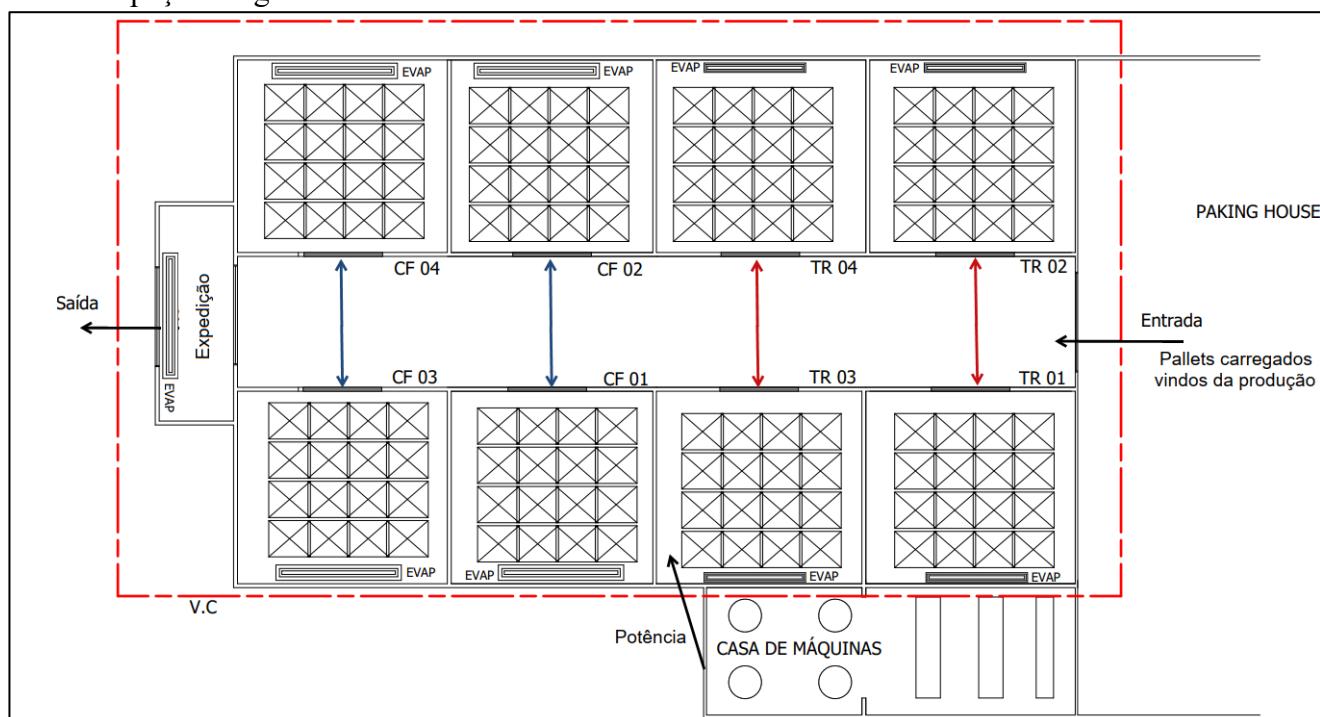
Após a saída do *Packing house*, climatizado a 25°C por um sistema de refrigeração à parte, as frutas são enviadas aos túneis de resfriamento rápido por 6 horas a 12°C, para remoção do calor remanescente das frutas processadas no *Packing* e preparo para o armazenamento refrigerado na etapa seguinte.

Nas câmaras frias, o *set point* de temperatura a 5°C é mantido constante, com umidade mínima de 80%, de modo a manter a qualidade da fruta durante o armazenamento prolongado. Nesta etapa, as frutas permanecem até o momento de seguirem viagem, sendo a área de expedição também refrigerada, a fim de manter o controle de temperatura até a entrada nos caminhões baú refrigerados.

Conforme mostrado na figura 4.1, as temperaturas em cada etapa do processo de acondicionamento térmico da fruta na agroindústria são controladas de acordo com as exigências do processo produtivo. Essas condições são essenciais para manter a qualidade das frutas, garantindo temperaturas adequadas e umidade mínima de 80% nos ambientes refrigerados.

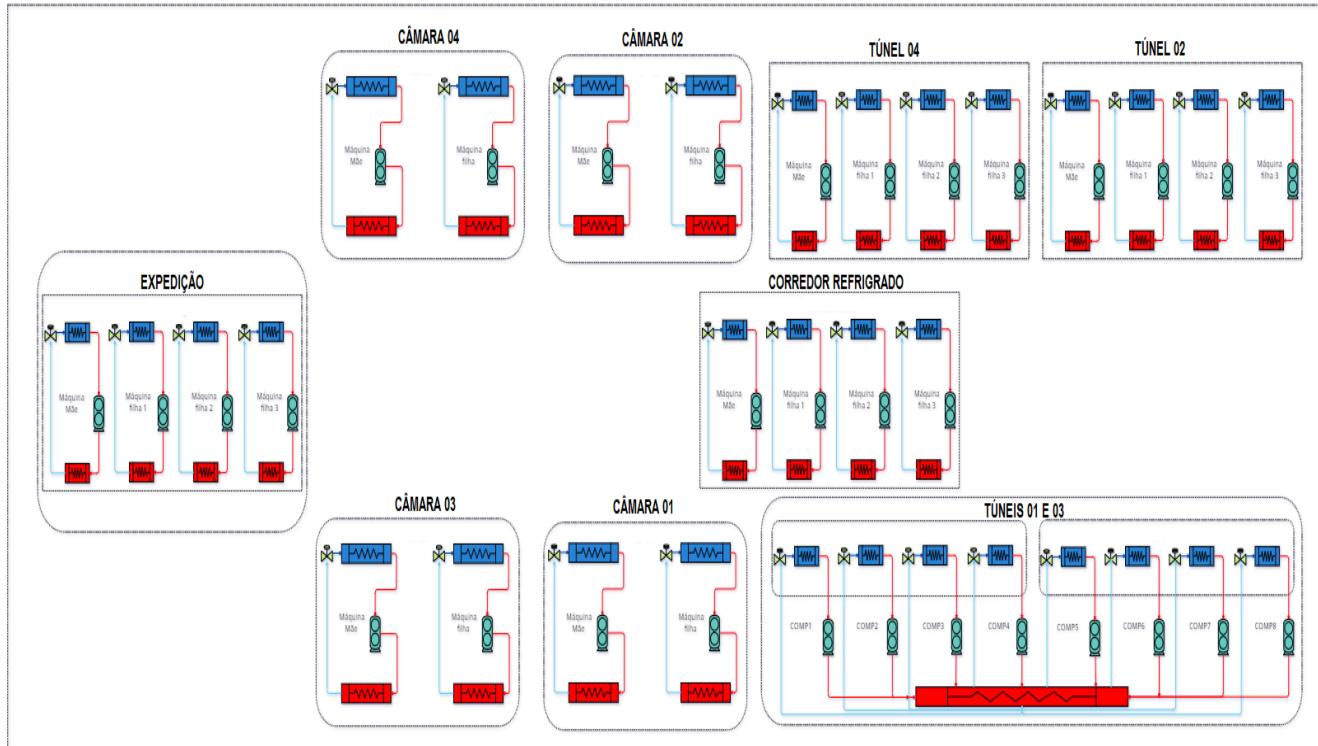
Quanto à disposição física da planta de refrigeração em respeito ao maquinário, ela é composta por nove grupos descentralizados de refrigeração por compressão de vapor, operando com fluido refrigerante R22, conforme ilustrado nas Figuras 4.2 e 4.3.

Figura 4.2 - Sistema de resfriamento das uvas – Disposição física da Planta de Refrigeração – espaço refrigerado.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 4.3 - Casa de máquinas da planta de refrigeração – disposição esquemática.



Fonte: Autoria própria (2025).

Já as unidades externas da planta encontram-se na casa de máquinas, localizadas acima do espaço refrigerado, sendo organizada da seguinte forma: as câmaras frias, o corredor refrigerado e a ala de expedição são equipadas cada um com um grupo de 20 TR (toneladas de refrigeração). Os túneis de resfriamento, por sua vez, são equipados com dois grupos de 40 TR e um grupo de 80 TR, respectivamente.

As Tabelas 4.1 e 4.2 detalham o quantitativo total de equipamentos por instalação e a capacidade total de refrigeração da planta.

Tabela 4.1 – Quantitativos totais de equipamentos da Planta de Refrigeração.

Instalações	Compressores	Condensadores	Evaporadores
Túneis de resfriamento	16	09	32
Corredor refrigerado	04	04	02
Câmara	08	08	08
Ala de Expedição	04	04	02
TOTAL	32	25	44

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 4.2 – Potências dos SRI's para acondicionamento térmico da uva.

Instalação	Potência (TR)
Túnel 01	40
Túnel 02	Rack central – 40
Túneis 03 e 04	Rack central – 80
Câmara 01	20
Câmara 02	20
Câmara 03	20
Câmara 04	20
Corredor refrigerado	20
Ala de expedição	20
Total	280 TR

Fonte: Autoria própria (2025).

As faixas de operação dos SRI's da planta, de acordo com dados dos fabricantes dos compressores Danfoss (2025), condensadores e evaporadores de conforme Mipal, (2025) foram utilizadas como parâmetros para comparação com os dados coletados nas instalações, como também na etapa de simulação numérica no EES.

As Tabelas 4.3 e 4. 4 detalham as faixas de operação dos SRI's que equipam as instalações dos túneis, câmaras frias e instalações auxiliares.

Tabela 4.3 – Dados operacionais dos SRI's: Túnel de resfriamento padrão – por máquina.

Parâmetros	Valores
Temperatura de condensação	45 a 60°C
Temperatura de evaporação	-5°C
Diferença de temperatura no evaporador	1,8°C
Temperatura de superaquecimento (médio)	18,5°C
Eficiência isentrópica do compressor	0,80
Faixa de temperatura de descarga do compressor MT64	-35 a 150°C
Capacidade de resfriamento	9,30 kW

Fonte: Autoria própria (2025).

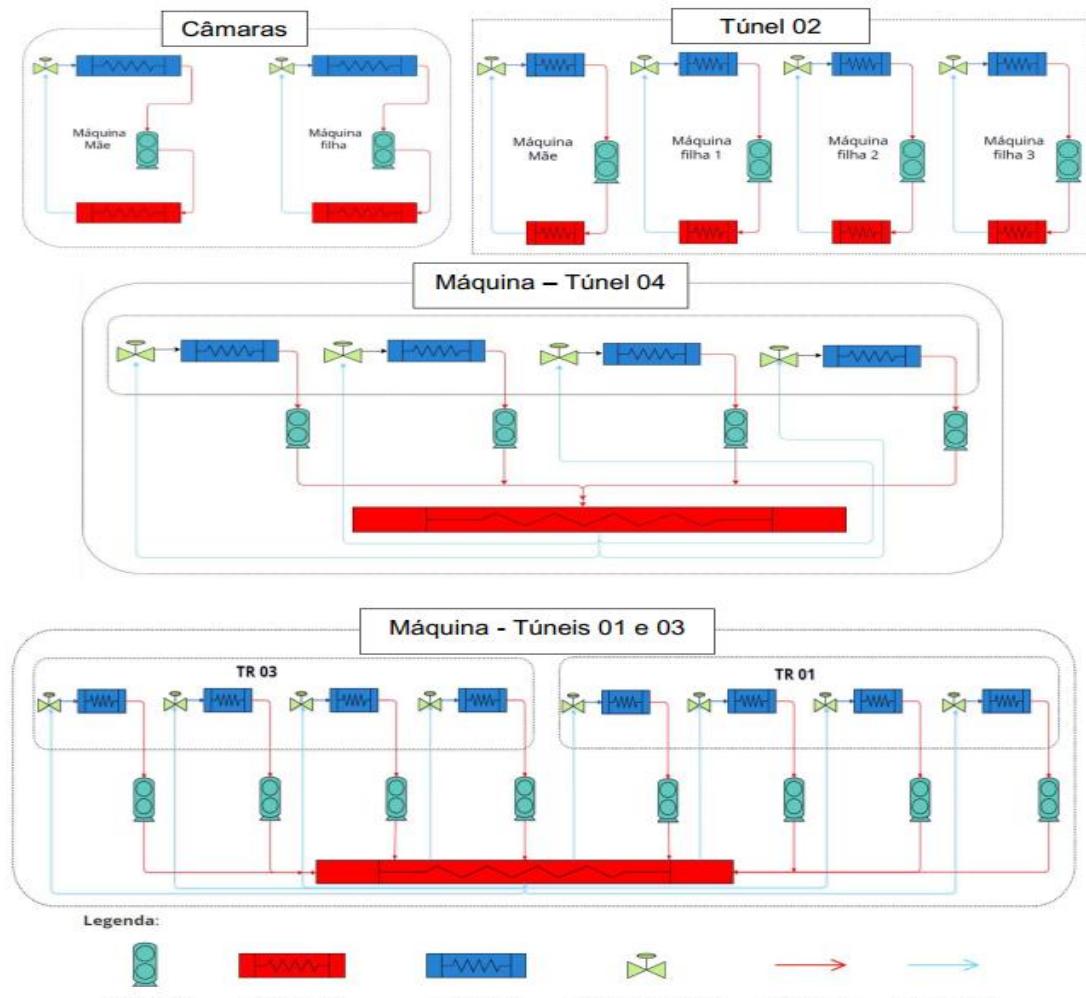
Tabela 4.4 – Dados operacionais dos SRI's: Câmara fria padrão e instalações auxiliares – por máquina.

Parâmetros	Valores
Temperatura de condensação	40 a 70°C
Temperatura de evaporação	-5°C
Diferença de temperatura no evaporador	11,8°C
Temperatura de superaquecimento (médio)	12,8°C
Eficiência isentrópica do compressor	0,80
Faixa de temperatura de descarga do compressor MT80	-35 a 150°C
Capacidade de resfriamento	36,15 kW

Fonte: Autoria própria (2025).

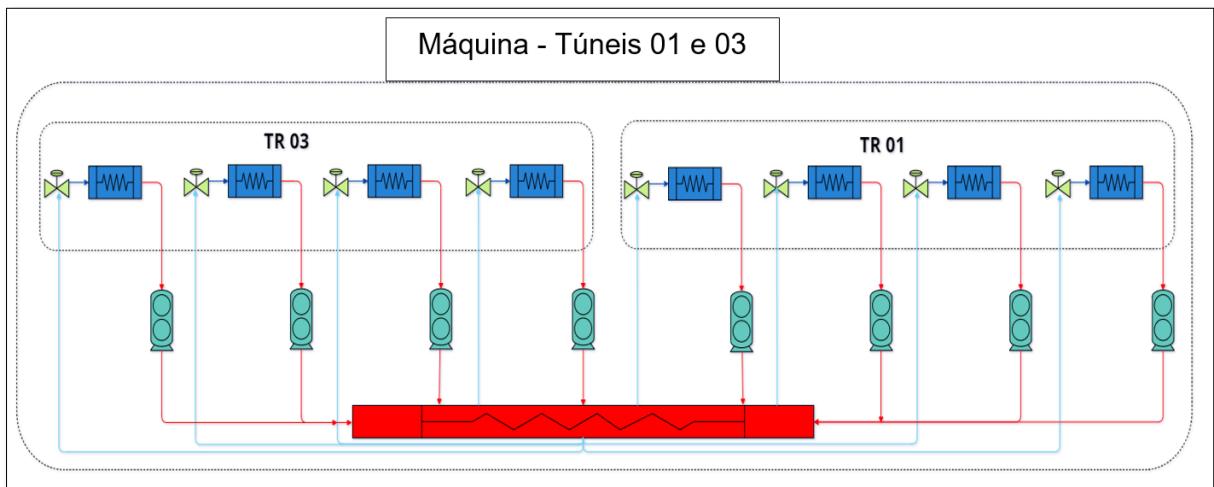
As figuras 4.4 e 4.5 demonstram os esquemas de forma simplificada dos SRI's que equipam os espaços refrigerados presentes na planta de refrigeração objeto deste estudo

Figura 4.4 - *Layout* das máquinas do sistema de refrigeração industrial para o resfriamento das uvas.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 4.5 - Esquema típico das máquinas dos Túneis 01 e 03.



Fonte: Autoria própria (2025).

Excetuando os túneis 01, 03 e 04, os demais grupos de refrigeração são constituídos por uma Unidade de Condensação (UC) e uma Unidade Evaporadora (EU) tipo Plug-in de fluxo forçado, com configuração de máquinas do tipo Mãe-filha ou mestre-escravo, sendo equipadas com compressores alternativos Danfoss MT64, evaporadores e condensadores Polifrio modelo PoliPlug.

Os túneis 01 e 03 são equipados com um grupo de rack central Climasul modelo UC 8, composto por compressores alternativos Danfoss MT80, condensador remoto a Ar Mipal modelo CDRV133NE e evaporadores Mipal modelo HDI064. Por fim, o túnel 04, é equipado com um grupo de rack central Climasul modelo UC 4, composto por compressores alternativos Danfoss MT80, condensador remoto a Ar Mipal modelo CDRV74NS e evaporadores Mipal modelo HDI064, conforme o arranjo ilustrado na Figura 4.

Em relação à demanda de energia elétrica da planta de SRI, ela é suprida pela rede de distribuição da concessionária e complementada por um moto-gerador a diesel WEG GTA 450 KVA, acionado diariamente durante o período da noite, das 18h às 21h, ou em casos de interrupção no fornecimento de energia pela concessionária.

4.2.2 Avaliação termodinâmica

Para a realização da análise termodinâmica foram coletados dados de pressão e temperatura em todos os sistemas em pleno funcionamento na planta de refrigeração, além dos dados de placa disponíves dos referidos equipamentos.

A aferição das temperaturas dos equipamentos foi efetuada por meio de um termômetro digital infravermelho, modelo MT 350a MINIPA, com escala de medição entre -50°C e 800°C . Os dados de pressão foram coletados a partir das temperaturas, utilizando a biblioteca do EES para sua determinação.

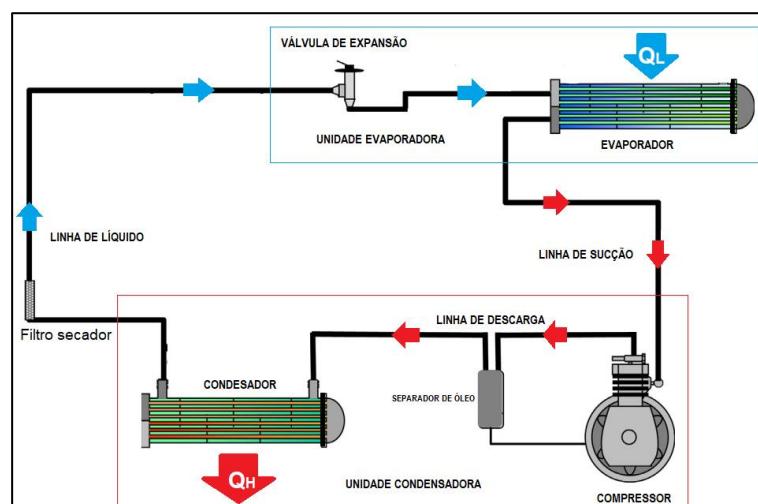
As coletas dos dados operacionais dos equipamentos foram realizadas durante a safra de verão, compreendida entre os meses de janeiro e março, período em que, além da alta demanda de refrigeração para o acondicionamento térmico da produção, ocorre o estresse térmico devido às altas temperaturas exibidas no período para a região. Esses fatores influenciam diretamente no consumo energético da planta como um todo.

Diante disso, o processo de coleta dos dados termodinâmicos operacionais da planta foi realizado com os túneis e câmaras operando em capacidade máxima, com as medições em cada grupo sendo realizadas nos períodos da manhã e da tarde, com temperatura ambiente mínima de 30°C .

