



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

**ANÁLISE EXERGONECONÔMICO E EXERGOAMBIENTAL DE DOIS
CHILLERS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE VAPOR DE
DUPLO EFEITO: UM PROTÓTIPO EM DESENVOLVIMENTO E UM
CHILLER COMERCIAL**

por

JOÃO LUIZ DE MEDEIROS NETO

Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau de doutor.

JOÃO LUIZ DE MEDEIROS NETO

**ANÁLISE EXERGOECONÔMICO E EXERGOAMBIENTAL DE DOIS
CHILLERS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE VAPOR DE
DUPLO EFEITO: UM PROTÓTIPO EM DESENVOLVIMENTO E UM
CHILLER COMERCIAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção
do Grau de doutor.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio Cabral dos Santos

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M488a Medeiros Neto, Joao Luiz de.

Análise exergoeconômico e exergoambiental de dois chillers de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito : um protótipo em desenvolvimento e um chiller comercial / Joao Luiz de Medeiros Neto. - João Pessoa, 2024.

169 f. : il.

Orientação: Carlos Antonio Cabral dos Santos.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Engenharia mecânica - Custo Exergético Específico. 2. Exergoeconomia. 3. Exergoambiental. 4. Sistema de refrigeração por absorção de vapor. 5. Análise de ciclo de vida - Sistema de refrigeração. I. Santos, Carlos Antonio Cabral dos. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621(043)

ANÁLISE EXERGOECONÔMICO E EXERGOAMBIENTAL DE DOIS CHILLERS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE VAPOR DE DUPLO EFEITO: UM PROTÓTIPO EM DESENVOLVIMENTO E UM CHILLER COMERCIAL

por

JOÃO LUIZ DE MEDEIROS NETO
Tese aprovada em 25 de novembro de 2024

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS ANTONIO CABRAL DOS SANTOS**
Data: 20/12/2024 11:15:11-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Antonio Cabral dos Santos
Orientador – UFPB



Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho
Examinador Interno – UFPB

Documento assinado digitalmente
 **FRANCISCO ANTONIO BELO**
Data: 20/12/2024 10:40:35-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Francisco Antônio Belo
Examinador Externo – UFPB

Documento assinado digitalmente
 **ALVARO ANTONIO OCHOA VILLA**
Data: 27/11/2024 14:02:10-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa
Examinador Externo – IFPE

Documento assinado digitalmente
 **JOSE CARLOS CHARAMBA DUTRA**
Data: 17/12/2024 15:29:46-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra
Examinador Externo – UFPE

DEDICATÓRIA

Com gratidão e humildade, dedico esta tese de doutorado a Deus, fonte inesgotável de sabedoria e guia constante em minha jornada acadêmica. Agradeço profundamente pela força, inspiração e direção divina que permearam cada passo deste percurso.

Aos meus pais, Judas Tadeu Rocha de Medeiros e Maria das Neves Ferreira de Medeiros, verdadeiros pilares do meu crescimento e educação, expresso minha eterna gratidão. Suas orientações, amor incondicional e sacrifícios incansáveis foram fundamentais para minha formação e para a concretização deste trabalho. Cada desafio superado é reflexo do apoio inabalável que recebi de vocês.

Que este trabalho possa contribuir de alguma forma para o bem da humanidade, sendo uma homenagem sincera àqueles que me apoiaram incondicionalmente.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Judas Tadeu Rocha de Medeiros e Maria das Neves Ferreira de Medeiros, cujo amor, apoio e sacrifícios foram fundamentais ao longo de toda a minha jornada acadêmica. O exemplo de dedicação e os valores que vocês me transmitiram foram a luz que guiou cada passo desta trajetória.

À minha noiva, Ellen Nunes Rodrigues Soares, expressei meu profundo agradecimento. Seu amor constante, compreensão e incentivo foram fontes inesgotáveis de força. Nas horas de desafio, foi o seu apoio que me impulsionou a continuar, e nos momentos de conquista, foi sua alegria que tornou as vitórias ainda mais significativas.

Ao meu estimado orientador, Professor Dr. Carlos Antonio Cabral dos Santos. Sua orientação exemplar, dedicação incansável e expertise acadêmica foram essenciais para o desenvolvimento desta tese de doutorado.

Professor Cabral, sua sabedoria, paciência e comprometimento foram fontes constantes de inspiração. Sua habilidade em orientar, questionar e incentivar o pensamento crítico contribuiu significativamente para o amadurecimento das ideias aqui apresentadas. Que esta expressão de gratidão possa, de alguma forma, refletir o profundo apreço que sinto pelo privilégio de tê-lo como orientador.

Ao colega Ronelly José de Souza pela colaboração valiosa durante esta jornada de pesquisa. Sua disposição para discutir ideias, oferecer alternativas perspicazes e compartilhar conhecimentos enriqueceu significativamente o desenvolvimento desta tese de doutorado. A troca constante de experiências e a parceria colaborativa foram fundamentais para superar desafios e alcançar conquistas ao longo deste percurso acadêmico. Agradeço por sua dedicação e amizade, elementos essenciais que tornaram esta jornada mais rica e gratificante.

Aos professores Álvaro Antônio Ochoa Villa e ao Professor José Carlos Charamba Dutra, pelos pontuais contribuições na qualificação.

Aos colegas do LABES - Laboratório de Energia Sustentável pela colaboração, apoio e espírito de equipe que tornaram esta jornada de pesquisa tão enriquecedora e significativa.

À FAPESQ – Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba pelo apoio financeiro no período em que tive direito.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo exergoeconômico e exergoambiental em sistemas de refrigeração por absorção de duplo efeito (uma unidade protótipo e outra comercial) que utilizam como fonte térmica a queima direta de gás natural. O protótipo analisado está em desenvolvimento na Rede Cooperativa de Pesquisa Norte-Nordeste do Gás Natural, enquanto o chiller comercial é um equipamento com capacidade de 100 TR (352 kW). No que se refere à análise exergoeconômica, a metodologia proposta é o Custo Exergético Específico (SPECO). Para o estudo exergoambiental, utilizou-se o software de código aberto OpenLCA, versão 1.30.3, para auxiliar na determinação dos impactos ambientais dos materiais e processos, empregando a metodologia ReCiPe endpoint. A análise termodinâmica é realizada considerando as abordagens energética e exergética, baseadas na primeira e na segunda lei da termodinâmica, para fornecer informações utilizadas nos estudos exergoeconômico e exergoambiental. O estudo exergoeconômico aloca os custos exergéticos e monetários associados aos fluxos exergéticos da unidade, além de auxiliar na tomada de decisão para a otimização dos equipamentos do sistema. O estudo exergoambiental possibilita uma análise ambiental que incorpora a avaliação da qualidade da energia em sistemas térmicos, visando aumentar a eficiência térmica e reduzir os impactos ambientais. Os chillers de absorção em estudo geralmente são compostos por geradores de vapor, sistema de condensação, evaporador, absorvedor, válvulas de expansão, bomba de solução e trocador de calor. O código computacional é desenvolvido na plataforma Solução de Equações de Engenharia (EES), pela facilidade de obtenção das propriedades dos fluidos de trabalho. Os principais resultados mostram que o uso do biometano na etapa de operação reduz os impactos ambientais em até 76,32% em comparação ao gás natural, enquanto o reaproveitamento do cobre na etapa de descarte contribui para uma redução de 34,61% nos impactos ambientais.

Palavras-Chaves: SPECO. Exergoeconomia. Exergoambiental. Sistema de refrigeração por absorção de vapor. Análise de ciclo de vida. OpenLCA. RECIPE.

ABSTRACT

The present study aims to present an exergoeconomic and exergoenvironmental analysis of double-effect absorption refrigeration systems (one prototype unit and one commercial unit) that utilize direct natural gas combustion as a thermal source. The prototype analyzed in this study is currently under development within the North-Northeast Natural Gas Cooperative Research Network, while the commercial chiller is a 100 TR (352 kW) unit. Regarding the exergoeconomic analysis, the proposed methodology is the Specific Exergy Cost (SPECOC). For the exergoenvironmental study, the open-source software OpenLCA, version 1.30.3, was used to assist in determining the environmental impacts of materials and processes, employing the ReCiPe endpoint methodology. The thermodynamic analysis considers both energetic and exergetic approaches, based on the first and second laws of thermodynamics, to provide data utilized in the exergoeconomic and exergoenvironmental studies. The exergoeconomic study allocates exergy and monetary costs associated with the unit's exergy flows, while also aiding in decision-making for system equipment optimization. The exergoenvironmental study enables an environmental analysis that incorporates energy quality assessment in thermal systems, with the aim of enhancing thermal efficiency and reducing environmental impacts. The absorption chillers in this study generally consist of steam generators, a condensation system, an evaporator, an absorber, expansion valves, a solution pump, and a heat exchanger. The computational code was developed on the Engineering Equation Solver (EES) platform, given its ease of obtaining the properties of the working fluids. The main results indicate that the use of biomethane during the operational phase reduces environmental impacts by up to 76.32% compared to natural gas, while the recycling of copper during the disposal phase contributes to a 34.61% reduction in environmental impacts.

Keywords: SPECOC. Exergoeconomics. Exergoenvironmental. Vapor absorption refrigeration system. Lifecycle analysis. OpenLCA. RECIPE

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Participação setorial no consumo de eletricidade no Brasil | 24 |
| Figura 2 - Emissões de CO ₂ nos últimos 10 anos no Brasil. | 28 |
| Figura 3- Sistema de refrigeração por absorção de vapor de simples efeito em série..... | 39 |
| Figura 4 - Composição média do gás natural comercializado pela PBGás. | 41 |
| Figura 5 - Principais características do gás natural. | 42 |
| Figura 6 - Etapas da digestão anaeróbica. | 44 |
| Figura 7 - Chiller de absorção de vapor comercializado pela LG..... | 49 |
| Figura 8- Ciclo básico de funcionamento do chiller de absorção de vapor comercializado pela LG..... | 49 |
| Figura 9 - Ciclo de funcionamento do chiller de absorção de vapor de duplo efeito comercializado pela LG..... | 50 |
| Figura 10 - Protótipo do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo em série com disposição em torre..... | 51 |
| Figura 11- Equações de custo para insumo, produto e equações auxiliares para equipamentos típicos em instalações térmicas..... | 55 |
| Figura 12 - Etapas do estudo Exergoambiental. | 59 |
| Figura 13 - Etapas de aplicação da avaliação do ciclo de vida..... | 60 |
| Figura 14 - Página inicial do software de código aberto OpenLCA versão 1.10.3. | 64 |
| Figura 15 - Diagrama dos impactos totais do chiller de absorção de vapor comercial de 352 kW. | 64 |
| Figura 16 - Diagrama da matéria prima utilizada na produção do chiller de absorção de vapor. | 65 |
| Figura 17 - Fluxograma da metodologia implementada..... | 69 |
| Figura 18 - Sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito de uso comercial com capacidade de 352 kW. | 70 |
| Figura 19 - Toda a estrutura do campus I da UFPB (esquerda) e as instalações da IES (direita). | 72 |
| Figura 20 - Volume de controle do gerador de vapor I. | 78 |

| | |
|---|-----|
| Figura 21 - Volume de controle do gerador de vapor II..... | 80 |
| Figura 22 - Volume de controle do Condensador..... | 82 |
| Figura 23- Volume de controle do Evaporador..... | 83 |
| Figura 24- Volume de controle do absorvedor..... | 85 |
| Figura 25 - Volume de controle do Trocador de calor de Baixa Temperatura..... | 86 |
| Figura 26 - Volume de controle do Trocador de calor de alta Temperatura. | 88 |
| Figura 27 - Volume de controle do Trocador de calor de alta Temperatura. | 90 |
| Figura 28 - Volume de controle do gerador de vapor II..... | 94 |
| Figura 29 - Volume de controle do gerador de vapor II..... | 95 |
| Figura 30 - Volume de controle do Condensador..... | 96 |
| Figura 31 - Volume de controle do Evaporador..... | 98 |
| Figura 32 - Volume de controle do Absorvedor..... | 99 |
| Figura 33 - – Volume de controle da bomba de solução. | 100 |
| Figura 34 - Volume de controle do trocador de calor de baixa temperatura. | 101 |
| Figura 35 - Volume de controle do trocador de calor de alta temperatura..... | 102 |
| Figura 36 - Volume de controle do gerador de vapor II..... | 105 |
| Figura 37 - Volume de controle do gerador de vapor II..... | 106 |
| Figura 38 - Volume de controle do Condensador..... | 107 |
| Figura 39 - Volume de controle do Evaporador..... | 109 |
| Figura 40 - Volume de controle do Absorvedor..... | 110 |
| Figura 41 - Volume de controle da bomba de solução. | 111 |
| Figura 42 - Volume de controle do trocador de calor de baixa temperatura. | 112 |
| Figura 43 - Volume de controle do trocador de calor de alta temperatura..... | 113 |
| Figura 44 - Escopo do estudo de ACV..... | 116 |
| Figura 45 - Diagrama esquemático das rotas de transporte..... | 118 |
| Figura 46 - Fluxos de calor nos equipamentos da unidade de Refrigeração por absorção de 352 kW. | 123 |
| Figura 47 - Comparação da eficiência exergética entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR..... | 128 |
| Figura 48 - Comparação da destruição de exergia (Ed) entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR..... | 129 |
| Figura 49 - Comparação da taxa de custo da exergia destruída entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR. | 130 |

| | |
|--|-----|
| Figura 50 - Comparação da taxa de custo com despesas totais entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR. | 131 |
| Figura 51 - Comparação da diferença relativa de custos do produto e combustível (rk) entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR. | 132 |
| Figura 52 - Comparação do fator exergoeconômico entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR. | 133 |
| Figura 53 - Contribuição dos impactos na qualidade do ecossistema referente a fabricação, operação, transporte e descarte do chiller de 352 kW. | 135 |
| Figura 54 - Contribuição dos impactos na saúde humana referente a fabricação, operação, transporte e descarte do chiller de 352 kW. | 136 |
| Figura 55 - Contribuição dos impactos nos recursos referente a fabricação, operação, transporte e descarte do chiller de 352 kW. | 136 |
| Figura 56 - Resultados detalhado dos impactos ambientais relacionados com a fabricação de cada componente do sistema. | 138 |
| Figura 57 - Parcelas de impactos ambientais referente ao transporte e operação do chiller de 352 kW. | 139 |
| Figura 58 - Estudo comparativo do uso do gás natural e biometano na operação do chiller de 352 kW por um período de 20 anos (tempo de vida do chiller). | 140 |
| Figura 59 - Estudo de dominância do processo de fabricação do chiller de refrigeração por absorção de vapor de 352 kW usando o método RECIPE. | 141 |
| Figura 60 - Estudo de dominância do transporte e operação do chiller de refrigeração por absorção de vapor de 352 kW usando o método RECIPE. | 143 |
| Figura 61 - Estudo de dominância do descarte do chiller de refrigeração por absorção de vapor de 352 kW usando o método RECIPE. | 143 |
| Figura 62 - Estudo comparativo de impacto ambiental de descarte do cobre em dois cenários. | 144 |
| Figura 63 - Comparação da taxa de impacto ambiental entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR. | 147 |
| Figura 64 - Comparação da taxa de impacto ambiental associada a destruição exergética (Bd) entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR. | 148 |
| Figura 65 - Comparação da diferença relativa de impacto ambiental (rk) entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR. | 149 |

| | |
|---|-----|
| Figura 66 - Comparação do fator exergoambiental (f_k) entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR..... | 150 |
| Figura 67 – Inventário da etapa de fabricação do chiller de absorção de 352 kW..... | 167 |
| Figura 68 - Inventário da etapa de transporte do chiller de absorção de 352 kW. | 168 |
| Figura 69 - Inventário da etapa de operação do chiller de absorção de 352 kW..... | 169 |
| Figura 70 - Inventário da etapa de descarte do chiller de absorção de 352 kW. | 170 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Comparação entre Sistema de Compressão e Sistema de refrigeração por absorção de vapor. | 40 |
| Tabela 2 - Composição média do biogás. | 43 |
| Tabela 3 - Principais especificações do biometano oriundo de aterros, estações de tratamento de esgoto, produtos e resíduos agrossilvopastoris e comerciais de acordo com as resoluções ANP 886/2022 e 906/2022. | 46 |
| Tabela 4 - Principais especificações do gás natural de acordo com a resolução ANP 16/2008. | 47 |
| Tabela 5 - Descrição dos pontos do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo de 352 kW fabricado pela LG. | 74 |
| Tabela 6 - Dados de entrada da análise termodinâmica do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo de 352 kW fabricado pela LG. | 75 |
| Tabela 7 - Dados de entrada da análise Termodinâmica do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo em desenvolvimento na RECOGAS. | 76 |
| Tabela 8 - Dados de entrada para o estudo exergoeconômico. | 92 |
| Tabela 9 - Dados de entrada para análise do ciclo de vida. | 117 |
| Tabela 10 - Descrição dos utilitários necessários para a operação do chiller. | 119 |
| Tabela 11 – Parâmetros Termodinâmicos de cada um dos pontos do chiller de refrigeração de 352 kW. | 122 |
| Tabela 12 - Resultados dos custos específicos e exergéticos do Chiller comercial de 352 kW. | 124 |
| Tabela 13 - Resultados da análise exergoeconômica para cada equipamento do Chiller comercial de 352 kW. | 126 |
| Tabela 14 - Contribuição dos impactos ambientais referente a saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos naturais do chiller de 352 kW. | 134 |
| Tabela 15 - Resultados do indicador ambiental específico e das taxas de impacto ambiental para cada fluxo do Chiller comercial de 352 kW. | 145 |
| Tabela 16 - Resultados da análise ambiental de cada equipamento do Chiller comercial de 352 kW. | 145 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 17 - Resultados dos impactos ambientais da etapa de transporte do chiller de absorção de 352 kW..... | 169 |
| Tabela 18 - Resultados dos impactos ambientais da etapa de operação do chiller de absorção de 352 kW. | 170 |
| Tabela 19 - Resultados dos impactos ambientais da etapa de descarte do chiller de absorção de 352 kW. | 171 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABS - Absorvedor
- AC - Razão ar-combustível em base mássica
- ACV - Análise de Ciclo de Vida
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANP - Agência Nacional do Petróleo
- ASTM - American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
- AVCO - Average cost (Custo médio)
- b - Impacto ambiental específico
- \dot{B} - Taxa de impacto ambiental médio [Pt] ou [mPt]
- BEN - Balanço Energético Nacional
- °C - Graus Celsius
- C - Corrente de custo monetário
- c - Custo monetário por exergia [R\$/kJ]
- Cd - Taxa de custo de exergia destruída
- COP - Coeficiente de performance em sistemas de refrigeração
- COP - Conferência das Partes (conferência sobre o clima)
- cp - Calor específico a pressão constante
- CRF - Cost recovery fator (Fator de recuperação de capital)
- cv - Calor específico a volume constante
- DALY - Disability Adjusted Life Year (Anos de vida ajustado por incapacidade)
- Dx - Largura do processo de absorção
- \dot{E} - Fluxo Energético [kW]
- EES - Engineering Equation Solver
- EPE - Empresa de Pesquisas Energéticas
- EVAP - Evaporador
- Ex - Exergia total
- ex - Exergia específica [kJ/kg]
- exf - Exergia Física Específica [kJ/kg]

exq - Exergia Química Específica [kJ/kg]
f - Fator exergoeconômico
fbk - Fator exergoambiental
fi - Fator de importância do equipamento
g - Aceleração da gravidade
GER - Gerador de vapor da unidade de refrigeração
GLP - Gás liquefeito do petróleo
GN – Gás natural
h - Entalpia específica
I - Irreversibilidade
i Taxa real de juros
ISSO - International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
k - Relação entre calores específicos (cp/cv)
k - Custo exergético unitário
LABES - Laboratório de Energias Sustentáveis
LCA - Life Cycle Analysis (Avaliação de Ciclo de Vida)
ln - Logaritmo natural ou neperiano
M - Massa molecular
 \dot{m} - Vazão Mássica [kg/s]
m - Massa
n - Número da vida útil do equipamento [Anos] ou [horas]
MME - Ministério das Minas e Energia
nh - Número de horas de operação do equipamento por ano
P - Pressão
PCI - Poder Calorífico Inferior
PCS - Poder Calorífico Superior
Pot - Potência
Pt - Point
Q - Calor [kJ]
 \dot{Q} - Fluxo de calor [kW]
QH - Calor da fonte quente
QL - Calor da fonte fria r Diferença de custo relativo

R - Constante universal dos gases
rbk - Diferença relativa de impacto ambiental específico
S - Entropia
s - Entropia específica
 S_{ger} - Geração de Entropia [kW]
SPECO - Specific Exergy Costing (Custo Específico da Exergia)
T - Temperatura
TCA - Trocador de alta temperatura
TCB - Trocador de calor baixa temperatura
TR - Tonelada de refrigeração
t - Tempo
u - Energia interna específica
UFPB - Universidade Federal da Paraíba
V - Volume
v - Volume específico
v - Velocidade
VALV - Válvula de expansão
vu - Vida útil dos equipamentos
W - Trabalho
Y - Impacto ambiental do equipamento
Z - Despesas [R\$/s]
z - Altura

Letras Gregas

Σ - Somatório
 \mathcal{E} - Eficiência exergética do método SPECO
 ξ - Efetividade
 β - Eficiência Exergética ou Racional
 η - Eficiência Energética ou pela 1ª lei da Termodinâmica
 ρ - Massa específica [kg/m³]
 φ - Fator de Manutenção [%]

Sobrescrito

CI – Custo devido ao investimento
CO – Construção do Equipamento
DI – Descarte
F – Física
q – Química
OM – Operação e Manutenção

Subscrito

0 – Estado de referência padrão
D – Destruída
e – Entrada
ee – Energia Elétrica
ext – Externa
f – final
F – Combustível (Insumo)
h – Horas
i – inicial
int – interna
k – equipamento
L – Perdida
max – Máximo
O.E. – Objeto de estudo
p – Produto
q – calor
s – Saída
tot – Total
v.c. – Volume de controle

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 23 |
| 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO | 23 |
| 1.2. JUSTIFICATIVA | 27 |
| 1.3. OBJETIVO GERAL..... | 30 |
| 1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 30 |
| 1.5. ESTRUTURA DA TESE..... | 31 |
| 2. ESTADO DA ARTE | 32 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 38 |
| 3.1. SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE VAPOR..... | 38 |
| 3.1.1. Fontes de Energia Térmicas para acionar sistemas de refrigeração por absorção de vapor..... | 40 |
| 3.1.2. Sistema de refrigeração por absorção de uso comercial..... | 48 |
| 3.1.3. Sistema de refrigeração por absorção em desenvolvimento na RECOGAS. | 50 |
| 3.2. EXERGOECONOMIA | 51 |
| 3.2.1. Análise exergoeconômica – método SPECO (specific exergy costing)..... | 52 |
| 3.2.2. Variáveis exergoeconômica..... | 55 |
| 3.3. AVALIAÇÃO EXERGOAMBIENTAL..... | 58 |
| 3.3.1. Avaliação do ciclo de vida..... | 59 |
| 3.3.2. Indicador de impacto ambiental para o ACV..... | 61 |
| 3.3.3. Método ReCiPe | 61 |
| 3.3.4. Introdução ao Open LCA | 62 |
| 3.3.5. Análise exergoambiental..... | 65 |
| 3.3.6. Variáveis exergoambiental | 67 |
| 4. METODOLOGIA | 69 |

| | |
|--|------------|
| 4.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA | 70 |
| 4.2. UTILIZAÇÃO DO SISTEMA..... | 71 |
| 4.3. AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA | 72 |
| 4.3.1. Gerador de Vapor 1..... | 77 |
| 4.3.2. Gerador de vapor 2 | 80 |
| 4.3.3. Condensador | 81 |
| 4.3.4. Evaporador | 83 |
| 4.3.5. Absorvedor..... | 84 |
| 4.3.6. Trocador de calor Baixa Temperatura..... | 86 |
| 4.3.7. Trocador de calor Alta Temperatura | 88 |
| 4.3.8. Bomba de solução | 89 |
| 4.4. AVALIAÇÃO EXERGOECONOMICA..... | 91 |
| 4.4.1. Gerador de vapor I..... | 93 |
| 4.4.2. Gerador de vapor II | 95 |
| 4.4.3. Condensador | 96 |
| 4.4.4. Evaporador | 97 |
| 4.4.5. Absorvedor..... | 99 |
| 4.4.6. Bomba de solução | 100 |
| 4.4.7. Trocador de calor de baixa temperatura | 101 |
| 4.4.8. Trocador de calor de alta temperatura | 102 |
| 4.5. AVALIAÇÃO EXERGOAMBIENTAL | 103 |
| 4.5.1. Gerador de vapor I..... | 104 |
| 4.5.2. Gerador de vapor II | 106 |
| 4.5.3. Condensador | 107 |
| 4.5.4. Evaporador | 108 |
| 4.5.5. Absorvedor..... | 110 |
| 4.5.6. Bomba de solução | 111 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 4.5.7. | Trocador de calor de baixa temperatura | 112 |
| 4.5.8. | Trocador de calor de alta temperatura | 113 |
| 4.6. | AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA..... | 114 |
| 4.6.1. | Definição do escopo | 115 |
| 3.6.2 | Descrição do inventário..... | 116 |
| 4.6.3. | Transporte..... | 118 |
| 4.6.4. | Operação do sistema..... | 119 |
| 4.6.5. | Avaliação dos impactos do ciclo de vida..... | 119 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 121 |
| 5.6. | AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA | 121 |
| 5.7. | AVALIAÇÃO EXERGOECONOMICA..... | 124 |
| 5.8. | AVALIAÇÃO EXERGOAMBIENTAL..... | 133 |
| 5.8.1. | Impactos ambientais da fase de fabricação, transporte e operação do chiller de absorção de 352 kW | 137 |
| 5.8.2. | Análise de Dominância..... | 140 |
| 6. | CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... | 152 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 159 |
| | APÊNDICE A | 167 |

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

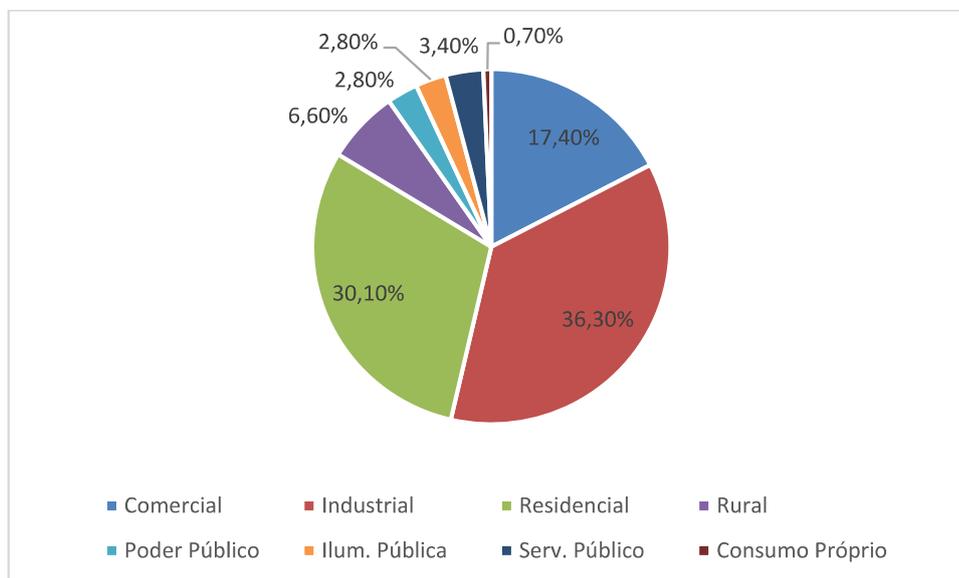
O uso cada vez maior de energia elétrica e a necessidade crescente de conforto térmico, especialmente em um cenário de aquecimento global, destacam a importância de estudos nessas áreas. A eletricidade desempenha um papel central no desenvolvimento econômico, trazendo benefícios essenciais para a sociedade, como iluminação, conforto, transporte e diversos outros avanços. Porém, esse aumento no consumo de eletricidade, impulsionado pela adoção de inúmeros dispositivos e processos, traz desafios sérios quanto à disponibilidade de recursos, ao custo econômico e aos impactos ambientais.

No contexto global, o consumo de energia elétrica tem experimentado um crescimento constante e acelerado. O desenvolvimento de países, como China e Índia, tem impulsionado a demanda por eletricidade, ocasionado pelo crescimento econômico e pelo aumento do padrão de vida. Além disso, a crescente urbanização, o aumento da população mundial e o avanço tecnológico têm contribuído para o aumento da necessidade de energia elétrica em diferentes setores, como indústria, transporte, comércio e residências.

No Brasil, o consumo de energia elétrica também tem acompanhado esse cenário de crescimento. O país possui uma das maiores economias do mundo e uma população de mais de 200 milhões de habitantes. A energia elétrica desempenha um papel crucial no desenvolvimento socioeconômico brasileiro, impulsionando setores como a indústria, agricultura, serviços e residências. De acordo com o Balanço Energético Nacional 2022, ano base 2021, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética vinculada ao Ministério de Minas e Energia, os setores industrial, residencial e comercial respondem a mais de 80% da energia elétrica consumida no

ano. A indústria lidera o consumo com cerca de 36,3% do consumo total, seguido pelo setor residencial (30,1%) e comercial (17,4%), assim como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Participação setorial no consumo de eletricidade no Brasil



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2022)

Embora o crescimento do consumo de energia elétrica seja essencial para o progresso econômico e social, também traz desafios relacionados à sustentabilidade e ao meio ambiente. A busca por fontes de energia mais limpas e eficientes, a promoção da conservação e o uso responsável dos recursos energéticos são questões cada vez mais importantes para garantir um futuro energético sustentável, tanto no Brasil quanto no mundo.

Então é fundamental adotar estratégias de planejamento energético, investir em tecnologias mais eficientes, promover a conscientização sobre o consumo responsável e buscar soluções inovadoras para equilibrar a crescente demanda por energia elétrica com a necessidade de preservar o meio ambiente e mitigar as mudanças climáticas.

O gás natural desempenha um papel estratégico no setor energético do Brasil, fornecendo uma fonte importante de energia para diversos setores da economia. Sua importância tem se consolidado ao longo dos anos, à medida que o país busca diversificar sua matriz energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis mais poluentes.

O metano (CH₄) representa um dos componentes predominantes do gás natural, sendo o hidrocarboneto combustível que gera a menor quantidade de dióxido de carbono por unidade de energia liberada durante o processo de combustão. Por essa razão, ele é considerado um combustível fóssil com menor impacto ambiental do que outros usados para a mesma finalidade.

O Brasil possui vastas reservas de gás natural em seu território, tanto em terra quanto em águas profundas. Essas reservas são encontradas principalmente nas regiões do pré-sal, na costa brasileira, o que tem impulsionado significativamente a produção e exploração do gás natural nos últimos anos. Além disso, o país também conta com importações de gás natural, provenientes de países vizinhos, como a Bolívia.

Diante das preocupações com as mudanças climáticas e a necessidade de uma transição energética mais sustentável, o Brasil tem buscado explorar o potencial do gás natural como uma ponte para um futuro mais limpo. Além de promover o uso eficiente do gás natural, o país tem investido no desenvolvimento de tecnologias que visam reduzir o consumo de energia elétrica, reduzindo os impactos causados pela produção da energia primária.

Atualmente os esforços estão direcionados para a redução dos gases do efeito estufa (GEE), através do desenvolvimento de tecnologias que visam a redução dos impactos ambientais. Entretanto países como EUA e China ainda permanecem emitindo grandes patamares de resíduos, sendo um desafio para as nações manterem suas economias e o pleno fluxo da produção alimentícia e industrial. (GARCIA, 2021)

A climatização para finalidade de conforto térmico vem se tornando cada vez mais utilizada em escala mundial, já que há necessidades humanas importantes e até cruciais que requerem o controle de temperatura e umidade. Contudo, o consumo ascendente de energia para fins de climatização causa preocupações com as reservas não-renováveis de combustíveis fósseis, com o aumento da poluição e conseqüentes mudanças negativas do meio ambiente, dentre elas o aquecimento global (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018).

A tecnologia de refrigeração e climatização que emerge com o objetivo de diminuir o consumo de energia e os efeitos no meio ambiente é a tecnologia de refrigeração por absorção

de vapor. Essa tecnologia se destaca por não utilizar substâncias que prejudicam a camada de ozônio, demandar uma quantidade reduzida de eletricidade em comparação com os sistemas de refrigeração e climatização de ar tradicionais, e, por último, aproveitar resíduos térmicos como fonte de energia, evitando assim a poluição ambiental que esses resíduos causariam.

Considerações econômicas e de gastos energéticos estão se tornando cada vez mais difundidas em processos industriais, visando a redução de custos, otimização de processos e redução da poluição ambiental. Segundo (Tsatsaronis, 1996), o estudo exergoeconômico é a combinação da análise exérgica com os fundamentos da economia aplicado em sistemas térmicos.

Para obter os valores dos custos energéticos e monetários dos sistemas de refrigeração por absorção de vapor, é necessário atrelar conceitos da termodinâmica com conceitos da economia. Uma parte importante para análise inicial é a determinação dos fluxos de exergia em cada componente do sistema. Segundo (Cavalcanti, 2016) o conceito de exergia é definido como sendo o trabalho máximo ou de potência que pode ser produzido por um sistema ou fluxo, quando o mesmo percorre um processo inteiramente reversível, quando se atinge o estado de equilíbrio com as condições ambientais.

Frente à degradação do meio ambiente causada pela exploração desordenada dos recursos naturais, o conceito de sustentabilidade tem se fortalecido ao longo dos anos. Alguns desafios resultantes desses danos ambientais incluem a exaustão de recursos não renováveis, alterações climáticas, extinção de espécies animais, aquecimento global, depleção da camada de ozônio e expansão da desertificação. Devido a tais questões, o mundo passou a reconhecer a necessidade de um gerenciamento adequado dos recursos naturais, compreendendo que a falta de uma gestão eficaz desses recursos afeta diretamente a qualidade de vida humana (GEORGE et al., 2018).

Considerando a importância de tomar decisões que reduzam os danos ao meio ambiente, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma abordagem que pode ser utilizada para mensurar os efeitos ambientais ligados aos sistemas de refrigeração baseados em absorção de vapor.

De acordo com Silva (2018), uma maneira de associar os impactos ambientais aos fluxos de exergia é chamado de avaliação exergoambiental. A avaliação ambiental é realizada através de uma análise de ciclo de vida (ACV), desde a fabricação de cada componente do produto, o seu uso e até o seu descarte. Para quantificar os impactos ambientais e combiná-los com a análise exérgica, faz-se necessário o uso de um indicador ambiental.

Um indicador ambiental é uma métrica quantitativa ou qualitativa que oferece dados acerca da situação, direções ou situações do ambiente ou sobre as consequências das ações humanas no meio ambiente. Estes marcadores são aplicados para analisar a excelência do ambiente, mensurar avanços rumo aos objetivos de sustentabilidade, identificar questões ambientais e embasar escolhas esclarecidas na administração ambiental.

Os indicadores ambientais abrangem alguns aspectos ambientais, como: Qualidade do ar, qualidade da água, consumo de recursos, mudanças climáticas, destinação de resíduos, poluição e etc.

Ao concluir esta tese, a expectativa é fornecer uma contribuição significativa no que diz respeito à aplicação de sistemas de refrigeração baseados em absorção de vapor, bem como aos estudos exergoeconômicos e exergoambientais como instrumentos para orientar decisões e aprimorar sistemas de conversão de energia. Além disso, pretende-se dar início à construção de um banco de dados que esteja relacionado aos impactos ambientais resultantes do sistema investigado.

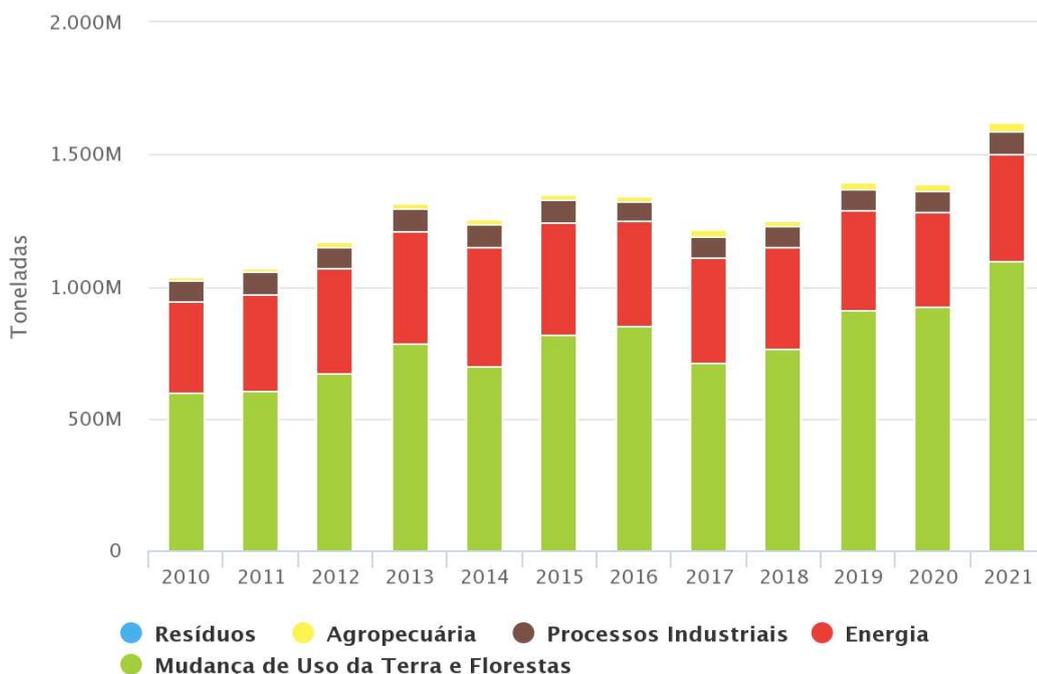
1.2.JUSTIFICATIVA

Os esforços dos pesquisadores nos últimos anos, com o propósito de criar tecnologias que auxiliem na redução do consumo de energia, economias financeiras e impactos ambientais nas etapas de desenvolvimento do país, desempenharam um papel crucial na promoção da sustentabilidade.

Porém, ao contrário do que ocorre no mundo, o Brasil teve um aumento nas emissões de gases poluentes nos últimos 10 anos de acordo com dados divulgados pelo sistema de

estimativas de emissões de gases de efeito estufa (SEEG), do observatório do clima. A figura abaixo ilustra tal fato.

Figura 2 - Emissões de CO2 nos últimos 10 anos no Brasil.



Fonte: SEEG, 2021

Os fatores que mais contribuem de acordo com a figura 2, são as mudanças de uso da terra e florestas, energia e processos industriais. O desenvolvimento de tecnologias que contribuam para redução dessas estimativas é importante em todos os setores da economia.

Considerando a iminente crise energética global e o aumento da poluição ambiental, estão sendo exploradas tecnologias que buscam economizar energia elétrica e preservar o meio ambiente. Entre essas tecnologias, destaca-se a refrigeração por absorção de vapor, que consome quantidades reduzidas de eletricidade e evita o uso de substâncias prejudiciais ao ambiente. A tecnologia de absorção de vapor é alimentada por energia térmica e emprega misturas binárias como fluidos de trabalho, como água-brometo de lítio e água-amônia, em contraste com os sistemas de compressão de vapor, que consomem grandes quantidades de eletricidade e fazem uso de substâncias prejudiciais à camada de ozônio.

Os acordos internacionais, como os Protocolos de Montreal (1987) e Kyoto (1997), e mais recentemente o Acordo de Paris (2016), impulsionaram pesquisas e estudos na área de

refrigeração industrial e comercial. Isso se deve à necessidade de reduzir a presença de refrigerantes CFCs na atmosfera (substâncias utilizadas em sistemas de refrigeração por compressão de vapor) e à busca por novas alternativas para a geração de frio. Entre essas alternativas, destacam-se os sistemas de refrigeração por absorção de vapor, que enfocam não apenas a análise térmica, mas também a utilização de fontes de energia provenientes da queima de gás natural, biogás e outros resíduos térmicos.

O trabalho atual visa dar continuidade às investigações iniciadas por Silva (2005), Marques (2018) e Cordeiro (2018). Silva (2005) conduziu uma análise exérgica em sistemas de refrigeração baseados em absorção de vapor de múltiplos efeitos, empregando a combinação água-brometo de lítio como refrigerante. Por sua vez, Marques (2018) e Cordeiro (2018) realizaram análises exergoeconômicas e exergoambientais em sistemas térmicos destinados à geração de calor, eletricidade e resfriamento.

Marques (2018) concentrou-se em um sistema de microgeração alimentado por gás natural, composto pelos seguintes elementos: um grupo motogerador, um sistema de refrigeração por absorção de vapor que utiliza água-amônia como fluido de trabalho e um recuperador de calor para pré-aquecimento de óleo mineral em uma usina de biodiesel. Este sistema tem como finalidade principal a produção de calor para processos industriais, eletricidade e refrigeração.

Enquanto isso, Cordeiro (2018) conduziu uma avaliação exergoeconômica e exergoambiental de um refrigerador por absorção de vapor de duplo efeito em série, com capacidade de aproximadamente 5 TR (17,60 kW) empregando a combinação água-brometo de lítio como fluido de trabalho e utilizando gás natural como fonte de energia para o gerador de vapor. O objetivo era simular a cogeração de resíduos térmicos.

De acordo com Cordeiro (2018), "Este estudo serve como base e parâmetro para otimização do protótipo desse sistema, que está em desenvolvimento contínuo nos Laboratórios de Energia Sustentável (LABES) localizados no edifício da Rede Cooperativa de Pesquisa Norte/Nordeste do Gás Natural RECOGÁS-N/NE, no Instituto de Energia Sustentável (IES) da Universidade Federal da Paraíba".

Com o objetivo de mensurar o consumo de energia, custos financeiros e os efeitos no meio ambiente resultantes da aplicação de tecnologias de refrigeração por absorção de vapor em cenários comerciais e em protótipos em fase de desenvolvimento, este estudo pretende conduzir uma análise exergoeconômica e exergoambiental em um chiller comercial com capacidade de 352 kW. O propósito principal é a redução de despesas financeiras, o aprimoramento da eficiência energética e a minimização dos impactos ambientais. O intuito é que esse estudo sirva como uma ferramenta decisiva para otimizar os sistemas examinados.

Portanto, a pesquisa proposta não apenas preenche lacunas de conhecimento na área de refrigeração por absorção de vapor, mas também tem o potencial de contribuir para um futuro mais sustentável e eficiente em termos energéticos. Ela se alinha com as necessidades da sociedade em relação à conservação de recursos, redução de emissões e inovação tecnológica.

1.3. OBJETIVO GERAL

- Realizar uma análise exergoeconômica e exergoambiental em dois sistemas de resfriamento por absorção de vapor de duplo efeito, um protótipo em fase de aprimoramento (17,60 kW) e um chiller comercial com uma capacidade de 352 kW, empregando energia térmica proveniente da combustão direta de gás natural, com o propósito de quantificar os efeitos no meio ambiente e identificar quais equipamentos podem ser otimizados em termos de eficiência energética.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Propor alternativas tecnológicas para atender as demandas de água gelada para climatização;
- Desenvolver um código computacional de análise exergoeconômica e ambiental para uma unidade de refrigeração por absorção de vapor de escala comercial;
- Apontar os equipamentos que necessitem de otimização de projeto com relação ao custo monetário e energético como também os impactos ambientais ocasionados pelos mesmos;

1.5. ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho de tese está estruturado em seis capítulos. O primeiro capítulo abrange a contextualização da pesquisa, a justificativa que motivou sua realização, os objetivos gerais e específicos. O segundo capítulo é uma revisão do estado da arte que destaca trabalhos recentes que refletem o interesse da comunidade acadêmica global na área de estudo. O terceiro capítulo engloba a fundamentação teórica e os conceitos essenciais que constituem a base para a compreensão do trabalho e sustentam o desenvolvimento da metodologia proposta. Neste capítulo, são abordados tópicos como o sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito, os combustíveis empregados nesses sistemas, os princípios da primeira e segunda leis da termodinâmica, além dos conceitos relacionados à exergoeconomia e análise exergoambiental.

O capítulo quatro tem início com uma descrição detalhada do objeto de estudo, suas aplicações no fornecimento de água gelada para refrigeração, bem como a identificação dos pontos de entrada e saída em cada volume de controle, representados pelas fronteiras dos equipamentos. Em seguida, é exposta a metodologia adotada na avaliação termodinâmica para determinar os fluxos de massa e energia, juntamente com as eficiências de cada componente da unidade, com base nos princípios da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica. Subsequentemente, é apresentada a abordagem utilizada para realizar a análise exergoeconômica, empregando o método SPECO. O capítulo é encerrado com a descrição da metodologia aplicada à análise exergoambiental e à análise de ciclo de vida (ACV) do sistema em estudo.

O quinto capítulo expõe os resultados alcançados e proporciona uma análise aprofundada desses resultados. O trabalho é concluído no sexto e último capítulo, onde são apresentadas as conclusões, considerações finais e sugestões para futuras pesquisas relacionadas ao tema.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DA ARTE

Os primeiros registros de estudos na área de refrigeração por absorção de vapor remontam a 1755, quando o Prof. Dr. William Cullen (1710-1790), professor de Química da Universidade de Edimburgo, demonstrou que era possível formar gelo a partir da água ao colocá-la em contato com um recipiente contendo éter. O professor reduziu a pressão sobre o éter, o que provocou sua evaporação a uma temperatura baixa, permitindo a formação de partículas de gelo.

Após o experimento do Professor William Cullen, diversos experimentos e estudos teóricos foram realizados para aprimorar os sistemas de refrigeração por absorção de vapor. Ochoa et al. (2016) publicou um livro introdutório sobre a análise de sistemas de refrigeração por absorção em língua portuguesa (Brasil). A obra aborda aspectos históricos, propriedades dos fluidos de trabalho, sistemas de simples e duplo efeito, além de apresentar os conceitos do método de análise exergoeconômica TCE (Teoria do Custo Exergético).

Recentemente, o estudo de sistemas de refrigeração por absorção de vapor tem atraído atenção da literatura devido ao seu potencial para integrar eficiência energética com sustentabilidade ambiental, abordando questões relacionadas a desempenho térmico, custos econômicos e impactos ambientais. Mohammadi (2019) propôs um sistema híbrido de refrigeração com evaporador duplo, otimizando o desempenho termodinâmico, econômico e ambiental por meio da utilização de compressores entre evaporadores e absorvedores. Apesar do aumento significativo no coeficiente de desempenho (COP) de 0,404 para 0,624, a implementação do compressor mostrou-se economicamente limitada devido ao aumento nos custos operacionais e de capital. Este estudo destaca o uso eficiente de rejeitos térmicos de gás

natural, alinhando-se ao objetivo de reduzir o impacto ambiental e econômico, um tema essencial na análise de sistemas de refrigeração, como abordado na presente tese.

De forma complementar, Papadopoulos et al. (2020) investigou 75 misturas de fluidos de trabalho para refrigeração de simples efeito, empregando uma análise multicritério que considera aspectos como eficiência exergética e impactos ambientais. Este estudo identificou novas misturas de fluidos, como acetaldeído e dimetilformamida, que apresentaram desempenho superior ao das combinações tradicionais de amônia-água e água-brometo de lítio, (este último foi o utilizado no presente trabalho) com custos reduzidos e melhores propriedades ambientais. Essa abordagem sistemática reforça a relevância de selecionar fluidos de trabalho adequados para otimizar os sistemas, contribuindo para estudos futuros que integram a análise de desempenho ambiental e econômico, como a investigação proposta no presente trabalho.

Souza et al. (2020) ampliou a discussão ao integrar um sistema de cogeração com refrigeração por absorção no Instituto de Energias Sustentáveis da UFPB. Utilizando o método SPECO, os modos de operação ORC Simples e Combinado foram avaliados, demonstrando que o modo combinado aumentou a eficiência exergética em até 40%, além de reduzir a exergia destruída e os custos específicos de produtos. Este estudo ressalta a importância de sistemas integrados para maximizar a eficiência e atender demandas energéticas de forma sustentável, estabelecendo paralelos com a análise de chillers de duplo efeito proposta pela tese.

Cavalcanti et al. (2021) introduziu um sistema de trigerção assistido por energia solar, considerando variações na temperatura de estado morto para avaliar o desempenho exergético de um sistema de refrigeração por absorção. Com base no método SPECO, identificaram-se variações na eficiência exergética, dependendo da temperatura do estado morto. Este trabalho demonstra como variáveis ambientais influenciam o desempenho e os custos associados, oferecendo ideias valiosas para análises exergoeconômicas e exergoambientais, como as desenvolvidas na tese.

O presente trabalho é incluso em um cenário mais amplo de estudos e inovações na área de refrigeração por absorção de vapor, como mostrado nos trabalhos de Bhowmich e Kundu (2021), Chen et al. (2022) e Zhai e Wu (2022). Bhowmich e Kundu propuseram um novo dispositivo de resfriamento que combina o processo de resfriamento com um componente

de dessalinização, utilizando uma abordagem multiobjetivo para otimizar o sistema em termos de energia, exergia e custo. A análise paramétrica realizada por esses autores identificou o processo de resfriamento como a principal fonte de irreversibilidade, destacando a necessidade de uma maior eficiência operacional para maximizar o desempenho global. O estudo mostrou que a eficiência exergética total do sistema combinado atingiu 0,5014, com um custo total do produto de $68,1680 \text{ \$ GJ}^{-1}$, evidenciando uma melhoria em relação aos sistemas tradicionais. Esta análise correlaciona-se diretamente com os objetivos e limitações dos chillers de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito analisados no trabalho em questão, mostrando a necessidade de buscar a otimização para reduzir irreversibilidades e custos operacionais.

Por outro lado, o estudo de Chen et al. (2022) sobre um sistema integrado de energia (IES) destaca a importância da integração de diferentes tecnologias, como coletores solares parabólicos, bombas de calor por absorção e refrigeração por absorção. A redução de 22,53% no consumo de gás natural e o aumento de 50% na produção de frio indicam uma otimização no desempenho energético e econômico do sistema. As melhorias observadas nas taxas de custo total e impacto ambiental, com reduções de 26,25% e 35,87%, respectivamente, evidenciam o alinhamento com os objetivos de sustentabilidade e eficiência explorados no trabalho de Souza et al. (2020), que utilizou o método SPECO para avaliar sistemas de cogeração. Ambos os estudos, tanto o IES otimizado de Chen et al. quanto os chillers de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito, destacam a importância da análise exergética como ferramenta importante para o aprimoramento de sistemas de refrigeração e energia. O trabalho não avaliou o uso de biometano na operação do sistema integrado energia.

O trabalho de Zhai e Wu (2022) sobre o sistema de refrigeração por absorção de vapor baseado em membrana microcanal (MMARS) se alinha também ao estudo em questão ao abordar a eficiência e compactidade dos sistemas de refrigeração por absorção. O uso de diferentes fontes de energia como aquecedor a gás natural, aquecedor elétrico e coletor solar tubular permite uma análise ampla de desempenho em termos de energia, exergia, economia e meio ambiente. A melhora no coeficiente de desempenho (COP) e na capacidade volumétrica de resfriamento é significativa, com destaque para a menor emissão de CO₂ equivalente entre os sistemas analisados, o que alivia o impacto ambiental. Essas características tornam o MMARS movido a energia solar um sistema potencial para alcançar a neutralidade de carbono,

mostrando o caminho para o desenvolvimento de sistemas mais sustentáveis. Esta descoberta complementa o trabalho de análise de chillers por absorção ao proporcionar uma visão sobre o papel da escolha da fonte de energia e da análise exergética para alcançar tanto eficiência quanto sustentabilidade.

Outras contribuições acadêmicas relevantes na área de refrigeração por absorção são observadas, como os estudos de Kadam et al. (2022), Dadpour et al. (2022) e Ahmad et al. (2022).

Kadam et al. (2022) realizou um estudo comparativo de desempenho termodinâmico, ambiental e econômico em sete configurações diferentes de ciclos de refrigeração por compressão de vapor, incluindo a integração de novos fluidos como o acetaldeído-N,N-dimetilformamida. Os autores descobriram que o sistema com o novo fluido apresentou um coeficiente de desempenho 9,1% superior ao da amônia/água na configuração autônoma de refrigeração por absorção de vapor. Além disso, o custo por tonelada de resfriamento e o potencial de aquecimento equivalente total foram mais baixos para o sistema com acetaldeído-N,N-dimetilformamida, indicando uma melhoria na eficiência energética e no impacto ambiental.

Dadpour et al. (2022) propôs uma abordagem para utilizar calor residual dos gases de escape do motor de combustão interna em um ciclo de chiller de absorção de duplo efeito. Eles desenvolveram um novo gerador para o chiller que permite a reutilização do calor residual, minimizando o consumo de combustível e as emissões associadas. A análise mostrou que o consumo de combustível poderia ser reduzido e que as emissões de NOX e CO2 diminuiram em 3461,832 kg/ano e 1919743,2 kg/ano, respectivamente. Dadpour et al. demonstrou como a otimização de sistemas de refrigeração por absorção pode reduzir o impacto ambiental e melhorar a eficiência energética, especialmente ao se aproveitar calor residual de motores, uma prática que pode ser aplicada em contextos semelhantes ao presente estudo. O referido trabalho não abordou outras fontes de energia na operação do chiller.

Ahmad et al. (2022) realizou uma análise detalhada da eficiência energética em sistemas de refrigeração por absorção de vapor, com foco nos pares de trabalho LiBr-H₂O e LiCl-H₂O. Eles encontraram que o sistema LiCl-H₂O apresentou um COP superior em condições de baixa

temperatura de evaporação, além de uma carga térmica menor no gerador. Essas descobertas são importantes para o estudo em questão, pois indicam como as escolhas de fluido de trabalho podem afetar a eficiência de sistemas de refrigeração por absorção. Esta análise adiciona uma perspectiva adicional sobre os parâmetros que influenciam o desempenho desses sistemas, como a carga térmica e a concentração da solução, que são importantes para otimizar o funcionamento de chillers de refrigeração por absorção.

Nagraj et al. (2022) explorou a otimização multiobjetivo de sistemas de refrigeração por absorção de vapor usando LiBr-H₂O. Eles empregaram algoritmos genéticos multiobjetivos para minimizar tanto o custo operacional quanto a destruição de exergia. Esse estudo revelou que diferentes algoritmos podem ser usados com sucesso para atingir objetivos específicos em sistemas de refrigeração por absorção. As descobertas de Nagraj et al. reforçam a importância de uma abordagem integrada para otimização que considere tanto aspectos econômicos quanto energéticos, para melhorar o desempenho em sistemas de refrigeração por absorção.

Alcântara et al. (2022, 2023) realizou estudos detalhados sobre o comportamento dinâmico de chillers de absorção de vapor, destacando suas complexidades em comparação com chillers mecânicos. Em 2022, o foco foi desenvolver e validar um modelo matemático quase dinâmico usando o método da equação característica, que incorpora princípios termodinâmicos e parâmetros externos como temperaturas e vazões dos circuitos de água quente, fria e gelada, além dos coeficientes globais de transferência de calor. Utilizaram o software F-Chart EES® para resolver as equações e o MATLAB para simulações transitórias, com boa concordância entre os modelos e os dados experimentais, apresentando erros relativos abaixo de 5%. Em 2023, Alcântara et al. analisou a transferência de calor e massa, fluidos de trabalho e limitações como cristalização e pressões de vácuo nos chillers de absorção. Propuseram uma metodologia que integra métodos inteligentes de regressão com dados externos e modelos físicos, permitindo estimar com precisão o comportamento transitório dos chillers. Essa abordagem mostrou boa concordância entre os modelos e os dados experimentais, destacando seu potencial como ferramenta para otimização e controle eficiente desses sistemas. Esses estudos são relevantes para o trabalho, pois fornecem uma visão sobre como as complexidades associadas ao comportamento dinâmico de chillers de absorção podem ser modeladas e controladas para otimizar o desempenho energético e reduzir impactos ambientais.

Ordóñez, Cavalcanti e Carvalho (2022) ofereceram uma revisão sobre métodos de análise de energia, exergia, minimização da geração de entropia e análises exergoambientais aplicados a sistemas energéticos. A revisão enfatiza a importância de abordagens que ultrapassam a simples eficiência energética, focando na maximização do aproveitamento do potencial termodinâmico dos recursos e na minimização da geração de entropia para aumentar a eficiência global dos sistemas. Essas metodologias combinadas formam uma caixa de ferramentas para o projeto, análise e otimização de sistemas energéticos, permitindo uma quantificação precisa dos impactos energéticos e ambientais. O artigo sublinha a relevância dessas análises na orientação de decisões de projeto e na busca por soluções que atendam às demandas contemporâneas por eficiência energética e sustentabilidade ambiental. Essas abordagens fornecem contribuições interessantes para o presente estudo, pois utilizam ferramentas avançadas de análise para compreender e otimizar o desempenho e os impactos ambientais de sistemas de refrigeração por absorção de vapor.

O estudo conduzido por Mohtaram et al. (2023) explorou a eficiência energética e exérgica de um sistema híbrido de refrigeração que combina o ciclo de Expansão com Ejetor Transcrítico de CO₂ (EETC) com um Sistema de Refrigeração por Absorção de Vapor de Água com Brometo de Lítio (VARSA). As simulações numéricas usando o software EES avaliaram parâmetros de desempenho como pressão e temperatura, destacando a Queda de Pressão do Bocal de Sucção (SNPD). A integração dessas tecnologias melhorou a capacidade de resfriamento, o Coeficiente de Performance (COP) e a eficiência exérgica do sistema híbrido, superando o desempenho do ciclo EETC isolado, com aumentos de 17,22% na capacidade de resfriamento, 17,28% no COP e 4,8% na eficiência exérgica. Esses resultados demonstram como a combinação de diferentes ciclos de refrigeração pode ser usada para melhorar a eficiência de sistemas complexos.

CAPÍTULO III

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE VAPOR

Os sistemas de absorção são caracterizados pelo número vezes que a solução é aquecida para produção de vapor a alta pressão. Isso se refere ao número de efeitos, ou seja, simples, duplo e triplo efeito. O sistema de simples efeito usa o calor de entrada uma única vez; o sistema de duplo efeito utiliza o calor de entrada no primeiro gerador de vapor e o vapor gerado a alta pressão é utilizado como fonte térmica para o segundo efeito, no segundo gerador de vapor; por fim, o sistema de triplo efeito que usa o calor de entrada três vezes mais que o de simples efeito, ou seja, utiliza o calor de entrada no primeiro gerador de vapor, gerando vapor a alta pressão e esse vapor gerado é utilizado como fonte térmica para o segundo efeito, no segundo gerador de vapor. O vapor gerado no segundo gerador serve como fonte térmica para o terceiro efeito, no terceiro gerador de vapor e assim sucessivamente.

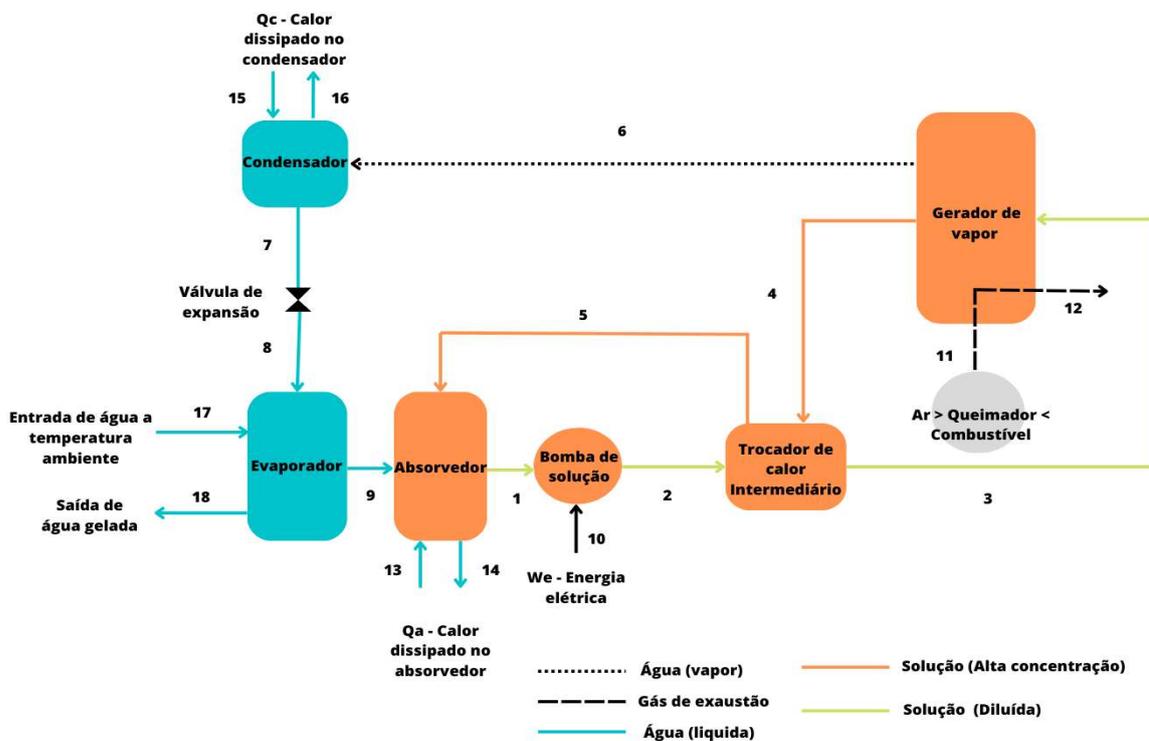
Esses sistemas também são caracterizados quanto ao fluxo da solução que pode ser em série ou em paralelo. Em série é quando a solução vinda do absorvedor é bombeada diretamente para o gerador de maior pressão e em paralelo quando essa solução é bombeada simultaneamente para todos os geradores de vapor existentes no sistema de absorção.

O sistema de simples efeito (figura 3) funciona da seguinte maneira: O vapor refrigerante a baixa pressão, que sai do evaporador é absorvido por uma solução absorvente no absorvedor (ponto 9, figura 3). A solução, ao absorver o vapor de refrigerante, é direcionado para a bomba (ponto 1), onde ocorre o aumento de pressão da solução. A solução após sair da bomba, passa pelo trocador de calor intermediário (pontos 2-3) entra no gerador de vapor, onde recebe calor de uma fonte térmica. O calor faz com que parte do fluido refrigerante, absorvido

no absorvedor, se separe da solução absorvente, logo do gerador de vapor saem vapor de refrigerante a alta pressão (ponto 6), solução com alta concentração de brometo de lítio (ponto 4). O vapor de refrigerante segue para o condensador, onde perde calor através de um sistema de arrefecimento e é condensado. A solução absorvente passa pelo trocador de calor intermediário, antes de voltar ao absorvedor. O vapor de água que sai do gerador de vapor entra no condensador e é condensado. Após o fluido refrigerante uniformizar a temperatura no condensador, passar por uma válvula de expansão (pontos 7-8) e segue para o evaporador, onde recebe calor do fluido ou ambiente a ser resfriado. Em seguida o fluido refrigerante, a baixa pressão, segue para o absorvedor, recomeçando o ciclo.

O sistema de refrigeração por absorção de vapor em série de duplo efeito é semelhante ao sistema de simples efeitos, as diferenças estão em quantas vezes a solução é aquecida e o acréscimo de mais um nível de pressão de trabalho. O sistema de duplo efeito possui dois geradores de vapor, logo a solução é aquecida duas vezes (uma em cada gerador). Já o sistema de refrigeração de triplo efeito possui três geradores de vapor e trabalha com um nível de pressão a mais do que o sistema de duplo efeito.

Figura 3- Sistema de refrigeração por absorção de vapor de simples efeito em série.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 1 apresenta as principais comparações entre os sistemas de refrigeração por compressão mecânica e os sistemas de refrigeração por absorção de vapor (por compressão térmica). Um sistema de refrigeração por absorção de simples efeito geralmente possui um coeficiente de desempenho (COP) que varia entre 0,7 e 0,86 (Mirza et al., 2024).

Tabela 1 - Comparação entre Sistema de Compressão e Sistema de refrigeração por absorção de vapor.

| Sistema de Compressão Mecânica | Sistemas de Absorção de vapor |
|--|--|
| O trabalho é utilizado para acionar o sistema | A energia térmica é utilizada para acionar o sistema |
| O compressor é usado para criar a diferença de pressão | O compressor é substituído por um absorvedor, gerador e uma bomba de líquido para criar a diferença de pressão |
| COP alto | COP baixo |
| Líquido na saída do evaporador pode danificar o compressor | A presença de líquido na saída do evaporador não é um problema grave |
| O desempenho é sensível ao superaquecimento no evaporador | O superaquecimento no evaporador não é muito importante |
| Existem muitas peças móveis | Poucas peças móveis |
| Manutenção regular necessária | Menos manutenção necessária |
| Econômico quando há disponibilidade de eletricidade | Econômico onde combustíveis de baixo custo ou calor residual estão disponíveis |

Fonte: Adaptado de Mirza et al., 2024

3.1.1. Fontes de Energia Térmicas para acionar sistemas de refrigeração por absorção de vapor

3.1.1.1. Gás natural

O gás natural é um combustível fóssil composto principalmente por metano (CH₄), mas também pode conter pequenas quantidades de outros gases, como etano, propano e butano. Ele é encontrado em reservatórios subterrâneos, tanto no subsolo terrestre quanto no marítimo e pode ser extraído por meio de perfuração dos poços e transportado por tubulações.

A Tabela 4 mostra a composição média do gás natural comercializado pela PBGás, incluindo os principais componentes químicos, como metano, etano, propano, dióxido de carbono e nitrogênio, bem como suas respectivas concentrações percentuais em volume. Além disso, são apresentadas propriedades do gás, como o poder calorífico superior, a densidade relativa ao ar e a massa específica, parâmetros essenciais para análises energéticas e de transporte do combustível.