Após a aquisição dos dados operacionais (de pressão, temperatura, vazão mássica e potência nominal) das unidades evaporadoras e condensadoras dos sistemas de compressão de R22, esses dados foram compilados e utilizados para efetuar modelagens computacionais por meio do *software Engineering Equation Solver* (EES,2024) e sua biblioteca para o R22, a fim de viabilizar as avaliações termodinâmicas de todos os sistemas frigoríficos dos túneis de resfriamento, câmaras, antecâmara e ala de expedição da planta de refrigeração.

Assim, a fim de sistematizar e simplificar o processo de avaliação térmica da planta, foram elaborados P&ID's dos sistemas frigoríficos de forma individualizada, identificando as entradas de massa e energia em todos os equipamentos constituintes, conforme a Figura 4.6.

Figura 4.6 - Esquema típico de sistema de refrigeração típico utilizado na planta.



Fonte: Adaptado de Belman-Flores *et al.* (2018).

Deste modo, os equacionamentos termodinâmicos referentes aos balanços de energia das 1^a e 2^a leis foram programados no *software*, juntamente com as configurações das variáveis coletadas em campo, de forma a obter os valores das eficiências energética exergética dos equipamentos e de cada sistema frigorífeno constituinte da planta.

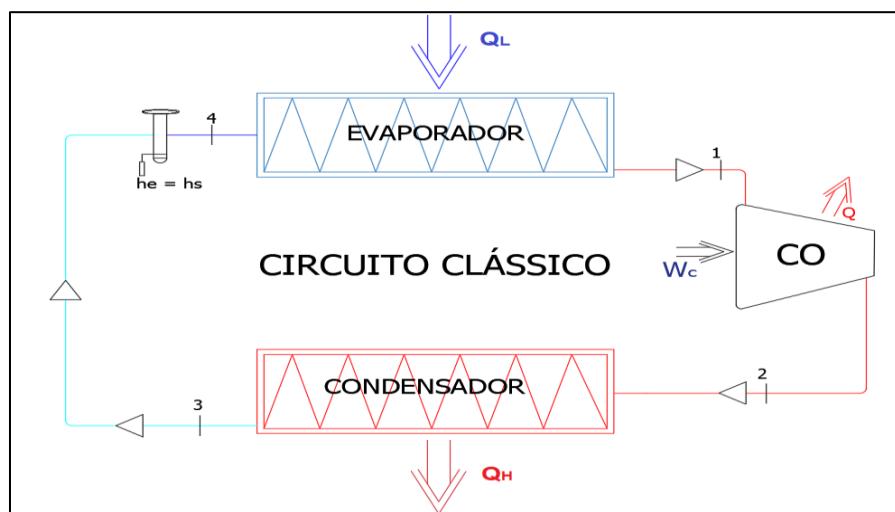
Devido ao quantitativo de equipamentos e acessórios presentes na planta do objeto de estudo, se fizeram necessárias considerar simplificações no objeto de estudo, a fim de tornar as análises mais objetivas, de modo a não comprometer as características principais dos sistemas nem a qualidade das análises realizadas.

Deste modo, não foram considerados equipamentos e/ou dispositivos auxiliares, como filtros secadores, instrumentos de medida e controle, válvulas de serviço e perdas térmicas oriundas das tubulações de condução de fluido refrigerante, sendo os grupos modelados com os equipamentos básicos, conforme a Figura 4.7.

Logo, as modelagens computacionais para as análises termodinâmica e exergética dos sistemas frigoríficos da planta foram efetuadas considerando as hipóteses simplificadoras:

- A operação ocorre em regime permanente;
- Variações de energias cinética e potencial não foram consideradas;
- Perdas de carga e a dissipação de calor através das tubulações foram desprezadas;
- O fluido refrigerante R22 é modelado como puro;
- O processo de expansão é adiabático e isentalpico;
- O processo de compressão é isentrópico.

Figura 4.7 - Fluxograma do ciclo de refrigeração por compressão de vapor padrão.



Fonte: Autoria própria (2025).

Assim, a equação 1 representa o balanço de massa aplicado a cada um dos volumes de controle avaliados.

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (1)$$

Sendo o fluxo de massa em (kg/s).

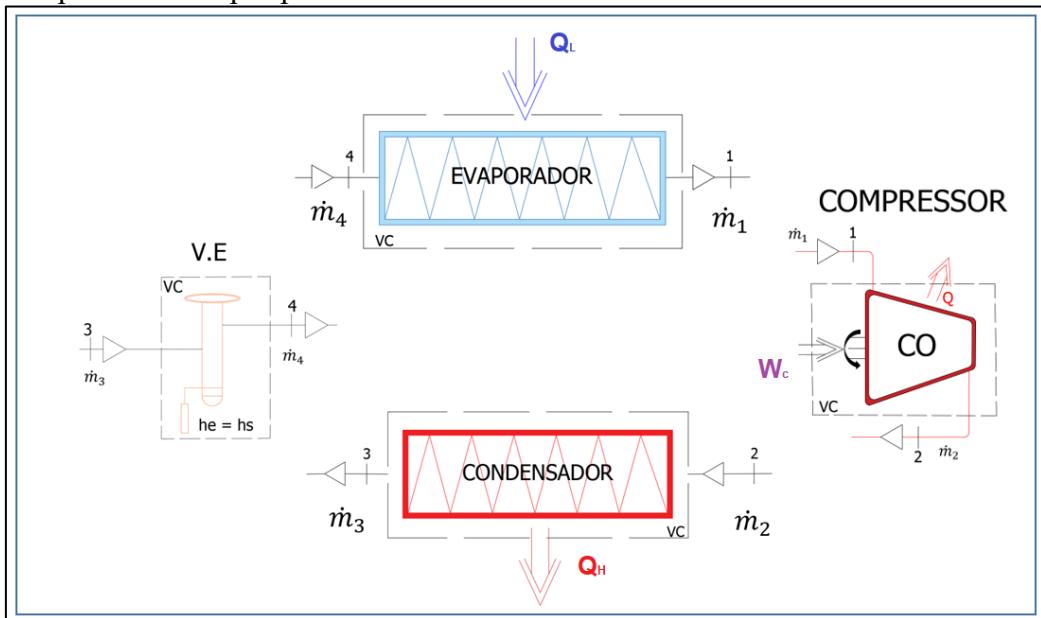
A equação 2 indica o balanço energético aplicado a todos componentes da planta, os termos da equação de transporte associados a energia cinética e energia potencial foram suprimidos, conforme as hipóteses simplificadoras estabelecidas.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m} \cdot (h_e) - \sum_s \dot{m} \cdot (h_s) \quad (2)$$

Os termos \dot{Q} e \dot{W} correspondem às taxas relacionadas as energias nas formas de calor e trabalho em (kW), respectivamente, h a entalpia específica em (kJ/kg).

Com base na figura 4.8, a tabela 5 fornece as equações dos balanços de massa e energia para cada equipamento do sistema de compressão de R22, conforme os volumes de controle definidos para cada equipamento do sistema.

Figura 4.8 – Volumes de controle para os equipamentos do ciclo de refrigeração por compressão de vapor padrão.



Fonte: Autoria própria (2025).

A tabela 4.5 detalha o equacionamento padrão da PLT (Primeira Lei da Termodinâmica) para cada componente do sistema de refrigeração padrão considerado para modelar todos os sistemas constantes na planta de acondicionamento refrigerado da agroindústria.

Tabela 4.5 – Balanço de massa e energia dos componentes dos SRI's da planta.

Equipamento	Equação do balanço de massa	Equação do balanço de energia
Compressor	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\dot{W}_{CA} = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_1 h_1 + \dot{P}_{ME} - \dot{Q}_C$
Condensador	$\dot{m}_3 = \dot{m}_2$	$\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3$
Válvula de expansão	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$	$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4$
Evaporador	$\dot{m}_4 = \dot{m}_1$	$\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_4 h_4$
Motor Elétrico	-	-

Fonte: Autoria própria (2025).

De modo similar, a equação 3 representa o balanço de exergia utilizado na avaliação exergética da planta. Com o valor da exergia em (kW).

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m} \cdot (\psi_e) - \sum_s \dot{m} \cdot (\psi_s) - \dot{X}_{dest.} = 0 \quad (3)$$

A tabela 4.6 mostra as equações de exergia desenvolvidas para cada componente do sistema de compressão de R22 de refrigeração padrão da planta, considerado no presente trabalho.

Tabela 4.6 – Balanço de exergia dos componentes dos SRI's da planta – Equacionamento generalizado.

Equipamento	Balanço de exergia	Destrução de exergia	Eficiência exergética
Compressor	$\dot{W}_{RevC} = \dot{m}_1 \psi_1 - \dot{m}_2 \psi_2 - \dot{Q}_C \left[1 - \frac{T_0}{T_2}\right]$	$\dot{X}_{desC} = \dot{m}_1 T_0 (s_2 - s_1)$	$\eta_{IIC} = 1 - \frac{\dot{X}_c}{\dot{W}_{real}}$
Condensador	$\dot{W}_{RevCo} = \dot{m}_2 \psi_2 - \dot{m}_3 \psi_3 - \dot{Q}_{cond} \left[1 - \frac{T_0}{T_H}\right]$	$\dot{X}_{desCo} = T_0 [\dot{m}_2 (s_2 - s_3) + \frac{\dot{Q}_H}{T_H}]$	$\eta_{IICO} = \frac{\dot{Q}_H (1 - \frac{T_0}{T_H})}{\dot{X}_2 - \dot{X}_3}$
Válvula de expansão	$\dot{W}_{RevG} = 0$	$\dot{X}_{desVE} = \dot{m}_3 T_0 (s_4 - s_3)$	$\eta_{IIVE} = 0$
Evaporador	$\dot{W}_{RevH} = \dot{m}_1 \psi_1 - \dot{m}_4 \psi_4 - \dot{Q}_L \left[1 - \frac{T_0}{T_4}\right]$	$\dot{X}_{desEV} = T_0 [\dot{m}_4 (s_1 - s_4) - \frac{\dot{Q}_L}{T_L}]$	$\eta_{IIH} = \frac{\dot{X}_{desEV}}{\dot{X}_4 - \dot{X}_1}$

Fonte: Autoria própria (2025).

Para a determinação dos coeficientes de desempenho térmico (COP) dos SRI's, utilizou-se a razão entre a taxa de energia térmica (\dot{Q}_L) retirada dos espaços refrigerados pelos evaporadores, pelo trabalho total (\dot{W}_{tot}) fornecido ao sistema por meio dos compressores para cada instalação, de acordo com equação (4).

$$COP = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{total}} \quad (4)$$

Similarmente, de modo a estimar as eficiências exergéticas (ECOP) ($\dot{\eta}_{ex}$), dos SRI's, utilizou-se a razão entre a taxa de exergia total destruída ($\dot{X}_{dest,Total}$) no ciclo de refrigeração, pela taxa de trabalho fornecida ao sistema (\dot{W}_e), conforme a equação (5).

$$\dot{\eta}_{ex} = \frac{\dot{X}_{dest,Total}}{\dot{W}_e} \quad (5)$$

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Avaliação energética

Através da PLT (Primeira Lei da Termodinâmica), dos dados obtidos via simulação numérica e estimados por meio de informações de placa e manuais dos equipamentos, foram determinados os coeficientes de desempenho (COP's) dos túneis de resfriamento, câmaras frias e instalações frigoríficas complementares. A tabela 4.7, detalha as variações percentuais entre os coeficientes estimados por meio dos dados dos equipamentos, e os retornados via simulações no EES, utilizando dados coletados para os túneis de resfriamento da planta.

Tabela 4.7 – Coeficientes de desempenho (COP) dos Túneis de resfriamento da planta.

Equipamento	COP estimado	COP EES	Percentual (%)
Túneis 1 e 3	8,78	6,36	32,56
Túnel 2	9,14	5,39	41,14
Túnel 4	9,14	6,04	33,92

Fonte: Autoria própria (2025).

Os túneis de resfriamento rápido apresentaram valores de COP's abaixo dos valores estimados para todas as instalações, os resultados encontrados via simulação numérica, baseados nos dados coletados em campo, apontaram rendimentos térmicos em média 36% menor em relação aos estimados para as referidas instalações.

O túnel 02 apresentou o pior rendimento térmico de todos os túneis de resfriamento, com seu desempenho térmico estando 41% menor em relação ao estimado. Seguido do Túnel 04 com 33% menos eficiente e dos túneis 1 e 3 com 32%, tendo em vista que a unidade condensadora destes últimos dois é compartilhada em si.

As baixas eficiências térmicas dos sistemas de refrigeração se dão a diversos fatores, entre eles: as elevadas cargas térmicas impostas às instalações devido às variações de temperatura das frutas durante o início do armazenamento nas câmaras; a manutenção inadequada, muitas vezes limitada apenas à corretiva; procedimentos de carga e descarga, que favorecem a infiltração de ar externo, elevando as cargas térmicas e, consequentemente, reduzindo a eficiência térmica dos espaços refrigerados.

Mokaya *et al.*, (2025), aponta no seu estudo de otimização de câmaras frias para armazenamento de frutas, os impactos negativos que a má observância de procedimentos operacionais, manutenção e infiltração de ar externo na eficiência energética destes espaços.

De acordo com informações fornecidas pela empresa, as instalações de refrigeração da planta objeto do estudo possuem em média 25 anos de uso e passaram por algumas atualizações pontuais ao longo do tempo, porém tais intervenções não acompanharam a demanda de produção de frio para o acondicionamento térmico da produção de uva, que cresce ano a ano. Desta forma, estando as instalações de túneis de resfriamento operando além da sua capacidade projetada.

Durante as coletas de dados operacionais aos túneis de resfriamento, foi observado problemas de manutenção e conservação dos equipamentos em especial nos trocadores de calor das unidades internas e externas, isolamento térmico de linhas de condução de fluido refrigerante, de portas, contribuindo negativamente na eficiência térmica dos túneis, tanto no espaço refrigerado, retirando o calor proveniente dos carregamentos das uvas, quando nas unidades condensadoras, na rejeição de calor necessária para garantir a eficiência satisfatória dos túneis.

Morozyuk *et al.*, (2023), realizaram um estudo teórico e experimental para investigar a eficiência de sistemas de refrigeração para câmaras frias comerciais, onde constataram que problemas de manutenção e limpeza dos trocadores de calor influenciam negativamente no COP da instalação em até 50%.

Em relação aos procedimentos de carga e descarga dos túneis, também foram observadas situações em que o tempo de abertura dos túneis para as operações dentro dos espaços é frequentemente elevado, propiciando a infiltração de ar externo proveniente do corredor da planta com temperatura mais elevada aumentar a temperatura média dos túneis, contribuindo para a redução da eficiência térmica das instalações, de modo a demandar maior consumo energético e tempo de resfriamento dos frutos nos túneis.

Hendry e Wafa (2025), realizaram um estudo avaliativo do projeto e desempenho de uma câmara fria equipada com um sistema de refrigeração por compressão de vapor para alimentos congelados, onde concluíram que o COP da instalação é negativamente influenciado pelo aumento da temperatura no evaporador, devido a elevada carga térmica, além de elevadas temperaturas de condensação. Resultado semelhante encontrado por Hua *et al.*, (2025) em estudo desenvolvido com um novo tipo de câmaras frigoríficas a base de tecnologia de mudança de fase do fluido refrigerante.

Em relação a coleta de dados térmicos nas instalações, dificuldades associadas ao acesso as unidades de refrigeração contribuíram de forma sensível na medição de temperaturas de trabalho dos equipamentos, como também termopares e *displayers* defeituosos nas centrais de controle das unidades dificultaram a conferência entre os valores mesurados *in loco* com os dados retornados pelos sensores das unidades de refrigeração dos túneis.

As dificuldades na mensuração das temperaturas de trabalho nos componentes dos SRI's dos túneis contribuíram显著mente durante a etapa de simulação no EES, onde foram observadas as principais discrepâncias entre as eficiências estimadas através de dados de placa dos equipamentos e os valores retornados pela simulação em *software*.

A tabela 4.8, detalha as variações percentuais entre os coeficientes estimados e os retornados pelo EES, utilizando dados coletados para as câmaras frias da planta.

Tabela 4.8 – Coeficientes de desempenho (COP) das Câmaras frias da planta.

Equipamento	COP estimado	COP EES	Percentual (%)
Câmara 01	4,70	2,94	33,60
Câmara 02	4,70	2,26	51,90
Câmara 03	4,70	3,05	35,10
Câmara 04	4,70	2,16	54,00

Fonte: Autoria própria (2025).

Para as câmaras frias, seguiu-se a mesma metodologia de avaliação utilizada para estudo do desempenho energético dos túneis de resfriamento, onde foi observado que os SRI's das câmaras frias 02 e 04 exibiram as maiores discrepâncias entre os COP's estimados e os simulados via EES apresentando diferenças percentuais acima dos 50%.

Já câmaras 01 e 03, apesar de baixos rendimentos térmicos retornados via resultados da simulação, representam os melhores desempenhos observados nas instalações de câmaras frias, com destaque para a câmara 01, apresentando o melhor rendimento entre as demais.

No geral, se observa, através dos dados coletados nas instalações das câmaras frias da planta, rendimentos médios 44% menores que os rendimentos térmicos estimados através dos dados de plaquetas dos SRI's.

Os resultados encontrados via simulação são explicados pelos motivos semelhantes aos dos túneis de resfriamento, uma vez que as instalações operam muitas vezes com cargas térmicas acima da capacidade de projeto, com manutenção deficitária, baseando-se majoritariamente na manutenção corretiva emergencial.

Além destes fatores, também houve dificuldades para a coleta e comparação dos dados mensurados *in loco* com os retornados pelos *dataloggers* dos SRI's das câmaras, contribuindo também para as discrepâncias retornadas pelos resultados obtidos através da simulação via EES.

A tabela 4.9, detalha as variações percentuais entre os coeficientes estimados e os retornados pelo EES, utilizando dados coletados nas instalações complementares da planta.

Tabela 4.9 – Coeficientes de desempenho (COP) instalações complementares da planta

Equipamento	COP estimado	COP EES	Percentual (%)
Corredor refrigerado	9,76	6,37	34,73
Ala de expedição	6,10	5,23	14,19

Fonte: Autoria própria (2025).

Já em relação as instalações complementares, os resultados retornados via simulação também seguiram o mesmo padrão de baixo rendimento, tendo o corredor climatizado apresentando o rendimento mais baixo, enquanto o espaço da ala de expedição apresentou o melhor rendimento de toda a planta da agroindústria, com 14,19% de diferença percentual em relação ao COP estimado.

Os resultados obtidos para as instalações auxiliares também estão relacionados aos problemas identificados nos SRI's que equipam as instalações de túneis e câmaras, porém, em relação ao corredor climatizado, observa-se o estresse térmico associado a infiltração de ar exterior, provindo do *packing house*, como também fatores relacionados diretamente aos isolamentos térmicos deste espaço, sendo a conjugação destes fatores causa preponderante para a baixa eficiência térmica observada para esta instalação.

Em relação ao sistema de refrigeração da ala de expedição, ele opera por curtos períodos em comparação com as demais instalações, é moderno e as perdas térmicas associadas a infiltração de ar exterior são mitigadas por sistema de isolamento térmico mais eficiente.

Sendo assim, seu rendimento térmico está associado ao procedimento de abertura e fechamento de porta de acesso e interface entre a doca refrigerada e o baú refrigerado, no processo de carregamento dos pallets nos caminhões, se torna o principal fator pelo qual o rendimento térmico é impactado.

4.3.2 Avaliação exergética

Com base nos resultados da avaliação da Segunda Lei da Termodinâmica (SLT) aplicada aos SRI's da planta, este trabalho realizou uma análise exergética para examinar o comportamento dos fluxos de exergia nos equipamentos que compõem os sistemas de refrigeração de cada espaço refrigerado, identificando as instalações e os componentes responsáveis pelas maiores taxas de destruição exergética.

A tabela 4.10 detalha os valores de fluxos e eficiência exergética para os SRI's instalações de túneis de resfriamento rápido da planta.

Tabela 4.10 – Dados de balanços energéticos e exegéticos dos SRI's – Túneis de resfriamento.

Instalação	E [kW]	Ex [kW]	E _D [kW]	η _{ex}
Túneis 01 e 03	41,76	267,16	214,53	0,193
Túnel 02	20,88	192,84	135,40	0,246
Túnel 04	20,88	186,37	152,08	0,184

Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados obtidos por meio de simulações indicaram que as eficiências exergéticas dos SRI's associados aos túneis de resfriamento da planta seguem o padrão de baixo desempenho previamente identificado na avaliação pela SLT. Dentre os sistemas analisados, o SRI do túnel 02 apresentou o melhor desempenho, com uma eficiência exergética de 24,60%.

Em seguida, observou-se o SRI compartilhado pelos túneis 01 e 03 — o maior sistema entre os avaliados — com uma eficiência de 19,30%. Por fim, o SFI do túnel 04, de porte intermediário, demonstrou o menor rendimento exergético, alcançando apenas 18,40%. Este valor situou-se abaixo da média geral de eficiência exergética da planta de refrigeração da agroindústria, estimada no presente trabalho em 23%.

A tabela 4.11 detalha os valores de fluxos e eficiência exergética para os SRI's das câmaras frias da planta.

Tabela 4.11 – Dados de balanços energéticos e exegéticos dos SRI's – Câmaras frias.

Instalação	E [kW]	Ex [kW]	E _D [kW]	η _{ex}
Câmara 01	10,44	5,5	1,30	0,267
Câmara 02	10,44	4,83	2,64	0,162
Câmara 03	10,44	5,64	2,23	0,235
Câmara 04	14,65	11,06	10,86	0,178

Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados da análise exergética para as câmaras frias apresentaram baixos valores de eficiências exergéticas no geral, seguindo a tendência identificada nos valores relativos as eficiências térmicas para os SFI's destas instalações.

A câmara 01 apresenta a melhor eficiência exergética entre os sistemas de refrigeração que equipam as instalações das câmaras frias da planta, 26,70%, seguida pela câmara 03 com 23,50%.

Já os sistemas das câmaras 02 e 04, com 16,20% e 17,8%, apresentaram as piores eficiências exergéticas de todas as instalações de câmaras frias da planta, sendo estes sistemas os que apresentaram as maiores discrepâncias entre os COP's na avaliação energética da planta.

Por fim, a tabela 4.12 detalha os valores de fluxos e eficiência exergética para os SRI's das instalações auxiliares da planta.

Tabela 4.12 – Dados de balanços energéticos e exegéticos dos SRI's – Corredor e Expedição.

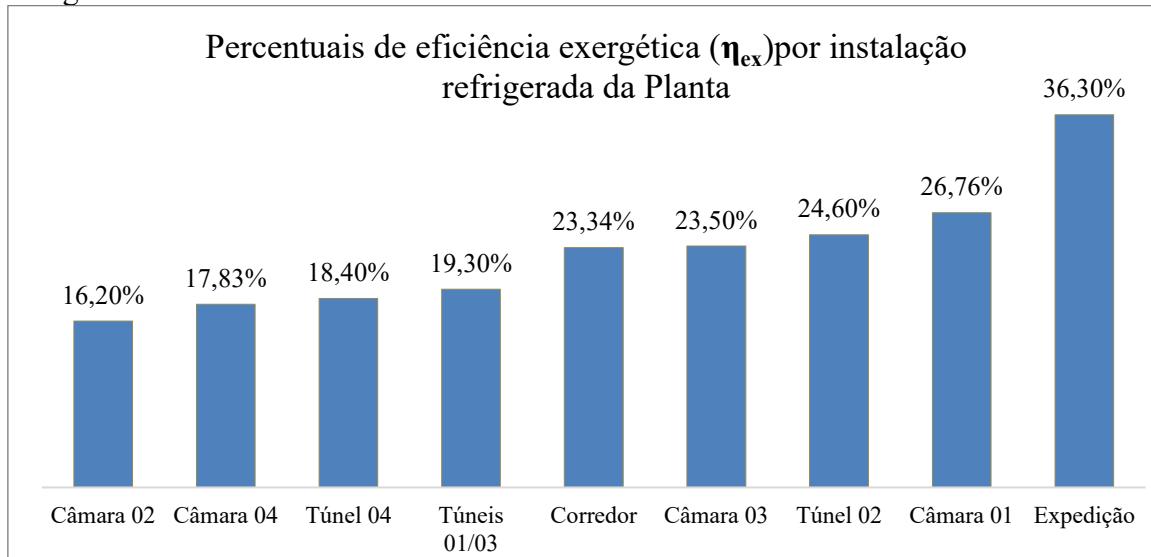
Instalação	E [kW]	Ex [kW]	E _D [kW]	η_{ex}
Corredor	10,44	6,31	2,68	0,233
Expedição	7,45	3,55	2,69	0,363

Fonte: Autoria própria (2025).

Para os SRI's que equipam as instalações auxiliares, Corredor climatizado e Ala de expedição, o sistema da expedição apresentou a melhor eficiência exergética dentre todas as instalações da planta, com 36,30%. Já o corredor seguiu a tendência das demais instalações, com eficiência exegética de 23,30%, dentro da média geral de 23% para eficiência exergética geral dos SRI's da planta.

De modo a ilustrar os resultados associados as eficiências exergéticas observadas nos SRI's da planta, a figura 4.9 compara os quantitativos de destruição exergética por instalação.

Figura 4.9 – Eficiências exergéticas das instalações da planta de acondicionamento refrigerado.



Fonte: Autoria própria (2025).

Através do gráfico comparativo mostrado na figura 4.9, observa-se que aproximadamente 45% dos SRI's apresentaram valores de eficiências exergéticas menores que a média global da planta, estimada em 23%. Destaca-se as instalações das câmaras 02 e 04, e dos túneis 01,03 e 04 com os piores resultados de toda a planta da agroindústria, onde juntos representam 50% de todas as instalações refrigeradas para o acondicionamento térmico de frutas da agroindústria.

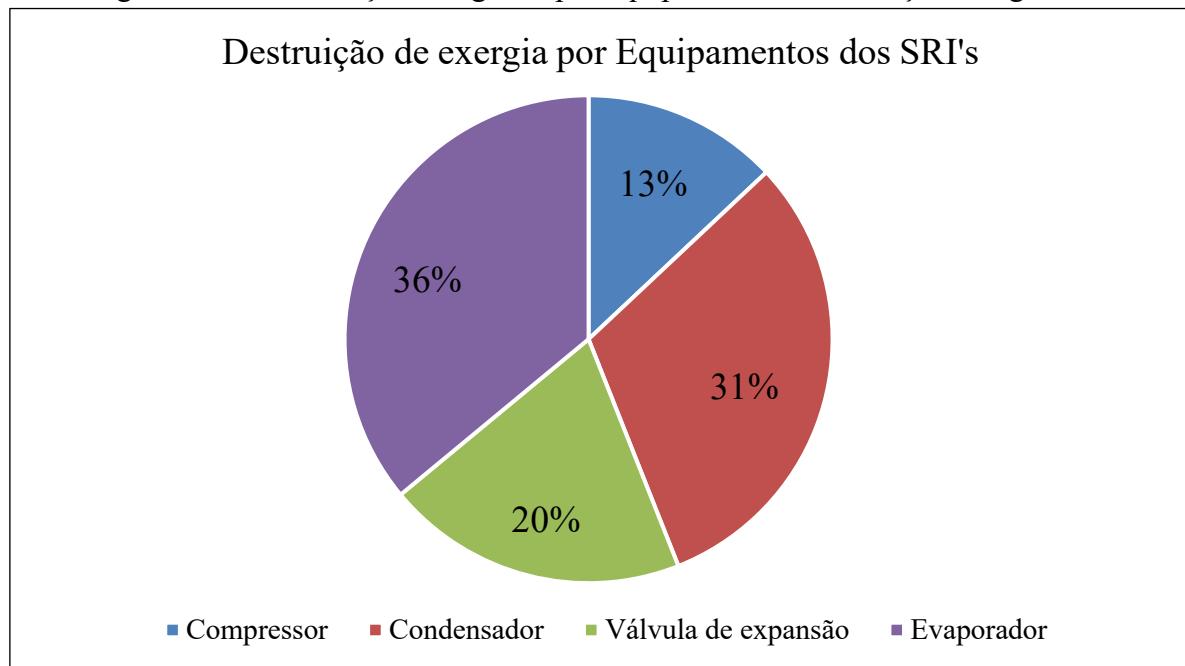
Os SRI's das demais instalações apresentaram valores de eficiência equiparados e dentro da média geral, com destaque para o SRI da Ala de expedição, com a melhor eficiência exergética da planta.

Conforme Bejan (2016), estes resultados podem ser explicados para sistemas de refrigeração por compressão de vapor, devido a carga térmica elevada, além dos limites de projeto, motivada pelo aumento na demanda de frio das instalações da planta como um todo, problemas de manutenção nos sistemas, tal como observado em campo, além de falhas nas operações de carga, descarga e manuseio das frutas dentro dos espaços refrigerados, contribuindo assim para os rendimentos insatisfatórios identificados.

Neste sentido, por meio da obtenção dos valores das eficiências energéticas e exergéticas dos SRI's da planta, procurou-se analisar as contribuições que os equipamentos constituintes dos SRI's teriam nas irreversibilidades que contribuíram para os baixos rendimentos observados.

Para isso, a figura 4.10 detalha a participação em média dos equipamentos principais dos SRI's na destruição de exergia na planta de refrigeração da agroindústria.

Figura 4.10 – Destrução exergética por equipamento da instalação refrigerada.



Fonte: Autoria própria (2025).

Em média, as taxas de destruição de exergia nos componentes dos SRI's apontaram os trocadores de calor como os grandes destruidores de exergia, com destaque para os

evaporadores, respondendo por 36% de toda exergia destruída, seguido pelos condensadores, com 31%.

Para os trocadores de calor, foram observadas variações consideráveis entre as temperaturas de evaporação e condensação do fluido refrigerante, o que contribui para o aumento das irreversibilidades nos equipamentos citados, por conta das temperaturas de condensação e evaporação exibidas durante a operação dos sistemas de refrigeração.

Resultados semelhantes aos estudos desenvolvidos por Dwinanto (2017) e Solanki *et. al.*, (2023), quando avaliaram os coeficientes de desempenho através da SLT, indicaram nos seus estudos a relação intrínseca entre o COP e a destruição de exergia devido as diferenças de temperaturas de condensação e evaporação em sistemas de compressão de vapor.

Para efeito comparativo, Fortes, (2017) realizou uma avaliação exergética de bomba de calor, cujos resultados apontaram baixas eficiências exergéticas associadas aos trocadores de calor, onde o evaporador e o condensador do seu objeto de estudo apresentaram eficiências exergéticas em torno dos 26%, percentual próximo ao resultado do presente trabalho.

Palanisamy Dhamodharan *et.al.*, (2025) realizaram uma Análise experimental e exergética da recuperação de energia da condensação do ar-condicionado em unidades de climatização e armazenamento refrigerado com capacidades de 88 e 5000 TR's, utilizando um trocador de calor a água de condensação para recuperação energética, como resultado, o estudo indicou baixas eficiências exergéticas globais do sistema, variando entre 20 e 22%, operando em temperaturas ambientais acima dos 35º C.

Goudarzi, (2025) realizou uma Análise energética, exergética e econômica de sistemas de armazenamento de energia fria em câmaras frigoríficas utilizando polietilenoglicol como material de mudança de fase, onde a eficiência exergética estimada em 20% foi influenciada negativamente pelas temperaturas de condensação e evaporação dos sistemas de refrigeração, sugerindo assim melhorias nos parâmetros operacionais dos evaporadores e condensadores.

Chattopadhyay e Gosh, (2020) também indicaram ao realizar um estudo termodinâmico com câmaras frigoríficas para vegetais, que altas temperaturas de condensação e do ambiente externo ao sistema de refrigeração foram as principais responsáveis por elevadas taxas de destruição exergética, situação semelhante à do presente estudo, cujas temperaturas externas no verão podem ultrapassar os 40º C.

As válvulas de expansão foram responsáveis por 20% da exergia média destruída nos SRI's de todas as instalações, e isso se deve as quedas bruscas de pressão na entrada do dispositivo, causando dessa forma restrição acentuada drástica no escoamento do fluido refrigerante.

A substituição por dispositivos de expansão modernos, como válvulas de expansão eletrônicas, pode contribuir positivamente para a queda deste percentual, propiciando assim, melhor controle da queda de pressão e redução de destruição exegética (RAHUL DEHARKAR *et al.*, 2025).

Por fim, os compressores apresentaram menores taxas de destruição exegética, respondendo assim por 13% do total. Este resultado se explica devido ao fato de a maioria dos compressores que operam nas instalações da planta serem trocados com relativa frequência, em relação aos demais equipamentos.

De acordo com relatos do setor de manutenção, as avarias nos compressores se dão em grande parte devido à sobrecarga a que estão submetidos, informação relevante que contribui para corroborar um dos motivos para as baixas eficiências exergéticas observadas para as instalações refrigeradas.

Para tanto, de modo a readequar a demanda térmica e mitigar sobrecargas, a empresa está implementando a modernização da planta, com unidades plug-in de refrigeração modernas e com capacidades térmicas redimensionadas para as necessidades de produção de frio atuais.

4.4 CONCLUSÃO

O presente trabalho efetuou uma avaliação termodinâmica da planta de refrigeração de uma agroindústria na região do Submédio Vale do São Francisco, mais especificamente o processo de acondicionamento térmico refrigerado no pós-colheita de uvas finas de mesa.

Através da coleta de dados em campo, utilização dos balanços de energia e exergia por meio da modelagem computacional, foi possível realizar as análises dos resultados relativos aos rendimentos termodinâmicos das instalações de túneis, câmaras frias e espaços refrigerados auxiliares, deste modo, propiciando visualizar o cenário atual da planta frigorífica em primeiro momento.

Diante dos dados retornados via modelagem via EES, foi possível identificar resultados já esperados relacionados aos rendimentos térmicos e exergéticos das instalações da planta de refrigeração, devido a fatores associados a antiguidade da instalação de modo

geral, manutenção dos SRI's, elevadas demandas térmicas impostas as unidades de refrigeração, como também os processos de caráter de procedimento operacional relacionados a carga e descarga dos locais aos espaços refrigerados, que de modo combinado atuam na redução das eficiências térmica e exergética da planta como um todo.

Deste modo, o COP global da instalação foi estimado em 4,82, estando 30% menor que o COP estimado em projeto. Este resultado é impactado pelos fatores acima descritos, onde aproximadamente 50% de todas as instalações da planta apresentaram eficiências abaixo dos valores médios de COP, com destaque para a câmara 04 (5,23) e o túnel de resfriamento rápido 02 (2,16), que apresentaram os menores rendimentos de toda a planta.

De modo similar, a eficiência exergética da planta também foi diretamente comprometida, sendo as câmaras 02 (16,20%) e 04 (17,80%) e os túneis 01 e 03 (19,30%), que apresentaram os menores rendimentos exergéticos, influenciando negativamente na eficiência exergética global da planta, estimada em 23%.

Entretanto, além dos fatores identificados como potenciais causadores dos baixos rendimentos observados nas instalações da planta, foram identificados pontos críticos nos equipamentos constituintes dos SRI's, com destaque para os Evaporadores e condensadores, respectivamente,

Estes equipamentos, em especial, apresentaram taxas de destruição exergética acima dos 30%, evidenciando assim a necessidade de revisão de manutenções, parâmetros operacionais, uma vez que são equipamentos no fim de sua vida útil, estando dimensionados para demandas térmicas estimadas para produção de 20 anos atrás, sofrendo poucas atualizações ao longo deste tempo.

Diante disto, através do desenvolvimento e resultados do presente trabalho, verifica-se a necessidade de modernização da planta frigorífica da agroindústria, de modo a alcançar melhores rendimentos térmicos, os quais impactarão diretamente na melhoria da eficiência energética do processo de acondicionamento térmico da produção e consequentemente, no ponto de vista ambiental, a mitigar de impactos ambientais decorrentes do consumo energético associado ao consumo energético desta etapa da produção de uvas.

Como sugestão para trabalhos futuros, identifica-se a necessidade de trabalhos que abordem avaliações termoeconômicas e exergoambientais e focadas na produção de frio industrial da planta, como também trabalhos voltados a melhoria de processos de acondicionamento térmico para a conserva da uva nos espaços refrigerados da planta.

REFERÊNCIAS

- ABREU, R. *et al.* **Thermoeconomic and thermoenvironmental analysis of the chilled water system in a shopping mall.** International Journal of Refrigeration, v. 134, p. 304–311, 1 fev. 2022.
- AL KHIRO, H. A.; BOUKHANOUF, R. **Analytical and computer modelling of a thermo-mechanical vapour compression system for space air conditioning in buildings.** Energy Conversion and Management, v. 323, p. 119252, jan. 2025.
- ALSHAMMARI, N. K. **An examination of the exergy and energy of a solar powered absorption cooling systems in the Riyadh climate.** Journal of Engineering Research, mar. 2025.
- BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics.** [s.l.] Hoboken, Nj, Usa John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- CHATTOPADHYAY, S.; GHOSH, S. **Comparative Energetic and Exergetic Assessment of Different Cooling Systems in Vegetable Cold Storage Applications.** Journal of The Institution of Engineers (India) Series C, v. 101, n. 4, p. 643–650, 24 abr. 2020.
- J.M. BELMAN-FLORES *et al.* **Exergy assessment of a refrigeration plant using computational intelligence based on hybrid learning methods.** v. 88, p. 35–44, 1 abr. 2018.
- D'AGARO, P. *et al.* **HVAC coverage in integrated refrigeration systems at various climate and building conditions.** Applied Thermal Engineering, v. 266, p. 125503, maio 2025.
- DANFOSS, MT80HP9AVE MT: **Recíprocos herméticos Compressores para ar-condicionado Compressores.** Danfoss Brazil Product Store. Disponível em: <https://store.danfoss.com/br/pt_BR/Climate-Solutions-para-refrigera%C3%A7%C3%A3o-e-ar-condicionado/Compressores/Compressores-para-ar-condicionado/Rec%C3%ADprocosherm%C3%A9ticos/MT/Compressor-rec%C3%ADproco%2C-MT80HP9AVE/p/MT80-9VI#documentWrapper>. Acesso em: 23 mai. 2025.
- DWINANTO, M. M.; NONE SUHANAN; NONE PRAJITNO. **Exergy analysis of a dual-evaporator refrigeration systems.** AIP conference proceedings, 1 jan. 2017.
- EMBRAPA. **Observatório da Fruta.** Disponível em:<<https://www.embrapa.br/observatorio-da-uva-2024>>. Acesso em 20 de fev. 2025.
- FORTE, D. *et al.* **Modeling of Daytime Radiative Cooling Enhanced Vapor-Compression Refrigeration Systems.** 2025.
- FORTES, A. F. C. **Análise termoeconômica e ambiental de um secador por bomba de calor.** Ufpb.br, 2017.

GOUDARZI, K. **Energy, exergy, and economic analysis of cold energy storage systems in cold storage using polyethylene glycol phase change material.** Case Studies in Thermal Engineering, v. 71, p. 106225, 2 maio 2025.

HAN, J. W. *et al.* **A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products:** Current status, challenges, and future trends. Trends in Food Science & Technology, v. 109, n. 0924-2244, p. 536–551, mar. 2021.

HENDRY, N.; NONE HUSNUL WAFA. **Design and performance evaluation of a cold storage room for bakery and frozen foods using coolselector®2 Software.** Global Journal of Engineering and Technology Advances, v. 23, n. 2, p. 108–116, 20 maio 2025.