Figura 4 - Composição média do gás natural comercializado pela PBGás.

| Composição | % vol. |
|--|--------|
| Metano (CH ₄) | 90,09 |
| Etano (C ₂ H ₆) | 6,84 |
| Dióxido de Carbono (CO ₂) | 1,56 |
| Nitrogênio (N ₂) | 1,35 |
| Propano (C ₃ H ₈) | 0,16 |
| Propriedades (valores médios) | |
| Poder Calorífico superior (kcal/m ³) | 9100 |
| Densidade relativa do ar | 0,614 |
| Massa específica (kg/m ³) | 0,737 |

Fonte: Adaptado de PBGÁS.

O gás natural é amplamente utilizado como fonte de energia em todo o mundo, tanto para fins residenciais, como também para fins comerciais e industriais. Ele é uma fonte de energia que polui menos levando em consideração, outros combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão, pois produz menos emissões de dióxido de carbono e outros poluentes atmosféricos.

Uma das principais vantagens do gás natural é sua versatilidade como fonte de energia. Ele pode ser usado para aquecimento de residências e edifícios, para produzir eletricidade em usinas de energia, como combustível para veículos, como matéria-prima na fabricação de produtos químicos como combustível para processos industriais e também como fonte térmica para os sistemas de refrigeração por absorção de vapor.

Além disso, o gás natural é geralmente mais seguro do que outros combustíveis fósseis, como o petróleo, porque é mais leve que o ar e se dissipa rapidamente em caso de vazamento. Isso o torna menos inflamável e menos propenso a causar explosões.

Figura 5 - Principais características do gás natural.



Fonte: PBGÁS.

Embora apresente vantagens, o gás natural também encara desafios e questões ambientais relacionados à sua obtenção, deslocamento e utilização. A título de ilustração, a extração pode desencadear danos ambientais, tais como a contaminação dos recursos hídricos e atmosféricos, além de suscitar inquietações acerca do impacto das emissões de metano, um gás de efeito estufa, nas alterações climáticas.

Portanto, o gás natural é uma importante fonte de energia que oferece muitas vantagens, mas também apresenta desafios e preocupações ambientais. Como em todas as formas de energia, é importante considerar cuidadosamente o uso do gás natural e suas implicações para o meio ambiente e para a sociedade como um todo.

3.1.1.2. Biogás

O biogás é uma fonte de energia renovável produzida a partir da decomposição de matéria orgânica, como resíduos agrícolas, esgoto e restos de comida. É composto principalmente por metano e dióxido de carbono, mas também pode conter pequenas quantidades de outros gases. De acordo com Alves (2020), o metano é considerado o principal componente do biogás, pois, além de ser encontrado em maior quantidade do que os demais gases, é causador do efeito estufa e combustível, o que possibilita o aproveitamento energético do biogás. Na sequência de maior quantidade presente, tem-se o dióxido de carbono, que assim como o metano, também é gás causador do efeito estufa, porém com um impacto 30,5 vezes menor.

Tabela 2 - Composição média do biogás.

| Componentes | Quantidade (%) | Considerações |
|---|----------------|---|
| Metano (CH ₄) | ~50 | Gás combustível, sendo um dos gases causadores do efeito estufa com potencial de aquecimento global 30,5 vezes superior ao do CO ₂ . |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | ~45 | Gás causador do efeito estufa. |
| Outros gases – Hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, amônia, ácido sulfídrico, aminas voláteis e monóxido de carbono. | ~5 | Entre esses gases, destaca-se o ácido sulfídrico, que além de mau odor, pode levar a ocorrência de chuva ácida |

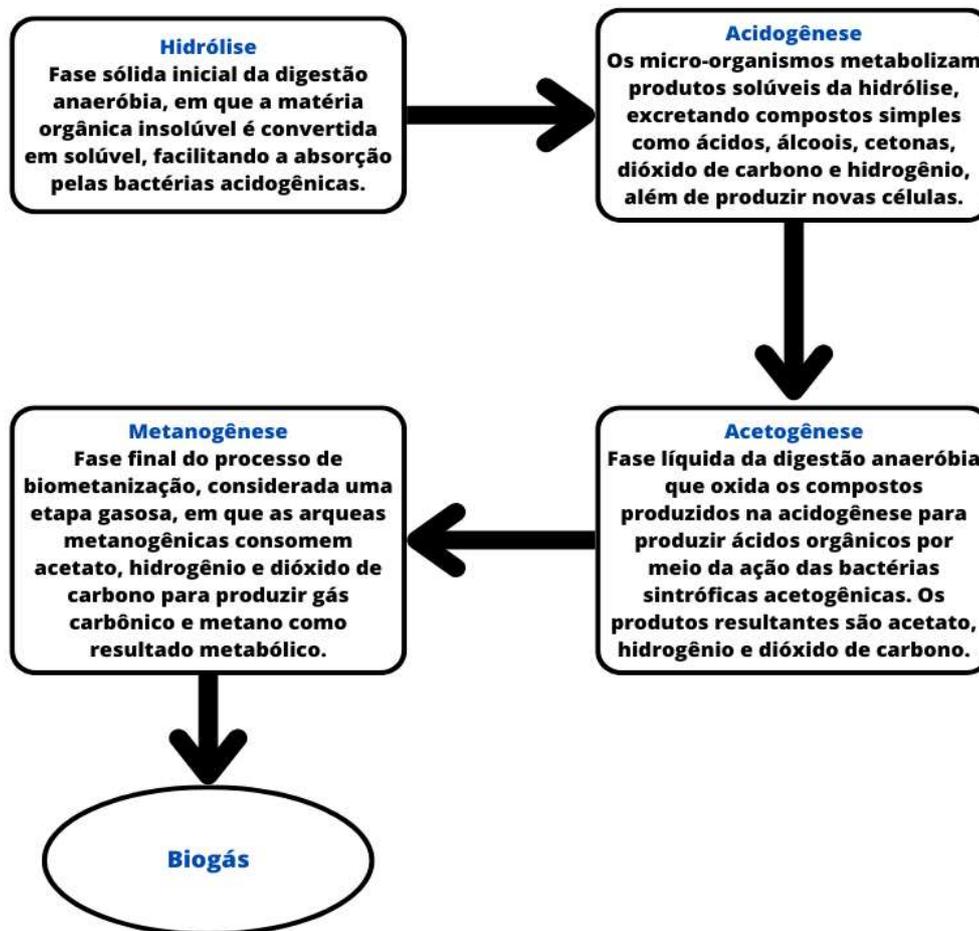
Fonte: Adaptado de SILVA, 2017.

O procedimento da digestão anaeróbia se constitui de quatro fases bem definidas. Essas quatro fases específicas consistem em: hidrólise, acidificação, acetogênese e metanogênese.

Essas quatro fases da digestão anaeróbia são altamente interdependentes, e a eficiência global do processo depende da harmonia entre as diferentes populações microbianas envolvidas em cada fase. A digestão anaeróbia é amplamente utilizada em estações de tratamento de resíduos orgânicos, plantas de biogás e em outras aplicações para produzir energia renovável e tratar resíduos orgânicos.

A Figura 6 apresenta as quatro etapas da digestão anaeróbia para produzir o biogás, começando pela hidrólise, onde compostos orgânicos complexos são quebrados em moléculas mais simples, como açúcares e ácidos graxos. Em seguida, ocorre a acidogênese, onde essas moléculas são convertidas em ácidos voláteis e compostos mais simples, como hidrogênio e dióxido de carbono. A terceira etapa, a acetogênese, envolve a transformação desses compostos em ácido acético, que serve como substrato para a última fase, a metanogênese, onde as bactérias metanogênicas convertem o ácido acético e outros compostos em metano e dióxido de carbono, gerando o biogás. Cada uma dessas fases requer condições ambientais específicas e interações microbianas precisas para otimizar a produção de biogás e garantir a eficiência do processo.

Figura 6 - Etapas da digestão anaeróbica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O biogás pode ser utilizado como fonte térmica para aquecimento de água, ar e outros fluidos. Ele pode ser queimado diretamente em um fogão ou caldeira para fornecer calor, ou pode ser convertido em eletricidade usando um gerador a gás.

Uma das principais vantagens do uso do biogás como fonte térmica é que ele é uma fonte de energia renovável que pode ajudar a reduzir a dependência de combustíveis fósseis, como o gás natural e o petróleo. Além disso, o biogás é uma forma eficiente de utilizar resíduos orgânicos, reduzindo a quantidade de lixo que é enviada para aterros sanitários e, conseqüentemente, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa.

O uso do biogás como fonte térmica também pode ser economicamente viável em áreas rurais, onde os resíduos orgânicos são abundantes e as fontes de energia são limitadas. Os

produtores agrícolas, por exemplo, podem utilizar o biogás produzido a partir de resíduos de culturas e esterco de animais para aquecer suas instalações, como galpões e estufas.

No entanto, o uso do biogás como fonte térmica também apresenta algumas desvantagens. A produção de biogás é limitada pela quantidade de resíduos orgânicos disponíveis, o que pode limitar sua utilização em grandes áreas urbanas. Além disso, a qualidade do biogás produzido pode variar dependendo da qualidade dos resíduos orgânicos utilizados, o que pode afetar a eficiência do processo de combustão.

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, gás natural e Biocombustíveis, o Biometano é um biocombustível gasoso obtido a partir do processamento do biogás. A Resolução ANP 906/2022 ainda define o biometano como sendo um biocombustível composto essencialmente de metano, derivado da purificação do Biogás.

A supracitada agência ainda informa que após as fases de limpeza do biogás, o resulta é o biometano com alta proporção de metano em sua composição, o qual possui atributos que o tornam intercambiável com o gás natural em todas as suas utilizações ou passível de ser transportado como gás comprimido por meio de caminhão-tubulação (gasoduto virtual) ou como gás liquefeito, conhecido como biometano liquefeito - Bio-GNL.

As especificações do Biometano são regulamentadas no Brasil por duas resoluções:

A Resolução ANP nº 886/2022 determina as diretrizes e os critérios para a validação do monitoramento da excelência do biometano proveniente de depósitos de resíduos sólidos e de estações de tratamento de águas residuais, destinado ao uso em veículos e em edifícios residenciais, industriais e comerciais, a fim de ser comercializado em todo o país.

A Resolução ANP nº 906/2022 estabelece as diretrizes para as características do biometano proveniente de materiais e restos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais, direcionado para aplicação em veículos e em estabelecimentos residenciais e comerciais, para ser vendido em todo o território do país.

As tabelas a seguir mostram as especificações do biometano baseado nas resoluções ANP 886/2022 e 906/2022 e as especificações do gás natural de acordo com a resolução ANP 16/2008, respectivamente.

Tabela 3 - Principais especificações do biometano oriundo de aterros, estações de tratamento de esgoto, produtos e resíduos agrossilvopastoris e comerciais de acordo com as resoluções ANP 886/2022 e 906/2022.

| Caract. | Unid. | Limite | Método |
|--|--------------------|--|------------------------------------|
| Poder Calorífico Superior | kJ/m ³ | 34.000 a 38.400 (Norte); 35.000 a 43.000 (Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 15213 / ASTM D 3588 / ISO 6976 |
| | kWh/m ³ | 9,47 a 10,67 (Norte); 9,72 a 11,94 (Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 15213 / ASTM D 3588 / ISO 6976 |
| Índice de Wobbe | kJ/m ³ | 40.500 a 45.000 (Norte); 46.500 a 53.500 (Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 15213 / ISO 6976 |
| Metano mínimo | % mol | 90,0 (Norte, Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 14903 / ASTM D 1945 / ISO 6974 |
| Oxigênio máximo | % mol | 0,8 (Norte, Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 14903 / ASTM D 1945 / ISO 6974 |
| CO ₂ máximo | % mol | 3,0 (Norte, Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 14903 / ASTM D 1945 / ISO 6974 |
| CO ₂ + O ₂ + N ₂ máximo | % mol | 10,0 ((Norte, Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 14903 / ASTM D 1945 / ISO 6974 |

Fonte: Adaptado das resoluções ANP 886/2022 e 906/2022.

A Tabela 4 mostra as principais especificações do gás natural de acordo com a Resolução ANP 16/2008, que estabelece os requisitos técnicos para a qualidade do gás natural comercializado no Brasil. Entre as especificações estão a composição mínima e máxima dos principais componentes, como metano, etano, propano, dióxido de carbono e nitrogênio, além do poder calorífico superior e o índice de Wobbe. A resolução também define limites dos principais componentes por região e o método utilizado que podem afetar a qualidade e o desempenho do gás em processos de combustão. Essas especificações são fundamentais para garantir a segurança, eficiência e conformidade do gás natural com os padrões exigidos pelas autoridades reguladoras.

Tabela 4 - Principais especificações do gás natural de acordo com a resolução ANP 16/2008.

| Caract. | Unid. | Limite | Método |
|--|--------------------|--|------------------------------------|
| Poder Calorífico Superior | kJ/m ³ | 34.000 a 38.400 (Norte); 35.000 a 43.000 (Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 15213 / ASTM D 3588 / ISO 6976 |
| | kWh/m ³ | 9,47 a 10,67 (Norte); 9,72 a 11,94 (Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 15213 / ASTM D 3588 / ISO 6976 |
| Índice de Wobbe | kJ/m ³ | 40.500 a 45.000 (Norte); 46.500 a 53.500 (Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 15213 / ISO 6976 |
| Metano mínimo | % mol | 68,0 (Norte); 85,00 (Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 14903 / ASTM D 1945 / ISO 6974 |
| Oxigênio máximo | % mol | 0,8 (Norte); 0,5 (Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 14903 / ASTM D 1945 / ISO 6974 |
| Etano máximo | % mol | 12,00 (Norte); 12,00 (Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 14903 / ASTM D 1945 / ISO 6974 |
| Propano máximo | % mol | 3,00 (Norte); 6,00 (Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 14903 / ASTM D 1945 / ISO 6974 |
| Butanos e mais pesados, máximo | % mol | 1,50 (Norte); 3,00 (Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 14903 / ASTM D 1945 / ISO 6974 |
| CO ₂ máximo | % mol | 3,0 (Norte, Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 14903 / ASTM D 1945 / ISO 6974 |
| Inertes (CO ₂ + N ₂) máximo | % mol | 18,0 ((Norte); 8,00 (Nordeste); 6,00 (Centro-oeste, Sudeste e Sul) | NBR 14903 / ASTM D 1945 / ISO 6974 |

Fonte: Adaptado da resolução ANP 16/2008.

3.1.1.3. Calor Residual

O calor residual é um tipo de fonte térmica que consiste no aproveitamento do calor que é gerado durante processos industriais e comerciais. Esse calor é normalmente liberado para o meio ambiente sem ser aproveitado, o que pode resultar em desperdício de energia e aumento dos custos operacionais das empresas.

O uso do calor residual como fonte térmica pode trazer diversos benefícios, como a redução do consumo de combustíveis fósseis e a diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, o aproveitamento do calor residual pode contribuir para a redução dos custos operacionais das empresas, já que elas podem utilizar o calor gerado em seus processos sem a necessidade de investir em outras fontes de energia.

Existem diversas formas de aproveitar o calor residual como fonte térmica. Uma das mais comuns é a utilização de trocadores de calor, que transferem o calor gerado em um processo para outro fluido, como água ou ar. Esse fluido pode ser utilizado para aquecer ambientes, fornecer água quente ou para gerar vapor, que pode ser utilizado em outros processos industriais.

Outra forma de aproveitar o calor residual é por meio da cogeração, que consiste na produção simultânea de energia elétrica e térmica. Nesse caso, o calor gerado durante a produção de eletricidade é aproveitado para gerar vapor ou água quente, que pode ser utilizado em sistemas de refrigeração por absorção de vapor para produzir água gelada para o sistema de climatização.

O uso do calor residual como fonte térmica apresenta diversas vantagens em relação a outras fontes de energia. Ele é uma fonte de energia renovável, já que é gerado a partir de processos que já acontecem dentro das empresas, e pode ser aproveitado sem a necessidade de investimentos em outras fontes de energia. Além disso, o uso do calor residual contribui para a redução dos custos operacionais das empresas, já que elas podem utilizar o calor gerado em seus processos sem a necessidade de investir em outras fontes de energia.

3.1.2. Sistema de refrigeração por absorção de uso comercial

O sistema de refrigeração por absorção de vapor direta da LG, com o modelo WCDH010, emprega uma combinação de água e brometo de lítio como o par de fluidos de trabalho. Ele se vale de diversas fontes de calor, tais como os gases produzidos durante a queima de gás natural (incluindo biogás, entre outros), bem como água quente e vapor, para operar o sistema.

A Figura 7 e a Figura 8 ilustram, respectivamente, o chiller de refrigeração por absorção de vapor comercial da LG e o ciclo básico de funcionamento desse tipo de sistema. O chiller em questão é um exemplo da aplicação prática de tecnologias de refrigeração por absorção de vapor, que utilizam a energia térmica, em vez de energia elétrica, para promover a troca de calor. O ciclo básico de funcionamento mostrado na Figura 9 descreve as etapas fundamentais

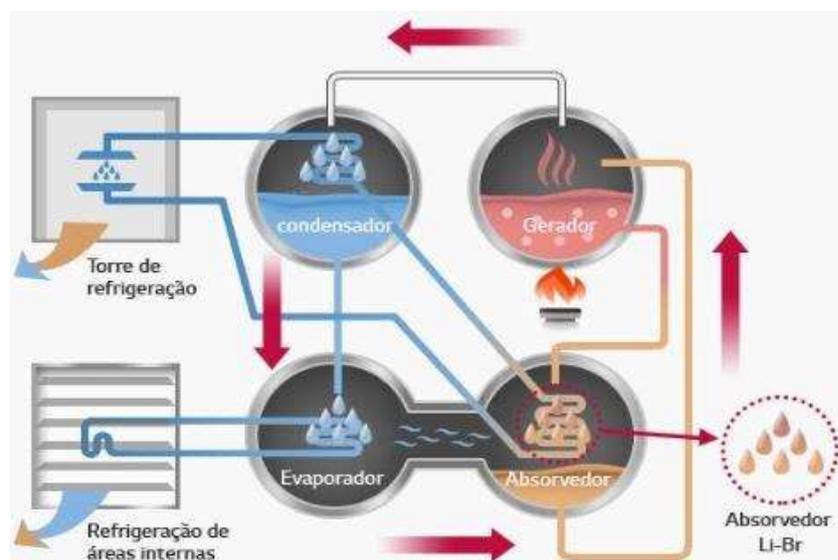
do processo: a evaporação do fluido refrigerante em baixa pressão, sua absorção por um solvente, a compressão térmica e a subsequente liberação de calor.

Figura 7 - Chiller de absorção de vapor comercializado pela LG



Fonte: Catalogo da LG

Figura 8- Ciclo básico de funcionamento do chiller de absorção de vapor comercializado pela LG.

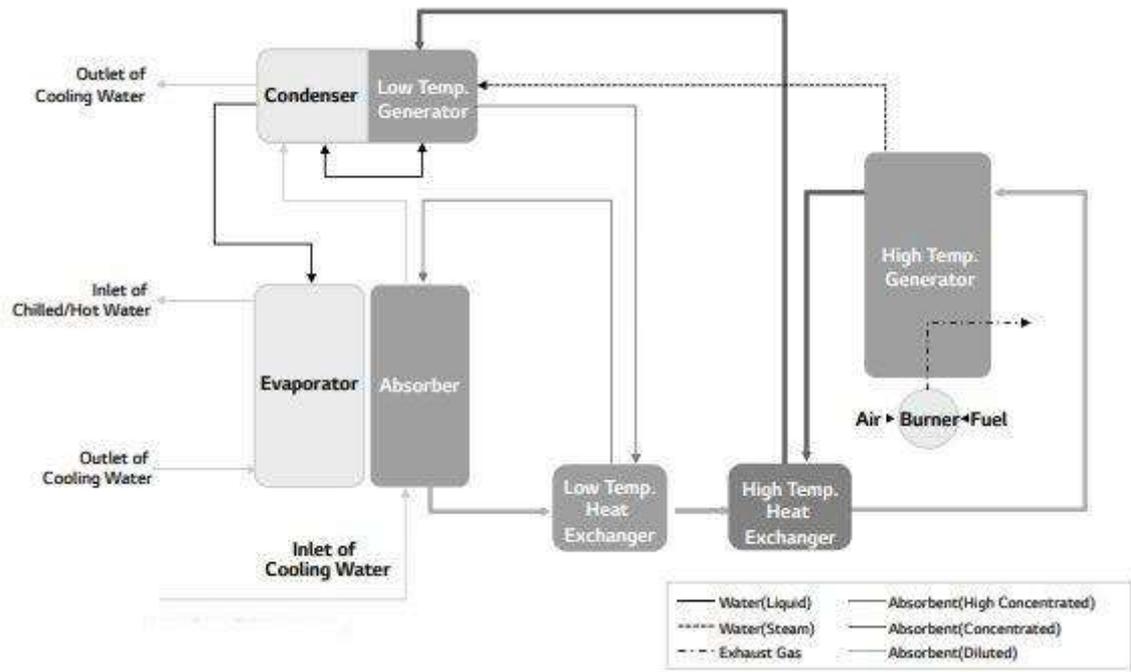


Fonte: Catalogo da LG

O chiller de absorção de vapor de duplo efeito modelo WCDH010 da marca LG trabalha com o par água- brometo de lítio, sendo a água o fluido refrigerante e o brometo de lítio o fluido absorvente. Tem capacidade de refrigeração de 100 TR. O funcionamento do mencionado chiller é semelhante a descrição de funcionamento do chiller de absorção de duplo efeito em

torre que estar em desenvolvimento na RECOGAS. A Figura 9 ilustra o ciclo de funcionamento do chiller da marca LG.

Figura 9 - Ciclo de funcionamento do chiller de absorção de vapor de duplo efeito comercializado pela LG.



Fonte: Catálogo LG

Algumas diferenças observadas no ciclo de funcionamento do chiller da LG em relação ao ciclo do protótipo em desenvolvimento na UFPB é o pré aquecimento da solução do fluido absorvente antes da entrada no gerador de vapor 2 (gerador de baixa temperatura).

O ciclo de funcionamento, traduzido para o português, é descrito no início da metodologia do presente estudo.

3.1.3. Sistema de refrigeração por absorção em desenvolvimento na RECOGAS.

O protótipo em desenvolvimento na RECOGAS foi construído na configuração em forma de torre, composta por três vasos de pressão cilíndricos separados por flanges. O vaso superior abriga o gerador de vapor I; o vaso central inclui o gerador de vapor II e o condensador; enquanto o vaso inferior é destinado ao absorvedor e ao evaporador. Além desses componentes principais, estão anexadas válvulas de expansão, um trocador de calor de solução do tipo casco

e tubo, bem como dutos para interligação dos componentes, o sistema de controle e a bomba de solução.

Figura 10 - Protótipo do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo em série com disposição em torre



Fonte: arquivo pessoal do autor.

A Figura 10 ilustra o protótipo em desenvolvimento no Instituto de Energia Sustentável destacando sua estrutura e os principais componentes do sistema de refrigeração por absorção de vapor. O protótipo foi projetado para simular as condições operacionais de um chiller comercial, utilizando um ciclo de absorção de duplo efeito e queima direta de gás natural como fonte térmica

3.2. EXERGONOMIA

O conceito de exergonomia é uma área da engenharia que relaciona a análise exérgica e os conceitos da economia no intuito de obter informações não disponíveis por meio de análises convencionais, sendo uma análise de grande relevância para o projeto e as operações envolvidas em um sistema térmico (BEJAN et al. 1996). Ou seja, a exergonomia é um estudo que tem a finalidade de redução de custos de produção, manutenção e operação de um sistema, baseando-se na definição de energia útil, exergia.

Segundo MARQUES (2018) Os principais objetivos a serem alcançados por um estudo exergoeconômico são:

- Determinação dos custos exergéticos e monetários dos fluxos dos volumes de controle, representados pelos equipamentos da unidade estudada;
- Determinação dos custos de cada produto em separado;
- Avaliação da variação dos custos dos fluxos e da eficiência dos diferentes equipamentos;
- Comparação, de forma equivalente, dos fluxos de diferentes correntes exergéticas;
- Indicação dos equipamentos que necessitem de otimização, visando oportunidades de redução dos custos.

TSATSARONIS (1993) diz que o estudo exergoeconômico apresenta outros objetivos, tais quais: calcular separadamente os custos de cada produto gerado por um sistema com mais de um produto; entender o processo de formação de custos e o fluxo de custos do sistema; otimizar variáveis específicas em um único componente, como também otimizar o sistema como em geral.

3.2.1. **Análise exergoeconômica – método SPECO (specific exergy costing)**

De acordo com MARQUES (2018), o método SPECO, ou Especificação de Custo Exergético, foi concebido por George Tsatsaronis em conjunto com seus parceiros, incluindo Pisa, Bejan, Moran, Winhold e outros, com o propósito de vincular os fluxos de exergia aos princípios econômicos para a avaliação de sistemas térmicos. Este método surgiu da fusão e aprimoramento de outros dois métodos, o AVCO (Custo Médio) e o LIFO (Último a Entrar, Primeiro a Sair).

A avaliação exergoeconômica se fundamenta na atribuição de custos às taxas de exergia de um condutor de energia e na obtenção do valor financeiro de cada um dos fluxos. A taxa de custo está associada a cada fluxo de exergia.. A equação do balanço exergoeconômico é dada por:

$$\sum_s (C_s \cdot E_s)_k + (c_w \cdot \dot{W}) = c_q \cdot E_q + \sum_i (C_e \cdot E_e)_k + \dot{Z}_k \quad (1)$$

Os termos c_e, c_s, c_w, c_q são os custos médio por unidade de exergia e o \dot{Z}_k é a taxa de custo das despesas totais (custo de aquisição, operação e manutenção), logo a expressão matemática de Z_k é:

$$Z_k = Z^{CI} + Z^{OM} \quad (2)$$

Sendo o Z_k constituído pelas parcelas de compra dos componentes (Z^{CI}) ou seja, o valor de aquisição dos equipamentos do sistema, e a outra parcela é referente a operação e manutenção do sistema (Z^{OM}).

O método é baseado em três etapas distintas:

- a. Determinação dos fluxos de exergia total;
- b. Definição dos produtos e combustíveis (insumos) de cada fluxo energético para cada volume de controle, levando em consideração o resultado desejado/ produzido por cada equipamento e a fonte consumida para obter esse resultado;
- c. Na última etapa são utilizadas equações que associem o custo de um sistema térmico com o ambiente e suas fontes de irreversibilidades. Desta forma, obtém-se os balanços para os produtos, para os combustíveis e as equações auxiliares para fechar a matriz de incidência.

3.2.1.1. Princípio F

O Princípio F estabelece que o custo específico (custo por unidade de exergia) associado à remoção do fluxo de exergia interno de um equipamento deve ser o mesmo para o fluxo de entrada e saída, ou seja, afirma-se que o combustível "paga a conta" do produto, razão pela qual o custo específico é igual. Com base na definição do Princípio F, Cavalcanti (2016) apresenta algumas conclusões:

- a. O significado físico de igualar os custos específicos do combustível ao do fluxo de entrada e saída é informar que o combustível assumi as despesas do produto;
- b. O produto carrega as irreversibilidades do componente. Quanto menor a eficiência com componente, mais caro ficara o produto.
- c. O conceito apresentado pode ser aplicado em qualquer componente de um sistema, observando-se, sempre, a função do componente.

Diante do exposto, obtemos uma equação auxiliar por cada remoção de exergia, de modo que o número de equações obtidos pelo o princípio F seja sempre igual ao número $N_{s,f}$ de fluxos de exergia de saída que estão associados à definição do combustível para o componente. (LAZARETTO A. (2006)).

3.2.1.2. Princípio P

O princípio P faz referência a entrega de fluxo de exergia para a corrente de exergia dentro de um componente considerado. Segundo TSATSARONIS (2006), o princípio P diz que cada corrente de exergia é fornecida para um fluxo de exergia vinculado ao produto no mesmo custo médio, cuja denominação é C_p . Ou seja, o princípio P afirma que que todos os fluxos de saída, exceto ao fluxo associado ao combustível, possuem o mesmo custo específico. Tendo em vista que cada fluxo de exergia corresponde a um fluxo de saída, o número de equações auxiliares fornecida pelo princípio P é igual a $N_{s,p}-1$, sendo que o $N_{s,p}$ é caracterizado pelo número de fluxos de exergia na saída do volume de controle que estão inseridos na definição de produto.

Aplicando o princípio F e o princípio P, defina-se as equações auxiliares e em seguida igualam-se os números de equações de fluxos com o número de incógnitas para definir a taxa de custo usando o método SPECO.

A tabela a seguir, baseada no trabalho de Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), ilustra várias utilizações dos princípios de combustível, produto e equações auxiliares em relação a equipamentos comuns em sistemas térmicos.

Figura 11- Equações de custo para insumo, produto e equações auxiliares para equipamentos típicos em instalações térmicas.

| Equipamento | Representação | Custo do Produto (c_p) | Custo do Insumo (c_i) | Equação auxiliar | Variável a ser determinada |
|-------------------------------------|---------------|---|---|--|----------------------------|
| Compressor, bomba ou ventilador | | $\dot{C}_2 - \dot{C}_1$ | \dot{C}_W | nenhuma | c_2 |
| Turbina ou expansor | | \dot{C}_W | $\dot{C}_1 - \dot{C}_2 - \dot{C}_3$ | $c_2 = c_3 = c_1$ | c_W |
| Trocador de calor | | $\dot{C}_2 - \dot{C}_1$ | $\dot{C}_3 - \dot{C}_4$ | $c_4 = c_1$ | c_2 |
| Misturador | | \dot{C}_3 | $\dot{C}_1 + \dot{C}_2$ | nenhuma | c_3 |
| Gaseificador ou câmara de combustão | | \dot{C}_3 | $\dot{C}_1 + \dot{C}_2$ | nenhuma | c_3 |
| Caldeira | | $(\dot{C}_4 - \dot{C}_2) + (\dot{C}_6 - \dot{C}_7)$ | $(\dot{C}_1 + \dot{C}_2) + (\dot{C}_3 + \dot{C}_4)$ | $\frac{\dot{C}_4 - \dot{C}_5}{\dot{I}_4 - \dot{I}_5} = \frac{\dot{C}_6 - \dot{C}_7}{\dot{I}_6 - \dot{I}_7}$ e $\dot{C}_3 = \dot{C}_4 = 0$ (perdas) | c_6 ou c_8 |

* Essas relações são válidas assumindo que o objetivo do trocador de calor é o de aquecer o fluxo frio ($T_2 \geq T_1$). Se o objetivo do trocador for o de resfriamento ($T_2 \leq T_1$), então exija-se o resfriado do fluxo frio e então, as seguintes relações devem ser utilizadas: $\dot{C}_2 = \dot{C}_4 - \dot{C}_3$; $\dot{C}_3 = \dot{C}_1 - \dot{C}_2$; $c_2 = c_4$ e a variável c_3 é calculada pelo balanço.

Fonte: Adaptado de Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) por Marques (2018).

3.2.2. Variáveis exergoeconômica

Alguns parâmetros qualificam o estudo exergoeconômico. Tais parâmetros tem o objetivo de direcionar os equipamentos mais eficientes e os que precisam melhorar, com relação ao desperdício de energia útil e monetário.

Os custos gerais são obtidos analisando a taxa de custo nivelado de cada equipamento, considerando fatores de amortização, despesas fixa e variável na operação e manutenção e o fator de recuperação de capital (CRF). Matematicamente, observa se que:

$$Z_i = z_i \cdot CRF \cdot \emptyset \text{ [$/s]} \quad (3)$$

O z_i é o custo de aquisição do equipamento (R\$), o \emptyset é o fator de manutenção em [%], o CRF é o fator de recuperação de capital e é aplicado quando se quer verificar o retorno do investimento, como também em amortização de capital. A expressão matemática para determinar tal fator é:

$$CRF = i \cdot \left[\frac{(1+i)^{n \text{ ano}}}{(1+i)^{n \text{ ano}} - 1} \right] \cdot \frac{1}{n_h \cdot 3600} \quad (4)$$

Sendo o n_h o número de horas de operação em um ano (Horas) e o i taxa anual de juros.

No tocante a avaliação de desempenho dos equipamentos usando a exergia, é aplicado o conceito de eficiência exergética dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{E_p}{E_f} \quad (5)$$

O inverso da eficiência exergética é chamado de custo exergético unitário expressado por:

$$K = \frac{E_f}{E_p} = \frac{E_i^*}{E_j} \quad (6)$$

Sendo K o custo exergético unitário, E_i^* é a exergia necessária para a obtenção do produto e o E_j é a quantidade mínima de exergia atrelado ao processo ideal para concepção do produto.

A exergia destruída é denominada por:

$$E_F = E_P + E_D \quad (7)$$

Onde E_F , E_P são as taxas de exergia do combustível e produto de cada componente, respectivamente

A expressão que determina a taxa de exergia destruída é denominada como:

$$\dot{C}_D = c_f \cdot E_D \quad (8)$$

Sendo c_f e E_D o custo específico do combustível e a taxa de destruição de exergia respectivamente.

O parâmetro que informa o aumento relativo no custo médio por unidade de exergia entre o combustível e o produto é:

$$r_k = \frac{c_P - c_f}{c_f} \quad (9)$$

O valor de r_k elevado informa que o componente tem maior potencial de otimização de custo sem necessitar de muito esforço em relação a um componente com menor valor.