HMIDA, A. *et al.* **Modeling of cold room driven by an absorption refrigerator in the south of Tunisia:** A detailed energy and thermodynamic analysis. Journal of Cleaner Production, v. 211, p. 1239–1249, fev. 2019.

HUA, W. *et al.* **New low carbon path for cold store—Research progress of new type of cold store based on phase change thermal energy storage technology.** Journal of Energy Storage, v. 126, p. 117109, ago. 2025.

MIPAL, Hd 450: **Evaporadores e Condensadores.** Disponível em: <<https://www.mipal.com.br/hdh/>>. Acesso em: 16 jun. 2025.

MOKAYA, P. K.; WAKIRU, J.; TANUI, J. **A risk-based approach to reduction of warm air infiltration for energy efficiency optimization in a cold storage system—a case study of a fruit packaging plant.** International Journal of Research in Industrial Engineering, v. 14, n. 2, p. 218–233, jun. 2025.

MOROZYUK, L. *et al.* **Experimental study and analysis of an air-cooled condenser with the fouling on the heat exchange surface for small-scale commercial refrigeration systems.** International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, v. 31, n. 1, 18 jul. 2023.

RAHUL DEHARKAR *et al.* **Advanced Exergy Analysis of Vapor Compression Systems Using Low-GWP Refrigerants and Variable-Frequency Compressor.** International Journal of Thermofluids, p. 101374–101374, 1 ago. 2025.

SAOUD, A. *et al.* **Performance investigation and numerical evaluation of a single-effect double-lift absorption chiller.** Applied Thermal Engineering, v. 227, p. 120369, jun. 2023.

SINGH TOMAR, M.; PRADHAN, R. C. **Recent developments in solar-powered refrigeration systems and energy storage methods for on-farm preservation of fruits and vegetables.** Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 72, p. 104032, 19 out. 2024.

SOLANKI, N.; ARORAA.; RAJ KUMAR SINGH. **Performance enhancement and environmental analysis of vapor compression refrigeration system with dedicated mechanical subcooling.** International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, v. 31, n. 1, 29 nov. 2023.

TEREHOVICS, E. et al. **Analysis of fish refrigeration electricity consumption**. Energy Procedia, v. 147, p. 649–653, 1 ago. 2018.

XU, B. et al. **Research on the Characteristics of Photovoltaic Ice-Cold Storage**. Energy and Built Environment, abr. 2024.

ZHENG, Z.; CAO, J. **Thermodynamic and feasibility analysis of air conditioning waste heat recovery via power generation cycles**. Energy Reports, v. 6, p. 3472–3490, nov. 2020.

CAPÍTULO V

5 ARTIGO: VANTAGENS AMBIENTAIS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM UM SISTEMA DE ACONDICIONAMENTO DE PRODUTOS HORTIFRUTÍCOLAS

RESUMO

Este trabalho se propõe a avaliar os impactos ambientais do uso da refrigeração no armazenamento de uvas no Submédio Vale do São Francisco e analisa a viabilidade da energia solar fotovoltaica como alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi realizada através do software *Simapro*, por meio da base de dados *Ecoinvent* v. 3.8 e método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2021 GWP 100a. O sistema atual opera em formato híbrido, com eletricidade da concessionária e gerador a diesel, resultando em emissões anuais de 80,10 t CO₂-eq. Desse modo, o presente estudo avalia três cenários de implementação de sistemas fotovoltaicos (SFV): o Cenário A atende apenas à demanda fora de ponta da planta de refrigeração, reduzindo as emissões para 55,50 t CO₂-eq/ano. O Cenário B supre toda a demanda energética da planta, mantendo o gerador a diesel em *standby*, resultando em 51,28 t CO₂-eq/ano. Já o Cenário C elimina o gerador a diesel, com a planta funcionando exclusivamente com SFV, reduzindo assim as emissões para 49,38 t CO₂-eq/ano. As análises revelaram que os fatores de emissão da energia gerada pelos SFVs variam entre 0,0318 e 0,0328 kg CO₂-eq/kWh, valores significativamente menores que o fator de 0,065 kg CO₂-eq/kWh da rede elétrica para o nordeste brasileiro. Destaca-se que o cenário B apresentou o melhor custo-benefício técnico-econômico e ambiental, enquanto o cenário C foi o mais eficiente em termos de benefício ambiental. O estudo conclui que a adoção de energia solar fotovoltaica proporciona vantagens ambientais ao tornar o processo de acondicionamento térmico de uvas mais sustentável, mitigando significativamente as emissões de GEE associadas a esta atividade agroindustrial.

Palavras-chave: Avaliação de Ciclo de Vida; Pegada de Carbono; Emissões de gases de efeito estufa; Frutas; Refrigeração.

5.1 INTRODUÇÃO

O polo da fruticultura irrigada, localizado no Submédio Vale do São Francisco, no semiárido nordestino, é uma importante região produtora hortifrutícola brasileira, com destaque para a vitivinicultura.

Segundo estimativas da Empresa Brasileira de Agropecuária (Loiva *et al.*, 2021), a região desponta como o segundo maior polo produtor de uvas no país, desempenhando um importante papel na economia local. No ano de 2023, foram produzidas 62,3 mil toneladas de uva, gerando uma receita estimada em US\$ 148,8 milhões de dólares (Revista Hortifrutibrasil, 2023).

Para Vasconcelos *et al.* (2019), devido aos aspectos relativos às condições climáticas da região predominantemente quente e seca, às especificidades do cultivo da uva e à necessidade de preservar a qualidade deste produto durante as etapas de processamento, estocagem e transporte, a cadeia do frio é de fundamental importância para evitar perdas (Khumalo *et al.*, 2020; Lufu *et al.*, 2020).

De acordo com Fedeli *et al.* (2022), a cadeia do frio dos produtos da vitivinicultura é iniciada a partir do processo de acondicionamento térmico inicial nas agroindústrias durante o pós-colheita e/ou em centros logísticos de distribuição, os quais são equipados com câmaras de resfriamento. O objetivo é manter os parâmetros de temperatura e umidade necessários para garantir a qualidade das uvas exigida pelos mercados consumidores (Spagnol *et al.*, 2018).

Apesar da importância, os sistemas de refrigeração industriais demandam grande consumo de energia elétrica, sendo responsáveis por uma parcela significativa do consumo energético (Peng *et al.*, 2022; Han *et al.*, 2018).

Isso ocorre especialmente nos processos de acondicionamento térmico de frutas frescas, que necessitam da utilização de sistemas de refrigeração industrial em larga escala para atender à produção (Matar *et al.*, 2021).

Por outro lado, para Arabkoohsar *et al.*, (2016), a utilização de sistemas fotovoltaicos se apresenta como alternativa técnica, econômica e ecologicamente viável para suprir a demanda energética de centros de armazenamento refrigerados. Além disso, promove a

redução nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) relativas a este elo da cadeia do frio (Wu *et al.*, 2019).

Bursztyn (2020) destaca que, tendo em vista as características climáticas e de insolação favoráveis da região do semiárido brasileiro, o uso da energia solar para atender à demanda energética do setor agrícola já é uma realidade.

Neste contexto, Wróbel-Jędrzejewska e Polak (2022) evidenciam que o setor agrícola de frutas e vegetais está gradualmente sendo orientado para a produção sustentável, adotando técnicas e práticas ecologicamente amigáveis, investindo na transição energética e descarbonização de suas fontes de energia.

Por sua vez, a energia demandada pelos armazéns refrigerados utilizados para o acondicionamento térmico da produção de uva é majoritariamente oriunda da rede de distribuição da concessionária, assim como através de geradores diesel-elétricos, que atuam como sistema auxiliar de fornecimento de energia elétrica.

Diante disto, a demanda por energia elétrica é intensa e inerente ao processo produtivo, sendo ampliada nos períodos de safra. De acordo com Rühlin e Scherrer (2023), os impactos ambientais relacionados com a etapa de resfriamento de frutas e vegetais são significativos, sendo agravados pela necessidade de uso de motores a combustão interna para suprir a demanda energética dos sistemas de refrigeração presentes nos armazéns (Calati, 2022).

Atualmente, apesar da ampla adoção dos sistemas convencionais de fornecimento de energia (rede-gerador), como destacado por Hamidinasab *et al.*, (2023), o setor agrícola, em conformidade com as políticas energéticas e ambientais, além de buscar benefícios econômicos e tecnológicos, está progressivamente investindo em sistemas fotovoltaicos.

Essa transição visa substituir a dependência dos motores a combustão interna em seus processos produtivos, tornando-os mais sustentáveis e econômicos. Isso ocorre devido à redução nos custos ambientais associados aos combustíveis fósseis, bem como à mitigação das emissões GEE originadas por esses equipamentos, como ressaltado por Elahi *et al.*, (2024).

Além disso, segundo Xiao *et al.*, (2018), avaliações desta natureza são importantes para promover a produção sustentável de uvas, através da redução das emissões de GEE associadas às atividades, bem como pelos impactos econômicos relacionados com a adoção de energia proveniente de matrizes renováveis, abundantes e de custo relativamente baixo (Rech, 2020).

Deste modo, o presente trabalho propõe avaliar as emissões de GEE associadas ao acondicionamento térmico refrigerado pós-colheita de uvas produzidas na região do Submédio São Francisco.

Nesta perspectiva, este estudo irá realizar uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) relativa ao sistema atual e comparar com os resultados obtidos considerando o cenário de inserção de um sistema fotovoltaico para suprir a demanda energética da unidade, de modo a verificar se tal medida tem potencial de redução de emissões de GEE para a etapa do processo produtivo da uva.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo deste trabalho é um sistema de refrigeração industrial utilizado para o acondicionamento térmico de uvas finas de mesa, em uma agroindústria produtora de uvas localizada no Sertão de Pernambuco, na região do Submédio Vale do São Francisco.

A planta de refrigeração está instalada dentro do bloco de processamento das frutas, no setor contíguo ao *Packing House*. Após os processos de recepcionamento, triagem, seleção, pesagem e embalagem da fruta, nas linhas de produção do *packing*, os *pallets* são movimentados para o setor de armazenamento refrigerado, iniciando a cadeia do frio da uva, sendo organizada conforme ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Fluxograma do processo de resfriamento das uvas.



Fonte: Autoria própria (2025).

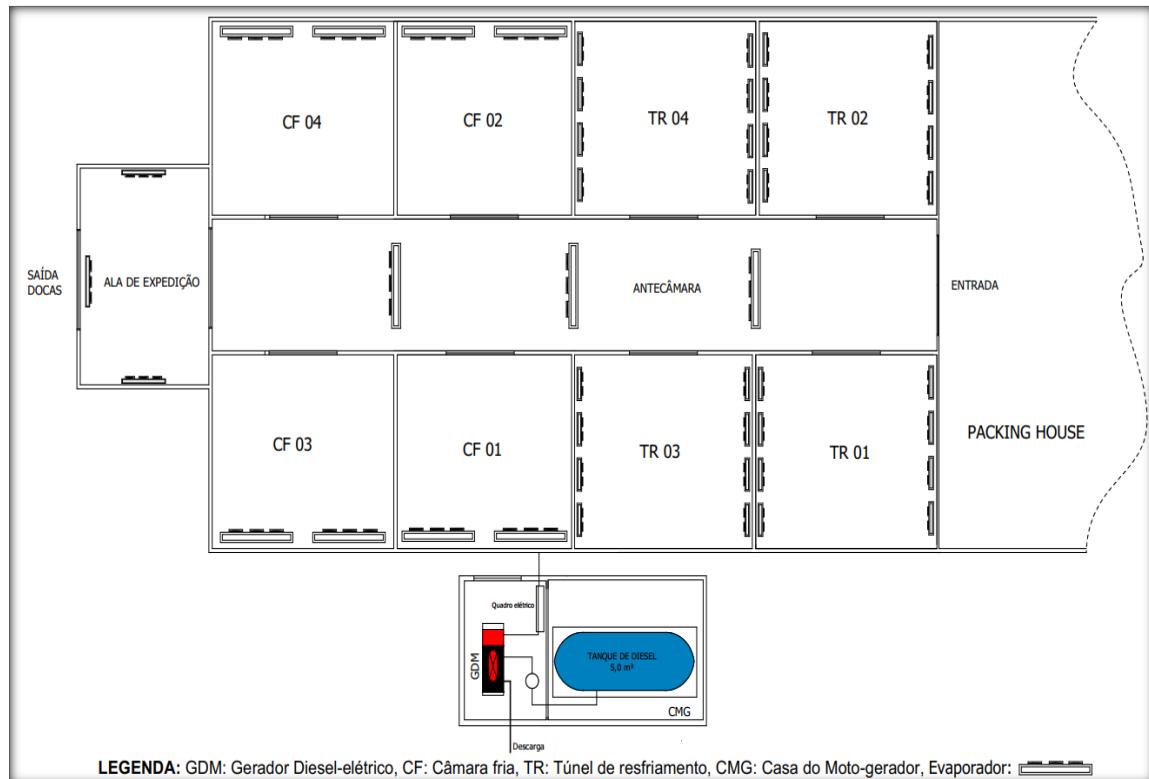
Nos túneis, os *pallets* carregados com a fruta são armazenados por um período de 12 horas, com o objetivo de reduzir a temperatura do carregamento de 25°C para 12°C, mantendo a temperatura e a umidade controladas. Após o período de armazenamento nos túneis, os *pallets* são enviados às câmaras frias através das antecâmaras, que são corredores climatizados a 10 °C que servem como via de passagem da planta de refrigeração.

As câmaras frigoríficas, por sua vez, são responsáveis pela redução da temperatura e manutenção da armazenagem térmica das frutas até o momento da expedição para o mercado consumidor, operando a 5 °C.

Por fim, a ala de expedição destaca-se como o local destinado ao carregamento dos *pallets* nos caminhões. Este espaço é caracterizado por ser refrigerado e isolado termicamente, operando a 5 °C, com a finalidade de preservar a temperatura dos carregamentos de frutas até o momento da entrada nos caminhões-baú refrigerados. A dinâmica operacional da planta é diária e contínua durante os períodos de safra, tornando-se intermitente durante a entressafra.

A Figura 5.2 mostra o processo de acondicionamento refrigerado da uva, onde a cadeia do frio é iniciada nos túneis de resfriamento rápido.

Figura 5.2 - Sistema de resfriamento das uvas – Disposição física da Planta de Refrigeração.



Fonte: Autoria própria (2025).

A planta é alimentada por energia elétrica fornecida pela rede de distribuição da concessionária e complementada por um motogerador a diesel WEG GTA 450 KVA, acionado diariamente durante o período da noite, das 18h às 21h, que é o horário de ponta de demanda de energia elétrica. Tal procedimento visa reduzir o custo operacional proveniente do preço mais elevado da energia elétrica fornecida pela concessionária.

Devido à importância da etapa de resfriamento no processo produtivo das uvas, o consumo energético da planta de refrigeração é elevado, estimado em 748 MWh/ano. Deste consumo, 50 MWh/ano (7,57%) são sustentados exclusivamente pelo motogerador a diesel, resultando em um consumo estimado de 45.625 litros de diesel S-10 anualmente.

Quanto à planta de resfriamento da agroindústria, detalhada na Figura 2, é composta por oito grupos autônomos e descentralizados de refrigeração por compressão de vapor, operando com o fluido refrigerante R22.

A disposição desses grupos na planta é organizada da seguinte forma: câmaras frias, antecâmara e a ala de expedição são equipadas com um grupo de 20 TR (toneladas de refrigeração) cada, enquanto quatro túneis de resfriamento são equipados com dois grupos de 40 TR cada.

Por sua vez, cada grupo de refrigeração é constituído por uma Unidade de Condensação (UCC), uma Unidade Evaporadora (EU) e um *rack* com compressores alternativos Danfoss MT64/80. A Tabela 5.1 detalha o quantitativo total por instalação e o total da planta.

Tabela 5.1 - Quantitativo de equipamentos da Planta de Refrigeração.

Instalações	Compressores	Condensadores	Evaporadores
Túneis de resfriamento	18	18	32
Antecâmara	03	03	03
Câmara	16	08	08
Ala de Expedição	03	03	03
TOTAL	40	32	46

Fonte: Autoria própria (2025).

A edificação da planta de acondicionamento refrigerado do objeto de estudo abrange uma área total de 1.653m². Sua estrutura é construída em concreto armado, contando com materiais isolantes térmicos para os ambientes refrigerados. A área total é distribuída entre quatro túneis de resfriamento rápido, câmaras frias, uma antecâmara e uma ala de expedição, conforme demonstrado na Figura 5.2.

O levantamento de dados para a elaboração deste estudo foi realizado por meio de visitas técnicas à instalação, onde foram coletadas informações sobre o maquinário de refrigeração e de potência utilizado no processo produtivo; mapeamento da instalação física; e, finalmente avaliação da demanda energética da planta, com o objetivo de estimar um

sistema fotovoltaico para suprir o consumo de energia elétrica requerido pela planta de refrigeração.

Até à conclusão deste estudo, a empresa não dispunha de sistema fotovoltaico (SFV), encontrando-se na fase de estudos para a sua implementação. Assim, este trabalho propõe três cenários de implementação de SFV para mitigação das emissões de GEE.

Para o dimensionamento dos SFVs, inicialmente se efetuou o levantamento do consumo energético anual da planta, por meio dos dados fornecidos pela agroindústria, considerando a localização e a área disponíveis, o recurso solar, a temperatura média anual, a acessibilidade, as distâncias entre a instalação e o ramal da rede elétrica da concessionária e, finalmente, a estrutura dos painéis, para implantação da instalação do SFV.

A implantação do sistema ocorrerá nas dependências da agroindústria, localizada no distrito de Vermelhos, município de Lagoa Grande (PE). O recurso solar exibido para esta localidade apresenta a taxa anual média de irradiação global horizontal de 5723 Wh/m². dia (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017), a temperatura média anual para a localidade é de 32,5 °C (Climatempo, 2024).

Quanto à instalação dos painéis, foi considerada uma estrutura fixa de perfis e fixadores de alumínio e aço galvanizado, específicos para instalação em cobertura metálica. A estrutura será localizada na própria planta de refrigeração e no telhado adjacente, com área disponível total de 2.200 m², sem sombreamento a 30 metros da rede de distribuição da concessionária.

Para tanto, foram dimensionados dois sistemas *on-grid*, de modo a emular três cenários viáveis para suprir a demanda energética da planta no presente estudo. A metodologia de cálculo utilizada para o dimensionamento dos SFVs baseou-se em Pinho e Galdino (2014) e Zilles (2016), utilizada para dimensionamentos de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR).

O primeiro sistema fotovoltaico foi dimensionado para uma capacidade instalada de 407 kWp, composto por 740 painéis fotovoltaicos modelo JAM 72S30 550/MR (JA Solar, 2022), com potência de 550W cada, e um conjunto de 4 inversores GROWATT modelo MAX75KTL3-X LV, com potência de 75kW. Este sistema corresponde à demanda fora de ponta da instalação, operando no formato híbrido com o gerador a diesel.

O segundo sistema foi dimensionado para atender à demanda energética de ponta e fora de ponta da instalação, com capacidade de 462 kWp, contando com 840 painéis modelo JAM 72S30 550/MR (JA Solar, 2022) com eficiência de conversão aproximada de 98%, e um conjunto de 3 inversores GROWATT de 125 kW, modelo MAX125KTL3-X LV. Neste

cenário, o gerador a diesel permanece em espera, sendo acionado durante os períodos de manutenção do SFV e em emergências.

Já o terceiro cenário também foi dimensionado para suprir a demanda de ponta e fora de ponta da instalação, com potência estimada em 462 kWp fornecidos por 840 painéis modelo JAM 72S30 550/MR (JA Solar,2022) e um conjunto com 3 inversores GROWATT de 125 kW, modelo MAX125KTL3-X LV, operando como único fornecedor energético. Neste cenário, o gerador a diesel e seus sistemas complementares são excluídos da planta, sendo a rede da concessionária o *backup* energético da planta.