Um fator de suma importância para avaliação da viabilidade de investimento de cada equipamento é o fator exergoeconômico determinado pela equação:

$$f_k = \frac{\dot{Z}}{c_f \cdot E_D + \dot{Z}} \quad (10)$$

Os componentes com valores baixos do fator f_k mostra que o custo da irreversibilidade é importante quando comparado com o custo de investimento. Tal parâmetro é muito utilizado quando analise se a viabilidade econômica de investimento na eficiência do equipamento.

Nesse contexto, esse coeficiente representa a influência dos custos de investimento de um dispositivo no incremento do custo global. Se o coeficiente exergoeconômico for baixo em relação a um dispositivo principal, isso sinaliza que é possível obter economias de custo ao aprimorar a eficiência do dispositivo e reduzir a perda de exergia. Em contrapartida, um coeficiente elevado sugere a possibilidade de reduzir o investimento no dispositivo.

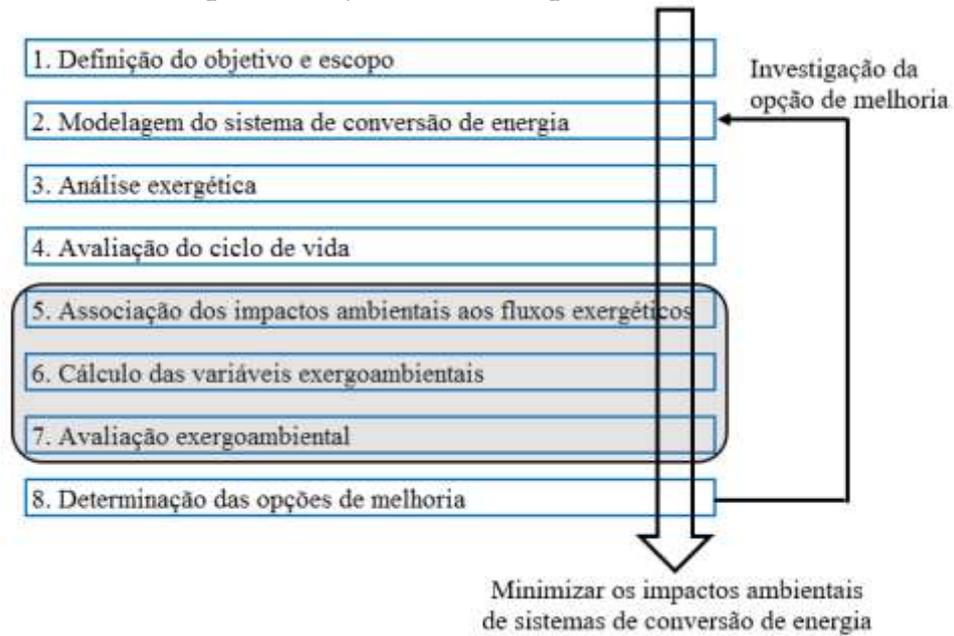
Esse coeficiente varia de 0 a 1 (0% a 100%) e tem como objetivo apontar quais equipamentos devem receber maior foco durante o processo de otimização. De acordo com Cordeiro (2018), o valor do fator exergoeconômico mais próximo de 1 (ou seja, 100%) melhor, pois mostraria que não há destruição de exergia.

3.3. AVALIAÇÃO EXERGOAMBIENTAL

O propósito da avaliação exergoambiental reside em conectar os efeitos ambientais aos fluxos de exergia, semelhante ao estudo de exergoeconomia, em sistemas de conversão de energia. A avaliação do aspecto ambiental é conduzida por meio de uma análise de ciclo de vida (ACV), que abrange desde a fase de concepção do produto até seu uso e posterior descarte. Para medir e integrar os impactos ambientais com a análise exérgica, torna-se essencial a utilização de um indicador ambiental.

O processo começa com a definição dos alvos a serem atingidos, assim como a identificação das superfícies de controle em cada dispositivo dentro do sistema em estudo. Em seguida, é efetuada a avaliação exérgica, gerando os valores de exergia para cada ponto ao longo dos fluxos determinados, o cômputo da eficiência exérgica de cada equipamento e as estimativas de exergia perdida no equipamento. A figura 12 mostra as etapas do estudo exergoambiental.

Figura 12 - Etapas do estudo Exergoambiental.



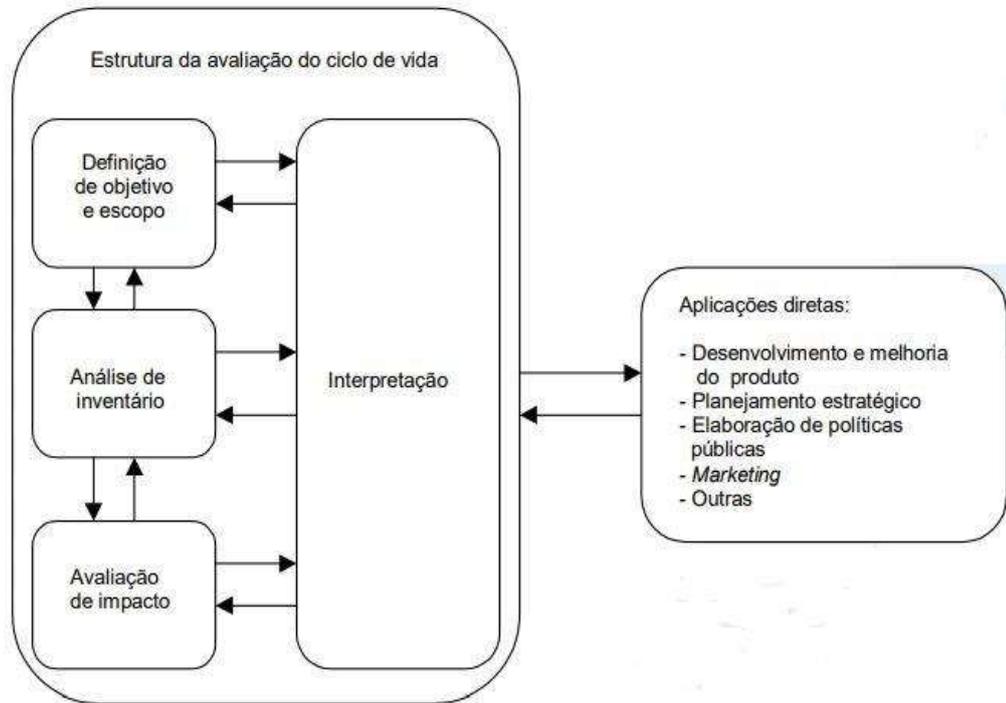
Fonte: Adaptado de Meyer et al. (2009) e por Marques (2018).

A etapa subsequente envolve a condução de uma análise do ciclo de vida para cada dispositivo do sistema, empregando um indicador ambiental adequado. Em seguida, integram-se os efeitos ambientais derivados da ACV com cada fluxo de exergia no sistema, viabilizando a computação das métricas exergoambientais. Com base nos resultados obtidos, é possível realizar uma avaliação exergoambiental que identifica os equipamentos que demandam a redução de seus impactos ambientais.

3.3.1. Avaliação do ciclo de vida

A análise de ciclo de vida (ACV) é uma técnica que avalia o tempo dos produtos e serviços através de inventários do consumo de recursos naturais, energia e emissões. A (ABNT, 2014) ainda define a ACV como sendo uma técnica para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto. As etapas de aplicação do ACV são descritas na figura 13.

Figura 13 - Etapas de aplicação da avaliação do ciclo de vida.



Fonte: ABNT, 2014

Segundo Marques (2018) a fase de definição de objetivo e escopo deve ser feita de forma clara, evidenciando os resultados esperados pelo estudo. Geralmente, esta fase deve conter: onde se inicia e termina o estudo (definição de limites), quantos e quais subsistemas devem ser incluídos e qual nível de detalhe deve ser abordado. Outra etapa importante na definição do escopo é estabelecer uma unidade funcional, mensurável, que é a medida de desempenho das saídas funcionais do sistema para fornecer uma relação entre as entradas e saídas.

A segunda etapa da análise de ciclo de vida é o inventário. Tal fase é caracterizado pela coleta de dados, quantificando todas as variáveis envolvidas durante o ciclo de vida de um produto, processo ou atividade, como: matéria prima, energia, transporte, emissões para o ar, resíduos sólidos, etc.

A terceira etapa do estudo é a avaliação do impacto que é a avaliação dos resultados obtidos na fase de inventário. A norma ISSO 14040 contém indicações dos elementos que devem constar nesta etapa, tais quais: A seleção e definição das categorias ambientais; Classificação dos impactos (por exemplo: CO₂ são classificados na categoria de aquecimento

global); caracterização, onde os impactos são quantificados usando uma unidade de referência; Normalização dos resultados em relação a uma referência; Ponderação (devido a grande quantidade de resultados é necessário utilizar um indicador ambiental único).

A quarta e última etapa é a interpretação dos resultados obtidos que permite gerar conclusões, explicações, limitações e recomendações sobre o ciclo de vida e oportunidades de melhoria.

3.3.2. **Indicador de impacto ambiental para o ACV**

Para realizar uma avaliação numérica do impacto ambiental de um sistema, é essencial ter um indicador ambiental específico. Um indicador ambiental é uma medida quantitativa ou qualitativa que é utilizada para avaliar e monitorar o estado do ambiente, as mudanças nele ocorridas, bem como os impactos das atividades humanas sobre o ecossistema. A literatura apresenta uma variedade de indicadores, dentro aos quais: Indicador CML 2 (2000), Indicador Suíço dos Ecopontos, Indicador EPS 2000, Indicador IMPACT 2002+, Indicador ECO-99 e o Método Recipe.

O método utilizado no presente estudo é o método Recipe que será abordado a seguir.

3.3.3. **Método ReCiPe**

O método ReCiPe é considerado o sucessor do método Eco indicador 99 e CML-IA. O objetivo do desenvolvimento de tal método era unir a “abordagem orientada ao problema” do CML-IA e a “abordagem orientada aos danos” do Eco indicador 99. A abordagem orientada ao problema define as categorias de impacto midpoint (GOEDKOOOP et al., 2009). A desvantagem do método midpoint é a variedade das categorias de impacto ambiental, o que torna as conclusões, a partir dos resultados obtidos, complexo. A “abordagem orientada aos danos” do EI-99 possui apenas três categorias de impacto, tornando a interpretação dos resultados mais simples, porém a incerteza dos resultados é maior. O método ReCiPe aborda ambas as estratégias e possui categorias de impacto ambiental tanto de midpoint (orientado ao problema) quanto de endpoint (orientadas aos danos). Os fatores de caracterização de midpoint são multiplicados pelos fatores de danos, para obter os valores do nível endpoint.

No nível de midpoint, 18 categorias de impacto são analisados, tais quais: Depleção de ozônio; Toxicidade Humana; Radiação Ionizante; Formação de oxidantes fotoquímicos; Formação de matéria articulada; Acidificação terrestre; Mudanças climáticas; Ecotoxicidade terrestre; Ocupação do solo agrícola; Ocupação do solo urbano; transformação de terra natural; Ecotoxicidade matinha; Eutrofização marinha; Eutrofização da água doce; Ecotoxicidade de água doce; Depleção de combustíveis fósseis; Depleção de animais; Depleção de água doce.

3.3.4. Introdução ao Open LCA

O processo de avaliação do ciclo de vida é auxiliado por programas computacionais para a modelagem dos processos e sistemas de produtos. Os softwares de ACV auxiliam principalmente a análise de impactos ambientais, sendo capazes de processar os dados do inventário em categorias de impacto ambientais a depender do método de impacto escolhido. Além disso, alguns softwares podem incluir modelagem gráfica, relatórios gerenciais, diagramas de fluxos e interpretação de resultados. (ROCHA, 2020)

O OpenLCA é um software de código aberto e gratuito destinado à realização de análises de ciclo de vida (ACV) de produtos e procedimentos. Esse programa capacita os utilizadores a examinar o impacto ambiental de um produto ou procedimento ao longo de sua trajetória completa, começando desde a aquisição das matérias-primas até a fase final de descarte. A principal meta do OpenLCA consiste em oferecer uma ferramenta de análise de ciclo de vida que seja acessível e de utilização descomplicada a uma ampla gama de utilizadores, abrangendo desde estudantes e investigadores até engenheiros e gestores empresariais.

O software de código aberto foi desenvolvido na Alemanha pela empresa Green Delta GmbH para Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e avaliação de sustentabilidade. Atualmente é mantido e desenvolvido por uma comunidade global de usuários e desenvolvedores. Ele foi lançado pela primeira vez em 2008 e desde então tem sido constantemente atualizado e aprimorado para atender às necessidades crescentes dos usuários.

O OpenLCA disponibiliza uma ampla variedade de recursos para ajudar os usuários a modelar e analisar sistemas de produção. Ele inclui uma biblioteca de dados de impacto

ambiental, ferramentas para otimização de fluxo de material, suporte para diferentes metodologias de ACV e integração com outras ferramentas de análise. Além disso, o software é compatível com vários formatos de arquivo, incluindo Excel, e pode ser integrado com outras ferramentas de gerenciamento de dados.

O Openlca pode ser usado para seguintes aplicações:

- Avaliação de ciclo de vida, custo do ciclo de vida e avaliação do ciclo de vida social;
- Pegada de carbono e água;
- Declaração ambiental do produto (DAP)
- Design do selo ambiental;
- Política integrada de produtos;

O OpenLCA Nexus (<https://nexus.openlca.org>) é um repositório online para dados de ACV. Ele combina dados oferecidos por provedores de dados ACV líderes mundiais, como oecoinvent center (banco de dados ecoinvent), PE International (banco de dados GaBi) e o Joint Research Centre da Comissão Europeia (banco de dados ELCD).

Os conjuntos de informações disponíveis no Nexus podem ser prontamente transferidos para o programa openLCA. Os bancos de dados openLCA e Nexus possuem um conjunto compartilhado de elementos de fluxo e outros dados de referência que foram ajustados em conjunto com os fornecedores de dados correspondentes, a fim de superar discrepâncias metodológicas, como aquelas relacionadas à representação de resíduos.

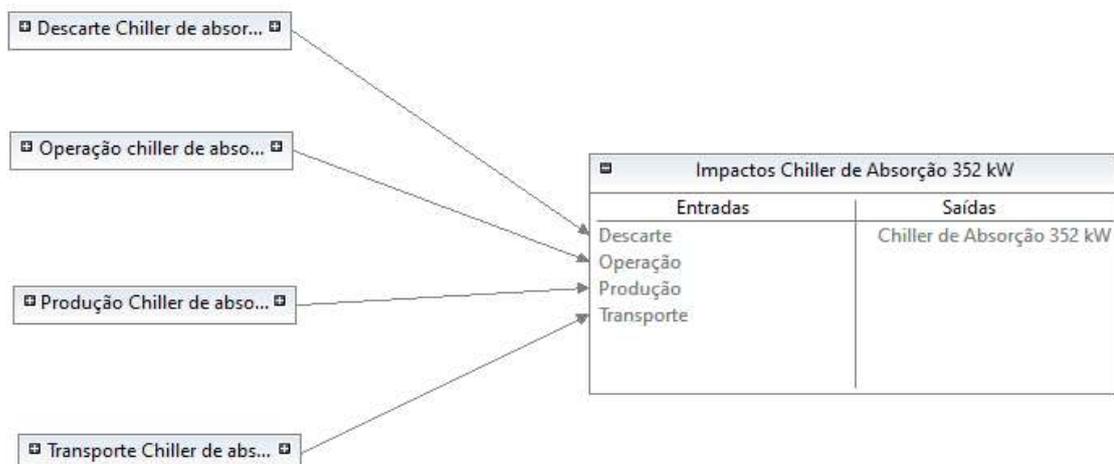
Figura 14 - Página inicial do software de código aberto OpenLCA versão 1.10.3.



Fonte: OpenLCA, 2006

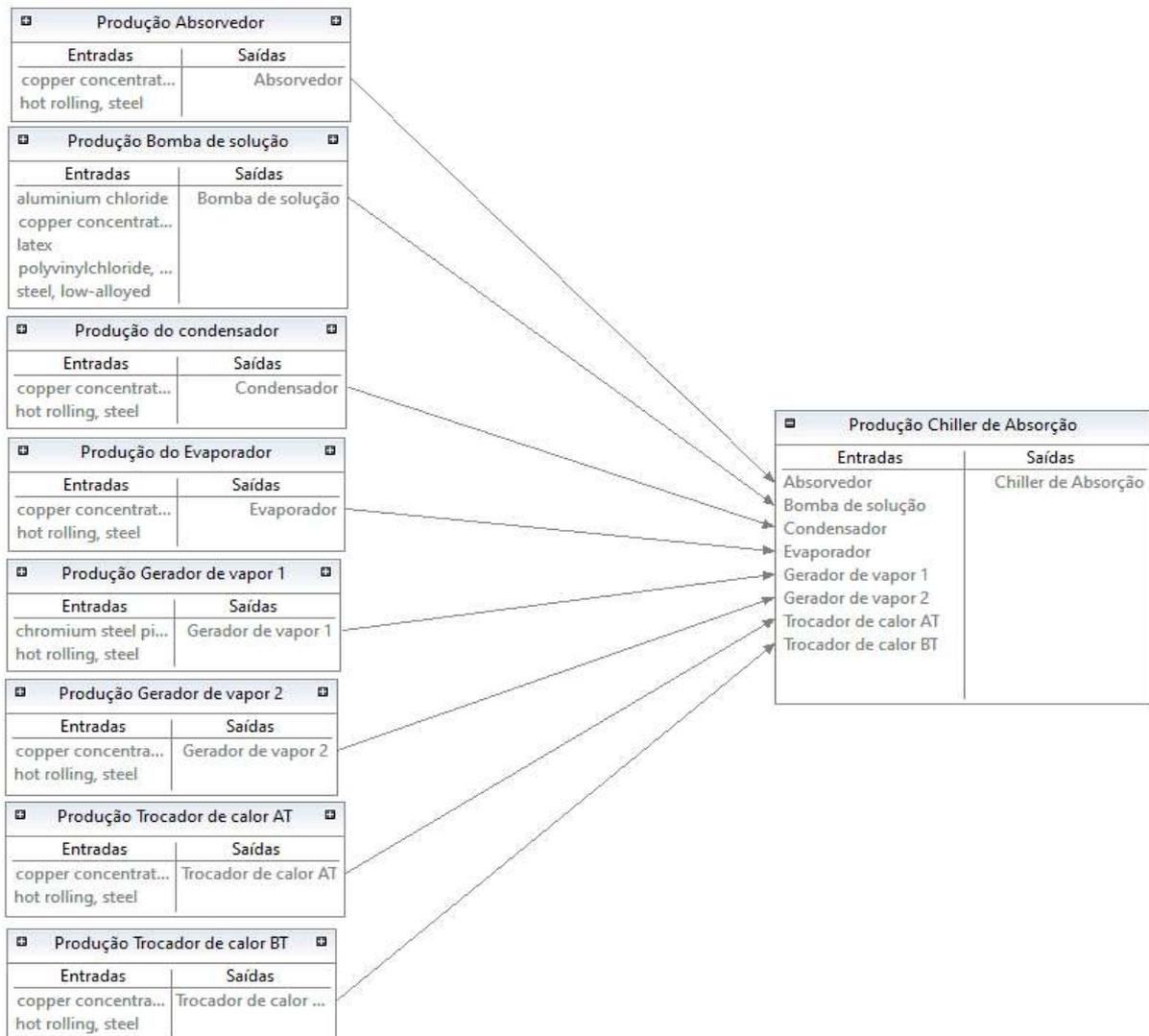
O programa utilizado neste estudo também possibilita a representação visual, por meio de gráficos, do acompanhamento da pesquisa sobre os efeitos no ambiente. Na Figura 15, é possível visualizar o diagrama de todas as etapas do estudo de ACV no chiller de absorção de vapor. Já a Figura 16 exibe o esquema que apresenta os recursos iniciais empregados na fabricação de cada componente do escopo de estudo do refrigerador de absorção a vapor comercial.

Figura 15 - Diagrama dos impactos totais do chiller de absorção de vapor comercial de 352 kW.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Diagrama da matéria prima utilizada na produção do chiller de absorção de vapor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 16 apresenta o Diagrama da matéria-prima utilizada na produção do chiller de absorção de vapor, mostrando as entradas e saídas dessa etapa do ACV. O diagrama destaca os principais materiais utilizados na etapa de produção do chiller comercial.

3.3.5. Análise exergoambiental

Segundo (Cavalcanti, 2016), a finalidade da análise exergoambiental é avaliar os impactos ambientais e incorporar critérios de sustentabilidade aos processos de conversão de energia.

A taxa de impacto ambiental $\dot{\mathbf{B}}$ de um fluxo m [Kg de CO₂-eq/s] e o produto da taxa de exergia \mathbf{E} em [kW] pelo indicador ambiental específico \mathbf{b} em [Kg de CO₂-eq/kJ], ou seja:

$$\dot{\mathbf{B}}_m = \mathbf{E}_m \cdot \mathbf{b}_m \quad (11)$$

A análise exergoambiental é semelhante à exergoeconômica usando o método SPECO, sendo que invés de usar taxas de custo, utilizasse taxas de impacto ambiental, tendo início com o balanço dos fluxos de cada componente do sistema em estudo e a aplicação dos princípios F e P. Portanto, o impacto ambiental específico do insumo e do produto, em um equipamento, são determinados pelas seguintes equações:

$$b_{F,K} = \frac{\dot{B}_{F,K}}{EX_{F,K}} \quad (12)$$

$$b_{P,K} = \frac{\dot{B}_{P,K}}{EX_{P,K}} \quad (13)$$

O cálculo exergoambiental estabelece que a influência ambiental de todas as entradas, somada à influência ambiental do componente em questão, é equivalente à soma das influências ambientais de todas as saídas. Portanto, podemos afirmar:

$$\sum_{i=1}^e \dot{\mathbf{B}}_{i,k} + \dot{\mathbf{Y}}_k = \sum_{m=1}^s \dot{\mathbf{B}}_{m,k} \quad (14)$$

Onde $\dot{\mathbf{Y}}_k$ é o impacto ambiental do componente, $\dot{\mathbf{B}}_k$ é a taxa de impacto ambiental associada a um fluxo de exergia de um componente tendo como unidade [Pts/s ou mPts/s], os índices i e m são os números de fluxos de entrada (e) e saída (s) e k são os componentes. O impacto ambiental do componente $\dot{\mathbf{Y}}_k$ é desenvolvido pela avaliação do ciclo de vida, seguindo as etapas já descritas e usando o software de código aberto OpenLCA versão 1.10.3 e a database Ecoinvent 3.7.1.

O valor da variável $\dot{\mathbf{Y}}_k$ (taxa de impacto ambiental do componente) é dividida em:

- \dot{Y}_k^{CO} é a construção do equipamento, incluindo fabricação, transporte e instalação;
- \dot{Y}_k^{OM} é a operação e manutenção, incluindo a produção de poluentes durante a operação;
- \dot{Y}_k^{DI} é o descarte, após o fim de utilização do equipamento ou processo;

Logo, \dot{Y}_k é igual a:

$$\dot{Y}_k = \dot{Y}_k^{CO} + \dot{Y}_k^{OM} + \dot{Y}_k^{DI} \quad (15)$$

Todos os valores da equação acima são obtidos através da análise de ACV.

3.3.6. Variáveis exergoambiental

Semelhante como no estudo exergoeconômico, alguns parâmetros de avaliação podem ser utilizados para identificar os componentes que mais precisam de otimização no tocante aos impactos ambientais. Cordeiro (2018) diz que com o auxílio desses parâmetros, pode determinar quais componentes que tem o maior impacto ambiental devido a exergia destruída, quais aqueles que precisam de maior modificação para degradar menos o ecossistema, quais podem ter o impacto reduzido com maior facilidade e etc.

A destruição de exergia associado a taxa de impacto ambiental de um componente k é calculado pela seguinte expressão matemática:

$$\dot{B}_{D,k} = Ex_{D,k} \cdot b_{F,k} \quad (16)$$

Na equação acima é dito que a destruição de exergia é compensado pelo um maior consumo de combustível para determinar a quantidade do produto. Por isso, a taxa de destruição de exergia, $Ex_{D,k}$, é multiplicado pelo impacto ambiental específico médio atrelado ao combustível do componente.

Outra variável considerada na análise exergoambiental é o impacto ambiental global atribuído a um componente, com o objetivo de reconhecer a significância ambiental desse componente "k" em um sistema em análise, revelando qual deles exerce a maior influência negativa no meio ambiente. A soma é calculada da seguinte forma:

$$\dot{B}_{TOT,k} = \dot{B}_{D,k} + \dot{Y}_k \quad (17)$$

A diferença relativa de impacto ambiental, $R_{b,k}$, trata de um fator utilizado para avaliar e otimizar um equipamento do sistema em relação a redução do impacto ambiental associado a um componente. Quanto mais alto o valor de $R_{b,k}$ de um equipamento em relação aos outros, maior é a facilidade de reduzir o impacto ambiental causado por esse equipamento em comparação com um equipamento com o menor valor da variável. A expressão matemática de tal variável é dada por:

$$R_{b,k} = \frac{b_{p,k} - b_{f,k}}{b_{f,k}} \quad (18)$$

O fator exergoambiental tem a função de comparar as fontes de formação do impacto ambiental em um componente expressando a contribuição relativa do impacto ambiental relacionado ao componente \dot{Y}_k à soma dos impactos ambientais associados ao componente k, logo tal parâmetro é expresso por:

$$f_{b,k} = \frac{\dot{Y}_k}{\dot{Y}_k + \dot{B}_{D,k}} = \frac{\dot{Y}_k}{\dot{B}_{TOT,k}} \quad (19)$$

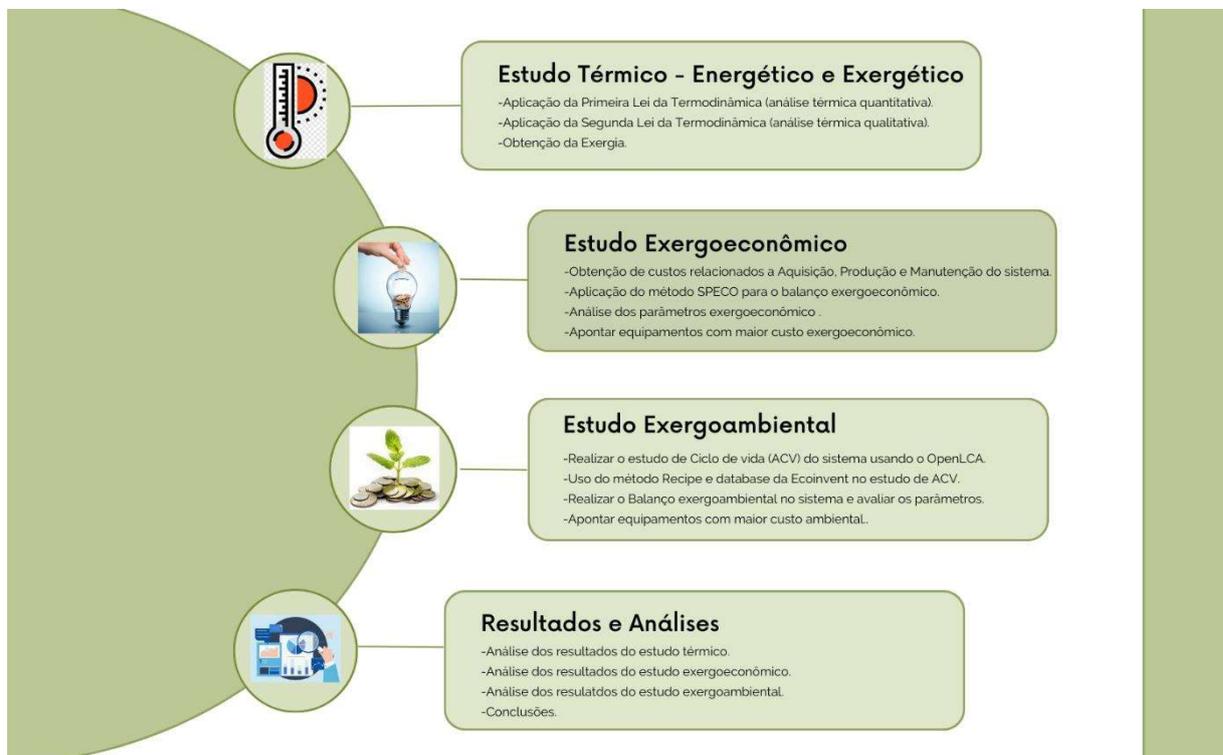
É evidente que o aspecto exergoambiental está diretamente ligado à exergia destruída e ao impacto ambiental. A magnitude desse fator varia em uma escala de 0 a 1, de modo que quanto mais próximo de 1, melhor, indicando que a destruição de exergia tem um impacto mínimo ou negligenciável no meio ambiente.

CAPÍTULO IV

4. METODOLOGIA

O presente capítulo tem início com a apresentação do foco de estudo deste trabalho, que consiste na descrição do objeto de pesquisa, incluindo suas finalidades e metas relacionadas ao atendimento das demandas estabelecidas. A modelagem matemática de cada componente é apresentada seguindo o fluxograma exposto na figura 17. Adicionalmente, foi criado um código de computador na plataforma EES (Engineering Equation Solver) para conduzir as análises termodinâmicas, exergoeconômicas e exergoambientais em cada volume de controle.

Figura 17 - Fluxograma da metodologia implementada.

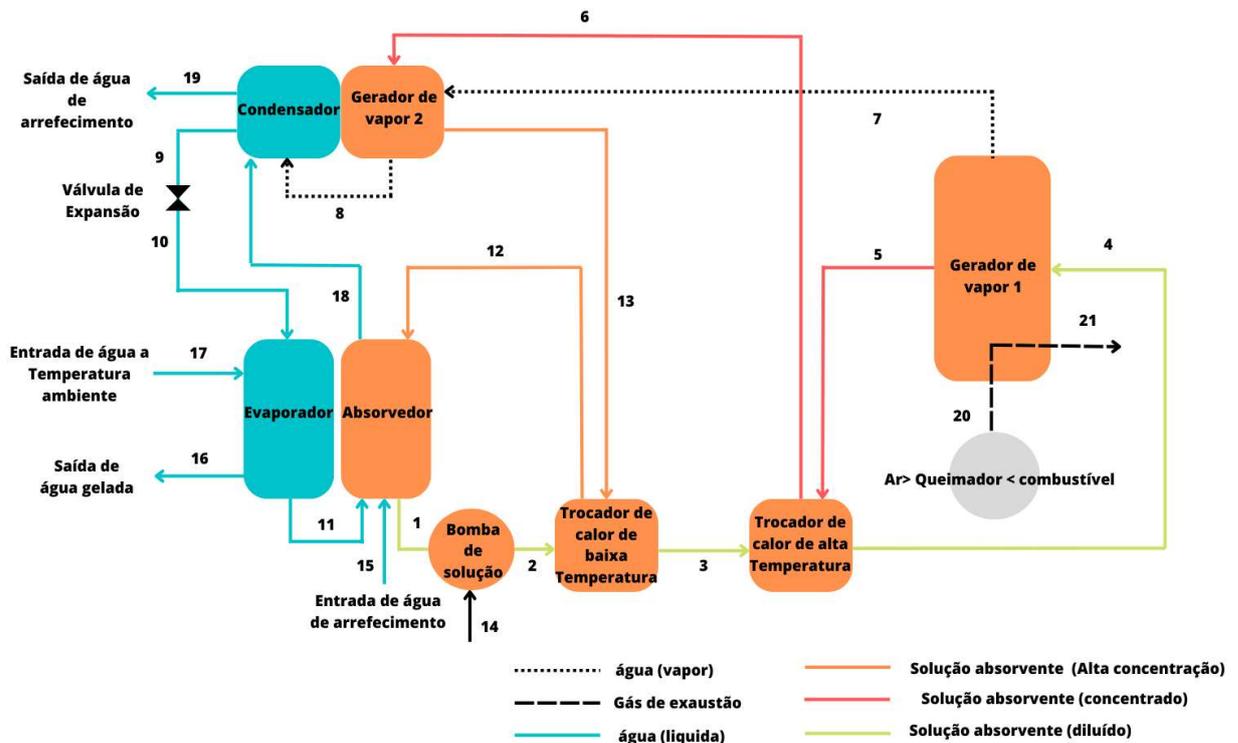


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Em um primeiro instante, é importante definir o escopo do presente estudo. O sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito de escala comercial tem capacidade de 100 TR (352 kW) é composto por: Dois geradores de vapor (Gerador 1 e 2), dois trocadores de calor, um absorvedor, um evaporador, um condensador, uma válvula de expansão e uma bomba de solução. A figura 18 ilustra o sistema supracitado.

Figura 18 - Sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito de uso comercial com capacidade de 352 kW.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito opera da seguinte forma: No ponto 1 da Figura 18, uma solução composta por água e brometo de lítio, com alta concentração da segunda substância, é retirada do absorvedor. Após a passagem por uma bomba, a pressão da solução é elevada e ela ingressa no trocador de calor de baixa temperatura, onde sofre um pré-aquecimento. Ao sair do trocador de calor de baixa temperatura, marcado como ponto 3 na figura 18, a solução passa pelo trocador de calor de alta temperatura e entra

no gerador de vapor 1, onde recebe energia térmica proveniente da queima direta de um combustível. Nesse momento, uma parte da solução de água e brometo de lítio é separada. Como resultado, do gerador de vapor 1, emerge vapor de água a alta temperatura e uma solução concentrada de água e brometo de lítio. A solução concentrada realiza uma troca de calor com o trocador de calor de alta temperatura antes de ser direcionada para o gerador de vapor 2. Em seguida, no gerador de vapor 2, o vapor de água a alta temperatura se mistura com a solução concentrada de água e brometo de lítio. A partir do gerador de vapor 2, o vapor de água flui para o condensador, enquanto a solução diluída segue em direção ao trocador de calor de baixa temperatura. A solução diluída, após passar pelo trocador de calor, atinge a pressão e temperatura adequadas para retornar ao absorvedor.

O vapor de água a baixa temperatura entra no condensador no ponto 8 da figura 18, onde troca calor com água de resfriamento e se condensa. Na saída do condensador, é observada água líquida, que atravessa uma válvula de expansão, onde ocorre a redução da pressão e temperatura, antes de entrar no evaporador. No evaporador, o fluido refrigerante troca calor com a água a temperatura ambiente, resultando na diminuição da temperatura do fluido externo para uma média de 5 graus Celsius. Ao sair do evaporador, o fluido refrigerante retorna ao absorvedor, dando início a um novo ciclo.

4.2. UTILIZAÇÃO DO SISTEMA

O edifício escolhido para aplicar o sistema de refrigeração comercial faz parte das instalações do Instituto de Energia Sustentável (IES) localizado na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Nordeste do Brasil. As instalações da IES são compostas por três blocos: IES-1, IES-2 e IES-3 (Fig. 19). Essa informação é essencial para a etapa de transporte na análise do ciclo de vida e no estudo exergoambiental.

Os blocos IES-1, IES-2 e IES-3 do Instituto de Energia Sustentável (IES) são divididos em salas de aula e laboratórios, com o objetivo de atender às demandas acadêmicas e de pesquisa. O IES-1 abriga uma sala de aula, a administração e dois banheiros. Já os blocos IES-2 e IES-3 são predominantemente dedicados aos laboratórios, onde são desenvolvidos projetos de pesquisa e experimentos voltados para a área de energia sustentável e eficiência energética

Figura 19 - Toda a estrutura do campus I da UFPB (esquerda) e as instalações da IES (direita).



Fonte: Souza et al. 2020

O intuito do estudo é quantificar os impactos ambientais do chiller de absorção de vapor comercial de 100 TR (352 kW), foge do escopo do presente trabalho o estudo do consumo de energia elétrica dos blocos citados, como também a área útil construída dos mesmos.

4.3. AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA

De acordo com Silva (2018), a avaliação termodinâmica precisa obter as propriedades de cada ponto selecionado no objeto de estudo. Com isso, realiza-se os balanços de massa para cada volume de controle. A partir daí, desenvolve-se os balanços de energia pelo uso da Primeira Lei da Termodinâmica, que representa uma análise quantitativa. Em seguida faz-se o balanço de exergia pela aplicação da Segunda Lei da Termodinâmica que representa o ponto de vista qualitativo da análise. Ambas as análises em conjunto proporcionam uma avaliação coerente do sistema térmico de forma global.

Algumas considerações são necessárias para simplificar a análise e tornar possível a realização do estudo, logo:

- Os processos de compressão e expansão são adiabáticos;
- Todos os processos são internamente reversíveis;

- Processo isoentálpico nos dispositivos de expansão;
- Os componentes do sistema operam em regime permanente;
- Os efeitos de energia cinética e potencial são desprezados;
- Desprezam-se os efeitos de movimento e gravidade;
- Na saída do evaporador e do condensador, o fluido refrigerante foi assumido em condições de saturação;
- A solução de brometo de lítio tem condições de equilíbrio nas saídas do absorvedor e do gerador de vapor;
- Não existe transferência de calor entre os trocadores de calor e sua vizinhança;

A unidade de refrigeração utilizada no modelo é um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito, que utiliza o par água/brometo de lítio como fluido de trabalho. O equipamento é fabricado pela LG, modelo WCDH010, conforme catálogo do fabricante.

A tabela 4 mostra cada um dos pontos do ciclo e as características do fluido de trabalho, bem como o nível de concentração da solução de acordo com Herold (2016).

I – Nível de concentração I, onde existe 52,9% de brometo de lítio na solução.

II – Nível de concentração II, onde existe 57,3% de brometo de lítio na solução.

III – Nível de concentração III, onde existe 62,656% de brometo de lítio na solução.

Tabela 5 - Descrição dos pontos do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo de 352 kW fabricado pela LG.

| Pontos | Descrição |
|-----------------|--|
| Ponto 1 | Solução vinda do absorvedor para entrada da bomba (I) |
| Ponto 2 | Solução proveniente da bomba para o trocador de calor baixa temperatura (I) |
| Ponto 3 | Solução proveniente do trocador de calor BP para o trocador de calor de AT (I) |
| Ponto 4 | Saída do trocador de calor AT e entrada do Gerador de vapor 1 (I) |
| Ponto 5 | A solução sai do Gerador de vapor 1 e entra no trocador de Calor AT (II) |
| Ponto 6 | A solução do Trocador de calor AT e entra no Gerador de vapor 2 (II) |
| Ponto 7 | Vapor de água sai do gerador 1 e entra no gerador 2 |
| Ponto 8 | Vapor de água sai do gerador de vapor 2 e entra no condensador |
| Ponto 9 | Do condensador sai água líquida em direção a válvula de expansão |
| Ponto 10 | Mistura de líquido-vapor de água da válvula de expansão para o evaporador |
| Ponto 11 | Vapor de água gelada proveniente do evaporador para o absorvedor |
| Ponto 12 | Solução concentrada saindo do trocador de calor BT para o absorvedor (III) |
| Ponto 13 | Solução concentrada saindo gerador de vapor 2 para o trocador de calor BT (III) |
| Ponto 14 | Potência elétrica de entrada da bomba |
| Ponto 15 | Entrada de água de arrefecimento no absorvedor |
| Ponto 16 | Saída de água gelada do evaporador |
| Ponto 17 | Entrada de água a temperatura ambiente |
| Ponto 18 | Saída de água de arrefecimento do absorvedor |
| Ponto 19 | Saída de água de arrefecimento do condensador |
| Ponto 20 | Entrada dos produtos da combustão |
| Ponto 21 | Saída dos produtos da combustão |

Fonte: Autor

Os dados de entrada usados na análise foram baseados no catálogo da empresa LG e por HEROLD, 2016.

Tabela 6 - Dados de entrada da análise termodinâmica do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo de 352 kW fabricado pela LG.

| Grandeza | Valor | Unid. | Denominação | Fonte |
|-------------------|------------|-------|--|-------------------------------|
| Q _{evap} | 352 | kW | Capacidade de refrigeração da unidade | Catálogo do fabricante |
| m [17] | 16,81 | kg/s | vazão mássica de água gelada (Fluxo 17) | Catálogo do fabricante |
| T [11] | 5 | °C | Temperatura de evaporação (Fluxo 11) | Herold (2016) |
| T [15] | 32 | °C | Temperatura entrada água de arrefecimento no absorvedor (Fluxo 15) | Catálogo do fabricante |
| T [18] | 33,65 | | Temperatura saída água de arrefecimento no absorvedor (Fluxo 18) | Calculado |
| T [18] | 33,65 | | Temperatura entrada água de arrefecimento no Condensador (Fluxo 18) | Calculado |
| T [19] | 37 | °C | Temperatura saída água de arrefecimento no Condensador (Fluxo 19) | Catálogo do fabricante |
| T [16] | 12 | °C | Temperatura de entrada água gelada no evaporador (Fluxo 16) | Catálogo do fabricante |
| T [17] | 7 | °C | Temperatura de saída água gelada no evaporador (Fluxo 17) | Catálogo do fabricante |
| T [9] | 30 | °C | Temperatura do condensador (Fluxo 9) | Herold (2016) |
| C [B] | 52,90 % | % | Concentração da solução nível baixo | Herold (2016) |
| C [M] | 57,3 | % | Concentração da solução nível médio | Herold (2016) |
| C [A] | 62,66 | % | Concentração da solução nível alto | Herold (2016) |
| P [I] | 77,52 | kPa | Pressão no gerador de vapor I | Catálogo do fabricante |
| COP | 1,51 | X | Coefficiente performance | Catálogo do fabricante |
| Q _{ger1} | 233,1 1 | kW | Energia térmica fornecida ao gerador de vapor 1 | Calculado |

Fonte: Autor

A Tabela 7 apresenta os dados de entrada para a análise termodinâmica do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito em desenvolvimento na RECOGAS. Esses dados incluem informações fundamentais como a temperatura de trabalho dos fluidos de arrefecimento do condensador, do evaporador e do absorvedor, bem como a concentração da solução de água e brometo de lítio, entre outras informações

Tabela 7 - Dados de entrada da análise Termodinâmica do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo em desenvolvimento na RECOGAS.

| | |
|--|------------------|
| Energia em forma de calor disponível no gerador de vapor 1 | 21,101 kW |
| Temperatura de entrada dos produtos de combustão (Fluxo 20) | 300 °C |
| Temperatura de saída dos produtos de combustão (Fluxo 21) | 200 °C |
| Temperatura entrada água de arrefecimento no absorvedor (Fluxo 15) | 25 °C |
| Temperatura saída água de arrefecimento no absorvedor (Fluxo 18) | 33,65 °C |
| Temperatura entrada água de arrefecimento no Condensador (Fluxo 18) | 33,65 °C |
| Temperatura saída água de arrefecimento no Condensador (Fluxo 19) | 28,16 °C |
| Temperatura de entrada água gelada no evaporador (Fluxo 17) | 12 °C |
| Temperatura de saída água gelada no evaporador (Fluxo 16) | 7 °C |
| Temperatura do condensador (Fluxo 9) | 30 °C |
| Temperatura do evaporador (Fluxo 11) | 5 °C |
| Diferencial de temperatura no trocador de calor | 19,7 °C |
| Concentração da solução nível baixo (Fluxo 19) | 52,9 % |
| Concentração da solução nível médio (Fluxo 5) | 57,325 % |
| Concentração da solução nível alto (Fluxo 12) | 62,656 % |
| Pressão no gerador de vapor I | 77,52 kPa |

Fonte: Herold, 2016

A primeira etapa da análise termodinâmica foi determinar os níveis de pressão alta e pressão baixa desse ciclo de refrigeração por absorção de vapor. Para isso, foram utilizadas as equações de estado para propriedades termofísicas do par água/brometo de lítio, mencionadas no trabalho de Bourseau e Bugarel (1986). Para determinar a pressão alta utiliza-se a temperatura de condensação e para pressão baixa a temperatura de evaporação (ambas em Kelvin). Os valores de pressão obtidos são em kPa.

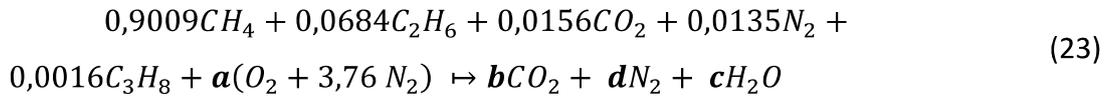
$$\log P = A - \frac{B}{T} \quad (20)$$

$$A = 7,44 - 1,767X_r + 0,9823X_r^2 + 0,3627X_r^3 \quad (21)$$

$$B = 2013,8 - 21,557X_r + 1540,9X_r^2 + 194,7X_r^3 \quad (22)$$

A etapa seguinte foi determinar os estados termodinâmicos de cada ponto do ciclo de refrigeração previamente estabelecidos. Para isso foi utilizada a sub-rotina do par água/brometo de lítio no software EES. A partir daí utiliza-se os princípios da conservação da massa, conservação da energia, balanço de exergia e cálculo de irreversibilidades, levando em consideração todas as hipóteses simplificadoras anteriormente destacadas, conforme equações abaixo.

A equação que representa a modelagem da combustão do gás natural na queima estequiométrica é:



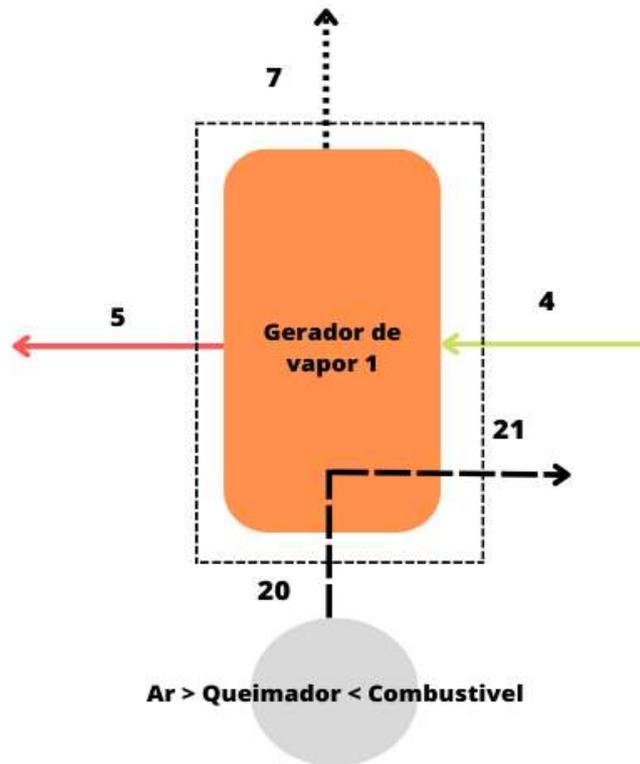
A partir da análise da equação acima, observamos que os coeficientes a, b, c e d (coeficientes da equação da combustão determinando no código computacional) são usados para obter a exergia química dos gases de combustão que entra no gerador de vapor de alta pressão, do sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito

A modelagem termodinâmica dos componentes do protótipo em desenvolvimento na Recogas (21,101 kW) foi realizado por Cordeiro (2018), sendo assim, os volumes de controle e as equações apresentadas a seguir são do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito (352 kW) fabricado pela LG baseado nos dados de entrada da tabela 6 e no objeto de estudo da figura 18.

4.3.1. Gerador de Vapor 1

A figura 20 mostra o volume de controle determinado para o gerador de vapor 1. Logo após, será apresentado as equações que regem o modelo termodinâmico. Tal procedimento será utilizado para todos os componentes do sistema de refrigeração de duplo efeito.

Figura 20 - Volume de controle do gerador de vapor I.



Fonte: Autor

Conservação da massa

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_7 + \dot{m}_5 \quad (24)$$

$$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{21} \quad (25)$$

Conservação da espécie

$$\dot{m}_4 x_4 = \dot{m}_7 x_7 + \dot{m}_5 x_5 \quad (26)$$

Conservação da energia

$$\dot{Q}_{g1} = -(\dot{m}_4 h_4) + \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_{20}(h_{20} - h_{21}) \quad (27)$$

Eficiência energética

$$\eta_{g1} = \frac{|\dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_7 h_7|}{|\dot{m}_{20}(h_{20} - h_{21})|} \quad (28)$$

Entropia Gerada

$$\dot{S}_{gerg1} = \dot{m}_5 s_5 + \dot{m}_7 s_7 - \dot{m}_4 s_4 - \frac{\dot{Q}_{g1}}{T_{g1}} \quad (29)$$

Exergia

$$e_{x_i}^F = (h_i - h_0) - T_0(S_i - S_0) \quad (30)$$

Onde $i = 4, 5, 7, 20$ e 21

$$e_{x_i}^q = \sum_i x_i e_{x_{0i}}^q + RT_0 \sum_i x_i \ln y_i x_i \quad (31)$$

Onde $i = 20$ e 21 . Logo, por existir combustão, a exergia dos pontos 20 e 21 é a soma da exergia física ($e_{x_i}^F$) e a exergia química ($e_{x_i}^q$).

Irreversibilidade total

$$\dot{I}_{total} = \dot{m}_4 e_{x4} + \dot{m}_{20} e_{x20} - \dot{m}_5 e_{x5} - \dot{m}_7 e_{x7} - \dot{m}_{21} e_{x21} \quad (32)$$

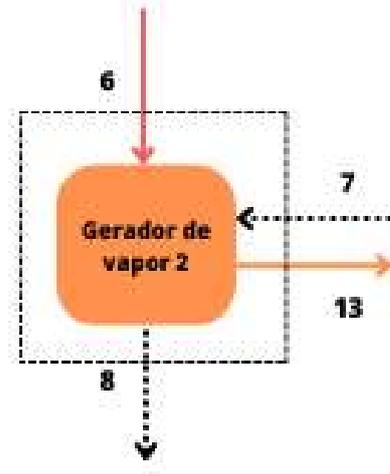
Eficiência racional

$$\beta_{g1} = \frac{\dot{m}_5 (e_{x5} - e_{x4}) + \dot{m}_7 (e_{x7} - e_{x4})}{\dot{m}_{20} (e_{x20} - e_{x21})} \quad (33)$$

4.3.2. Gerador de vapor 2

A figura 21 mostra o volume de controle determinado para o gerador de vapor II. Logo após, será apresentado as equações que regem o modelo termodinâmico.

Figura 21 - Volume de controle do gerador de vapor II.



Fonte: Autor

Conservação da massa

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_{13} \quad (34)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (35)$$

Conservação da espécie

$$\dot{m}_6 x_6 = \dot{m}_{13} x_{13} \quad (36)$$

Conservação da energia

$$\dot{Q}_{gII} = \dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_7 (h_7 - h_8) \quad (37)$$

Eficiência energética

$$\eta_{gII} = \frac{|\dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_{13} h_{13}|}{|\dot{m}_7 (h_7 - h_8)|} \quad (38)$$

Entropia Gerada

$$\dot{S}_{gergII} = \dot{m}_8 s_8 + \dot{m}_{13} s_{13} - \dot{m}_6 s_6 - \dot{m}_7 s_7 - \frac{\dot{Q}_{gII}}{T_{gII}} \quad (39)$$

Exergia

$$e_{x_i}^F = (h_i - h_0) - T_0 (S_i - S_0) \quad (40)$$

Onde $i = 6, 7, 8, 13$

Irreversibilidade total

$$\dot{I}_{total} = \dot{m}_6 e_{x6} + \dot{m}_7 e_{x7} - \dot{m}_8 e_{x8} - \dot{m}_{13} e_{x13} \quad (41)$$

Eficiência racional

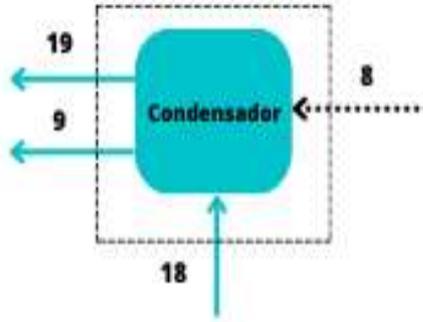
$$\beta_{g1} = \frac{\dot{m}_6 (e_{x6} - e_{x13})}{\dot{m}_7 (e_{x7} - e_{x8})} \quad (42)$$

4.3.3. Condensador

A figura 22 mostra o volume de controle determinado para o condensador. Logo após, será apresentado as equações que regem o modelo termodinâmico.

Os balanços de massa, conservação da energia, Eficiência energética, entropia gerada, exergia, irreversibilidade total e eficiência racional são apresentados a seguir.

Figura 22 - Volume de controle do Condensador.



Fonte: Autor

Conservação da massa

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (43)$$

$$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19} \quad (44)$$

Conservação da energia

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_9 h_9 - \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_{18} (h_{18} - h_{19}) \quad (45)$$

Eficiência energética

$$\eta_c = \frac{|\dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_9 h_9|}{|\dot{m}_{18} (h_{19} - h_{18})|} \quad (46)$$

Entropia Gerada

$$\dot{S}_c = \dot{m}_9 s_9 - \dot{m}_8 s_8 - \frac{\dot{Q}_c}{T_c} \quad (47)$$

Exergia

$$e_{x_i}^F = (h_i - h_0) - T_0 (S_i - S_0) \quad (48)$$

Onde $i = 8, 9, 18$ e 19

Irreversibilidade total

$$\dot{I}_{total} = \dot{m}_8 e_{x8} + \dot{m}_{18} e_{x18} - \dot{m}_9 e_{x9} - \dot{m}_{19} e_{x19} \quad (49)$$

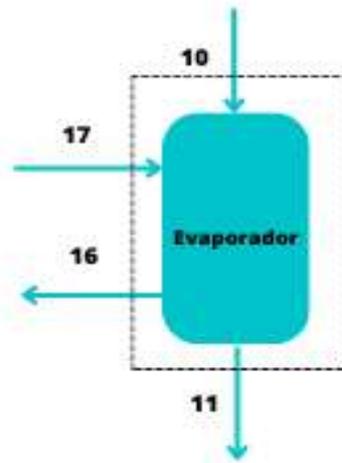
Eficiência racional

$$\beta_c = \frac{\dot{m}_{19} (e_{x19} - e_{x18})}{\dot{m}_9 (e_{x9} - e_{x8})} \quad (50)$$

4.3.4. Evaporador

A figura 23 mostra o volume de controle determinado para o evaporador. Logo após, será apresentado as equações que regem o modelo termodinâmico.

Figura 23- Volume de controle do Evaporador.



Fonte: Autor

Conservação da massa

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \quad (51)$$

$$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17} \quad (52)$$

Conservação da energia

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{10}(h_{10} - h_{11}) = \dot{m}_{17}C_{PH2O}(T_{17} - T_{16}) \quad (53)$$

Eficiência energética

$$\eta_{g1} = \frac{|\dot{m}_{17}(h_{17} - h_{16})|}{|\dot{m}_{11}(h_{11} - h_{10})|} \quad (54)$$

Entropia Gerada

$$\dot{S}_{gere} = \dot{m}_{11}h_{11} - \dot{m}_{10}h_{10} - \frac{\dot{Q}_e}{T_e} \quad (55)$$

Exergia

$$e_{xi}^F = (h_i - h_0) - T_0(S_i - S_0) \quad (56)$$

Onde i = 10, 11, 16, 17

Irreversibilidade total

$$\dot{I}_{total} = \dot{m}_{10}e_{x10} + \dot{m}_{17}e_{x17} - \dot{m}_{11}e_{x11} - \dot{m}_{16}e_{x16} \quad (57)$$

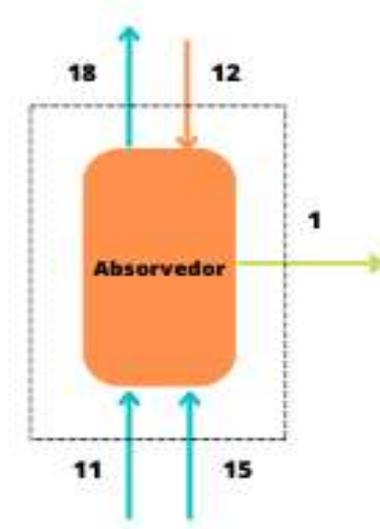
Eficiência racional

$$\beta_e = \frac{\dot{m}_{17}(e_{x17} - e_{x16})}{\dot{m}_{11}(e_{x10} - e_{x9})} \quad (58)$$

4.3.5. Absorvedor

A figura 24 mostra o volume de controle determinado para o absorvedor. Logo após, será apresentado as equações que regem o modelo termodinâmico.

Figura 24- Volume de controle do absorvedor.



Fonte: Autor

Conservação da massa

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{11} + \dot{m}_{12} \quad (59)$$

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{18} \quad (60)$$

Conservação da espécie

$$\dot{m}_1 x_1 = \dot{m}_{11} x_{11} + \dot{m}_{12} x_{12} \quad (61)$$

Conservação da energia

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_{12} h_{12} = \dot{m}_{15} C_{PH2O} (T_{15} - T_{18}) \quad (62)$$

Eficiência energética

$$\eta_{abs} = \frac{|\dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{12} h_{12} - \dot{m}_1 h_1|}{|\dot{m}_{15} (h_{15} - h_{18})|} \quad (63)$$

Entropia Gerada

$$\dot{S}_{gerabs} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_{12} h_{12} - \frac{\dot{Q}_{g1}}{T_{g1}} \quad (64)$$

Exergia

$$e_{x_i}^F = (h_i - h_0) - T_0(S_i - S_0) \quad (65)$$

Irreversibilidade total

$$\dot{I}_{total} = \dot{m}_{11} e_{x11} + \dot{m}_{12} e_{x12} + \dot{m}_{15} e_{x15} - \dot{m}_1 e_{x1} - \dot{m}_{18} e_{x18} \quad (66)$$

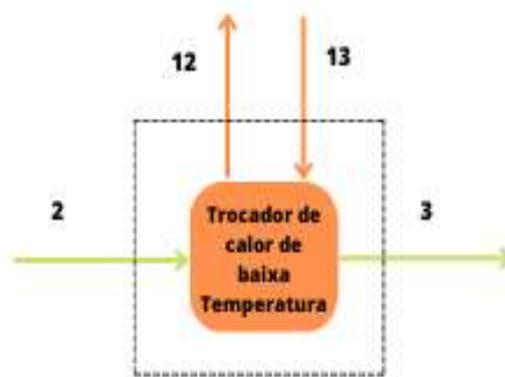
Eficiência racional

$$\beta_{abs} = \frac{\dot{m}_{11} (e_{x11} - e_{x1}) + \dot{m}_{12} (e_{x12} - e_{x1})}{\dot{m}_{15} (e_{x18} - e_{x15})} \quad (67)$$

4.3.6. Trocador de calor Baixa Temperatura

A figura 25 mostra o volume de controle determinado para o Trocador de calor de baixa Temperatura. Logo após, será apresentado as equações que regem o modelo termodinâmico.

Figura 25 - Volume de controle do Trocador de calor de Baixa Temperatura.



Fonte: Autor

Conservação da massa

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (68)$$

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{12} \quad (69)$$

Conservação da espécie

$$\dot{m}_2 x_2 = \dot{m}_3 x_3 \quad (70)$$

$$\dot{m}_{13} x_{13} = \dot{m}_{12} x_{12} \quad (71)$$

Conservação da energia

$$\dot{Q}_{tcbt} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_{12} h_{12} \quad (72)$$

Eficiência energética

$$\eta_{tcbt} = \frac{|\dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2|}{|\dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_{12} h_{12}|} \quad (73)$$

Entropia Gerada

$$\dot{S}_{gertcbt} = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{12} h_{12} - \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_{13} h_{13} \quad (74)$$

Exergia

$$e_{x_i}^F = (h_i - h_0) - T_0(S_i - S_0) \quad (75)$$

Onde $i = 2, 3, 12, 13$

Irreversibilidade total

$$\dot{I}_{total} = \dot{m}_2 e_{x_2} + \dot{m}_{13} e_{x_{13}} - \dot{m}_3 e_{x_3} - \dot{m}_{12} e_{x_{12}} \quad (76)$$

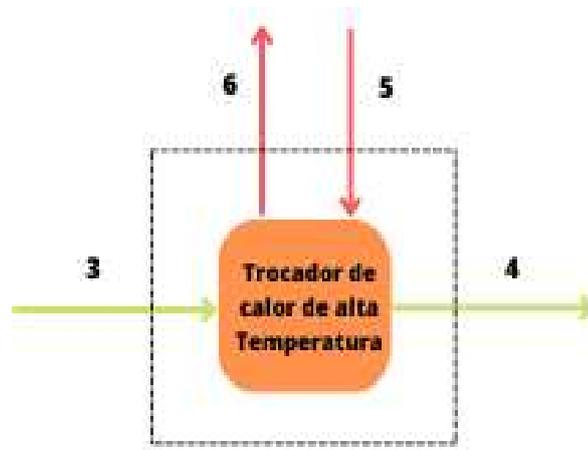
Eficiência racional

$$\beta_{tcbt} = \frac{\dot{m}_2 (e_{x2} - e_{x3})}{\dot{m}_{12} (e_{x12} - e_{x13})} \quad (77)$$

4.3.7. Trocador de calor Alta Temperatura

A figura 26 mostra o volume de controle determinado para o Trocador de calor de alta Temperatura. Logo após, será apresentado as equações que regem o modelo termodinâmico.

Figura 26 - Volume de controle do Trocador de calor de alta Temperatura.



Fonte: Autor

Conservação da massa

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 \quad (78)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad (79)$$

Conservação da espécie

$$\dot{m}_4 x_4 = \dot{m}_3 x_3 \quad (80)$$

$$\dot{m}_5 x_5 = \dot{m}_6 x_6 \quad (81)$$

Conservação da energia

$$\dot{Q}_{tcat} = \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_5 h_5 \quad (82)$$

Eficiência energética

$$\eta_{tcat} = \frac{|\dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_3 h_3|}{|\dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_5 h_5|} \quad (83)$$

Entropia Gerada

$$\dot{S}_{gertcgt} = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_5 h_5 \quad (84)$$

Exergia

$$e_{x_i}^F = (h_i - h_0) - T_0(S_i - S_0) \quad (85)$$

Onde $i = 3, 4, 5$ e 6

Irreversibilidade total

$$\dot{I}_{total} = \dot{m}_3 e_{x3} + \dot{m}_5 e_{x5} - \dot{m}_4 e_{x4} - \dot{m}_6 e_{x6} \quad (86)$$

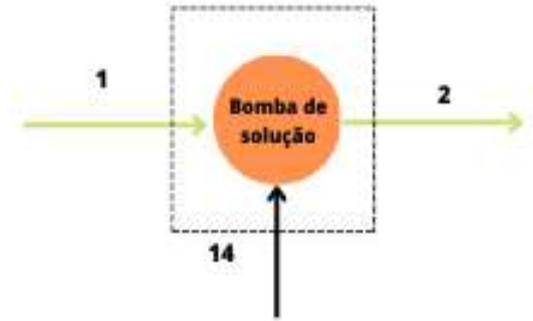
Eficiência racional

$$\beta_{tcat} = \frac{\dot{m}_3 (e_{x3} - e_{x4})}{\dot{m}_5 (e_{x5} - e_{x6})} \quad (87)$$

4.3.8. Bomba de solução

A figura 27 mostra o volume de controle determinado para a bomba de solução. Logo após, será apresentado as equações que regem o modelo termodinâmico.

Figura 27 - Volume de controle do Trocador de calor de alta Temperatura.



Fonte: Autor

Conservação da massa

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (88)$$

Conservação da espécie

$$\dot{m}_1 x_1 = \dot{m}_2 x_2 \quad (89)$$

Conservação da energia

Admitindo que a bomba seja adiabática e reversível (isentrópica):

$$\dot{Q}_b = h_1 - h_2 \quad (90)$$

$$\dot{Q}_b = h_1 - h_{2iso} \quad (91)$$

Eficiência energética

$$\eta_b = \frac{|h_1 - h_{2iso}|}{|h_1 - h_2|} \quad (92)$$

4.4.AVALIAÇÃO EXERGOECONOMICA

Diferentes abordagens foram apresentadas na literatura para a análise exergoeconômica de sistemas que trabalham com conversão de energia. Nesta etapa do estudo, foi utilizado o método SPECO, para avaliar, do ponto de vista exergoeconômico, o sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito de 352 kW comercializado pela LG. A supracitada técnica utiliza como parâmetros: a exergia de cada fluxo de entrada e saída para os volumes de controle, o custo específico de exergia, eficiência exergetica e as equações auxiliares para igualar o número de variáveis com o de equações no sistema linear TSATSARONIS (2002).

Para cada componente do sistema foi aplicado um volume de controle e em seguida foi identificado as equações que representam os produtos, os combustíveis e as equações auxiliares baseado nos conceitos do método SPECO.

A válvula de expansão presente no ciclo, foram incorporadas aos equipamentos sucessores, pois o significado econômico dos fluxos exergeticos na entrada e na saída são considerados desprezíveis com relação aos fluxos restantes da unidade em estudo de acordo com MARQUES (2005).

Para a análise exergoeconômica, são empregados os valores de exergia provenientes da avaliação termodinâmica e os dados de entrada da tabela a seguir. O custo de aquisição do chiller de refrigeração por absorção de vapor foi determinado pela equação contida no trabalho de Bellos (2017) expressa na equação 98, a taxa anual de juros foi determinada com base em observações sobre o mercado financeiro, a expectativa de vida útil do sistema é informada no manual do fabricante e a importância relativa de cada dispositivo foi estabelecida com base na experiência de outros estudos relacionados à aplicação de sistemas de absorção.