Em todos os dimensionamentos dos SFVs do presente trabalho, foram considerados os módulos de inversores fotovoltaicos, cabeamentos elétricos e demais acessórios constituintes de um SFV padrão, como também a taxa de degradação dos painéis fotovoltaicos, cujo valor estimado é de 0,55% ao ano, conforme o fabricante.

Estes dimensionamentos levam em consideração todas as especificidades do processo produtivo e do perfil de consumo energético da planta, com o objetivo de torná-la autossuficiente energeticamente, eliminando o uso diário do motogerador.

5.2.2 Avaliação de Ciclo de Vida

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é um método de avaliação dos potenciais impactos ambientais associados a processos produtivos, produtos e serviços, sendo certificada por organismo internacional ISO e padronizada por normatizações específicas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006). A ACV pode ser utilizada para avaliar todo o ciclo de vida de um produto ou serviço (extração de matéria-prima, fabricação, transporte, uso e descarte), bem como pode analisar etapas específicas (Abreu *et al.*, 2022).

Conforme mencionado anteriormente, todos os dados da planta de refrigeração, incluindo informações sobre a edificação, maquinário e SFV foram obtidos através da coleta de informações em campo, consultando as documentações em posse da empresa, projetos, manuais e dados de placa de equipamentos.

Esta etapa foi realizada para inventariar todos os materiais constituintes dos componentes da planta, sendo uma etapa fundamental para o início da ACV da instalação como um todo. Os dados de entrada de inventário podem ser visualizados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Dados de entrada de inventário: composição material do objeto de estudo.

Componentes	Materiais	Transporte
Maquinário:	Aço: 4,14 t	
Sistema de refrigeração + Motogerador	Alumínio: 3,86 t Cobre: 6,95 t Ferro: 1,60 t	Rodoviário: 2.289 km
Insumos:	R22: 185 kg	
Combustível lubrificantes	Óleo P160: 100 kg	Rodoviário: 85 km
Fluido refrigerante	Diesel S-10: 37892 kg	
Sistema fotovoltaico:	Aço galvanizado: 0,20 t	
Painéis	Alumínio anodizado: 9,60 t	
Estrutura	Alumínio comum: 1,48 t	
Inversores + acessórios	Vidro temperado: 14,15 t Material eletrônico: 0,32 t	Rodoviário: 2.400 km
Cabeamentos	Cobre: 0,30 t Aço: 71,04 t	
Edificação:	Concreto: 606,25 t	Rodoviário 85 km
Superestrutura	Cerâmica: 149,150 t	Rodoviário 2.289 km*
Revestimento térmico	Zinco: 4,53 t Poliuretano PUR*: 35,40 t	

Fonte: Autoria própria (2025) com base em coleta de informações em campo, documentações da empresa, projetos, manuais e dados de placa de equipamentos.

A ACV foi desenvolvida com o software *SimaPro* versão 9.6.0.1, que segue a ABNT NBR ISO 14040 (2014a) e ABNT NBR ISO 14044 (2014b), utilizando-se a base de dados *Ecoinvent* v. 3.8 (2021) e o método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2021 GWP 100a (IPCC, 2021), que reúne, em métrica padrão, as emissões de gases de efeito estufa em unidade de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂-eq) ao longo de 100 anos. Assim, a ACV focou apenas na atividade de acondicionamento refrigerado da uva, englobando toda a sua estrutura física, de maquinário, energética e operacional.

Foram considerados quatro cenários, o atual e três possíveis cenários futuros (Tabela 5.3), com a adoção do SFV *on-grid* com diferentes configurações, de modo a comparar os resultados referentes à possível redução de emissões. O primeiro cenário contempla a demanda energética atual.

O cenário A contempla a demanda fora de ponta (parcial) e os cenários B e C suprindo a demanda energética total, sendo o cenário B com grupo gerador em espera e o cenário C sem gerador diesel-elétrico.

Tabela 5.3 - Esquemas energéticos propostos para o acondicionamento térmico da uva.

Cenário	Eletricidade da rede	Eletricidade do gerador diesel	Eletricidade do SFV
Atual	698 MWh/ano	57 MWh/ano	-
Cenário A FP	-	57 MWh/ano	649 MWh/ano
Cenário B PFP + G	-	23,45 MWh/ano	724,70 MWh/ano
Cenário C PFP - G	-	-	748,14 MWh/ano

Fonte: Autoria própria (2025).

A ACV considerou a fabricação, transporte e descarte. A vida útil da planta de refrigeração e do sistema fotovoltaico é estimada pelos fabricantes em 25 e 35 anos, respectivamente. Neste estudo, foi considerado o recorte temporal de 25 anos para o SFV e maquinário, e de 40 anos para a edificação.

Para o parâmetro de descarte final, a reciclagem foi considerada para cobre, aço, alumínio, ferro e vidro temperado, ao longo de 85 km de transporte entre a sede da empresa até o centro de reciclagem mais próximo.

O fluido refrigerante R22 e os óleos lubrificantes do motogerador e dos compressores foram também reciclados. Os materiais da edificação foram destinados a aterros, com o concreto utilizado como aterro de estradas da própria empresa.

Por fim, para quantificar o impacto ambiental associado às emissões de GEE relativos ao consumo de energia elétrica fornecida pela rede de distribuição, utilizou-se a metodologia proposta por Carvalho e Delgado (2017).

Foram utilizados os dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2024) mais recentes para a região nordeste, levando em conta as contribuições das principais fontes de geração que compõem o mix energético: eólica (61,45%), hidráulica (24,18%), solar (11,95%), gás (1,42%) e óleo (0,34%).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5.4 mostra as emissões relacionadas com a estrutura e os equipamentos utilizados para o acondicionamento da uva no cenário atual. Em relação ao mix elétrico do subsistema Nordeste, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao consumo de eletricidade da rede são de 0,065 kg CO₂-eq/kWh (ONS, 2024), considerando as porcentagens de contribuição das tecnologias de geração descritas na Tabela 3.

Os valores foram obtidos por meio do *software Simapro* (Simapro, 2024) usando *Ecoinvent 3.8* (2021) e *IPCC 2021 GWP 100a* (IPCC,2021). Para o consumo de diesel, as emissões associadas são de 0,898 kg CO₂-eq/kWh, valor que inclui sua cadeia de produção e sua combustão.

Tabela 5.4 - Emissões associadas ao acondicionamento da uva: cenário atual.

Emissões (t CO ₂ -eq)			
Componentes	Materiais	Transporte	Descarte
	Aço: 21,60	1,60	-7,40
Maquinário	Alumínio:55,20	1,49	-84,50
Vida útil 25 anos	Cobre: 82,20	2,69	11,70
	Ferro fundido:7,85	0,60	-2,61
	Zinco: 7,45	0,48	-2,11
Total 100,60 CO ₂ -eq = 4,024 t CO ₂ -eq/ano			
Insumos	R22:76,70	1,80	18,40
Vida útil 25 anos	Óleo P160: 3,65	0,87	4,50
	Diesel S-10: 188,00	0,55	0
Total 298,39 t CO ₂ -eq = 11,94 t CO ₂ -eq/ano			
Edificação	Aço: 371,00	1,02	-121,00
Vida útil 40 anos	Concreto: 53,90	8,71	0,150
	Cerâmica: 173,00	2,14	91,40
	Zinco: 27,20	0,006	-7,70
	Poliuretano PUR: 197,00	13,70	-60,90
Total 750,00 CO ₂ -eq = 18,74 t CO ₂ -eq/ano			
Consumo de eletricidade da rede elétrica 698 MWh/ano		Total	45,37 t CO ₂ -eq/ano
Total de emissões associadas ao cenário atual 80,10 t CO ₂ -eq/ano			

Fonte: Autoria própria (2025).

As emissões de GEE demonstradas no cenário atual, através da Tabela 4, são representadas pelo maquinário, insumos, edificação e consumo de eletricidade, respectivamente. Os dados indicam que o consumo de eletricidade da rede é atualmente a principal fonte de emissões totais de GEE, contribuindo com quase 57% do total.

Em um segundo lugar distante, encontra-se a edificação, com 23% das emissões totais. Os insumos utilizados no processo representam 15% das emissões, indicando que os materiais ou recursos empregados, apesar de possuírem um valor absoluto relevante, não desempenham um papel tão significativo nas emissões totais.

Por fim, o maquinário da planta corresponde a 5% das emissões, apresentando um impacto relativamente menor em comparação às demais fontes analisadas.

Em relação às emissões associadas aos materiais constituintes de cada componente inventariado, destacam-se os derivados dos hidrocarbonetos (Poliuretano, Diesel e R22) e a cerâmica, apresentando maiores impactos associados à matéria-prima, além dos materiais metálicos, aço, alumínio e cobre.

Apesar dos impactos elevados observados na Tabela 4 para os materiais indicados no inventário, excetuando-se o diesel, os demais são recicláveis ou reutilizáveis. Isso é evidenciado pelos quantitativos positivos e negativos quantificados na etapa de descarte do ciclo de vida destes materiais.

Os quantitativos positivos representam um ônus ambiental adicional durante sua reciclagem ou reuso, enquanto os resultados negativos indicam um benefício ambiental, relativo à menor emissão de GEE associada à etapa de descarte.

Mesmo com recorte temporal superior aos demais itens inventariados da planta, os resultados relativos às emissões associadas à edificação são altos e se explicam devido a esta ser composta por materiais cujo impacto ambiental associado às etapas de obtenção da matéria-prima serem elevados (Zhu *et al.*, 2024).

Em relação à etapa de transporte, devido às quantidades de materiais e insumos necessários, além das distâncias percorridas até o local da planta serem significativas, as emissões associadas a esta etapa representaram 44,50% da totalidade do GEE emitido para o cenário atual.

Já para os insumos, o impacto associado ao consumo de diesel S-10 representou 63% do total de CO₂ equivalente emitido, seguido do fluido refrigerante R22, responsável por 32,4% das emissões. Para efeito de comparação, devido ao uso extensivo do combustível no processo produtivo, as emissões associadas ao seu uso são maiores do que as emissões totais associadas ao maquinário ao longo da vida útil estimada.

Para o maquinário da planta, o cobre e o alumínio respondem juntos por 72,3% das emissões na etapa de matéria-prima, sendo a etapa de transporte responsável por 61%.

Devido ao maquinário ser constituído inteiramente por materiais metálicos, os resultados demonstrados na etapa de descarte representam o ganho ambiental referente à reciclagem/reutilização destes materiais, sendo o cobre utilizado nos trocadores de calor da planta de refrigeração e no gerador, o material mais ecologicamente nocivo, emitindo 11,9t CO₂-eq na etapa de descarte.

A Tabela 5.5 mostra as emissões relacionadas com a estrutura e os equipamentos utilizados para o acondicionamento da uva no cenário A.

Tabela 5.5 - Emissões associadas ao acondicionamento da uva - Cenário A.

Componentes	Materiais	Emissões (t CO₂-eq)	
		Transporte	Descarte
Maquinário	idem cenário atual	-	-
			Total 100,60 CO ₂ -eq = 4,024 t CO ₂ -eq/ano
Insumos	idem cenário atual - materiais	-	-
			Total 298,39 t CO ₂ -eq = 11,94 t CO ₂ -eq/ano
Sistema fotovoltaico	Módulo monocristalino: 615,00	8,58	-100,00
	Cabeamento em cobre: 3,16	0,10	0,48
	Inversores + Acessórios: 0,93	0,13	0,75
	Estrutura metálica	-	-
	Aço galvanizado: 1,01	0,08	0,34
Vida útil 25 anos	Alumínio: 21,20	0,60	-32,50
			Total 519,87 t CO ₂ -eq = 20,79 t CO ₂ -eq/ano
Edificação	Mesmo do cenário atual	-	-
			Total 750,00 t CO ₂ -eq = 18,74 t CO ₂ -eq/ano
Consumo de eletricidade da rede elétrica 0 MWh/ano			
			Total 18,74 t CO ₂ -eq/ano
			Total de emissões associadas ao cenário A 55,50 t CO ₂ -eq/ano

Fonte: Autoria própria (2025).

O inventário realizado para o cenário A engloba a instalação do SFV para a demanda energética fora de ponta da planta de refrigeração, consistindo em um sistema composto por 740 painéis, estrutura, inversores, cabeamento e demais acessórios.

As emissões de carbono relativas ao maquinário, aos insumos e à edificação permaneceram inalteradas, tendo em vista que a planta utilizaria o gerador para suprir a demanda energética nos horários de ponta, nos mesmos parâmetros de operação do cenário atual, seguindo a mesma tendência para os insumos, cujo consumo de diesel não se altera.

A edificação, por sua vez, também não sofrerá alterações, restando tão somente a inclusão do SFV no inventário, com contribuição relativa à emissão de carbono de 519,87 t CO₂-eq, representando 31% das emissões totais do cenário A.

A partir da inclusão do SFV, foi observado o decréscimo de 30% nas emissões totais do cenário A em relação ao cenário atual. Esta redução se dá exclusivamente devido à implantação do SFV na planta, impactando positivamente nas emissões associadas à geração de energia.

Apesar da redução de GEE alcançada no cenário A, os módulos monocristalinos respondem por 95% das emissões de GEE associadas à etapa de produção, em relação ao total de emissões vinculadas ao ciclo de vida do SFV. Esse resultado é semelhante aos encontrados por Choudhary *et al.*, (2022) e Zhu *et al.*, (2024).

De todo o modo, apesar do impacto ambiental proveniente das etapas de produção e transporte do SFV, todos os materiais constituintes são recicláveis/reutilizáveis, como os módulos fotovoltaicos e a estrutura em alumínio. Estes componentes são responsáveis pelas maiores parcelas de redução das emissões totais de CO₂ na etapa de descarte, correspondendo a reduções nas emissões em 100 t CO₂-eq e 32,5 t CO₂-eq., respectivamente, refletindo benefícios ambientais significativos no ciclo de vida do SFV.

A Tabela 5.6, por sua vez, mostra as emissões relativas à estrutura e aos equipamentos utilizados para o acondicionamento da uva no cenário B.

Tabela 5.6 - Emissões associadas ao acondicionamento da uva - Cenário B.

Emissões (t CO ₂ -eq)			
Componentes	Materiais	Transporte	Descarte
Maquinário 25 anos	Idem cenário atual		
		Total 100,60 CO ₂ -eq = 4,024 t CO ₂ -eq/ano	
Insumos 25 anos	R22: 76,40 Óleo P160: 3,65 Diesel S-10: 7,73	1,80 0,87 0,02	18,40 4,50 0
		Total 117,60 t CO ₂ -eq = 4,70 t CO ₂ eq/ano	
Sistema fotovoltaico 25 anos	Módulo monocristalino: 698,00	8,58	-114,00
	Cabeamento em cobre: 3,82	0,81	0,52
	Inversores + Acessórios: 6,40	0,24	0,74
	Estrutura metálica Aço galvanizado: 1,00 Alumínio: 21,20	1,00 0,60	-0,34 -32,50
		Total 595,36 t CO ₂ -eq = 23,81 t CO ₂ -eq/ano	
Edificação	Idem cenário atual	-	-

40 anos	Total 750,00 t CO ₂ -eq = 18,74 t CO ₂ -eq/ano
Consumo de eletricidade da rede elétrica 0 MWh/ano	-
Total de emissões associadas ao cenário B	51,28 t CO ₂ -eq/ano

Fonte: Autoria própria (2025).

Para o cenário B, que emula o consumo energético demandado pela planta de refrigeração pelo SFV na sua totalidade, com o gerador mantido em modo de espera, é observado um decréscimo de 36% em relação ao cenário atual e 7,6% relativamente ao cenário A.

As emissões associadas à planta para o cenário são de 51,29 t CO₂-eq e 23,80 t CO₂-eq/ano ao longo de sua vida útil. Neste cenário, os quantitativos inventariados das emissões referentes à edificação e ao maquinário permanecem inalterados, variando as quantidades relacionadas ao SFV, que são maiores para o cenário.

Apesar do aumento na quantidade de painéis, estrutura, inversores e acessórios por conta de o SFV ser maior neste cenário, verifica-se um decréscimo de 60% nas emissões associadas aos insumos em relação ao cenário atual. Sendo alavancada pela redução no consumo de diesel para fornecimento de energia elétrica para a planta em 96% em comparação com o cenário atual.

Esta redução é alcançada em especial devido à mitigação do consumo de diesel pelo gerador, uma vez que tal equipamento passará a operar em espera programada, estimada em até 15 dias por ano.

A redução das emissões ocorre exclusivamente pela adoção do SFV na planta de refrigeração, sendo responsável pela emissão total de 595 t CO₂-eq, representando aproximadamente 54% das emissões de GEE associadas ao cenário B.

A seguir, a Tabela 5.7 detalha as emissões relacionadas com a estrutura e os equipamentos utilizados para o acondicionamento da uva no cenário C.

Tabela 5.7 - Emissões associadas ao acondicionamento da uva - Cenário C.

Componentes	Materiais	Emissões (t CO ₂ -eq)	
		Transporte	Descarte
Maquinário 25 anos	Aço: 8,09	0,60	-2,63
	Alumínio: 55,20	0,19	-84,50
	Cobre: 74,20	2,32	10,06
	Ferro fundido: 2,54	0,48	-8,43

Zinco: 7,45	1,49	-2,11
Total 64,95 t CO ₂ -eq = 2,60 t CO ₂ -eq/ano		
Insumos 25 anos	R22: 76,71	0,87
	Óleo P160: 3,61	0,87
Total 105,82 t CO ₂ -eq = 4,23 t CO ₂ -eq/ano		
Edificação	Idem cenário atual	
Total 750,00 t CO ₂ -eq = 18,74 t CO ₂ -eq/ano		
Sistema fotovoltaico	Mesmo do cenário B	
Total 519,87 t CO ₂ -eq = 23,81 t CO ₂ -eq/ano		
Consumo de eletricidade da rede elétrica 0 MWh/ano		
- -		
Total de emissões associadas ao cenário C		49,39 t CO ₂ -eq/ano

Fonte: Autoria própria (2025).

Já o cenário C, considera o fornecimento total de energia elétrica pelo SFV sem gerador elétrico, ou seja, a energia demandada pela planta de refrigeração é exclusivamente fornecida pelo SFV. Analisando-se a Tabela 7, observa-se uma redução de 11% das emissões totais em relação ao cenário B, equipado com a mesma configuração de SFV.

Esta redução nas emissões totais se dá majoritariamente pela eliminação do consumo de diesel nos insumos e a redução do impacto ambiental associado aos equipamentos, representado pela retirada do gerador e seus acessórios da planta de refrigeração.

Para os insumos, a redução das emissões associadas ao consumo de diesel em relação ao cenário atual é de 65%. Para o maquinário, a redução percentual é de 35%, no comparativo geral entre os cenários B e C.

Por outro lado, na comparação entre os cenários C e atual, observa-se o decréscimo percentual de 38% nas emissões totais. Esta redução se explica pela adoção do SFV na planta considerada para o cenário C.

Além das reduções das emissões associadas aos insumos e maquinário descritos anteriormente, o impacto gerado pela instalação e operação do SFV na planta promove ganho

ambiental alcançado pela geração de energia mais limpa e pela eliminação do uso de gerador elétrico.

Diante disso, no comparativo entre os cenários atual e C, foram observadas reduções nas emissões de carbono equivalente para o maquinário em percentuais semelhantes aos estimados no comparativo entre os cenários B e C.

Para os insumos, há uma redução de 10% no cenário C comparado ao B, que é de 98,6% entre o cenário C e o atual. A Tabela 5.8 faz um resumo das emissões anuais associadas a cada cenário.

Tabela 5.8 - Resumo das emissões totais associadas a cada cenário.