Tabela 8 - Dados de entrada para o estudo exergoeconômico.

| Grandeza | Valor | Unid. | Denominação | Fonte |
|------------|---------|--------------------|--|------------------------|
| Tarifacomb | 3,765 | R\$/m ³ | Tarifa do gás natural em 03 08 2023 (categoria industrial, faixa 3) | Site Pbgás |
| Tarifae | 0,32401 | R\$/kW h | Tarifa de energia elétrica categoria industrial B3 | Energisa |
| Zichiller | 336.435 | R\$ | Custo de aquisição do chiller de refrigeração por absorção de vapor | Bellos (2017) |
| i | 10 | % | Taxa anual de juros | Herrera e Sodré (2014) |
| vu | 20 | anos | vida útil dos equipamentos | Catálogo do Fabricante |
| nh | 8640 | h/ano | número de horas de opera o por ano | pelo autor |
|   | 6 | % | Fator de manuten o dos equipamentos | Lazzaretto (2006) |
| figv1 | 19,4 | % | Fator de importância gerador de vapor 1 do Chiller de absor o | Bejan, 1996 |
| figv2 | 19,4 | % | Fator de importância gerador de vapor 2 do Chiller de absor o | Bejan, 1996 |
| ficond | 9 | % | Fator de importância do condensador do chiller de absor o | Bejan, 1996 |
| fievap | 17,5 | % | Fator de importância do evaporador do chiller de absor o | Bejan, 1996 |
| fiabsor | 18 | % | Fator de importância do absorvedor do chiller de absor o | Bejan, 1996 |
| fibombs | 2,5 | % | Fator de importância da bomba de soluço do chiller de absor o | Bejan, 1996 |
| fitca | 6,95 | % | Fator de importância do trocador de calor de alta do chiller de absor o | Bejan, 1996 |
| fitcb | 6,95 | % | Fator de importância do trocador de calor de baixa do chiller de absor o | Bejan, 1996 |
| fiv | 0,3 | % | Fator de importância da válvula do chiller de absor o | Bejan, 1996 |

Fonte: Elaborado pelo autor

O consumo e a taxa de custo do gás natural, como também a taxa de custo da energia elétrica   determinada pelas expressões matemáticas abaixo:

$$\text{Consumo de gás natural (m}^3\text{)} = \frac{\text{Potência (kW)}}{\text{COP} \times \text{Poder colorifco superior GN } \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}\right)} \quad (93)$$

$$C_{comb} = \frac{\dot{m}_{comb}}{\rho_{comb}} \times \text{Tarifa}_{comb} \quad (94)$$

$$\dot{C}_{ee} = \frac{\text{Tarifa}_{ee}}{3600} \quad (95)$$

A taxa de custo total de aquisição é determinada pela equação abaixo:

$$Z_i = Z_i \cdot f_i \cdot CRF \cdot \phi \text{ [$/s]} \quad (96)$$

O CRF é o fator de recuperação de capital e a expressão matemática adaptada para determinar tal fator é:

$$CRF = i \cdot \left[\frac{(1+i)^{vu}}{(1+i)^{vu} - 1} \right] \cdot \frac{1}{n_h \cdot vu \cdot 3600} \text{ [$/s]} \quad (97)$$

O valor de aquisição do chiller comercial de 352 kW foi determinado de acordo com a equação abaixo referenciado por Bellos (2017).

$$C_{abs} = C_{esp\ abs} \cdot Q_{ev\ nom} \cdot N_{abs} \cdot C_{fator\ de\ convers\~ao} \quad (98)$$

Sendo o $C_{esp\ abs}$ o custo esperado do chiller dado por R\$/kW, o $Q_{ev\ nom}$ a quantidade de calor que vai para o evaporador em kW, o N_{abs} a quantidade de chiller e o $C_{fator\ de\ convers\~ao}$ o fator de conversão da moeda, tendo em vista que o valor de $C_{esp\ abs}$ é fornecido em euro na literatura e convertido para a moeda oficial no Brasil.

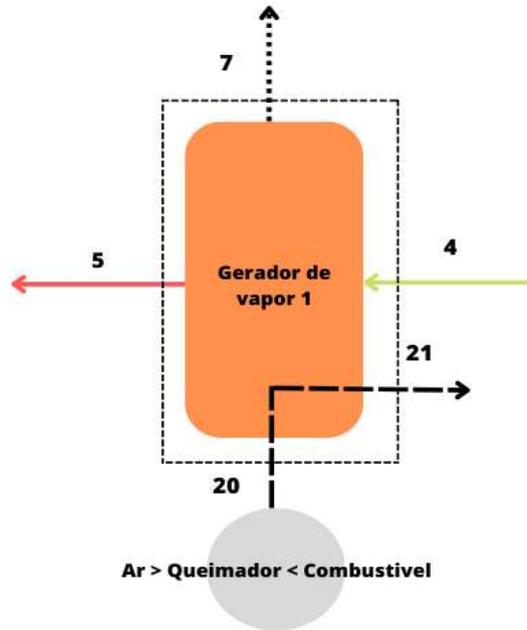
A bomba de solução utilizada no chiller de 352 kW tem potência de 1,5 kW de acordo com o manual do fabricante, logo $W_b = Ex14 = 1,5$ kW.

Para cada componente do sistema foi aplicado um volume de controle e em seguida foi identificado as equações que representam os produtos, os combustíveis e as equações auxiliares baseado nos conceitos do método SPECO.

4.4.1. Gerador de vapor I

A figura 28 apresenta o volume de controle determinado para o gerador de vapor I. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico.

Figura 28 - Volume de controle do gerador de vapor II.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.1.1. Balanço exergoeconômico do Gerador de vapor I

A equação do produto do gerador de vapor I é:

$$P: (c_5 \cdot E_5) + (c_7 \cdot E_7) + (c_{21} \cdot E_{21}) \quad (99)$$

A equação do combustível do gerador de vapor I é:

$$F: (c_{20} \cdot E_{20}) - (c_{21} \cdot E_{21}) \quad (100)$$

A equação auxiliar do Produto, obtido por meio do conceito do princípio P, diz que: cada corrente de exergia é fornecida para um fluxo de exergia vinculado ao produto no mesmo custo médio, portanto temos:

$$c_4 = \frac{C_5 + C_7}{E_5 + E_7} \quad (101)$$

A equação auxiliar do combustível, obtido a partir do princípio F, que diz: o custo específico vinculado a uma remoção de fluxo de exergia interno de um equipamento deve ser o mesmo custo médio específico do fluxo de entrada e saída, logo:

$$c_{20} = c_{21} \quad (102)$$

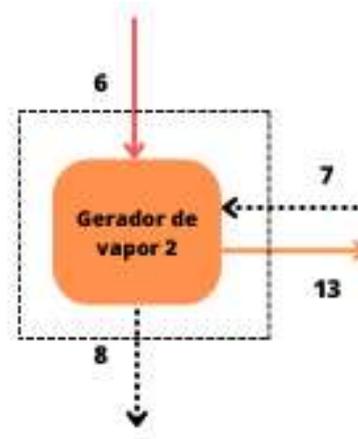
Unindo as informações obtidas nas etapas anteriores e acrescentando os custos totais do componente (custo de aquisição, operação, manutenção) referente ao gerador de vapor I, obtemos a seguinte expressão:

$$(c_5 \cdot E_5) + (c_7 \cdot E_7) + (c_{21} \cdot E_{21}) = (c_4 \cdot E_4) + (c_{20} \cdot E_{20}) + Z_{gerador1} \quad (103)$$

4.4.2. Gerador de vapor II

A figura 29 exibe o volume de controle determinado para o gerador de vapor II. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico:

Figura 29 - Volume de controle do gerador de vapor II.



Fonte: Elaborador pelo autor

4.4.2.1. Balanço exergoeconômico do Gerador de vapor II

A equação do produto do gerador de vapor II fica:

$$P: (c_7 \cdot E_7) - (c_8 \cdot E_8) \quad (104)$$

A equação do combustível do gerador de vapor II fica:

$$F: (c_{13} \cdot E_{13}) - (c_6 \cdot E_6) \quad (105)$$

A equação auxiliar do produto, baseado no princípio P é:

$$c_8 = c_7 \quad (106)$$

A equação auxiliar do combustível, baseado no princípio F é:

$$c_6 = c_{13} \quad (107)$$

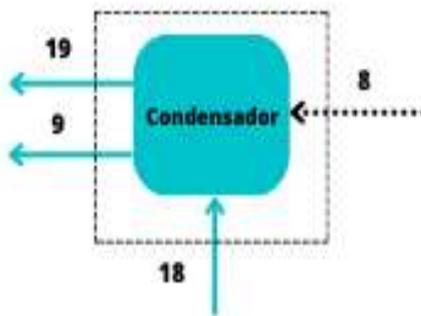
Portanto, o balanço geral para o gerador de vapor II, acrescentando os custos totais do componente (custo de aquisição, operação e manutenção), é expressado por:

$$(c_8 \cdot E_8) + (c_{13} \cdot E_{13}) = (c_6 \cdot E_6) + (c_7 \cdot E_7) + Z_{gerador2} \quad (108)$$

4.4.3. Condensador

A figura 30 mostra o volume de controle determinado para o condensador. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico:

Figura 30 - Volume de controle do Condensador.



Fonte: elaborado pelo autor

4.4.3.1. Balanço exergoeconômico do condensador

A equação do produto para o condensador é:

$$P: (c_{10} \cdot E_{10}) - (c_8 \cdot E_8) \quad (109)$$

A equação do combustível para o condensador fica:

$$F: (c_{19} \cdot E_{19}) - (c_{18} \cdot E_{18}) \quad (110)$$

A equação auxiliar do produto, utilizando o princípio P, no condensador não é aplicado.

A equação auxiliar do combustível no condensador, tendo como base o princípio F, fica:

$$c_8 = c_{10} \quad (111)$$

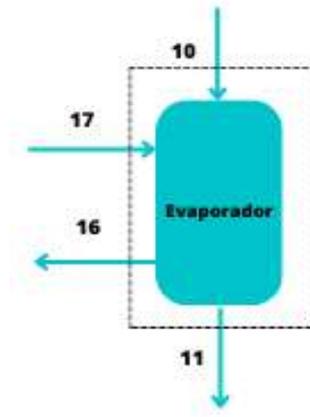
Logo, o Balanço exergoeconômico para o sistema de condensação, somando os custos totais do componente (custo de aquisição, operação e manutenção) é:

$$(c_9 \cdot E_9) + (c_{19} \cdot E_{19}) = (c_8 \cdot E_8) + (c_{18} \cdot E_{18}) + Z_{condensador} \quad (112)$$

4.4.4. Evaporador

A figura 31 mostra o volume de controle determinado para o evaporador. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico:

Figura 31 - Volume de controle do Evaporador.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.4.1. Balanço exergoeconômico do evaporador

A equação do produto baseado na finalidade do evaporador é:

$$P: (c_{16} \cdot E_{16}) - (c_{17} \cdot E_{17}) \quad (113)$$

A equação do combustível baseado na finalidade do evaporador é:

$$F: (c_{10} \cdot E_{10}) - (c_{11} \cdot E_{11}) \quad (114)$$

A equação auxiliar do produto, a partir do princípio P, não é aplicado.

A equação auxiliar do combustível, baseado no princípio F é:

$$c_{10} = c_{11} \quad (115)$$

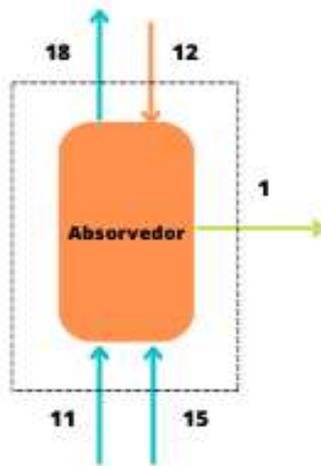
Portanto, o balanço exergoeconômico para o evaporador, acrescentando os custos totais do componente (custo de aquisição, operação e manutenção) é:

$$(c_{16} \cdot E_{16}) + (c_{11} \cdot E_{11}) = (c_{17} \cdot E_{17}) + (c_{10} \cdot E_{10}) + Z_{evaporador} \quad (116)$$

4.4.5. Absorvedor

A figura 32 mostra o volume de controle determinado para o absorvedor. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômica:

Figura 32 - Volume de controle do Absorvedor.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.5.1. Balanço exergoeconômico do absorvedor

A equação do produto a partir da finalidade do absorvedor fica:

$$P: (c_1 \cdot E_1) - (c_{11} \cdot E_{11}) + (c_{18} \cdot E_{18}) - (c_{15} \cdot E_{15}) \quad (117)$$

A equação do combustível a partir da finalidade do absorvedor é representada por:

$$F: (c_{12} \cdot E_{12}) \quad (118)$$

A equação auxiliar do produto para o absorvedor é:

$$\frac{C_1 - C_{11}}{E_1 - E_{11}} = \frac{C_{18} - C_{15}}{E_{18} - E_{15}} \quad (119)$$

A equação auxiliar do combustível para o absorvedor não é necessária para fechar o balanço do ciclo, logo não é aplicado.

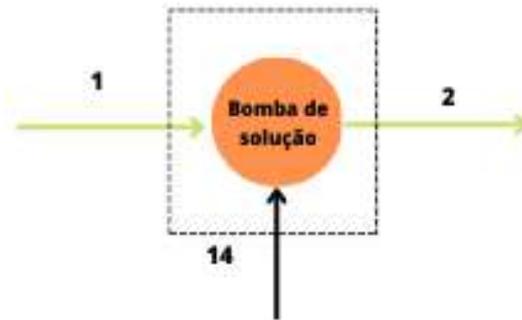
Portanto, o balanço geral para o absorvedor, incluindo os custos totais do componente (custo de aquisição, operação e manutenção), fica:

$$(c_1 \cdot E_1) + (c_{18} \cdot E_{18}) = (c_{12} \cdot E_{12}) + (c_{15} \cdot E_{15}) + (c_{11} \cdot E_{11}) + Z_{absorvedor} \quad (120)$$

4.4.6. Bomba de solução

A figura 33 mostra o volume de controle determinado para a bomba de solução. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico:

Figura 33 - - Volume de controle da bomba de solução.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.6.1. Balanço exergoeconômico da bomba de solução

A equação do produto tendo como base a finalidade do equipamento é:

$$P: (c_2 \cdot E_2) - (c_1 \cdot E_1) \quad (121)$$

A equação do combustível tendo como base a função do equipamento é:

$$F: (c_{14} \cdot E_{14}) \quad (122)$$

A equação auxiliar do produto para a bomba de solução não é necessária para obtenção do balanço do ciclo, logo não é aplicado.

A equação auxiliar do combustível para a bomba de solução não é aplicada para tal equipamento.

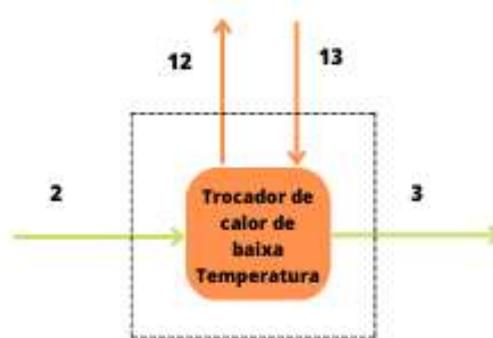
Portanto, o balanço geral para a bomba de solução, incluindo os custos totais do componente (custo de aquisição, operação e manutenção) é:

$$(c_2 \cdot E_2) = (c_{14} \cdot E_{14}) + (c_1 \cdot E_1) + Z_{bombasolução} \quad (123)$$

4.4.7. Trocador de calor de baixa temperatura

A figura 34 mostra o volume de controle determinado para o trocador de calor de baixa temperatura. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico:

Figura 34 - Volume de controle do trocador de calor de baixa temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.7.1. Balanço exergoeconômico do trocador de calor de baixa temperatura

A equação do produto baseado na função do equipamento é:

$$P: (c_3 \cdot E_3) - (c_2 \cdot E_2) \quad (124)$$

A equação do combustível tendo como base a finalidade do trocador de calor fica:

$$F: (c_{12} \cdot E_{12}) + (c_{13} \cdot E_{13}) \quad (125)$$

Não existe a necessidade de uma equação auxiliar do produto para obtenção do balanço do ciclo.

A equação auxiliar do combustível para o trocador de calor é:

$$c_{13} = c_{12} \quad (126)$$

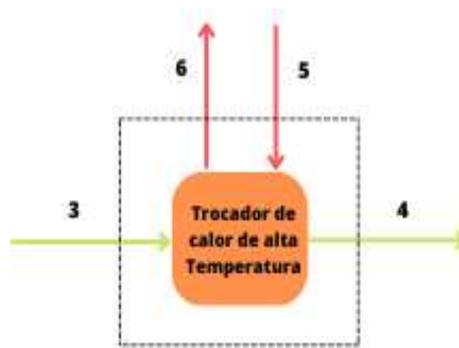
Portanto, o balanço exergoambiental para o trocador de calor de baixa temperatura, acrescentando os custos totais do componente (custo de aquisição, operação e manutenção) é:

$$(c_{12} \cdot E_{12}) + (c_3 \cdot E_3) = (c_2 \cdot E_2) + (c_{13} \cdot E_{13}) + Z_{TBT} \quad (127)$$

4.4.8. Trocador de calor de alta temperatura

A figura 35 mostra o volume de controle determinado para o trocador de calor de alta temperatura. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico:

Figura 35 - Volume de controle do trocador de calor de alta temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.8.1. Balanço exergoeconômico do trocador de calor de alta temperatura

A equação do produto baseado na função do equipamento é:

$$P: (c_4 \cdot E_4) - (c_3 \cdot E_3) \quad (128)$$

A equação do combustível tendo como base a finalidade do trocador de calor fica:

$$F: (c_6 \cdot E_6) - (c_5 \cdot E_5) \quad (129)$$

Não existe a necessidade de uma equação auxiliar do produto para obtenção do balanço do ciclo.

A equação auxiliar do combustível para o trocador de calor é:

$$c_5 = c_6 \quad (130)$$

Portanto, o balanço exergoeconômico para o trocador de calor de alta temperatura, incluindo os custos totais do componente (custo de aquisição, operação e manutenção) é:

$$(c_6 \cdot E_6) + (c_4 \cdot E_4) = (c_5 \cdot E_5) + (c_3 \cdot E_3) + Z_{TAT} \quad (131)$$

4.5. AVALIAÇÃO EXERGOAMBIENTAL

Semelhante a análise exergoeconômica, a análise exergoambiental também faz o estudo de cada componente do sistema e leva em consideração os parâmetros adicionais de avaliação para a realização da análise dos resultados, unindo os impactos ambientais e efeitos de sustentabilidade aos fluxos de exergia do sistema.

A análise exergoambiental é dividida em três etapas: na primeira etapa, o objetivo é obter os valores de exergia em todos os pontos do sistema; na segunda etapa, a meta é realizar a análise de ciclo de vida em todos os equipamentos do sistema e a terceira e última etapa é a análise exergoambiental em si, onde são associados os impactos ambientais aos fluxos exergéticos e calculados os parâmetros adicionais do estudo exergoambiental.

O modelamento exergoambiental leva em consideração algumas hipóteses simplificadoras, sendo:

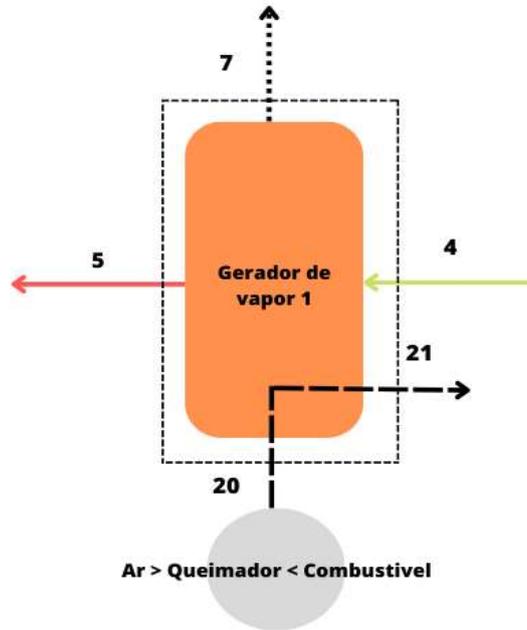
- As equações referentes as variáveis adicionais do estudo exergoambiental dos componentes leva em consideração as formulas gerais apresentados na fundamentação teórica e não serão expostas individualmente na etapa que segue.
- Todos os equipamentos levam em consideração a equação geral do método proposto por TSATSARONIS (2008) e MEYER et al (2009);
- O ar tem impacto ambiental estabelecido como zero, pois é levado em conta que está disponível no meio ambiente;
- A água utilizada para arrefecimento no ciclo (condensador, absorvedor e evaporador) tem impacto ambiental considerado zero. Segundo Cordeiro (2018), isso acontece apenas com a água de entrada uma vez que esta não vai degradar o meio ambiente com emissões tóxicas, porem o resultado da água de saída trará impacto devido a eventuais perdas de energia causados pela evaporação;

4.5.1. Gerador de vapor I

A figura 36 apresenta o volume de controle determinado para o gerador de vapor I. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoambiental.

A definição de produto e combustível é determinado de acordo com a finalidade do equipamento usando o método SPECO. A seguir são apresentados a equação do produto, combustível e a equações auxiliares para fechar o sistema.

Figura 36 - Volume de controle do gerador de vapor II.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.1.1. Balanço exergoambiental do Gerador de vapor I

A equação do produto do gerador de vapor I é:

$$P: (b_5 \cdot E_5) + (b_7 \cdot E_7) - (b_4 \cdot E_4) \quad (132)$$

A equação do combustível do gerador de vapor I é:

$$F: (b_{20} \cdot E_{20}) - (b_{21} \cdot E_{21}) \quad (133)$$

A equação auxiliar do Produto, obtido por meio do conceito do princípio P, diz que: cada corrente de exergia é fornecida para um fluxo de exergia vinculado ao produto no mesmo custo ambiental médio, portanto temos:

$$b_4 = \frac{B_5 + B_7}{E_5 + E_7} \quad (134)$$

A equação auxiliar do combustível, obtido a partir do princípio F, que diz: o custo ambiental específico vinculado a uma remoção de fluxo de exergia interno de um equipamento deve ser o mesmo custo ambiental médio específico do fluxo de entrada e saída, logo:

$$b_{20} = b_{21} \quad (135)$$

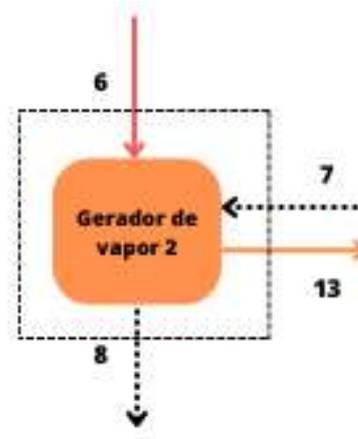
Unindo as informações obtidas nas etapas anteriores e acrescentando a taxa de impacto ambiental do componente (construção, operação, manutenção e descarte) referente ao gerador de vapor I, obtemos a seguinte expressão:

$$(b_5 \cdot E_5) + (b_7 \cdot E_7) + (b_{21} \cdot E_{21}) = (b_4 \cdot E_4) + (b_{20} \cdot E_{20}) + \dot{Y}_{gerador1} \quad (136)$$

4.5.2. Gerador de vapor II

A figura 37 exibe o volume de controle determinado para o gerador de vapor II. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoambiental:

Figura 37 - Volume de controle do gerador de vapor II.



Fonte: Elaborador pelo autor

4.5.2.1. Balanço exergoambiental do Gerador de vapor II

A equação do produto do gerador de vapor II fica:

$$P: (b_7 \cdot E_7) - (b_8 \cdot E_8) \quad (137)$$

A equação do combustível do gerador de vapor II fica:

$$F: (b_{13} \cdot E_{13}) - (b_6 \cdot E_6) \quad (138)$$

A equação auxiliar do produto, baseado no princípio P é:

$$b_8 = b_7 \quad (139)$$

A equação auxiliar do combustível, baseado no princípio F é:

$$b_6 = b_{13} \quad (140)$$

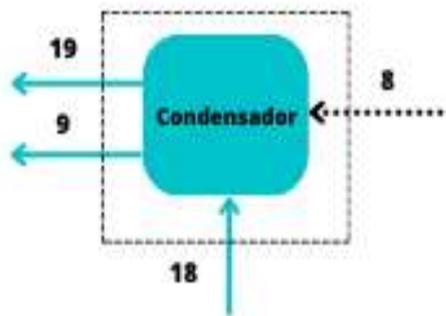
Portanto, o balanço geral para o gerador de vapor II, acrescentando a taxa de impacto ambiental do componente (construção, operação, manutenção e descarte), é expressado por:

$$(b_8 \cdot E_8) + (b_{13} \cdot E_{13}) = (b_6 \cdot E_6) + (b_7 \cdot E_7) + \dot{Y}_{gerador2} \quad (141)$$

4.5.3. Condensador

A figura 38 mostra o volume de controle determinado para o condensador. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoambiental:

Figura 38 - Volume de controle do Condensador.



Fonte: elaborado pelo autor

4.5.3.1. Balanço exergoambiental do condensador

A equação do produto para o condensador é:

$$P: (b_{10} \cdot E_{10}) - (b_8 \cdot E_8) \quad (142)$$

A equação do combustível para o condensador fica:

$$F: (b_{19} \cdot E_{19}) - (b_{18} \cdot E_{18}) \quad (143)$$

A equação auxiliar do produto, utilizando o princípio P, no condensador não é aplicado.

A equação auxiliar do combustível no condensador, tendo como base o princípio F, fica:

$$b_{10} = b_8 \quad (144)$$

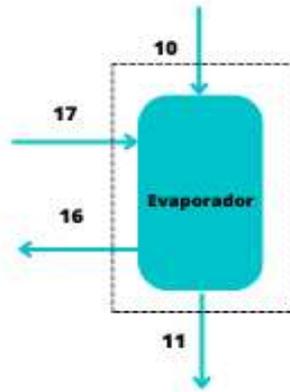
Logo, o Balanço exergoambiental para o sistema de condensação, somando a taxa de impacto ambiental do componente (construção, operação, manutenção e descarte) é:

$$(b_{10} \cdot E_{10}) + (b_{19} \cdot E_{19}) = (b_8 \cdot E_8) + (b_{18} \cdot E_{18}) + \dot{Y}_{condensador} \quad (145)$$

4.5.4. Evaporador

A figura 39 mostra o volume de controle determinado para o evaporador. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoambiental:

Figura 39 - Volume de controle do Evaporador.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.4.1. Balanço exergoambiental do evaporador

A equação do produto baseado na finalidade do evaporador é:

$$P: (b_{16} \cdot E_{16}) - (b_{17} \cdot E_{17}) \quad (146)$$

A equação do combustível baseado na finalidade do evaporador é:

$$F: (b_{10} \cdot E_{10}) - (b_{11} \cdot E_{11}) \quad (147)$$

A equação auxiliar do produto, a partir do princípio P, não é aplicado.

A equação auxiliar do combustível, baseado no princípio F é:

$$b_{10} = b_{11} \quad (148)$$

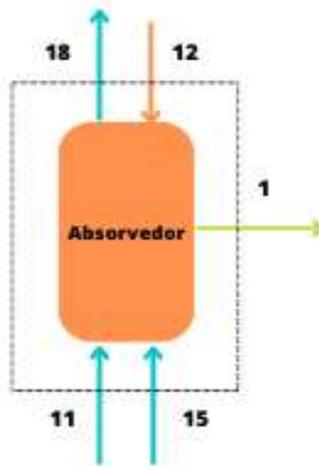
Portanto, o balanço exergoambiental para o evaporador, acrescentando a taxa de impacto ambiental do componente (construção, operação, manutenção e descarte) é:

$$(b_{16} \cdot E_{16}) + (b_{11} \cdot E_{11}) = (b_{17} \cdot E_{17}) + (b_{10} \cdot E_{10}) + \dot{Y}_{evaporador} \quad (149)$$

4.5.5. Absorvedor

A figura 40 mostra o volume de controle determinado para o absorvedor. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoambiental:

Figura 40 - Volume de controle do Absorvedor.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.5.1. Balanço exergoambiental do absorvedor

A equação do produto a partir da finalidade do absorvedor fica:

$$P: (b_{18} \cdot E_{18}) - (b_{15} \cdot E_{15}) + (b_1 \cdot E_1) - (b_{11} \cdot E_{11}) \quad (150)$$

A equação do combustível a partir da finalidade do absorvedor é representada por:

$$F: (b_{12} \cdot E_{12}) \quad (151)$$

A equação auxiliar do produto para o absorvedor é:

$$\frac{B_1 - B_{11}}{E_1 - E_{11}} = \frac{B_{18} - B_{15}}{E_{18} - E_{15}} \quad (152)$$

A equação auxiliar do combustível para o absorvedor não é necessária para fechar o balanço do ciclo, logo não é aplicado.

Portanto, o balanço geral para o absorvedor, incluindo a taxa de impacto ambiental do componente (construção, operação, manutenção e descarte), fica:

$$(b_1 \cdot E_1) + (b_{18} \cdot E_{18}) = (b_{12} \cdot E_{12}) + (b_{15} \cdot E_{15}) + (b_{11} \cdot E_{11}) + \dot{Y}_{absorvedor} \quad (153)$$

4.5.6. Bomba de solução

A figura 41 mostra o volume de controle determinado para a bomba de solução. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoambiental:

Figura 41 - Volume de controle da bomba de solução.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.6.1. Balanço exergoambiental da bomba de solução

A equação do produto tendo como base a finalidade do equipamento é:

$$P: (b_2 \cdot E_2) + (b_1 \cdot E_1) \quad (154)$$

A equação do combustível tendo como base a função do equipamento é:

$$F: (b_{14} \cdot E_{14}) \quad (155)$$

A equação auxiliar do produto para a bomba de solução não é necessária para obtenção do balanço do ciclo, logo não é aplicado.

A equação auxiliar do combustível para a bomba de solução não é aplicada para tal equipamento.

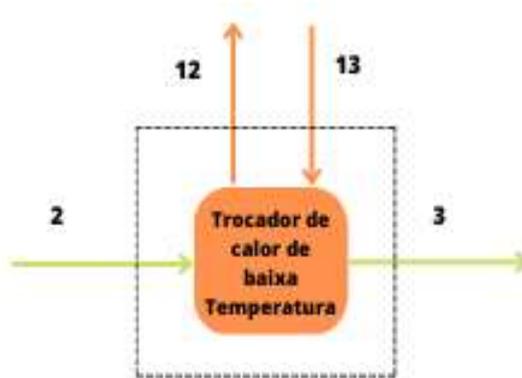
Portanto, o balanço geral para a bomba de solução, incluindo a taxa de impacto ambiental do componente (construção, operação, manutenção e descarte) é:

$$(b_2 \cdot E_2) = (b_{14} \cdot E_{14}) + (b_1 \cdot E_1) + \dot{Y}_{bombasolu\c{c}ao} \quad (156)$$

4.5.7. Trocador de calor de baixa temperatura

A figura 42 mostra o volume de controle determinado para o trocador de calor de baixa temperatura. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoambiental:

Figura 42 - Volume de controle do trocador de calor de baixa temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.7.1. Balanço exergoambiental do trocador de calor de baixa temperatura

A equação do produto baseado na função do equipamento é:

$$P: (b_3 \cdot E_3) - (b_2 \cdot E_2) \quad (157)$$

A equação do combustível tendo como base a finalidade do trocador de calor fica:

$$F: (b_{12} \cdot E_{12}) - (b_{13} \cdot E_{13}) \quad (158)$$

Não existe a necessidade de uma equação auxiliar do produto para obtenção do balanço do ciclo.

A equação auxiliar do combustível para o trocador de calor é:

$$b_{13} = b_{12} \quad (159)$$

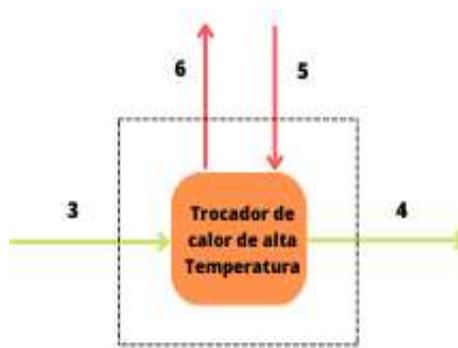
Portanto, o balanço exergoambiental para o trocador de calor, acrescentando a taxa de impacto ambiental do componente (construção, operação, manutenção e descarte) é:

$$(b_{12} \cdot E_{12}) + (b_3 \cdot E_3) = (b_2 \cdot E_2) + (b_{13} \cdot E_{13}) + \dot{Y}_{TBT} \quad (160)$$

4.5.8. Trocador de calor de alta temperatura

A figura 43 mostra o volume de controle determinado para o trocador de calor de alta temperatura. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoambiental:

Figura 43 - Volume de controle do trocador de calor de alta temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.8.1. Balanço exergoambiental do trocador de calor de alta temperatura

A equação do produto baseado na função do equipamento é:

$$P: (b_4 \cdot E_4) - (b_3 \cdot E_3) \quad (161)$$

A equação do combustível tendo como base a finalidade do trocador de calor fica:

$$F: (b_6 \cdot E_6) - (b_5 \cdot E_5) \quad (162)$$

Não existe a necessidade de uma equação auxiliar do produto para obtenção do balanço do ciclo.

A equação auxiliar do combustível para o trocador de calor é:

$$b_5 = b_6 \quad (163)$$

Portanto, o balanço exergoambiental para o trocador de calor, acrescentando a taxa de impacto ambiental do componente (construção, operação, manutenção e descarte) é:

$$(b_6 \cdot E_6) + (b_4 \cdot E_4) = (b_5 \cdot E_5) + (b_3 \cdot E_3) + \dot{Y}_{TAT} \quad (164)$$

4.6. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Como consta na literatura, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma parte importante do processo de análise exergoambiental, pois calcula os valores de impacto ambiental obtidos por meio de um método quantificador. Em outras palavras, a ACV é uma ferramenta de análise que permite avaliar os potenciais impactos ambientais em cada fase do ciclo de vida de um produto ou serviço, ou seja, desde a extração da matéria-prima até o seu descarte. (Souza et al. 2020)

Basicamente, a ACV compreende quatro etapas:

1. Objetivo e escopo: definição do objeto de estudo, bem como seus limites.

2. Inventário do ciclo de vida (LCI): determina todas as entradas e saídas atreladas ao objeto de estudo definido anteriormente.