Cenário	t CO ₂ -eq/ano
Atual	80,10
Cenário A	55,50
Cenário B	51,28
Cenário C	46,36

Fonte: Autoria própria (2025).

Devido ao uso intensivo do gerador a diesel, cuja energia produzida contribui significativamente para o impacto ambiental associado à energia no cenário atual. O quantitativo de emissões, neste caso, é maior quando comparado aos demais cenários em que o SFV é considerado.

No cenário A, no qual o SFV foi dimensionado para suprir apenas a demanda energética fora de ponta da planta de refrigeração, observa-se um decréscimo de 31% nas emissões anuais.

Mesmo com a redução de 91,80% na demanda de energia da rede, o gerador a diesel continua a operar da mesma forma que no cenário atual, o que pode ser explicado pela introdução do SFV, que contribui com emissões relacionadas com a produção, o transporte e o descarte de seus materiais. O cenário A não elimina a necessidade de uso do gerador a diesel, que continua a gerar emissões de carbono associadas ao consumo de combustível fóssil.

No cenário B, o SFV foi dimensionado para suprir totalmente a demanda energética da planta de refrigeração, com o gerador em *standby*. Isso resulta em um decréscimo de 36% nas emissões anuais associadas ao processo de acondicionamento térmico da uva, quando comparado à configuração atual da planta.

Devido à mitigação do uso do gerador na operação – que passa a atuar apenas como *backup* energético, ou seja, entrando em operação pontualmente em casos de manutenção ou indisponibilidade momentânea do SFV –, as emissões são reduzidas em 54%, devido ao impacto positivo gerado pela energia proveniente do SFV. Ainda assim, nesta configuração operacional, foi identificada uma redução aproximada de 96% no consumo de diesel, o que resultou em uma diminuição de 61% nas emissões de GEE relativas aos insumos, em comparação ao cenário atual.

Em linha com Gorjian *et al.*, (2023), os resultados indicam o impacto do uso do diesel como fonte energética complementar para a produção de frio na planta, destacando sua significativa contribuição para o total de emissões de GEE, mesmo com o tempo de operação limitado. Observa-se, também, uma redução considerável nas emissões provenientes dos insumos ao substituir essa fonte energética pelo SFV.

Por fim, ao analisar a adoção do SFV no cenário C, os resultados demonstram que a retirada do gerador como fonte energética não influencia na oferta de energia para a planta, porém reduz as emissões. O cenário C, assim como o cenário B, tem como objetivo suprir totalmente a demanda energética da planta de refrigeração. Contudo, no presente cenário, considera-se o descomissionamento do grupo gerador da planta.

A demanda de energia elétrica durante os períodos de parada do SFV será atendida exclusivamente pela rede elétrica da concessionária. A ACV para este cenário apresentou redução estimada em 38% nas emissões, em comparação com a configuração atual da planta.

Quando comparado ao cenário B, no qual o grupo gerador opera em estado de espera, a redução nas emissões de GEE é modesta, representando 11%. Esse percentual de redução está mais relacionado com a eliminação do impacto associado ao consumo de diesel e do gerador do que ao impacto gerado pelos materiais constituintes do SFV.

Outro parâmetro utilizado para complementar a ACV é o cálculo do fator de emissão, em kg CO₂-eq/kWh produzido pelo SFV. No caso do SFV dimensionado para o cenário A, as emissões totais são de $5,23 \times 10^5$ kg CO₂-eq ao longo de 25 anos, ou seja, 20,79 t CO₂-eq/ano. Este valor pode ser dividido pela produção anual para o cenário, de modo a determinar seu fator de emissão.

No cenário A, a produção de eletricidade proveniente do SFV é de 649 MWh, resultando em um fator de emissão de 0,032 kg CO₂-eq/kWh.

Para o cenário B, a produção do SFV é de 724,7 MWh, com emissões associadas ao SFV estimadas em 23,81 t CO₂-eq/ano, levando a um fator de emissão de 0,0328 kg CO₂-eq/kWh.

eq/kWh. Por fim, para o cenário C, sua produção anual é de 748,14 MWh, com emissões de 23,81 t CO₂-eq/ano e, portanto, um fator de emissão de 0,0318 kg CO₂-eq/kWh.

Estes fatores de emissão estão alinhados com estudos existentes. Schultz e Carvalho (2022) estimaram um fator de impacto de 0,044 kg CO₂-eq/kWh para um SFV com 16,40 MWh de capacidade instalado na região do sertão paraibano, no nordeste brasileiro, para abastecimento da rede elétrica local.

Já Gonçalves *et al.*, (2021) realizaram um estudo comparativo entre um SFV convencional e um semitransparente para uma demanda energética de 386kWh/dia, com pegada de carbono de 0,0257 kg CO₂-eq/kWh. Os estudos de impacto ambiental para uma usina fotovoltaica de microgeração com capacidade de 45kWp na cidade de Cuiabá realizados por Dantas *et. al.*, (2019) estimaram um fator de emissão de CO₂ em 0,035 kg CO₂-eq/kWh, reduzindo assim o impacto associado ao consumo de energia elétrica em até 32% em relação à energia fornecida pela concessionária.

Todos os fatores de emissão obtidos para os cenários aqui estudados são muito mais baixos que o fator de emissão associado ao consumo de eletricidade da rede elétrica, 0,065 kg CO₂-eq/kWh.

Os resultados desta avaliação, relativa ao custo ambiental associado ao consumo de energia para o processo de acondicionamento da uva, confirmam que a configuração do cenário B apresenta o melhor resultado ambiental em termos de fator de emissão, apesar de não excluir o uso de combustível fóssil em sua operação. O cenário C apresenta as mais baixas emissões de GEE anuais.

Assim, com base nos resultados obtidos nas quantificações de GEE para os cenários estudados, a implementação de energia solar fotovoltaica no processo de acondicionamento da uva se apresenta como uma solução viável para diminuir as emissões de GEE.

5.4 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o potencial de mitigação de impactos ambientais decorrentes do processo de acondicionamento térmico refrigerado no pós-colheita de uvas produzidas na região do Submédio Vale do São Francisco. Por meio da aplicação da metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida, foi possível quantificar as emissões de gases de efeito estufa associadas ao cenário atual do processo de acondicionamento da uva. Em seguida, foram propostos três cenários com a implementação de energia solar fotovoltaica.

O primeiro cenário considerou um sistema solar fotovoltaico de 407 kWp, correspondendo à demanda fora de ponta da instalação, operando no formato híbrido com o gerador a diesel. O segundo sistema foi dimensionado para atender à demanda energética de ponta e fora de ponta da instalação, com capacidade de 462 kWp, onde o gerador a diesel permanece em espera, sendo acionado durante os períodos de manutenção e em emergências.

Já o terceiro cenário também foi dimensionado para suprir a demanda de ponta e fora de ponta da instalação, com potência estimada em 462 kWp. O gerador a diesel e seus sistemas complementares são excluídos da planta, sendo a rede da concessionária o *backup* energético da planta.

No cenário atual, compara-se o consumo energético de 698 MWh/ano proveniente da rede elétrica e 57 MWh/ano advindo do diesel, o que leva a emissões de 80,1 t CO₂-eq/ano. No primeiro cenário proposto, o gerador diesel também produz 57 MWh/ano e o sistema solar fotovoltaico produz 649 MWh/ano, resultando em emissões de 55,5 t CO₂-eq/ano.

No segundo cenário, o gerador diesel reduz sua produção para 23,45 MWh/ano, com a produção de 724,7 MWh pelo sistema fotovoltaico, resultando em emissões de 51,28 t CO₂-eq/ano. No terceiro cenário, não há geração a diesel e o sistema fotovoltaico produz 748,14 MWh/ano, levando a emissões anuais de 49,38 t CO₂-eq/ano.

Quando se analisou o fator de emissão associado à produção de eletricidade por meio do sistema solar fotovoltaico, obteve-se 0,032 kg CO₂-eq/kWh, 0,0328 kg CO₂-eq/kWh e 0,0318 kg CO₂-eq/kWh, respectivamente, para os cenários propostos. Todos os fatores de emissão obtidos para os cenários aqui estudados são muito mais baixos que o fator de emissão associado ao consumo de eletricidade da rede elétrica, 0,065 kg CO₂-eq/kWh.

O terceiro cenário, além de obter as mais baixas emissões anuais, também resultou no fator de emissão mais baixo.

Como proposição para estudos futuros, sugere-se a realização de estudos exergoambientais e exergoeconômicos, que considerem outras variáveis importantes, como a avaliação de eficiência energética e térmica da planta, custos de instalação e manutenção do sistema fotovoltaico, bem como dos equipamentos do sistema frigorífico e da edificação.

Estudos que levem em conta a sazonalidade da demanda energética da planta nos períodos de safra e entressafra também podem ser implementados, de modo a comparar e refinar os resultados do presente trabalho. Tais estudos podem auxiliar a agroindústria a direcionar investimentos para tornar o processo de acondicionamento térmico mais sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura: NBR ISO 14040*, Rio de Janeiro, versão corrigida 2014a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações: NBR ISO 14044*, Rio de Janeiro, ABNT – versão corrigida 2014b.
- ABREU, R. P. *et al.* **Thermoeconomic and thermoenvironmental analysis of the chilled water system in a shopping mall.** International Journal of Refrigeration, v. 134, p. 304–311, 1 fev. 2022.
- ARAÚJO, L. S. *et al.*, (2020). **Proposta de Projeto e Estudo de Minigeração Distribuída de Energia Elétrica Fotovoltaica na Cidade de Manaus/AM - Brasil.** European Academic Research. III. 5534.
- ARABKOOHSAR, A.; MACHADO, L.; KOURY, R.N.N. **Operation analysis of a photovoltaic plant integrated with a compressed air energy storage system and a city gate station.** Energy, volume 98, 2016, pages 78-91, ISSN 0360-5442.
- BUREK, J.; NUTTER, D. W. **A life cycle assessment-based multi-objective optimization of the purchased, solar, and wind energy for the grocery, perishables, and general merchandise multi-facility distribution center network.** Applied Energy, v. 235, p. 1427–1446, fev. 2019.
- BURSZTYN, M. **Energia solar e desenvolvimento sustentável no Semiárido: o desafio da integração de políticas públicas**1. Estudos Avançados, v. 34, n. 98, p. 167–186, abr. 2020.
- CALATI, M.; HOOMAN, K.; MANCIN, S. **Thermal storage based on phase change materials (PCMs) for refrigerated transport and distribution applications along the cold chain: A review.** International Journal of Thermofluids, v. 16, p. 100224, 1 nov. 2022.
- CARVALHO, MONICA; DELGADO, DANIELLE. (2017). **Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix.** LALCA-Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida. 1. 64. 10.18225/lalca. v1i1.3779.
- CHOUDHARY, K. *et al.* **Comparative Life Cycle Assessments of Photovoltaic Thermal Systems with Earth Water Heat Exchanger Cooling.** Procedia CIRP, v. 105, p. 255–260, 2022.
- DANTAS, O. DE L.; APOLONIO, R.; JUNIOR, A. A. **Potencial da geração distribuída e seu impacto na redução de emissões de CO₂:** Estudo de um micro usina fotovoltaica conectada à rede de energia elétrica. Engevista, v. 21, n. 2, p. 329–340, maio 2019.

ELAHI, M. *et al.* **Optimizing IC engine efficiency:** A comprehensive review on biodiesel, nanofluid, and the role of artificial intelligence and machine learning. *Energy conversion and management*, v. 307, p. 118337–118337, maio 2024.

FEDELI, S.; GOEDHALS-GERBER, L.; VAN DYK, E. **Identifying temperature breaks in table grape export cold chains from South Africa to the United Kingdom:** A Western Cape case. *Transportation Research Procedia*, v. 67, p. 63–71, 2022.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2021. Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto protocol. (2021).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO, ISO 14040:2006: **Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework**, Genebra, ISO 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO, ISO 14044:2006: **Environmental management - Life cycle assessment – Requirements and guidelines**, Genebra, ISO 2006.

GONÇALVES, G. L. *et al.* **Comparação ambiental entre sistema fotovoltaico convencional e semitransparente.** *Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica* do IFPB, v. 1, n. 53, p. 103, 3 fev. 2021.

GORJIAN, S. *et al.* **The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations.** *Journal of Cleaner Production*, v. 292, p. 126030, abr. 2021.

HAMIDINASAB, B. *et al.* **Illuminating sustainability:** A comprehensive review of the environmental life cycle and exergetic impacts of solar systems on the agri-food sector. *Solar Energy*, v. 262, p. 111830, 15 set. 2023.

HAN, J.-W. *et al.* **Numerical modeling of forced-air cooling of palletized apple: Integral evaluation of cooling efficiency.** *International Journal of Refrigeration*, v. 89, p. 131–141, maio 2018.

HAN, J. W. *et al.* **A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products:** Current status, challenges, and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, volume 109, 2021.

IKRAM, H. *et al.* **Techno-economic evaluation of a solar PV integrated refrigeration system for a cold storage facility.** *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 44, p. 101063, abr. 2021.

LOIVA, M. *et al.* **COMUNICADO TÉCNICO Vitivinicultura brasileira:** panorama 2021. Foto: Loiva Maria Ribeiro de Mello. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1149674/1/Com-Tec-226.pdf>>.

LITARDO, J. *et al.* **Air-conditioning life cycle assessment research:** A review of the methodology, environmental impacts, and areas of future improvement. *Energy and Buildings*, volume 296, 2023, 113415, ISSN 0378-7788.

LUFU, R.; AMBAW, A.; OPARA, U. L. **Water loss of fresh fruit: Influencing pre-harvest, harvest and postharvest factors.** Scientia Horticulturae, v. 272, p. 109519, out. 2020.

KHUMALO, G. *et al.* **The non-conformance of in-transit citrus container shipments to cold protocol markets:** A systematic literature review. Food Control, v. 125, p. 107947, jul. 2021.

MATAR, C. *et al.* **Benefit of modified atmosphere packaging on the overall environmental impact of packed strawberries.** Postharvest Biology and Technology, volume 177, 2021, 111521, ISSN 0925-5214.

NATARAJAN, B., *et al.* **Development and performance evaluation of a hybrid portable solar cold storage system for the preservation of vegetables and fruits in remote areas,** Journal of Energy Storage, Volume 72, Part A, 2023,

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, **Carga e Geração.** Disponível em: <[Http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao](http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao)>. Acesso em 06 ago. 2024.

PENG, Z. *et al.* **Thermo-economic analysis of absorption-compression hybrid cooling systems with parallel subcooling and recooling for small scale low-grade heat source and low temperature application.** International Journal of Refrigeration, mar. 2022.

PEREIRA, E. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar.** [s.l.] Universidade Federal de São Paulo, 2017.

RECH, S.; FINCO, E.; LAZZARETTO, A. **A multicriteria approach to choose the best renewable refrigeration system for food preservation.** Renewable Energy, v. 154, p. 368–384, jul. 2020.

REVISTA HORTIFRUTI BRASIL. **Anuário 2023 e 2024.** Edição especial ano 22, nº 240. Dez/23 - Jan 24. ISSN 1981-1837. Disponível em:<<https://www.hfbrasil.org.br/br/revista/anuario-hf-brasil-retrospectiva-2023-perspectiva-2024.aspx>>. Acesso em 09 de mar. 2024.

RÜHLIN, V.; SCHERRER, M. **Towards net zero emissions logistics cold chains – An early-stage assessment of GHG reduction potentials in the fruits and vegetables industry.** Transportation Research Procedia, v. 72, p. 1105–1112, 1 jan. 2023.

SCHULTZ, H. S.; CARVALHO, M. **Design, Greenhouse Emissions, and Environmental Payback of a Photovoltaic Solar Energy System.** Energies (19961073), v. 15, n. 16, p. 6098–N.PAG, 15 ago. 2022.

SPAGNOL, W. A. *et al.* **Monitoramento da cadeia do frio: novas tecnologias e recentes avanços.** Brazilian Journal of Food Technology, v. 21, n. 0, 13 nov. 2017.

VASCONCELOS, O. C. M. *et al.* **Modeling ‘Tommy Atkins’ mango cooling time based on fruit physicochemical quality.** Scientia Horticulturae, v. 244, p. 413-420, 2019.

WRÓBEL-JEDRZEJEWSKA, M.; POLAK, E. **Determination of carbon footprint in the processing of frozen vegetables using an online energy measurement system.** Journal of

Food Engineering, Volume 322, 2022, 110974, ISSN 0260-8774.
<https://doi.org/10.1016/j.foodeng.2022.110974>.

WU, W *et al.* **Environmental trade-offs in fresh-fruit cold chains by combining virtual cold chains with life cycle assessment.** Applied Energy, volume 254, 2019, 113586, ISSN 0306-2619.

XIAO, X. *et al.* **Energy Conservation Potential Assessment Method for Table Grapes Supply Chain.** Sustainability, v. 10, n. 8, p. 2845, 10 ago. 2018.

ZILLES, R. *et al.* **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** [s.l.] Oficina de Textos, 2016.

ZHU, Z. *et al.* **Evaluation of carbon emissions for fresh food last-mile delivery: A comparative analysis of two refrigeration methods.** Case Studies in Thermal Engineering, v. 60, p. 104787–104787, 4 jul. 2024.

CAPÍTULO VI

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo geral realizar uma análise termodinâmica e ambiental de um sistema de refrigeração utilizado no processo de acondicionamento térmico refrigerado no pós-colheita de uvas, na região do Submédio Vale do São Francisco.

Esse objetivo foi plenamente atingido, uma vez que foi possível quantificar o desempenho térmico e exergético da planta frigorífica, bem como mensurar os impactos ambientais associados ao seu consumo energético, por meio da aplicação da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

Os principais resultados demonstraram que o sistema frigorífico opera com desempenho inferior ao esperado, apresentando um coeficiente de desempenho (COP) global de 4,82, valor 30% menor em relação ao estimado através de dados de placa/projeto.

As eficiências exergéticas também foram comprometidas, com média global de 23%, sendo que os piores desempenhos foram observados nos túneis 01, 03 e 04, e nas câmaras 02 e 04, cujas eficiências ficaram abaixo de 20%. Identificou-se ainda que os evaporadores e condensadores foram os principais equipamentos responsáveis pela destruição exergética da planta, representando juntos cerca de 67% das perdas.

A análise ambiental revelou que, no cenário atual, o consumo energético da planta é de 698 MWh/ano provenientes da rede elétrica, acrescido de 57 MWh/ano gerados por um sistema a diesel, totalizando emissões de 80,1 t CO₂-eq/ano.

Na busca por alternativas sustentáveis, foram simulados três cenários com a integração de sistemas de energia solar fotovoltaica. O primeiro cenário considerou um sistema de 407 kWp, operando em paralelo com o gerador a diesel, resultando em emissões de 55,5 t CO₂-eq/ano.

No segundo cenário, com sistema fotovoltaico de 462 kWp e gerador diesel em stand-by, as emissões caíram para 51,28 t CO₂-eq/ano. Já o terceiro cenário, também com 462 kWp, eliminou o uso do diesel, utilizando a rede elétrica como backup, reduzindo as

emissões para 49,38 t CO₂-eq/ano, além de apresentar o menor fator de emissão, 0,0318 kg CO₂-eq/kWh — menos da metade do fator da rede elétrica (0,065 kg CO₂-eq/kWh).

Os resultados obtidos demonstram que a adoção de sistemas fotovoltaicos na matriz energética da planta não apenas contribui para a mitigação de impactos ambientais, mas também representa uma alternativa viável para a redução da dependência de combustíveis fósseis e da rede elétrica convencional.

Assim, esta pesquisa oferece contribuições relevantes, tanto no campo teórico quanto prático, ao demonstrar a aplicabilidade integrada das análises termodinâmica, exergética e ambiental na refrigeração industrial voltada à cadeia do frio no setor agroindustrial.