3. Avaliação de impacto do ciclo de vida (LCIA): utiliza os dados produzidos na etapa 2 e aloca os impactos potenciais correspondentes no meio ambiente (recursos e ecossistemas) e na saúde humana.

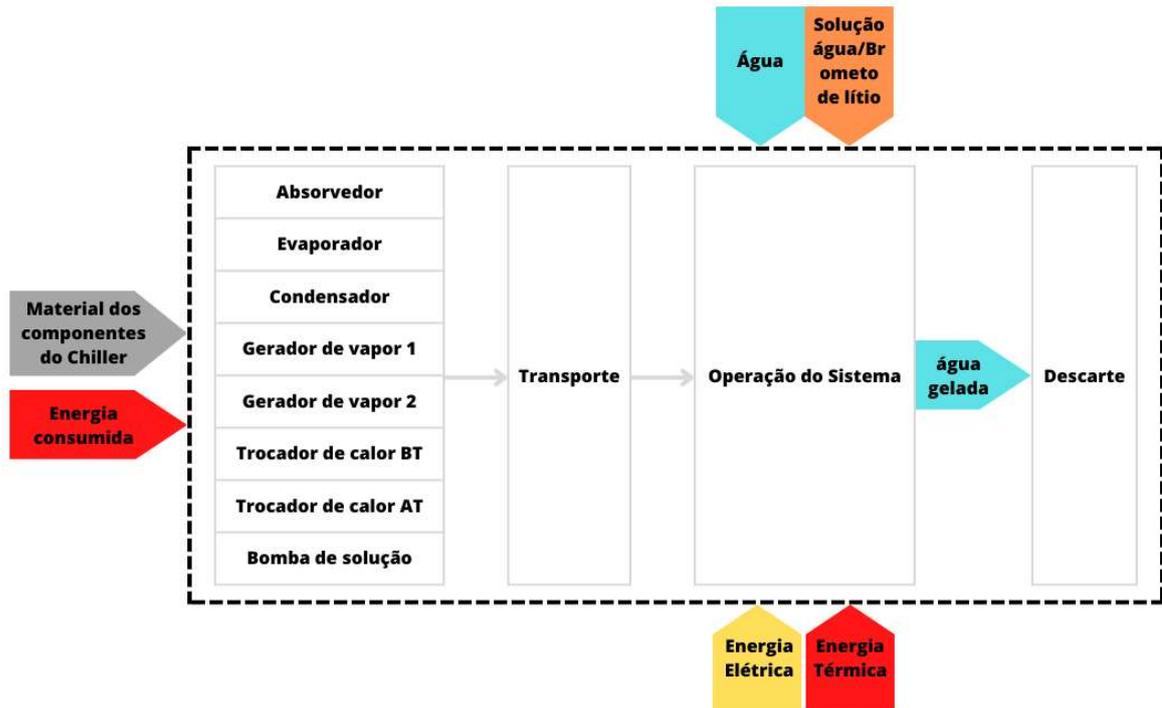
4. Interpretação: visa identificar o que está causando grandes impactos ambientais e, em última análise, indicar melhorias.

4.6.1. Definição do escopo

Esta fase da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) detalha principalmente o propósito e os limites do objeto de análise. O aspecto objetivo abrange as definições do sistema, produto ou atividade investigada, assim como seu período de vida, enquanto os limites podem abranger a extração de matéria-prima (juntamente com suas fases de processamento e fabricação), transporte, utilização, manutenção e disposição (CAVALCANTI, 2019). Essa metodologia é conhecida como a abordagem "do berço ao túmulo", pois examina o ciclo de vida desde a extração da matéria-prima até seu descarte (ROSSI, 2019). Outra abordagem mencionada na literatura é a "do berço ao portão" (cradle-to-gate), que é empregada quando não há informações sobre a fase de descarte do objeto de estudo, ou seja, a avaliação ambiental é conduzida desde a extração da matéria-prima até o transporte e as fases finais no mercado (BAHLAWAN, 2020).

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é realizada desde a extração das matérias-primas até o descarte final. Neste trabalho, o descarte ocorrerá em um aterro sanitário municipal, onde o equipamento será incinerado. Na etapa de fabricação do chiller, a análise considerou as matérias-primas utilizadas para a produção de cada componente. Em seguida, foi avaliado o transporte desde a fábrica até o local de instalação e operação do chiller. Durante a fase de operação, foram mensuradas a fonte térmica, o consumo de eletricidade, o fluido de trabalho e, por fim, o descarte do equipamento. A figura 44 apresenta o escopo do estudo de ACV

Figura 44 - Escopo do estudo de ACV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise considerará a vida útil do sistema ao longo de um período de 20 anos, conforme recomendado pelo fabricante.

3.6.2 Descrição do inventário

Como já descrito anteriormente, o Inventário do Ciclo de Vida é a etapa da ACV onde todas as entradas e saídas são associadas ao objeto de estudo. Para este estudo, foram considerados insumos para as duas principais fases do ciclo de vida do sistema: fabricação de componentes e operação do sistema. Para o primeiro, considerou-se o consumo de matéria-prima e energia com base na massa de cada componente. Para o segundo, considerou-se a fonte de calor, o fluido de trabalho e a eletricidade necessária para o funcionamento do sistema. Mais detalhes sobre os dados de cada componente são relatados na Tabela 9. O transporte do fabricante do componente até o local de operação do sistema também foi considerado na simulação.

O manual do fabricante do chiller de refrigeração por absorção de vapor diz que a massa total do produto é 4200 kg, sendo que o gerador de vapor 1 possui uma massa de 900 kg, a parte

superior do chiller que é composta pelo gerador de vapor 2 e o condensador tem 600 kg e a parte inferior que é constituído pelo evaporador, absorvedor, bomba de solução, trocador de calor de baixa temperatura e trocador de calor de alta temperatura possui uma massa de 2700 Kg. A massa referente aos anexos como tubulação, sensores e painel de comando não estão no escopo do presente estudo, logo para efeitos de análise, a massa total é 3600 Kg. (LG Electronics, Home appliance & Air solution company, 2020)

Tabela 9 - Dados de entrada para análise do ciclo de vida.

| Componente | Massa (kg) | Matéria-Prima | Transporte | Distância (km) | Descarte |
|----------------------|------------|--|---|----------------|--|
| Absorvedor | 700 | 80% Cobre / 20% Aço laminado | Provincia de Gyeonggi - Corea do Sul / João Pessoa - PB Brasil | 21.116 | Aterro sanitário municipal com incineração |
| Evaporador | 700 | 80% Cobre / 20% Aço laminado | Provincia de Gyeonggi - Corea do Sul / João Pessoa - PB Brasil | 21.116 | Aterro sanitário municipal com incineração |
| Condensador | 300 | 80% Cobre / 20% Aço laminado | Provincia de Gyeonggi - Corea do Sul / João Pessoa - PB Brasil | 21.116 | Aterro sanitário municipal com incineração |
| Gerador de vapor 1 | 900 | 80% aço inoxidável / 20% aço laminado | Provincia de Gyeonggi - Corea do Sul / João Pessoa - PB Brasil | 21.116 | Aterro sanitário municipal com incineração |
| Gerador de vapor 2 | 300 | 80% Cobre / 20% Aço laminado | Provincia de Gyeonggi - Corea do Sul / João Pessoa - PB Brasil | 21.116 | Aterro sanitário municipal com incineração |
| Trocador de calor BT | 300 | 80% Cobre / 20% Aço laminado | Provincia de Gyeonggi - Corea do Sul / | 21.116 | Aterro sanitário municipal com incineração |

| | | | | | |
|----------------------|-----|---|--|--------|--|
| | | | João Pessoa - PB Brasil | | |
| Trocador de calor AT | 300 | 80% Cobre / 20% Aço laminado | Provincia de Gyeonggi - Coreia do Sul / João Pessoa - PB Brasil | 21.116 | Aterro sanitário municipal com incineração |
| Bomba de solução | 100 | aço carbono 50% / PVC 40% / Cobre 5% / Alumínio 3% / Borracha 2% | Provincia de Gyeonggi - Coreia do Sul / João Pessoa - PB Brasil | 21.116 | Aterro sanitário municipal com incineração |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6.3. Transporte

O Fabricante do chiller em estudo é a LG Electronics, Home appliance & Air solution company, que fica localizada na província da Gyeonggi-do, Coreia do Sul. O presente estudo não considera o transporte do local de extração da matéria – prima até o endereço do fabricante. O transporte da fábrica da LG até o Aeroporto Internacional de Incheon é feito em caminhão por cerca de 69 km, então, do aeroporto de Incheon até o Aeroporto Internacional de Guarulhos, o transporte é feito em contêiner via avião cargueiro, o trajeto tem uma distância de 18315 km; e, do aeroporto internacional de Guarulhos até as dependências dos prédios do IES (Fig. 45), na cidade de João Pessoa, é feito também por caminhão por cerca de 2732 km.

Figura 45 - Diagrama esquemático das rotas de transporte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6.4. Operação do sistema

O Chiller de refrigeração por absorção de vapor da fabricante LG Electronics, Home appliance & Air solution company, modelo WCDH010 tem capacidade de refrigeração de 100 TR (352 kW), tem como par de fluido de trabalho água e brometo de lítio e pode ter como fonte térmica queima direta de gás natural, Biogás/ Biometano, gases de exaustão, vapor, água quente, como também a combinação de ambas as fontes térmicas mencionadas. O coeficiente de performance (COP) é de 1,51 de acordo com o manual do fabricante. No escopo do estudo é considerado que o sistema possui uma bomba de solução (único equipamento que consome energia elétrica) com potência de 1,5 kW, que funciona 24 horas por dia, logo o consumo mensal é de 1.080 kWh/mês, 13.140 kWh/ano e durante o ciclo de vida do chiller que é de 20 anos, o consumo de energia elétrica projetado é de 262.800 kWh. A demanda de energia térmica do chiller durante o ciclo de vida de 20 anos é de aproximadamente 40.840.842 kWh, tendo em vista que a energia térmica requerida em uma hora de funcionamento do chiller é de 233,10 kWh.

O volume de água de arrefecimento e água gelada de acordo com o manual é, respectivamente 0,028 m³ e 0,0168 m³, logo o volume total é de 0,0448 m³, lembrando que não foi considerado as perdas de água, pois o ciclo é fechado. O volume da solução no absorvedor é de 0,019 m³, sendo 55% de brometo de lítio (Fluido absorvedor) e 45% de água (fluido refrigerante).

Tabela 10 - Descrição dos utilitários necessários para a operação do chiller.

| Tipo | Quantidade |
|---|--------------------------|
| Energia elétrica | 262.800 kWh (20 anos) |
| Energia térmica | 40.840.842 kWh (20 anos) |
| Volume de água (arrefecimento e gelada) | 0,0448 m ³ |
| Volume da solução | 0,019 m ³ |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6.5. Avaliação dos impactos do ciclo de vida

Após concluir a fase do inventário, a etapa de avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV) vincula essas informações ao possível impacto que podem gerar no ambiente e na saúde

humana. Para isso, o processo AICV foi elaborado por meio do software openLCA na versão 1.10.3, operando com o banco de dados Ecoinvent 3.7.1. O estudo adere às diretrizes estabelecidas pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, enquanto a simulação é executada seguindo o método AICV ReCiPe Endpoint (Humanitário, Ponderação média – H,A). Conforme observado por Marques et al. em 2021, embora o EI-99 seja considerado um método convencional de AICV, o ReCiPe tem se destacado como sua evolução. Além disso, conforme indicado pelo Instituto Nacional de Saúde Pública e Meio Ambiente em 2016, os métodos e informações empregados no ReCiPe são os mais recentes e estão alinhados com o conhecimento científico atual.

Esse tipo método coleta os danos ambientais calculados e os agrupa em três categorias:

- Saúde humana: doenças relacionadas a causas ambientais; considera-se o número de doenças, bem como sua duração e anos de vida perdidos por morte prematura.
- Qualidade do Ecossistema: danos à diversidade de espécies, como tipos específicos de plantas e organismos inferiores.
- Recursos Naturais: considera o excedente de energia no futuro, necessário para obtenção de recursos minerais e fósseis.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos mediante execução das análises abordadas e descritas na etapa da metodologia, ou seja, os resultados do estudo energético, exerético, exergoeconômico e exergoambiental. As informações apresentadas como os dados, tabelas, gráficos e ponderações visam demonstrar os componentes do sistema que mais perdem energia no processo, desenvolvem o maior custo monetário e possuem o maior impacto ambiental ao longo de sua vida útil, fazendo com que os componentes que necessitam de otimização sejam identificados e otimizados.

Os resultados apresentados serão divididos em subseções, tais quais: Avaliação Termodinâmica, Avaliação exergoeconomica e Avaliação exergoambinetal. As simulações objeto deste estudo foi realizado utilizando a plataforma computacional EES e o OpenLCA na avaliação de ciclo de vida.

5.6.AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA

No primeiro instante, para o estudo termodinâmico, foram definidas as funções necessárias para os cálculos da temperatura média da solução de brometo de lítio no gerador, da entalpia dos produtos da combustão do gás natural, da entropia da solução, da exergia física e química dos produtos da combustão, de acordo com o diagrama sequencial das etapas do estudo. Após a simulação computacional, a tabela 11 mostra os valores dos seguintes parâmetros em cada ponto do sistema: temperatura, pressão, título da mistura, vazão mássica, entalpia, entropia, exergia específica e a taxa de exergia (essa última será utilizado nas próximas etapas do estudo)

Tabela 11 – Parâmetros Termodinâmicos de cada um dos pontos do chiller de refrigeração de 352 kW.

| Pontos | T(°C) | P(kPa) | X(%) | m(Kg/s) | h(kJ/kg) | s(kJ/kg.K) | ex(kJ/kg) | Ex(kW) |
|--------|-------|--------|------|---------|----------|------------|-----------|----------|
| 1 | 28,08 | 0,7761 | 52,9 | 1,108 | 227,8 | 0,1902 | 80,76 | 89,47 |
| 2 | 28,08 | 77,52 | 52,9 | 1,108 | 227,8 | 0,5083 | 80,76 | 89,47 |
| 3 | 47,78 | 77,52 | 52,9 | 1,108 | 281,7 | 0,5649 | 117,9 | 130,6 |
| 4 | 128,7 | 77,52 | 52,9 | 1,108 | 276,6 | 0,5083 | 129,6 | 143,5 |
| 5 | 138,6 | 77,52 | 57,3 | 1,022 | 300,7 | 0,791 | 69,44 | 70,99 |
| 6 | 66,7 | 4,243 | 57,3 | 1,022 | 194,9 | 0,4043 | 78,92 | 80,68 |
| 7 | 117,5 | 77,52 | X | 0,08552 | 2714 | 7,576 | 459,5 | 39,29 |
| 8 | 68,9 | 4,243 | X | 0,08552 | 2629 | 8,68 | 45,56 | 3,896 |
| 9 | 30 | 4,243 | X | 0,08552 | 125,7 | 0,4364 | 0,1057 | 0,009037 |
| 10 | 5 | 0,7761 | X | 0,08552 | 125,7 | 0,4365 | 0,07425 | 0,00635 |
| 11 | 5 | 0,7761 | X | 0,08552 | 2510 | 9,067 | -188,9 | -16,16 |
| 12 | 46,76 | 0,7761 | 62,7 | 1,022 | 143,5 | 0,2581 | 71,1 | 72,69 |
| 13 | 78,32 | 4,243 | 62,7 | 1,022 | 202 | 0,4302 | 78,3 | 80,05 |
| 14 | X | X | X | X | X | X | X | 1,5 |
| 15 | 32 | X | X | 15,78 | 134 | 0,464 | 0,1829 | 2,886 |
| 16 | 12 | X | X | 9,739 | 50,24 | 0,1804 | 2,2209 | 21,6293 |
| 17 | 7 | X | X | 9,739 | 29,31 | 0,1063 | 2,161 | 21,05 |
| 18 | 33,65 | X | X | 15,78 | 140,9 | 0,4866 | 0,3656 | 5,768 |
| 19 | 37 | X | X | 15,78 | 154,9 | 0,532 | 0,8477 | 13,38 |
| 20 | 520 | X | X | 0,05624 | 6272 | 12,27 | 2692 | 151,4 |
| 21 | 200 | X | X | 0,05624 | 2127 | 5,607 | 533,7 | 30,02 |

Fonte: Elaborado pelo autor

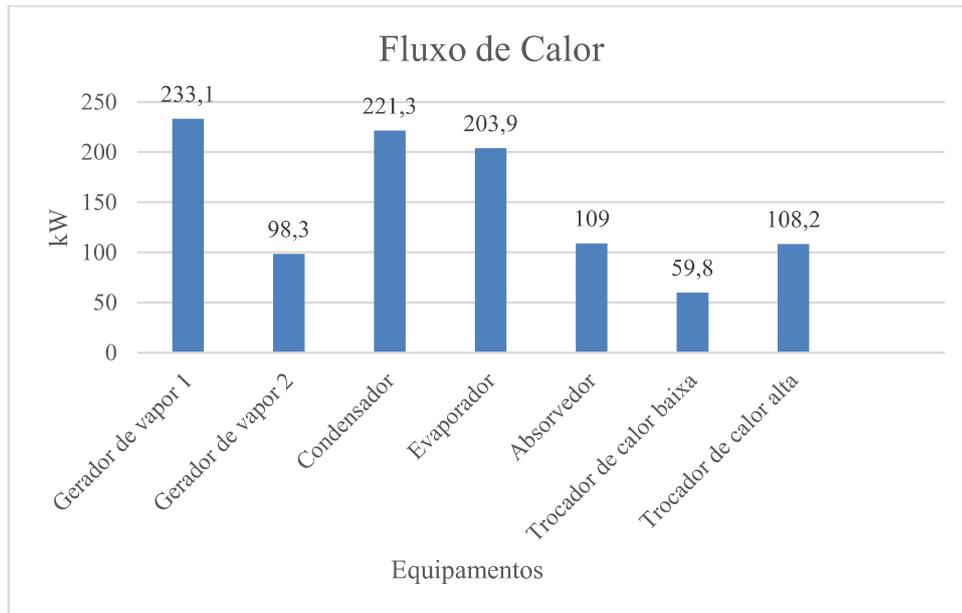
O valor negativo da exergia no ponto 11 (saída do evaporador e entrada do absorvedor), ocorre porque a exergia é medida tendo como referência o estado padrão ($T_0 = 25 \text{ °C}$ e $P_0 = 101,325 \text{ kPa}$), e nesse ponto tanto a pressão como a temperatura estão abaixo desses valores.

Observa-se também que o chiller de refrigeração por absorção possui três níveis de pressão: 77,52 kPa, 4,243 kPa e 0,7761 kPa. A maior concentração de brometo de lítio (62,7%) é observada no retorno do trocador de calor de baixa temperatura para o absorvedor (pontos 13 e 12) tal fato mostra que a quantidade de água na solução foi separada quando a solução passou no gerador de vapor 2 e em seguida no trocador de calor de baixa temperatura. A menor

concentração de brometo de lítio (52,9%) é vista no ponto 1 (saída do absorvedor), pois nesse ponto a quantidade de água que vem do evaporador é absorvido pelo fluido absorvente.

A figura 46 mostra o fluxo de calor em cada equipamento da unidade de refrigeração por absorção de vapor de duplo de 352 kW.

Figura 46 - Fluxos de calor nos equipamentos da unidade de Refrigeração por absorção de 352 kW.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico, os maiores fluxos de calor ocorrem no gerador de vapor 1 e no condensador, seguidos pelo evaporador e absorvedor. O condensador e o evaporador dissipam 221,3 kW e 203,9 kW, respectivamente, o que indica um grande fluxo de energia térmica necessária para realizar a troca de calor com o ambiente. Além disso, o absorvedor apresenta um fluxo de 109 kW, necessário para dissolver o refrigerante no absorvente, enquanto os trocadores de calor de baixa e alta temperatura contribuem com fluxos menores, de 59,8 kW e 108,2 kW, respectivamente, ajudando a recuperar parte do calor no sistema e melhorando a eficiência do processo.

Uma análise mais aprofundada sobre as irreversibilidades do sistema será mostrada na próxima seção tendo como base a visão da aplicação do método SPECO.

5.7.AVALIAÇÃO EXERGEOECONOMICA

A etapa de avaliação exergoeconomica são expostos os desfechos da avaliação exergoeconômica por meio do método SPEC0. Na Tabela 12 são exibidas as taxas do custo unitário e os gastos exergéticos em cada fluxo de entrada e saída de cada equipamento da unidade de refrigeração por absorção de vapor.

Tabela 12 - Resultados dos custos específicos e exergéticos do Chiller comercial de 352 kW.

| Pontos | Ex (kW) | c (R\$/GJ) | Ĉ (R\$/h) | Pontos | Ex (kW) | c (R\$/GJ) | Ĉ (R\$/h) |
|--------|---------|------------|-----------|--------|---------|------------|-----------|
| 1 | 89,45 | 78,36 | 25,232 | 12 | 72,69 | 616,6 | 161,352 |
| 2 | 89,47 | 90,23 | 29,063 | 13 | 80,05 | 2773 | 799,2 |
| 3 | 130,6 | 1439 | 676,8 | 14 | 1,5 | 60 | 0,324 |
| 4 | 143,5 | 811,8 | 419,4 | 15 | 2,886 | 0 | 0 |
| 5 | 70,99 | 1055 | 269,568 | 16 | 9,7390 | 5304 | 185,94 |
| 6 | 80,68 | 1848 | 536,76 | 17 | 21,05 | 0 | 0 |
| 7 | 39,29 | 1939 | 274,32 | 18 | 5,768 | 0 | 0 |
| 8 | 3,896 | 2773 | 38,916 | 19 | 13,38 | 544,3 | 26,2188 |
| 9 | 0,00904 | x | x | 20 | 151,4 | 222,7 | 121,392 |
| 10 | 0,00635 | 2773 | 0,0634 | 21 | 30,02 | 222,7 | 24,066 |
| 11 | -16,16 | 2773 | -161,352 | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor

Na tabela 12 estão apresentados os resultados das variáveis exergoeconomica como: Eficiência exergética, exergia destruída, custos específicos médios dos insumos e produtos, o custo da exergia destruída, as taxas de custos relacionado ao investimento, manutenção e operação do sistema de refrigeração de 352 kW, a diferença relativa de custos e o fator exergoeconômico.

O custo monetário associado ao fluxo 11 (saída do evaporador) apresentou um resultado negativo devido à exergia também ter registrado um valor negativo. Essa situação é explicada pelas condições de temperatura e pressão durante o processo nesse fluxo específico. Quando esses parâmetros estão abaixo do ponto morto, é possível que os valores se tornem negativos, o que pode levar a interpretações equivocadas dos resultados. Isso ocorre porque um custo negativo é contraditório, considerando que qualquer geração de trabalho normalmente está associada a um custo. Conforme destacado por CAVALCANTI (2021), a presença de valores negativos de exergia pode resultar em inconsistências nas taxas de custos monetários e nas taxas de impacto ambiental.

As menores eficiências exergeticas da unidade correspondem à bomba de solução, ao trocador de calor de baixa e ao gerador de vapor 1, respectivamente. O valor pequeno da eficiência exergetica da bomba pode ser justificado pela aplicação do método SPECO, onde a entrada de energia elétrica (fluxo 14) é considerada como insumo, enquanto os fluxos 1 e 2 são tratados como produtos. Segundo CORDEIRO 2018, se a eficiência da bomba de solução fosse calculada pelo método convencional (considerando a entrada de energia elétrica e o fluxo 1 como insumos), a eficiência exergetica seria superior a 90%.

Conforme CORDEIRO 2018, esse efeito é evidenciado ao analisar o custo dos produtos da bomba, que é bastante elevado; no presente estudo, alcançou 53.170 R\$/GJ, devido à significativa elevação na pressão. No entanto, o ganho de temperatura, entalpia e exergia é praticamente nulo. Portanto, o método SPECO postula a existência de um considerável custo associado ao investimento inicial, à manutenção e à operação da bomba em relação ao ganho exergetico proporcionado pela mesma. Essa condição explica o elevado valor da diferença relativa de custos (r_k). O valor elevado de r_k sugere que a bomba é facilmente otimizável, e o valor de f_k indica que isso pode ser alcançado reduzindo o investimento inicial na bomba em comparação com o restante do ciclo.

Os valores não evidenciam o propósito da bomba, que é simplesmente aumentar a pressão no ciclo, sem muitas outras consequências. Isso torna inviável a melhoria considerando as regras do método SPECO. Portanto, nessa situação, o método demonstra ser inadequado.

A tabela 13 apresenta os principais resultados da análise exergoeconômica do chiller comercial de 352 kW, como a eficiência exergetica, destruição de exergia, custo específico do combustível e o produto, taxa de destruição de exergia, custo de aquisição do equipamento, diferença de custo relativo e a fator exergoeconômico, respectivamente.

Tabela 13 - Resultados da análise exergoeconômica para cada equipamento do Chiller comercial de 352 kW.

| Equipamento | ϵ (%) | Ed (kW) | Cf (R\$/GJ) | Cp (R\$/GJ) | Cd (R\$/h) | Zk (R\$/ano) | rk (%) | fk (%) |
|-------------------------|----------------|---------|-------------|-------------|------------|--------------|--------|--------|
| Gerador de vapor 1 | 27,37 | 88,16 | 222,7 | 1041 | 70,668 | 66,17 | 367,5 | 27,79 |
| Gerador de vapor 2 | 69,97 | 36,02 | 1878 | 2773 | 243,504 | 66,17 | 47,71 | 10,05 |
| Condensador | 51,1 | 3,722 | 956,8 | 2773 | 12,8232 | 30,70 | 189,9 | 49,6 |
| Evaporador | 69,97 | 4,885 | 2773 | 4566 | 48,492 | 59,69 | 64,65 | 33,6 |
| Absorvedor | 71,56 | 30,04 | 490,8 | 593,1 | 53,064 | 61,40 | 20,85 | 32,23 |
| Bomba | 1,33 | 1,48 | 60 | 53170 | 0,31968 | 8,53 | 88.521 | 91,64 |
| Trocador de calor baixa | 17,89 | 33,77 | 4308 | 24440 | 523,8 | 23,70 | 82,37 | 1,895 |
| Trocador de calor alta | 75,12 | 3,21 | 5751 | 7377 | 66,456 | 23,70 | 28,27 | 12,79 |

Fonte: Elaborado pelo autor

No que diz respeito à eficiência exergética reduzida no gerador de vapor 1, essa circunstância pode ser justificada pela elevada destruição de exergia no processo, sendo a mais significativa entre todos os dispositivos do sistema. Isso ocorre devido à presença de combustão e à altamente irreversível desorção, assim como à perda de calor resultante da alta temperatura dos gases não utilizados no processo. O mencionado equipamento apresenta o mais alto valor de rk, indicando que os custos dos produtos superam consideravelmente os custos dos combustíveis, tornando-o um dispositivo facilmente otimizável.

Observa-se também que as maiores destruição de exergia ocorre no gerador de vapor 1, gerador de vapor 2 e no trocador de calor de baixa. Os maiores custos de aquisição, operação e manutenção estão associados ao gerador de vapor 1 e 2 e ao absorvedor.

Ainda da tabela 13, é possível verificar que os maiores valores de rk (exceto a bomba de solução), que é a diferença relativa entre o produto e o insumo, estão no Gerador de vapor 1, condensador e no trocador de calor de baixa. Portanto, os equipamentos mencionados são os que necessitam de otimização para redução de custos e isso pode ser realizado com menor esforço quando comparado os valores de rk dos demais equipamentos.

Os índices mais baixos de fk (coeficiente exergoeconômico) são observados no trocador de calor de baixa, no Gerador de vapor 2 e no trocador de calor de alta. Isso aponta para a

exigência de aprimoramento na eficiência energética, especialmente visando a diminuição das irreversibilidades no processo desses dispositivos.

Realizando uma avaliação conjunta entre as variáveis exergoeconômicas em estudo, conclui-se que os equipamentos que deve ser otimizado no sistema são: Trocador de calor de baixa, Gerador de vapor 1 e 2 e o Trocador de calor de alta.

A análise comparativa de resultados desempenha um papel crucial na avaliação e aprimoramento de diversos processos e sistemas. Ao confrontar dados obtidos de diferentes experimentos, modelos ou abordagens, os pesquisadores conseguem identificar padrões, discrepâncias e tendências significativas. Essa comparação não apenas valida a consistência dos resultados, mas também fornece informações valiosas para refinamentos futuros. Seja na pesquisa científica, desenvolvimento de tecnologia ou otimização de processos industriais, a comparação de resultados é uma ferramenta indispensável para a tomada de decisões informadas, contribuindo para avanços substanciais e a eficácia contínua em diversas áreas do conhecimento.

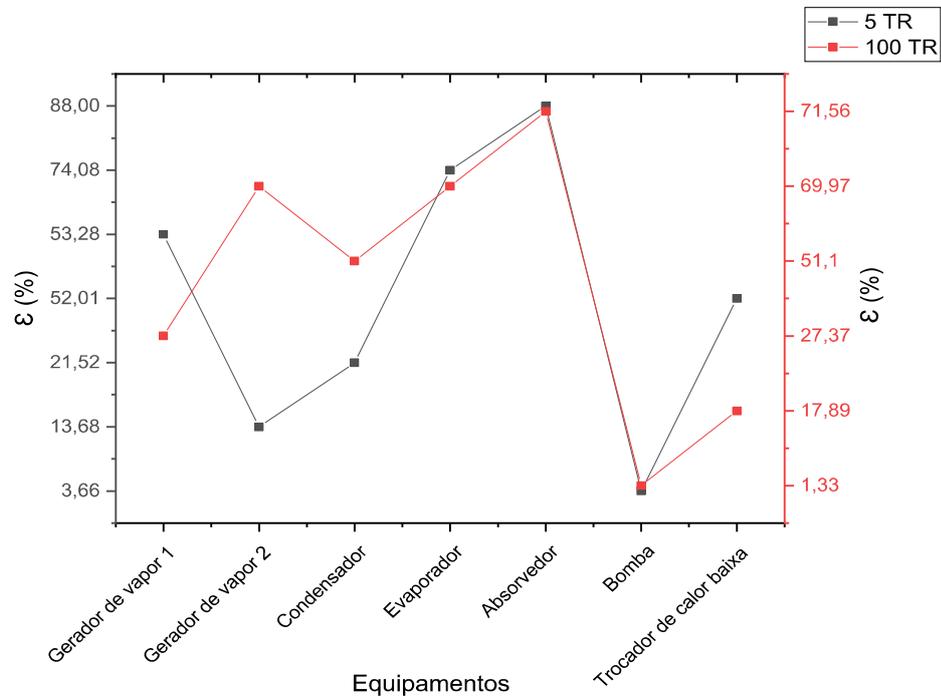
A próxima etapa envolverá uma comparação entre a pesquisa conduzida por CORDEIRO (2018), a qual examinou um chiller de refrigeração por absorção de vapor com capacidade de 5 TR, e o presente estudo que se concentrou em um chiller comercial de 100 TR.

A primeira comparação, figura 47, diz respeito à eficiência exérgica entre os dois chillers, sendo relevante salientar que os dados do trocador de calor de alta do chiller de 100 TR foram excluídos da análise, uma vez que o chiller de 5 TR possui apenas um trocador de calor, designado na comparação como o trocador de calor de baixa. Tal fato pode explicar o aumento da eficiência exérgica no gerador de vapor 2, pois a solução que sai do gerador de vapor 1, recebe energia térmica do trocador de calor de alta, no chiller comercial de 100 TR, algo que não ocorre no chiller de 5 TR.

A figura 47 ainda mostra que no condensador (equipamento que vem logo depois do gerador de vapor 2) teve uma melhora na eficiência exérgica. O condensador desempenha um papel fundamental na remoção de calor do sistema, transformando o vapor refrigerante de volta

para o estado líquido. Ao otimizar a eficiência exergética desse componente, busca-se reduzir as irreversibilidades no processo, maximizando a quantidade útil de trabalho obtida.