Do ponto de vista acadêmico, este estudo reforça a importância de metodologias combinadas para diagnósticos precisos sobre desempenho energético e impactos ambientais, além de fornecer uma base científica robusta para futuras investigações em eficiência energética e sustentabilidade. Seus achados podem beneficiar outras áreas, como logística refrigerada, engenharia de energia, sustentabilidade ambiental e gestão de agroindústrias, especialmente em regiões que enfrentam desafios energéticos e climáticos similares.

Quanto às limitações, destaca-se que o estudo foi desenvolvido com foco em uma única planta frigorífica, sob condições operacionais específicas de uma safra, o que limita sua generalização como também houve dificuldades técnicas durante as coletas de dados das instalações, por exemplo. Dessa forma, não foram abordadas as análises exergoeconômicas e de viabilidade financeira da implantação dos sistemas fotovoltaicos, elementos que seriam fundamentais para uma avaliação completa e que podem ser abordados em trabalhos posteriores.

Diante das limitações elencadas, sugere-se para pesquisas futuras a realização de análises exergoeconômicas e exergoambientais mais aprofundadas, que considerem não apenas os ganhos ambientais e energéticos, mas também os custos associados à modernização dos sistemas, ao uso de energias renováveis e à gestão operacional da cadeia do frio.

Estudos que explorem outros elos, como o transporte refrigerado e os centros de distribuição, também são recomendados, ampliando o entendimento sobre a sustentabilidade na cadeia produtiva de frutas na região do Vale do São Francisco.

CAPÍTULO VII

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TODA DISSERTAÇÃO

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura:** NBR ISO 14040, Rio de Janeiro, versão corrigida 2014a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações:** NBR ISO 14044, Rio de Janeiro, ABNT – versão corrigida 2014b.

ABREU, R. P. *et al.* **Thermoeconomic and thermoenvironmental analysis of the chilled water system in a shopping mall.** International Journal of Refrigeration, v. 134, p. 304–311, 1 fev. 2022.

AGUINIS, H.; RAMANI, R. S.; ALABDULJADER, N. **What You See Is What You Get? Enhancing Methodological Transparency in Management Research.** Academy of Management Annals, 12(1), 83–110, 2018. doi:10.5465/annals.2016.0011.

AHMED, R. *et al.* **A review and evaluation of the state-of-the-art in PV solar power forecasting: Techniques and optimization.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 124, n. February, p. 109792, 2020.

AL KHIRO, H. A.; BOUKHANOUF, R. **Analytical and computer modelling of a thermomechanical vapour compression system for space air conditioning in buildings.** Energy Conversion and Management, v. 323, p. 119252, jan. 2025.

ALROBAIAN, A. A. **Impact of optimal sizing and integration of thermal energy storage in solar assisted energy systems.** Renewable Energy, Elsevier, vol. 211(C), pages 761-771, 2023. doi: 10.1016/j.renene.2023.05.010.

ALSAMAN, A.S. **Hybrid Solar-Driven Desalination/Cooling Systems:** Current Situation and Future Trend. *Energies.* 15(21):8099, 2022. doi: doi.org/10.3390/en15218099.

ALSHAMMARI, N. K. **An examination of the exergy and energy of a solar powered absorption cooling systems in the Riyadh climate.** Journal of Engineering Research, mar. 2025.

ANTOINE, P. *et al.* **Thermodynamic performance's analysis of a cold production by hybrid compressor-based thermochemical sorption processes using ammoniated salts.** Energy Conversion and Management, v. 267, p. 115931, set. 2022.

ARABKOOHSAR, A.; MACHADO, L.; KOURY, R.N.N. **Operation analysis of a photovoltaic plant integrated with a compressed air energy storage system and a city gate station.** Energy, volume 98, 2016, pages 78-91, ISSN 0360-5442.

ARAÚJO, L. S. *et al.* **Proposta de Projeto e Estudo de Minigeração Distribuída de Energia Elétrica Fotovoltaica na Cidade de Manaus/AM - Brasil.** European Academic Research. III. 2020.

BALOGUN, A. *et al.* **Performance Evaluation of a Low-cost Cold Storage System on Fruits and Vegetables in Rural Areas.** Asian Journal of Advanced Research and Reports, v. 19, n. 4, p. 261–270, 18 abr. 2025.

BASU, D. N.; GANGULY, A. **Solar thermal–photovoltaic powered potato cold storage – Conceptual design and performance analyses.** Applied Energy, v. 165, p. 308–317, mar. 2016.

BATALHA, Mário Otávio; SILVA, Aline Lira da; SOUZA, Guilherme Cardoso de; SOUZA, Rosires Deliza de. **Redução de perdas nas cadeias de frutas e hortaliças pela análise da vida útil dinâmica.** Brazilian Journal of Food Technology, v. 21, 2018.

BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics.** [s.l.] Hoboken, Nj, Usa John Wiley & Sons, Inc, 2016.

BIANCO N. *et al.* **A semi-empirical model for de-watering and cooling of leafy vegetables.** Applied Thermal Engineering, Volume 208, 2022, 118227, ISSN 1359-4311. DOI: doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118227.

BRERETON, *et al.* **Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain.** Journal of Systems and Software, 80(4), 571–583, 2007. doi: [10.1016/j.jss.2006.07.009](https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.07.009).

BUREK, J.; NUTTER, D. W. **A life cycle assessment-based multi-objective optimization of the purchased, solar, and wind energy for the grocery, perishables, and general merchandise multi-facility distribution center network.** Applied Energy, v. 235, p. 1427–1446, fev. 2019.

BURSZTYN, M. **Energia solar e desenvolvimento sustentável no Semiárido: o desafio da integração de políticas públicas**1. Estudos Avançados, v. 34, n. 98, p. 167–186, abr. 2020.

CALATI, M.; HOOMAN, K.; MANCIN, S. **Thermal storage based on phase change materials (PCMs) for refrigerated transport and distribution applications along the cold chain: A review.** International Journal of Thermofluids, v. 16, p. 100224, 1 nov. 2022.

CARVALHO, MONICA; DELGADO, DANIELLE. **Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix.** LALCARevista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida, 2017.

CATRINI *et al.* An integrated approach based on Life Cycle Assessment and Thermoeconomics: Application to a water-cooled chiller for an air conditioning plant. Energy, 160, 72–86, 2018. doi: 10.1016/j.energy.2018.06.223.

CAVALCANTI, E. J. C.; CARVALHO, M.; DA SILVA, D. R. S. Energy, exergy and exergoenvironmental analyses of a sugarcane bagasse power cogeneration system. Energy Conversion and Management, v. 222, p. 113232, out. 2020.

ÇENGEL Y. A.; BOLES M., A. **Termodinâmica**. 7. ed. McGraw-Hill, 2013.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M.; TURNER, R. H. **Fundamentals of thermal-fluid sciences**. New York, Ny: McGraw-Hill Education, 2017.

CHATTOPADHYAY, S.; GHOSH, S. Comparative Energetic and Exergetic Assessment of Different Cooling Systems in Vegetable Cold Storage Applications. Journal of The Institution of Engineers (India) series C, v. 101, n. 4, p. 643–650, 24 abr. 2020.

CHEN *et al.* Exergo-economic assessment and sensitivity analysis of a solar-driven combined cooling, heating and power system with organic Rankine cycle and absorption heat pump. Energy, 230, 120717, 2021. doi: 10.1016/j.energy.2021.120717.

CHEN, Y. *et al.* Techno-economic cost assessment of a combined cooling heating and power system coupled to organic Rankine cycle with life cycle method. Energy, 239, 121939, 2022. doi: 10.1016/j.energy.2021.121939.

CHOUDHARY, K. *et al.* Comparative Life Cycle Assessments of Photovoltaic Thermal Systems with Earth Water Heat Exchanger Cooling. Procedia CIRP, v. 105, p. 255–260, 2022.

CIMINI, A.; MASTELLONE, M. L.; TRAVAGLIONE, A.; BALASSONE, V. Life Cycle Assessment in the food supply chain: a case study on refrigerated logistics. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 21, p. 160–175, 2016.

CLAUDINO, E. S; TALAMINI, E. Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 77–85, 1 jan. 2013.

COLAKOGLU, M.; DURMAYAZ, A. Energy, exergy, economic and emission saving analysis and multiobjective optimization of a new multi-generation system based on a solar tower with triple combined power cycle. Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 52, Part D, 2022.

D'AGARO, P. *et al.* HVAC coverage in integrated refrigeration systems at various climate and building conditions. Applied Thermal Engineering, v. 266, p. 125503, maio 2025.

DA PAIXÃO, Joelson Lopes; SAUSEN, Jordan Passinato; DA ROSA ABAIDE, Alzenira. **Energia fotovoltaica: avanços, potencialidades e desafios para uma transição sustentável**. 2024.

DANFOSS, MT80HP9AVE MT: **Compressores recíprocos herméticos para ar-condicionado Compressores. Danfoss Brazil Product Store.** Disponível em: <https://store.danfoss.com/br/pt_BR/Climate-Solutions-pararefrigera%C3%A7%C3%A3o-e-ar-condicionado/Compressores/Compressores-para-arcondicionado/Rec%C3%ADpriosherm%C3%A9ticos/MT/Compressorrec%C3%ADprio%2C-MT80HP9AVE/p/MT80-9VI#documentWrapper>. Acesso em: 23 mai. 2025.

DANTAS, O. DE L.; APOLONIO, R.; JUNIOR, A. A. **Potencial da geração distribuída e seu impacto na redução de emissões de CO₂:** Estudo de um micro usina fotovoltaica conectada à rede de energia elétrica. *Engevista*, v. 21, n. 2, p. 329–340, maio 2019.

DINCER, I.; ROSEN, M. A. **Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development.** [s.l.] Elsevier Science, 2020.

Diniz, D. P. **Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida em cervejarias artesanais /** Daniel de Paula Diniz. - João Pessoa, 2024.

DINIZ, D.P.; CARVALHO, M. **Environmental Repercussions of Craft Beer Production in Northeast Brazil.** *Sustainability*, v. 16, n. 11, p. 4566, 2024.

DINIZ, Daniel de Paula. **TRANSIÇÃO ENERGÉTICA EM CERVEJARIAS /** Daniel de Paula Diniz. - João Pessoa, 2020.

DWINANTO, M. M.; NONE SUHANAN; NONE PRAJITNO. **Exergy analysis of a dualevaporator refrigeration systems.** *AIP conference proceedings*, 1 jan. 2017.

ELAHI, M. *et al.* **Optimizing IC engine efficiency:** A comprehensive review on biodiesel, nanofluid, and the role of artificial intelligence and machine learning. *Energy conversion and management*, v. 307, p. 118337–118337, maio 2024.

EMBRAPA. **Artigo - Fruticultura Irrigada é um importante vetor de desenvolvimento regional e inclusão socioprodutiva.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-denoticias/-/noticia/94311969/artigo-fruticultura-irrigada-e-um-importante-vetor-de-desenvolvimento-regional-e-inclusao-socioprodutiva>>. Acesso em: 27 jun. 2025.

EMBRAPA. **Observatório da Fruta.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/observatorio-da-uva-2024>>. Acesso em 20 de fev. 2025.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2021: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses.** Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021.

FEDELI, S.; GOEDHALS-GERBER, L.; VAN DYK, E. **Identifying temperature breaks in table grape export cold chains from South Africa to the United Kingdom: A Western Cape case.** *Transportation Research Procedia*, v. 67, p. 63–71, 2022.

FERREIRA, A. P.; NASCIMENTO, F. S.; SOUZA, D. M. **Avaliação dos impactos ambientais da utilização de energia solar na agricultura irrigada do Vale do São Francisco.** *Renewable Energy*, v. 223, p. 1200-1212, 2024.

FERREIRA, Iara Jeanice Souza. **Influência de câmara de resfriamento rápido e de câmara fria na qualidade de manga 'Rosa'**. 2020. ix, 74 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco-UNIVASF, Campus Juazeiro-BA, 2020.

FORTE, D. *et al.* **Modeling of Daytime Radiative Cooling Enhanced VaporCompression Refrigeration Systems**. 2025.

FORTES, A. F. C. **Análise termoeconômica e ambiental de um secador por bomba de calor**. Ufpb.br, 2017.

FRANCESCA, M.; MARTA. R.; MICHELE, G. **Design rules for environmental sustainability: the case of refrigeration blocksystems**, Procedia CIRP, Volume 109, 2022, Pages 185-190, ISSN 2212-8271. DOI:doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.234.

FU, C.; SHEN, Q.; WU, T. **Exergo-economic comparisons of solar cooling systems coupled to series/parallel absorption chiller types considering the lowest heat transfer area**. Case Studies in Thermal Engineering, volume 39, 2022.

GAO, E. *et al.* **A review of application status and replacement progress of refrigerants in the Chinese cold chain industry**. International Journal of Refrigeration, v. 128, p. 104–117, ago. 2021.

GOEDKOOP, M. *et al.* ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation. Netherlands: RIVM/Pré Consultants, 2013.

GÓMEZ, C., HIDALGO, A., & GUERRERO, F. **Refrigeration and sustainability in the food supply chain**. Journal of Food Engineering, 286, 110157,2021.

GONÇALVES, G. L. *et al.* **Comparação ambiental entre sistema fotovoltaico convencional e semitransparente**. Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, v. 1, n. 53, p. 103, 3 fev. 2021.

GORJIAN, S. *et al.* **The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations**. Journal of Cleaner Production, v. 292, p. 126030, abr. 2021.

GOUDARZI, K. **Energy, exergy, and economic analysis of cold energy storage systems in cold storage using polyethylene glycol phase change material**. Case Studies in Thermal Engineering, v. 71, p. 106225, 2 maio 2025.

HAMIDINASAB, B. *et al.* **Illuminating sustainability: A comprehensive review of the environmental life cycle and exergetic impacts of solar systems on the agri-food sector**. Solar Energy, v. 262, p. 111830, 15 set. 2023.

HAN, J. W. *et al.* **A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products: Current status, challenges, and future trends**. Trends in Food Science & Technology, v. 109, n. 0924-2244, p. 536–551, mar. 2021.

HAN, J. W. *et al.* **Mathematical modelling of cooling efficiency of ventilated packaging: Integral performance evaluation.** International Journal of Heat and Mass Transfer. v. 111, p. 386-397, 2017.

HAN, J.-W. *et al.* **Numerical modeling of forced-air cooling of palletized apple: Integral evaluation of cooling efficiency.** International Journal of Refrigeration, v. 89, p. 131–141, maio 2018.

HENDRY, N.; NONE HUSNUL WAFA. **Design and performance evaluation of a cold storage room for bakery and frozen foods using coolselector®2 Software.** Global Journal of Engineering and Technology Advances, v. 23, n. 2, p. 108–116, 20 maio 2025.

HERCHER-PASTEUR, J. *et al.* **Energetic assessment of the agricultural production system. A review.** Agronomy for Sustainable Development, v. 40, n. 4, 23 jul. 2020.

HMIDA, A. *et al.* **Modeling of cold room driven by an absorption refrigerator in the south of Tunisia: A detailed energy and thermodynamic analysis.** Journal of Cleaner Production, v. 211, p. 1239–1249, fev. 2019.

HOSSAIN, A. *et al.* **Development and performance evaluation of a refrigerated storage structure for preserving fresh fruits and vegetables.** Discover Food, v. 4, n. 1, 19 ago. 2024.

HUA, W. *et al.* **New low carbon path for cold store—Research progress of new type of cold store based on phase change thermal energy storage technology.** Journal of Energy Storage, v. 126, p. 117109, ago. 2025.

IBRAHIM, T. K. *et al.* **A comprehensive review on the exergy analysis of combined cycle power plants, Renewable and Sustainable.** Energy Reviews, Volume 90, 2018, Pages 835-850, ISSN 1364-0321. doi: doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.072.

IKRAM, H. *et al.* **Techno-economic evaluation of a solar PV integrated refrigeration system for a cold storage facility.** Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 44, p. 101063, abr. 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO, ISO 14040:2006: **Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework,** Genebra, ISO 2006.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2021. Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto protocol. 2021.

ISO. **Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework (ISO 14040).** Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

J.M. BELMAN-FLORES *et al.* **Exergy assessment of a refrigeration plant using computational intelligence based on hybrid learning methods.** v. 88, p. 35–44, 1 abr. 2018.

KHUMALO, G. *et al.* The non-conformance of in-transit citrus container shipments to cold protocol markets: A systematic literature review. *Food Control*, v. 125, p. 107947, jul. 2021.

KITCHENHAM, B. **Procedures for Undertaking Systematic Review**. Joint Technical Report, Computer Science Department, Keele University and ICT National Australia, 2004.

KROOS A. K.; POTTER M. C. **Termodinâmica para Engenheiros**. 1.ed. Cengage Learning, 2015.

LIMA, M. A. O. *et al.* Exergetic Evaluation and Life Cycle Assessment as Strategies for Sustainability Analysis: Application for Industrial Refrigeration Systems. In: 9 th Virtual International Conference on Science Technology and Management in Energy, 2023, Belgrade. Proceedings of the 9 th Virtual International Conference on Science Technology and Management in Energy, 2023

LIMA, A. C., SILVA, T. R., & SOUZA, J. F. **Life cycle assessment applied to fruit production in Brazilian semi-arid regions: Environmental hotspots and improvement strategies**. *Journal of Cleaner Production*, 2022. 365, 132456.

LIMA, R. F.; SILVA, J. A.; SANTOS, M. P. **Potencial da energia solar fotovoltaica no suporte às atividades agroindustriais no Semiárido brasileiro**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 161, p. 112345, 2022.

LITARDO, J. *et al.* **Air-conditioning life cycle assessment research**: A review of the methodology, environmental impacts, and areas of future improvement. *Energy and Buildings*, volume 296, 2023.

LIU, X. *et al.* **Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of an integrated process combining CO₂ capture and storage, an organic Rankine cycle and an absorption refrigeration cycle**. *Energy Conversion and Management*, volume 210, 2020.

LOIVA, M. *et al.* **COMUNICADO TÉCNICO Vitivinicultura brasileira**: panorama 2021. Foto: Loiva Maria Ribeiro de Mello. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1149674/1/Com-Tec-226.pdf>>.

LUCKESI, Márcio V. *et al.* **Frutas e hortaliças na Central de Abastecimento da Bahia, Brasil: por que não apenas oferta, mas também perda?** Semina: Ciências Agrárias, 2024. DOI: 10.5433/1679-0359.2024v45n5p1391. Acesso em: 19 jun. 2025.

LUFU, R.; AMBAW, A.; OPARA, U. L. **Water loss of fresh fruit: Influencing preharvest, harvest and postharvest factors**. *Scientia Horticulturae*, v. 272, p. 109519, out. 2020.

MARQUES *et al.* **Life cycle assessment and comparative exergoenvironmental evaluation of a micro-trigeneration system**. *Energy*, 216, 119310, 2021. doi: 10.1016/j.energy.2020.119310.

MATAR, C. *et al.* **Benefit of modified atmosphere packaging on the overall environmental impact of packed strawberries.** Postharvest Biology and Technology, volume 177, 2021, 111521, ISSN 0925-5214.

MEDEIROS, P. R., SANTOS, V. L., & ALMEIDA, R. A. **Environmental impact assessment of irrigated mango production in the São Francisco Valley using life cycle assessment approach.** *Science of the Total Environment*, 2024.

MIPAL, Hd 450: **Evaporadores e Condensadores.** Disponível em: <<https://www.mipal.com.br/hdh/>>. Acesso em: 16 jun. 2025.

MIRANDA, Isadora Benevides. **Resfriadores evaporativos no ambiente térmico de packing house no submédio do vale do São Francisco.** 2021. x, 64 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, 2021.

MOKAYA, P. K.; WAKIRU, J.; TANUI, J. **A risk-based approach to reduction of warm air infiltration for energy efficiency optimization in a cold storage system-a case study of a fruit packaging plant.** International Journal of Research in Industrial Engineering, v. 14, n. 2, p. 218–233, jun. 2025.

MONTAZERINEJAD, H.; AHMADI, P.; MONTAZERINEJAD, Z. **Advanced Exergy, Exergo-economic and Exrgo-environmental analyses of a Solar based Trigeneration Energy System.** Applied Thermal Engineering, 2019. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.

MORAN J. M.; SHAPIRO H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia.** 8. ed. LTC, 2018.

MORAN, M. J. *et al.* **Moran's Principles of Engineering Thermodynamics.** [s.l.] Wiley Global Education, 2020.

MOREIRA, Igor Rocha. **Sustentabilidade e energia na indústria de laticínios de Minas Gerais.** 2024.

MOROZYUK, L. *et al.* Experimental study and analysis of an air-cooled condenser with the fouling on the heat exchange surface for small-scale commercial refrigeration systems. **International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration**, v. 31, n. 1, 18 jul. 2023.

MOURA, C. R.; ALMEIDA, T. S.; SOARES, L. M. **Energia solar na agricultura irrigada: avanços, desafios e perspectivas no Vale do São Francisco.** *Journal of Cleaner Production*, v. 430, p. 137456, 2023.

MOURAD, A. H. I., AKKAD R., SOLIMAN, E., & OLABI, A. G. **A review of biodegradable materials for food packaging applications: Emerging trends and challenges.** *Journal of Cleaner Production*, 2021.

MOUSAVI, S. A.; MEHRPOOYA. **A comprehensive exergy-based evaluation on cascade absorption-compression refrigeration system for low temperature applications - exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental assessments.** *Journal of Cleaner Production*, 246, 119005, 2020.

NATARAJAN, B., *et al.* **Development and performance evaluation of a hybrid portable solar cold storage system for the preservation of vegetables and fruits in remote areas**, Journal of Energy Storage, Volume 72, Part A, 2023.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, **Carga e Geração**. Disponível em: <[Http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao](http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao)>. Acesso em 06 ago. 2024.

OZTURK, M.; DINCER, I. **4.10 Integrated Gasification Combined Cycles**. Comprehensive Energy Systems, p. 364–473, 2018.

PADMAVATHY *et al.* **Performance studies of low GWP refrigerants as environmental alternatives for R134a in low-temperature applications**. Environmental Science and Pollution Research, 2021.

PENG, Z. *et al.* **Thermo-economic analysis of absorption-compression hybrid cooling systems with parallel subcooling and recooling for small scale low-grade heat source and low temperature application**. International Journal of Refrigeration, mar. 2022.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

POVEDA-ORJUELA P. P. *et al.* **Parameterization, Analysis, and Risk Management in a Comprehensive Management System with Emphasis on Energy and Performance (ISO 50001: 2018)**. Energies. 2020.

RAHUL DEHARKAR et al. **Advanced Exergy Analysis of Vapor Compression Systems Using Low-GWP Refrigerants and Variable-Frequency Compressor**. International Journal of Thermofluids, p. 101374–101374, 1 ago. 2025.

RANDAZZO, T.; CIAN, E.; MISTRY, M. N. **Air conditioning and electricity expenditure: The role of climate in temperate countries**, Economic Modelling, volume 90, 2020.

RECH, S.; FINCO, E.; LAZZARETTO, A. **A multicriteria approach to choose the best renewable refrigeration system for food preservation**. Renewable Energy, v. 154, p. 368– 384, jul. 2020.

REVISTA DA FRUTA. **Dos trópicos para o mundo: caminhos para destaque internacional**. Disponível em:<<http://banca.maven.com.br/pub/revistadafruta/?numero=24#page/1>>. Acesso em 03 de jun. de 2023.

REVISTA DA FRUTA; **Notícias do Pomar: uva e manga, a força do vale do são francisco**. Disponível em:< <https://www.revistadafruta.com.br/noticias-do-pomar/uva-emanga-a-forca-do-vale-do-sao-francisco-,398130.jhtml>>. Acesso em 03 de jun. de 2023.

REVISTA HORTIFRUTI BRASIL. **Anuário 2023 e 2024**. Edição especial ano 22, nº 240. Dez/23 - Jan 24. ISSN 1981-1837. Disponível

em:<<https://www.hfbrasil.org.br/br/revista/anuario-hf-brasil-retrospectiva-2023-perspectiva-2024.aspx>>. Acesso em 09 de mar. 2024.

RÜHLIN, V.; SCHERRER, M. **Towards net zero emissions logistics cold chains – An early-stage assessment of GHG reduction potentials in the fruits and vegetables industry.** *Transportation Research Procedia*, v. 72, p. 1105–1112, 1 jan. 2023.

SAADI, H. *et al.* **A comparative study on energy use and environmental impacts in various greenhouse models for vegetable cultivation.** *Environmental and Sustainability Indicators*, p. 100553, 5 dez. 2024.

SADI, M.; ARABKOOHSAR, A. **Techno-economic analysis of off-grid solar-driven cold storage systems for preventing the waste of agricultural products in hot and humid climates.** *Journal of Cleaner Production*, volume 275, 2020.

SAINI, S. K. *et al.* Comparative study of Exergetic and Economic analysis of Multi-evaporator NH₃ and NH₃-CO₂ CRS for a Seafood Processing Plant. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2021.

SALIN, V. **2018 GCCA Global Cold Storage Capacity Report.** Global Cold Chain Alliance, july 2018. Disponível em<<file:///C:/Users/1211230/Downloads/2018%20GCCA%20Cold%20Storage%20Capacity%20Report%20final.pdf>>. Acesso em 05 de junho de 2023.

SANTOS, A. C., GONÇALVES, C. A., & COELHO, S. T. **Avaliação do Ciclo de Vida de sistemas de refrigeração no pós-colheita de frutas tropicais.** *Revista Brasileira de PósColheita*, 2022.

SANTOS, A.; CARVALHO, A.; BARBOSA-PÓVOA, A. **A methodology for integrating the characterization factors uncertainty into life cycle assessments.** *Sustainable Production and Consumption*, v. 33, p. 1018–1030, 1 set. 2022.

SANTOS, E. F.; SILVA, H. R.; PEREIRA, R. J. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos aplicados à fruticultura irrigada no Semiárido.** *Solar Energy*, v. 228, p. 480-489, 2021.

SANTOS, F. J., OLIVEIRA, M. S., & PEREIRA, L. F. **Sustainable agriculture in semi-arid regions: The role of life cycle assessment in the Brazilian fruit sector.** *Agricultural Systems*, 2023.

SANTOS, K. L. DOS *et al.* **Perdas e desperdícios de alimentos: reflexões sobre o atual cenário brasileiro.** *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 23, 2020.

SANTOS, M. E. M. dos Santos. **Guia prático para redução de perdas pós-colheita de produtos hortifrutícolas.** TCC (Pós-graduação Lato Sensu em Pós-colheita de Produtos Hortifrutícolas) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Petrolina Zona Rural, Petrolina, PE, 66 f., 2024.

SANTOS, S. F. DOS *et al.* **Post-harvest losses of fruits and vegetables in supply centers in Salvador, Brazil: Analysis of determinants, volumes and reduction strategies.** *Waste Management*, v. 101, p. 161–170, jan. 2020.

- SAOUD, A. *et al.* **Performance investigation and numerical evaluation of a single-effect double-lift absorption chiller.** Applied Thermal Engineering, v. 227, p. 120369, jun. 2023.
- SCHULTZ, H. S.; CARVALHO, M. **Design, Greenhouse Emissions, and Environmental Payback of a Photovoltaic Solar Energy System.** Energies (19961073), v. 15, n. 16, p. 6098–N.PAG, 15 ago. 2022.
- SILVA, J. B. L. da *et al.* **Influência do pré-resfriamento na conservação pós-colheita da uva de mesa.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 22, n. 1, p. 34– 39, 2018.
- SILVA, M. C.; FERREIRA, L. G.; LIMA, P. H. **Análise do papel da energia fotovoltaica na sustentabilidade da produção agrícola no Vale do São Francisco.** Energy Reports, v. 9, p. 655-666, 2023.
- SINGH TOMAR, M.; PRADHAN, R. C. **Recent developments in solar-powered refrigeration systems and energy storage methods for on-farm preservation of fruits and vegetables.** Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 72, p. 104032, 19 out. 2024.
- SOLANKI, N.; ARORAA.; RAJ KUMAR SINGH. **Performance enhancement and environmental analysis of vapor compression refrigeration system with dedicated mechanical subcooling.** International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, v. 31, n. 1, 29 nov. 2023.
- SONNTAG, R. E; CLAUS BORGNAKKE; JOHN, G. **Fundamentals of Thermodynamics.** [s.l.] John Wiley & Sons, 2003.
- SOUZA, R. F., LIMA, G. C., & TORRES, M. E. **Integrating life cycle assessment with certification schemes in tropical fruit production: A case study in the São Francisco Valley.** Sustainable Production and Consumption, 2021.
- SPAGNOL, W. A. *et al.* **Monitoramento da cadeia do frio: novas tecnologias e recentes avanços.** Brazilian Journal of Food Technology, v. 21, n. 0, 13 nov. 2017.
- Systems. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, v. 31, n. 1, 18 jul. 2023.
- TANTEKIN, A. **Thermodynamic Analysis of Vapor Compression Refrigeration System with Various Refrigerants.** Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, v. 15, n. 1, p. 392– 405, 15 mar. 2025.
- TEREHOVICS, E. *et al.* **Analysis of fish refrigeration electricity consumption.** Energy Procedia, v. 147, p. 649–653, 1 ago. 2018.
- VASCONCELOS, O. C. M. *et al.* **Modeling ‘Tommy Atkins’ mango cooling time based on fruit physicochemical quality.** Scientia Horticulturae, v. 244, p. 413-420, 2019.
- WAHRLICH, J. *et al.* **Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida: uma revisão.** REVISTA GESTÃO & SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL, v. 9, n. 2, p. 183–201, 2020.

WANG *et al.* **Environmental impact assessment of office building heating and cooling sources:** A life cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 121140, 2020.

WANG, X.; ALAM, F. **Special Issue on Thermodynamic and Exergy Analyses of Cooling, Power, and Energy Systems.** *Applied Sciences*, v. 12, n. 23, p. 12364–12364, 2 dez. 2022.

WENZEL, P. M.; PETER, R. **Multi-Criteria Comparison of Energy and Environmental Assessment Approaches for the Example of Cooling Towers.** *Applied System Innovation*, n. 5, 89, 2022.

WIKE, N. Y. *et al.* **Key contributors to postharvest losses and the scale of the problem.** Elsevier eBooks, p. 1–15, 1 jan. 2023.

WRÓBEL-JEDRZEJEWSKA, M.; POLAK, E. **Determination of carbon footprint in the processing of frozen vegetables using an online energy measurement system.** *Journal of Food Engineering*, Volume 322, 2022.

WU, W *et al.* **Environmental trade-offs in fresh-fruit cold chains by combining virtual cold chains with life cycle assessment.** *Applied Energy*, volume 254, 2019, 113586, ISSN 0306-2619.

XIAO, X. *et al.* **Energy Conservation Potential Assessment Method for Table Grapes Supply Chain.** *Sustainability*, v. 10, n. 8, p. 2845, 10 ago. 2018.

XU, B. *et al.* **Research on the Characteristics of Photovoltaic Ice-Cold Storage.** *Energy and Built Environment*, abr. 2024.

ZANDI, S. *et al.* **Energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analyses and multi-objective optimization of a CPC driven solar combined cooling and power cycle with different working fluids.** *International Journal of Thermodynamics*, 24 (2), 151- 170, 2021.

ZHENG, Z.; CAO, J. **Thermodynamic and feasibility analysis of air conditioning waste heat recovery via power generation cycles.** *Energy Reports*, v. 6, p. 3472–3490, nov. 2020.

ZHU, Y.-D. *et al.* **Thermodynamic analysis of a novel multi-target-temperature cascade cycle for refrigeration.** *Energy Conversion and Management*, v. 243, p. 114380, set. 2021.

ZHU, Z. *et al.* **Evaluation of carbon emissions for fresh food last-mile delivery: A comparative analysis of two refrigeration methods.** *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 60, p. 104787–104787, 4 jul. 2024.

ZILLES, R. *et al.* **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** [s.l.] Oficina de Textos, 2016.

APÊNDICE

CÓDIGO PADRÃO - MODELAGEM VIA EES DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DA PLANTA DE ACONDICIONAMENTO TÉRMICO DE UVAS.

"Código - Análise de 1^a e 2^a Lei para ciclo de refrigeração por compressão de vapor"

"Dados do sistema de Refrigeração - Código padrão"

" Descrição de funcionamento de Câmara frias / Túneis de resfriamento:

- 1 - Dois sistemas de refrigeração por compressão de vapor por instalação;
- 2 - O sistema de refrigeração opera com R22;
- 3 - Propriedades termodinâmicas: biblioteca EES;
- 4 - Os dados dos equipamentos foram coletados in loco e também observados os dados de plaqueta/ catálogo de fabricante"

"Considerações:"

"1 - Regime permanente"

"2 - Variações de energia cinética e potencial = 0"

"3 - Fluido de trabalho: R22"

"Para fins de avaliação, determinar:

- A) Taxa de resfriamento;
- B) COP do sistema;
- C) Exergia destruída em todos os componentes do sistema;
- D) Potência mínima de entrada;
- E) Eficiência de 1^a e 2^a Lei do ciclo
- F) Taxa de destruição total de exergia do ciclo;"

"Entradas - Propriedades do ciclo"

"Estado de referência para o R22"

$$P[0] = 1000 \text{ [kPa]}$$

$$T[0] = 303 \text{ [K]}$$

$$m_{dot}[0] = 0,342 \text{ [kg/s]}$$

$$h[0] = \text{Enthalpy}(R22; T=T[0]; P=P[0])$$

$$s[0] = \text{Entropy}(R22; T=T[0]; P=P[0])$$

"Ponto 01 Entrada Compressor - Saída do Evaporador" "Estado Vapor saturado"

$P[1] = 580 \text{ [kPa]}$

$T[1] = 278 \text{ [K]}$

$m_{\text{dot}}[1] = m_{\text{dot}}[0]$

$h[1] = \text{Enthalpy}(R22; T=T[1]; P=P[1])$

$s[1] = \text{Entropy}(R22; T=T[1]; P=P[1])$

"Ponto 02 - Saída do Compressor - Entrada do Condensador"

$P[2] = 4227 \text{ [kPa]}$

$T[2] = 361 \text{ [K]}$

$m_{\text{dot}}[2] = m_{\text{dot}}[0]$

$h[2] = \text{Enthalpy}(R22; T=T[2]; P=P[2])$

$s[2] = \text{Entropy}(R22; T=T[2]; P=P[2])$

"Ponto 03 - Saída do Condensador - Entrada da Válvula de expansão"

$P[3] = 2940$

$T[3] = 342 \text{ [K]}$

$m_{\text{dot}}[3] = m_{\text{dot}}[0]$

$h[3] = \text{Enthalpy}(R22; T=T[3]; P=P[3])$

$s[3] = \text{Entropy}(R22; T=T[3]; P=P[3])$

"Ponto 04 - Entrada do Evaporador "

$P[4] = 420 \text{ [kPa]}$

$T[4] = 268 \text{ [K]}$

$m_{\text{dot}}[4] = m_{\text{dot}}[0]$

$h[4] = \text{Enthalpy}(R22; T=T[4]; P=P[4])$

$s[4] = \text{Entropy}(R22; T=T[4]; P=P[4])$

"Considerações"

"1 - Regime permanente"

"2 - Regime uniforme"

"3 - Sistema estacionário"

"Equacionamento - Equipamentos - 1^a Lei"

"COMPRESSOR"

"Trabalho real"

$W_{\text{dot_CA}} = 17,584 * 0,85 \text{ [kW]} - Q_{\text{ca}}$

"Eficiência do compressor - Dado do fabricante: 85% - Potência do compressor: 5 hp"

$Q_{\text{ca}} = 0,7 \text{ [kW]}$

"Temperatura da carcaça do compressor"

$T_c = 316 \text{ [K]}$

"CONDENSADOR"

$Q_{dot_CON} = (m_{dot}[2]*h[2] - m_{dot}[3]*h[3])$
 "VÁLVULA DE EXPANSÃO"

" $h[3] = h[4]$ "

"EVAPORADOR"

$Q_{dot_EV} = m_{dot}[3]*(h[1] - h[4])$

"Eficiências de 1ª Lei"

"Equacionamento - Equipamentos - 2ª Lei - Balanço de entropia s"

"COMPRESSOR"

$Sger_{dot_CA} = (m_{dot}[2]*s[2] - m_{dot}[1]*s[1]) - (Q_{ca} / T_c)$

"CONDENSADOR"

$Sger_{dot_CON} = m_{dot}[0]*(s[3] - s[2]) - (Q_{dot_CON}/T[2])$

"VÁLVULA DE EXPANSÃO"

$Sger_{dot_VE} = m_{dot}[3]*(s[4] - s[3])$

"EVAPORADOR"

$Sger_{dot_EV} = m_{dot}[0]*(s[4] - s[1]) + (Q_{dot_EV}/T[4])$

"Equacionamento - Equipamentos - Balanço de exergia - Irreversibilidade" "Exergia em termos de taxa"

$Z1 = m_{dot}[1]*(T[0]*s[1])$

$Z2 = m_{dot}[2]*(T[0]*s[2])$

$Z3 = m_{dot}[3]*(T[0]*s[3])$

$Z4 = m_{dot}[4]*(T[0]*s[4])$

"EXERGIA DE ENTRADA"

"COMPRESSOR"

$ExCA = Z1$ "CONDENSADOR A" $ExCON = Z2$

"VÁLVULA DE EXPANSÃO A" $ExVE = Z3$

"EVAPORADOR A" $ExEV = Z4$

"Trabalho reversível dos equipamentos"

"COMPRESSOR"

$Wrev_{CA} = Z2 - Z1$ "CONDENSADOR"

$Wrev_{CON} = Z2 - Z3$ "VÁLVULA DE EXPANSÃO"

$Wrev_{VE} = 0$ "EVAPORADOR"

$Wrev_{EV} = Z4 - Z1$

"Cálculo de eficiencias de 2^aLei e Destruição de exergia"

"COMPRESSOR"

"Exergia destruída"

$$X_{dot_destCA} = T[0] * (Sger_{dot_CA} + Q_{ca}/T_c)$$

"Eficiência de 2^a Lei"

$$\eta_{CA2^aLei} = Wrev_{CA}/W_{dot_CA}$$

"CONDENSADOR"

"Exergia destruída"

$$X_{dot_destCON} = T[0] * Sger_{dot_CON}$$

"Eficiência de 2^a Lei"

$$\eta_{CON2^aLei} = 1 - (X_{dot_destCON} / Q_{dot_CON})$$

"VÁLVULA DE EXPANSÃO"

"Exergia destruída"

$$X_{dot_destVE} = T[0] * Sger_{dot_VE}$$

"EVAPORADOR"

"Exergia destruída"

$$X_{dot_destEV} = T[0] * Sger_{dot_EV}$$

"Eficiência de 2^a Lei"

$$\eta_{EV2^aLei} = (X_{dot_destEV} / W_{dot_CB})$$

"COEFICIENTE DE DESEN PENHO - COP reversível"

$$\beta_{rev} = (T_L / (T_H - T_L)) T_L = T[4]$$

$$T_H = T[2]$$

"COEFICIENTE DE DESEN PENHO - COP real"

$$\beta_{real} = (\beta_{rev} * \eta_{ciclo})$$

"Eficiência do Ciclo - Máquina Mãe – Câmara/Tunel"

$$X_{dot_Q_L} = Q_{dot_EV} * ((T[0] - T_L) / T_L)$$

$$\eta_{ciclo} = X_{dot_Q_L} / W_{dot_CA}$$

"Exergia destruída total"

$$X_{dot_tot} = W_{dot_CA} - X_{dot_Q_L}$$

"Fim de código"