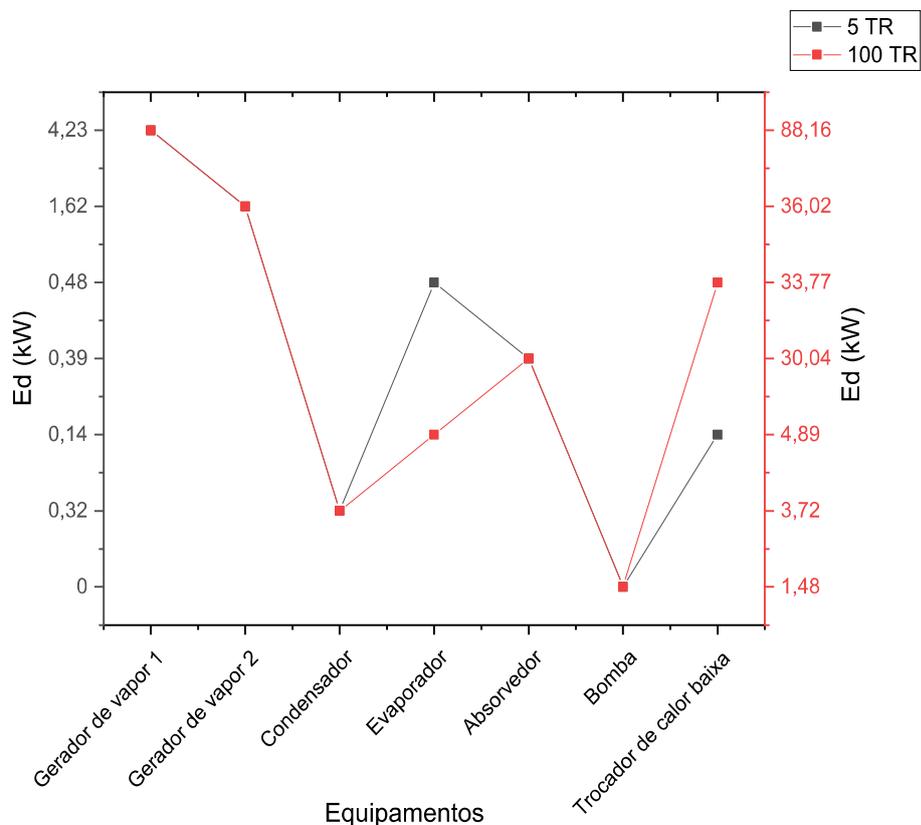
Figura 47 - Comparação da eficiência exergética entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR.



Fonte: Elaborado pelo autor

Uma análise comparativa na figura 48 ratifica o aumento da destruição de exergia devido ao aumento da potência de refrigeração que passou de 5 TR para 100 TR. O crescimento está associado ao aumento dos processos irreversíveis na dissipação de energia na forma de calor. Quanto maior a potência do chiller, maior será a destruição de exergia.

Figura 48 - Comparação da destruição de exergia (Ed) entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR.

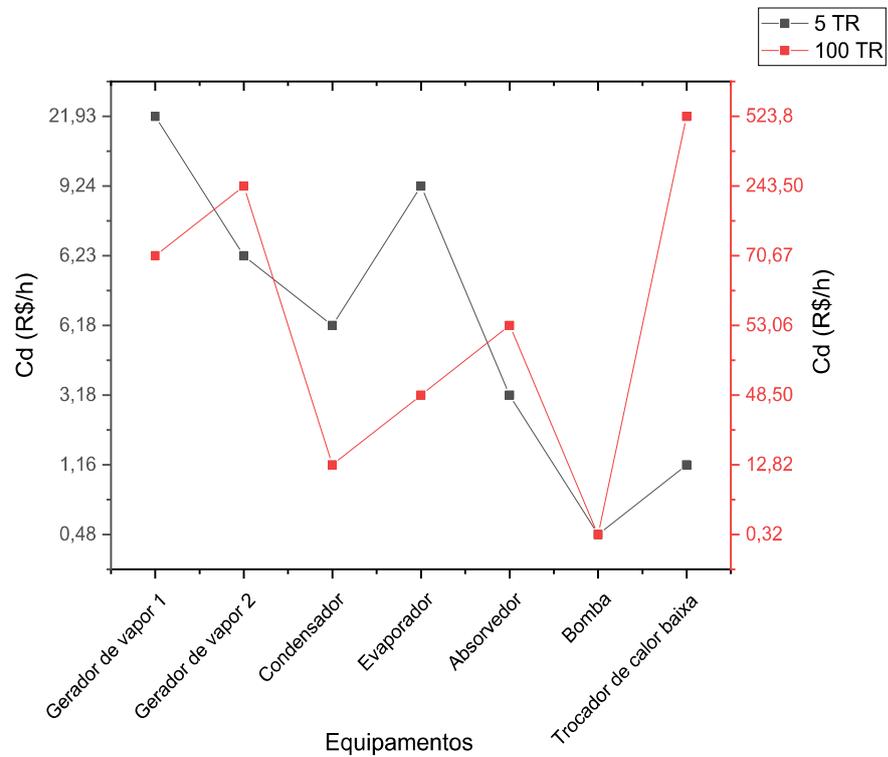


Fonte: Elaborado pelo autor

As demais imagens fornecem comparativos dos resultados das análises das variáveis exergoeconômicas, tais quais: taxa de custo da exergia destruída (C_d), taxa de custos com despesas totais (Z_k), Diferença relativa de custos do produto e combustível (r_k) e do fator exergoeconômico. Cada imagem representa uma perspectiva visual e informativa das métricas exergoeconômicas consideradas no estudo, permitindo uma avaliação abrangente e detalhada das relações entre os diversos parâmetros analisados. Essas representações visuais são essenciais para uma compreensão mais clara das tendências, padrões e impactos das variáveis exergoeconômicas no contexto do sistema em estudo, contribuindo para a interpretação dos resultados e para a identificação de possíveis áreas de otimização e aprimoramento.

Na figura 49, encontra-se a comparação da taxa de custo associada à exergia destruída entre os dois chillers em análise. É evidente que o trocador de calor de baixa no chiller de 100 TR apresenta um custo elevado de exergia destruída, reafirmando a observação anterior e enfatizando a imperatividade de otimizar o equipamento para redução dos custos associados.

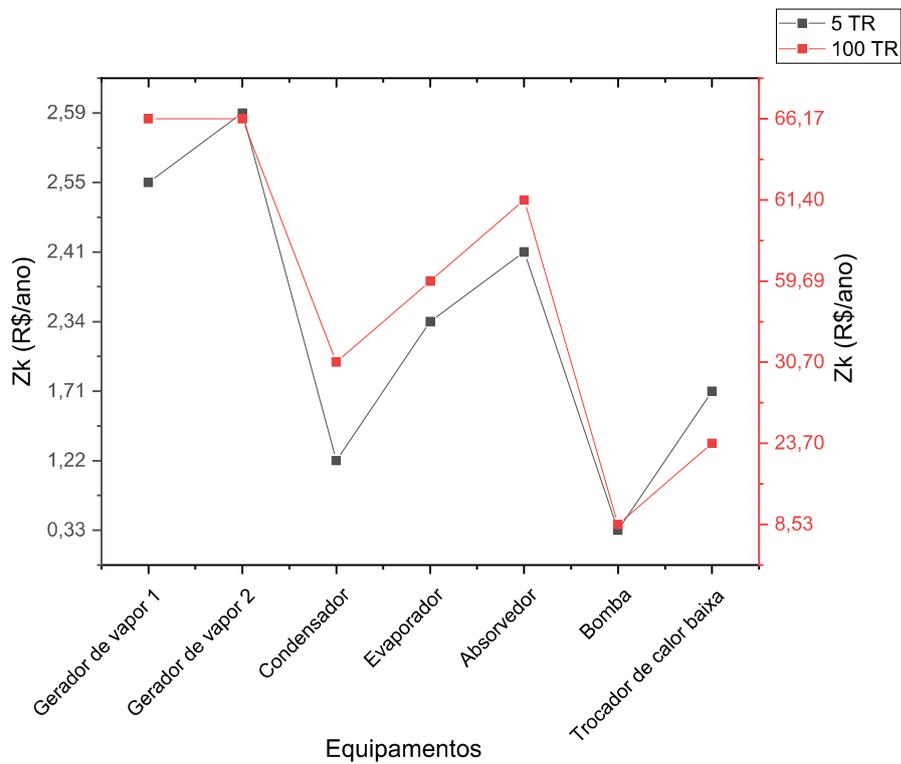
Figura 49 - Comparação da taxa de custo da exergia destruída entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR.



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 50 ilustra o acréscimo nos custos relacionados às despesas totais (aquisição, operação e manutenção) do chiller de 100 TR, uma vez que esse parâmetro se eleva proporcionalmente ao aumento da potência do sistema.

Figura 50 - Comparação da taxa de custo com despesas totais entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR.

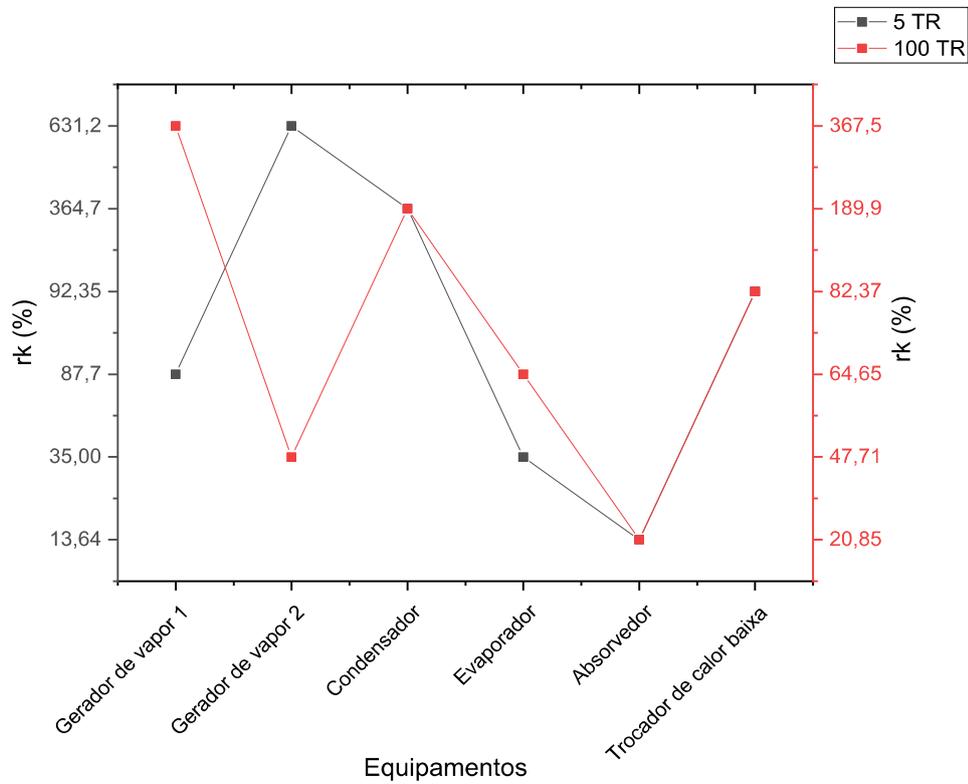


Fonte: Elaborado pelo autor

A variável r_k (Diferença relativa de custos entre produto e combustível) para análise exergoeconômica é destacada na figura 51. No chiller de 5 TR, o gerador de vapor 2 apresentou o valor mais elevado. A elevada disparidade nos custos entre produtos e combustíveis pode ser justificada pela ausência de um trocador de calor no sistema. Se houvesse tal dispositivo, o custo exergético no gerador de vapor 2 seria menor, indicando um aproveitamento mais eficiente da energia proveniente do fluxo do gerador 1. Uma avaliação semelhante pode ser aplicada ao condensador.

Então, exceto o gerador de vapor 2, o método SPECO para análise exergoeconômica apontou os mesmos equipamentos para otimização: Condensador, Trocador de calor de baixa e o Gerador de vapor 1.

Figura 51 - Comparação da diferença relativa de custos do produto e combustível (rk) entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR.

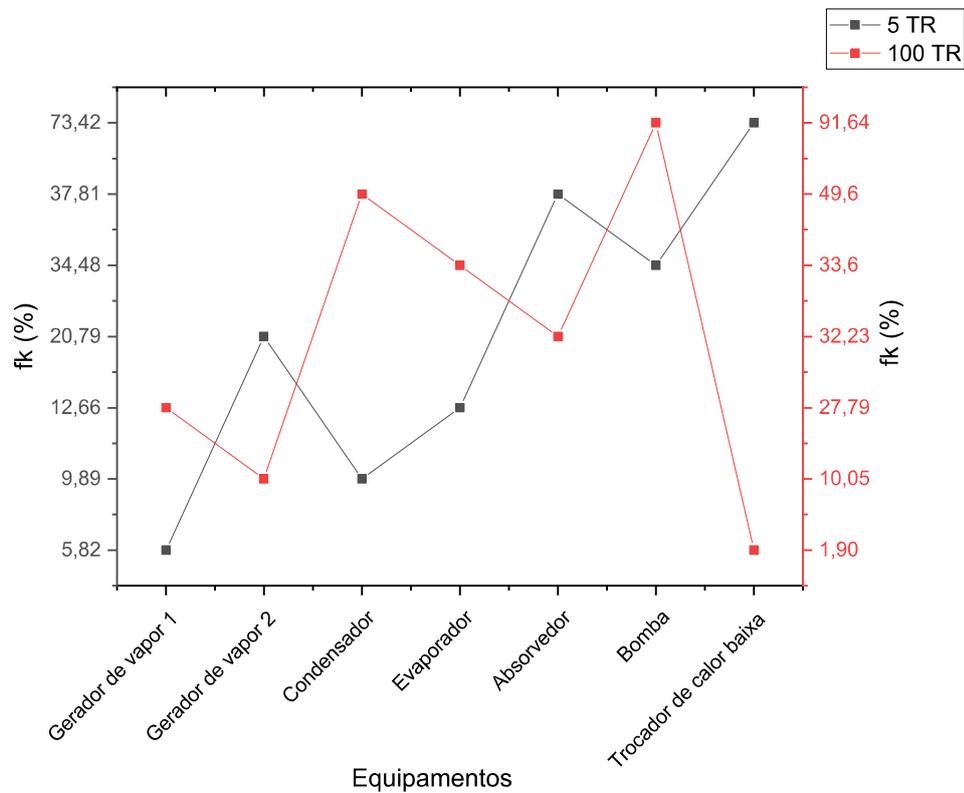


Fonte: Elaborado pelo autor

A última variável que será feita a análise comparativa é o fator exergoeconômico, que segundo MARQUES (2018) fator exergoeconômico (fk) serve para avaliar o desempenho de um equipamento através da junção de duas perspectivas: (i) custos não associados a exergia (investimento, operação e manutenção) e (ii) destruição de exergia e perdas.

Os equipamentos que possuem um valor baixo do fator exergoeconômico deve ter redução nos custos para melhorar a eficiência do equipamento através da diminuição da destruição de exergia. Tais equipamentos são: para o chiler de 5 TR, gerador de vapor 1, condensador e evaporador, e para o chiller de 100 TR, trocador de calor de baixa, gerador de vapor 2 e o gerador de vapor 1.

Figura 52 - Comparação do fator exergoeconômico entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR.



Fonte: Elaborado pelo autor

5.8. AVALIAÇÃO EXERGOAMBIENTAL

A etapa de avaliação exergoambiental são apresentados os resultados do estudo de análise de ciclo de vida (ACV) do chiller de 100 TR, a avaliação exergoambiental por meio do método SPECO, o comparativo dos resultados das variáveis exergoambiental do chiller de 5 TR (com uso do software Simapro 8.4 e o método Eco-indicador 99) e o chiller de 100 TR (com o uso do software OPENLCA e o método RECIPE endpoint).

Os primeiros resultados que serão apresentados a seguir são aqueles decorrentes da análise do ciclo de vida (ACV), que foi realizado com o auxílio da ferramenta OPENLCA 1.10.3 e o método RECIPE endpoint. A unidade funcional considerada é 1 kWh de capacidade de resfriamento fornecida por um chiller de absorção de vapor de 352 kW ao longo de 20 anos.

A tabela 2 ilustra a contribuição dos impactos ambientais totais do chiller de absorção referente a saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos naturais. Os resultados foram

gerados considerando as fases do escopo do presente estudo que são: fabricação, transporte, operação e descarte do chiller de 352 kW (100 TR). Os valores da tabela são apresentados em milipontos (mPt) e porcentagem.

Tabela 14 - Contribuição dos impactos ambientais referente a saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos naturais do chiller de 352 kW.

| Categoria do impacto | Ecossistema | | Saúde Humana | | Recursos | |
|-----------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | mPt | % | mPt | % | mPt | % |
| Ocupação de terras agrícolas | 2,79 | 0,1000 | | | | |
| Mudanças climáticas, ecossistemas | 481,98 | 17,2544 | | | | |
| Ecotoxicidade de água doce | 0,07 | 0,0025 | | | | |
| Eutrofização de água doce | 0,09 | 0,0032 | | | | |
| Ecotoxicidade marinha | 0,01 | 0,0004 | | | | |
| Transformação natural da terra | 37,62 | 1,3468 | | | | |
| Acidificação terrestre | 1,44 | 0,0516 | | | | |
| Ecotoxicidade terrestre | 0,46 | 0,0165 | | | | |
| Ocupação do solo urbano | 9,32 | 0,3336 | | | | |
| Mudanças climáticas, saúde humana | | | 762,54 | 27,2981 | | |
| Toxicidade humana | | | 51,72 | 1,8515 | | |
| Radiação ionizante | | | 0,56 | 0,0200 | | |
| Destruição do ozônio | | | 0,25 | 0,0089 | | |
| Formação de material particulado | | | 218,59 | 7,8253 | | |
| Formação de oxidante fotoquímico | | | 0,88 | 0,0315 | | |
| Esgotamento fóssil | | | | | 1175,24 | 42,0723 |
| Esgotamento de metal | | | | | 49,83 | 1,7839 |
| Total | 533,78 | 19,1088 | 1034,54 | 37,0354 | 1225,07 | 43,8562 |

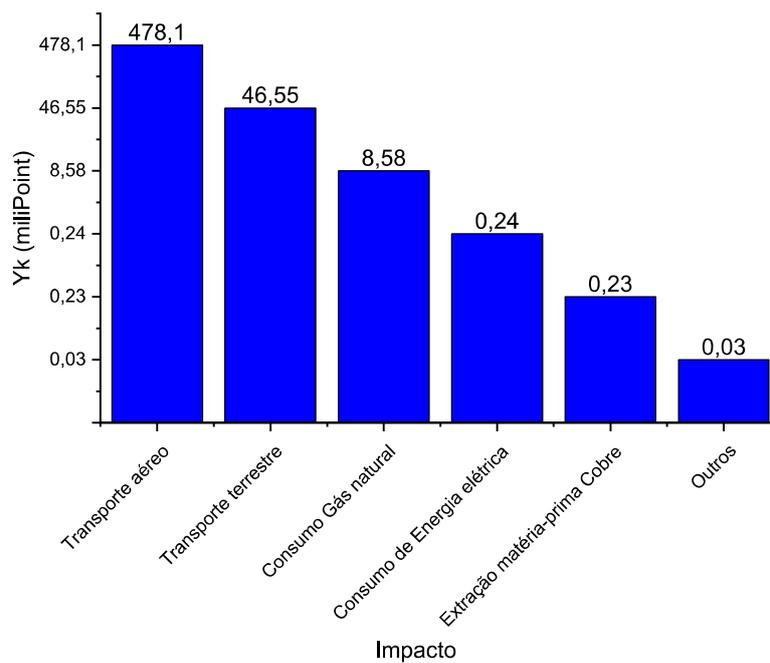
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como era previsto, a maior contribuição dos impactos ambientais foi referente a categoria de recursos com 43,86%, logo em seguida a categoria de saúde humana, com 37,03% e por último a parcela de impacto ambiental do ecossistema que ficou em torno de 19,11%. É importante destacar o baixo valor do impacto na camada de ozônio, cerca de 0,01 %.

As figuras abaixo ilustram as contribuições de maiores relevância referente aos impactos ambiente causados pela fabricação, transporte, operação e descarte do chiller de refrigeração

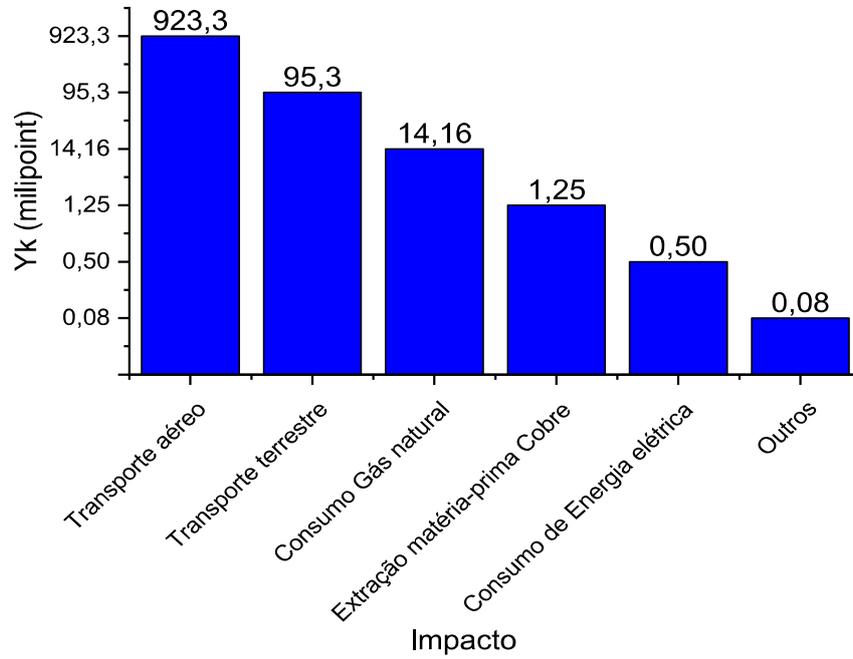
por absorção de vapor de 352 kW. É notável nas figuras que os dois maiores impactos são do transporte aéreo e do transporte terrestre.

Figura 53 - Contribuição dos impactos na qualidade do ecossistema referente a fabricação, operação, transporte e descarte do chiller de 352 kW.



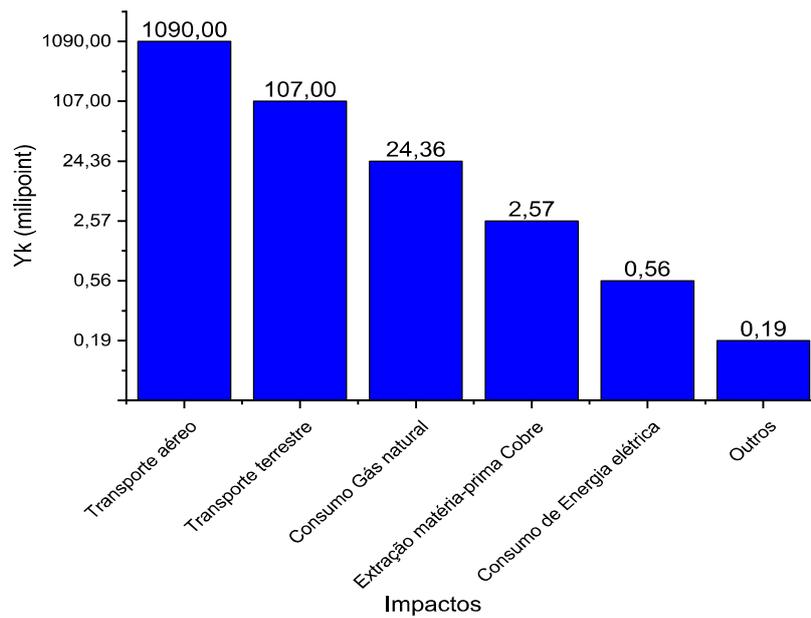
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54 - Contribuição dos impactos na saúde humana referente a fabricação, operação, transporte e descarte do chiller de 352 kW.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55 - Contribuição dos impactos nos recursos referente a fabricação, operação, transporte e descarte do chiller de 352 kW.



Fonte: Elaborado pelo autor.

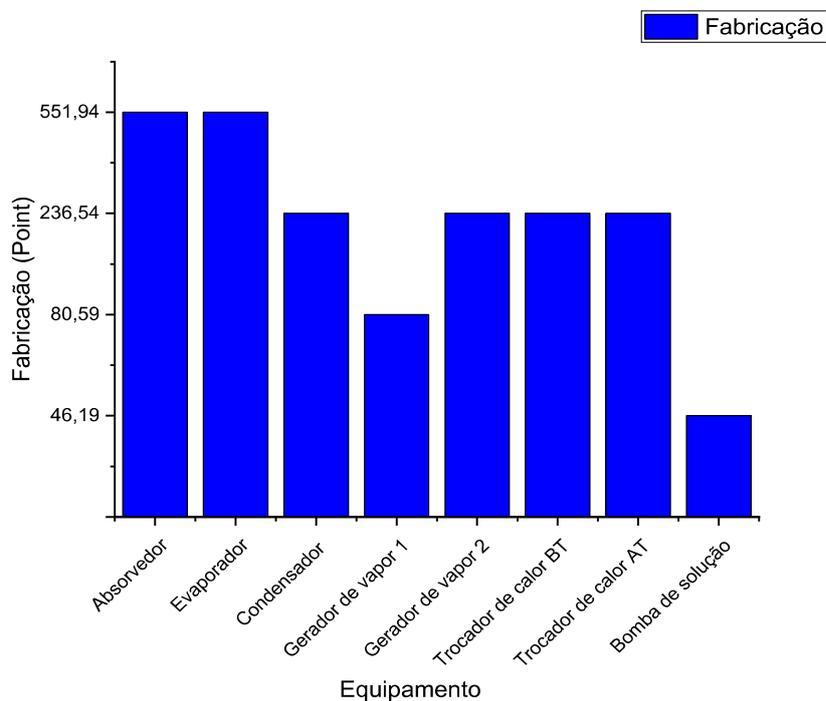
A influência relacionada ao transporte aéreo encontra justificção na distância entre a fábrica de origem do chiller de absorção comercial e o local de destino (local de instalação do chiller), resultando em uma demanda maior de recursos ambientais. Se a fábrica estivesse situada no país de operação do chiller, esse impacto seria atenuado. Quanto à contribuição do impacto proveniente do consumo de gás natural, ela está vinculada ao "compressor térmico" característico dos dispositivos de refrigeração por absorção de vapor, que utiliza energia térmica como fonte de alimentação para o ciclo. Se essa fonte de energia térmica fosse substituída por uma fonte renovável ou aproveitamento de rejeitos térmicos, tal impacto seria reduzido.

5.8.1. Impactos ambientais da fase de fabricação, transporte e operação do chiller de absorção de 352 kW

O objetivo desta seção é fornecer informações detalhadas sobre as diferentes fases descritas no escopo do presente estudo (Figura 44). Conforme apresentado nas Figuras 44 e 45, as principais fases são: a produção de cada componente, o transporte para a instalação da IES, operação do sistema e o descarte. Informações detalhadas sobre os dados de entrada, como materiais, massa dos componentes e distâncias, são apresentadas na Tabela 8.

A figura 56 ilustra os resultados referente a fabricação de cada componente e o valor total da contribuição da fabricação. A unidade de referência para a fabricação foi o kg (quilograma), logo o gráfico mostra que as maiores parcelas de contribuição foram na fabricação do absorvedor e evaporador, pois tais componentes tem como material de fabricação o cobre e o aço laminado. De fato, o cobre caracteriza-se por fases de extração e produção de consumo de energia muito intensivo, o que resulta em elevados impactos ambientais principalmente devido à produção de eletricidade a partir de carvão em países produtores como a China que teve uma quota de 40% do total cobre processado mundialmente em 2019 (IEA, 2021). O gerador de vapor 1, mesmo tendo a maior massa do sistema (900 kg), o impacto é menor pelo fato de que os tubos deste componente serem fabricados com aço inoxidável e o compartimento composto de aço laminado, segundo informações do fabricante (Tabela 9).

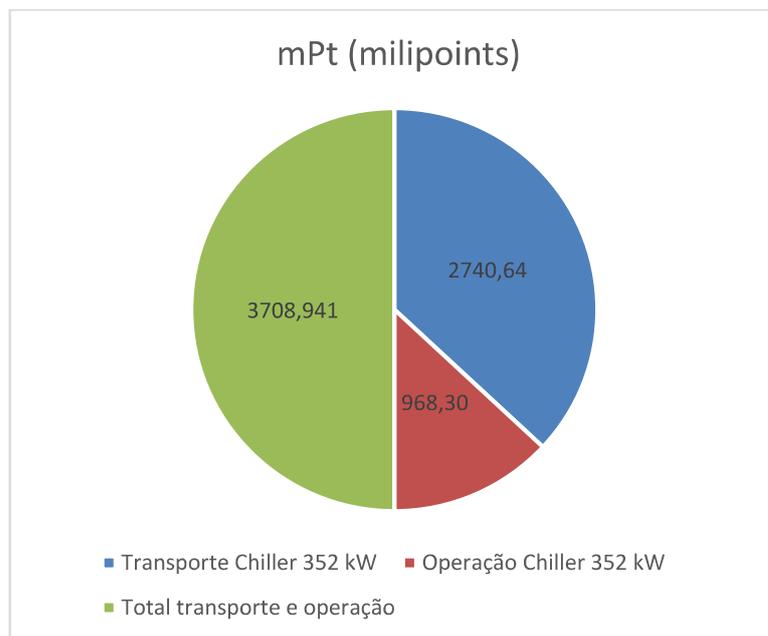
Figura 56 - Resultados detalhado dos impactos ambientais relacionados com a fabricação de cada componente do sistema.



Fonte: Elaborador pelo autor.

A figura 57 mostra as parcelas dos impactos ambientais atribuídos ao transporte e a operação do sistema de refrigeração por absorção de vapor de 352 kW. O maior impacto é referente ao transporte, pois a distância do local de fabricação do chiller e a necessidade do uso de avião para transportar o chiller eleva os impactos ambientais. O uso de gás natural como fonte térmica do chiller aumenta os impactos ambientais, por ser um combustível fóssil formado a partir da decomposição de materiais orgânicos, o uso em excesso causa preocupação ambiental.

Figura 57 - Parcelas de impactos ambientais referente ao transporte e operação do chiller de 352 kW.

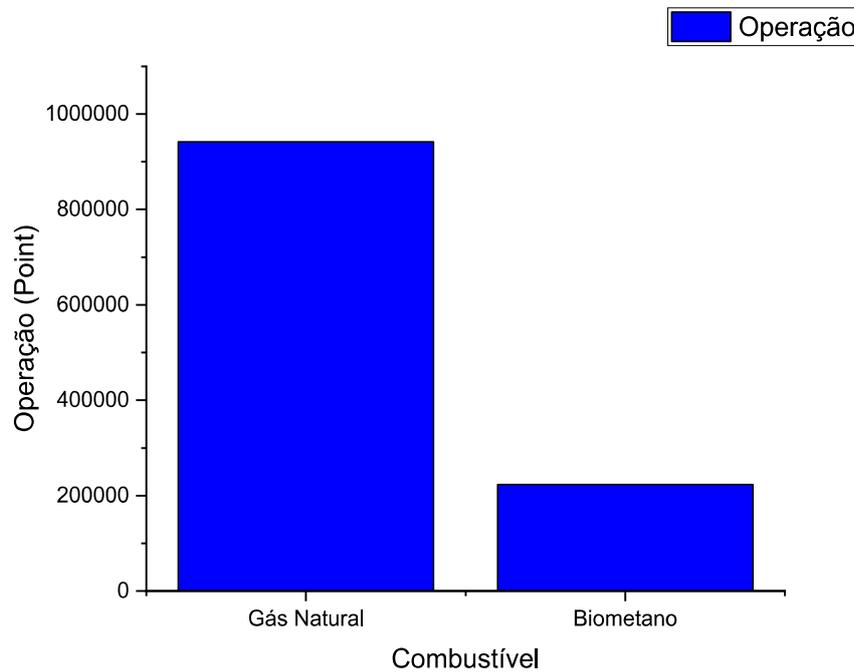


Fonte: Elaborado pelo autor.

A comparação entre a operação do chiller de 352 KW utilizando gás natural e biometano revela importantes considerações ambientais. Ambas as fontes de combustível são derivadas de recursos fósseis e renováveis, respectivamente. O uso de gás natural, embora seja mais comum, está associado a emissões de carbono e outros poluentes, contribuindo para as mudanças climáticas e a degradação da qualidade do ar. Por outro lado, o biometano, obtido a partir de matéria orgânica renovável, apresenta-se como uma alternativa mais sustentável, pois sua produção pode ser neutra em carbono. A utilização do biometano no chiller não apenas reduziria as emissões de gases de efeito estufa, mas também fomentaria a transição para uma matriz energética mais limpa e ecologicamente equilibrada. Portanto, a escolha entre gás natural e biometano para alimentar o chiller não apenas influencia diretamente a eficiência operacional do sistema, mas também determina o seu impacto ambiental, desempenhando um papel crucial na busca por práticas mais sustentáveis no setor de climatização.

A análise comparativa do impacto ambiental do chiller de 352 kW ao longo de um período de 20 anos, utilizando gás natural e biometano, é representada na figura 58. A transição para o biometano como fonte de combustível para a geração de energia térmica demonstra uma diminuição, aproximadamente de 76,32%, nos impactos ambientais. Essa redução sublinha não apenas a eficácia do biometano em termos de desempenho energético, mas também seu papel crucial na mitigação dos efeitos adversos associados ao uso de combustíveis fósseis.

Figura 58 - Estudo comparativo do uso do gás natural e biometano na operação do chiller de 352 kW por um período de 20 anos (tempo de vida do chiller).



Fonte: Elaborado pelo autor.

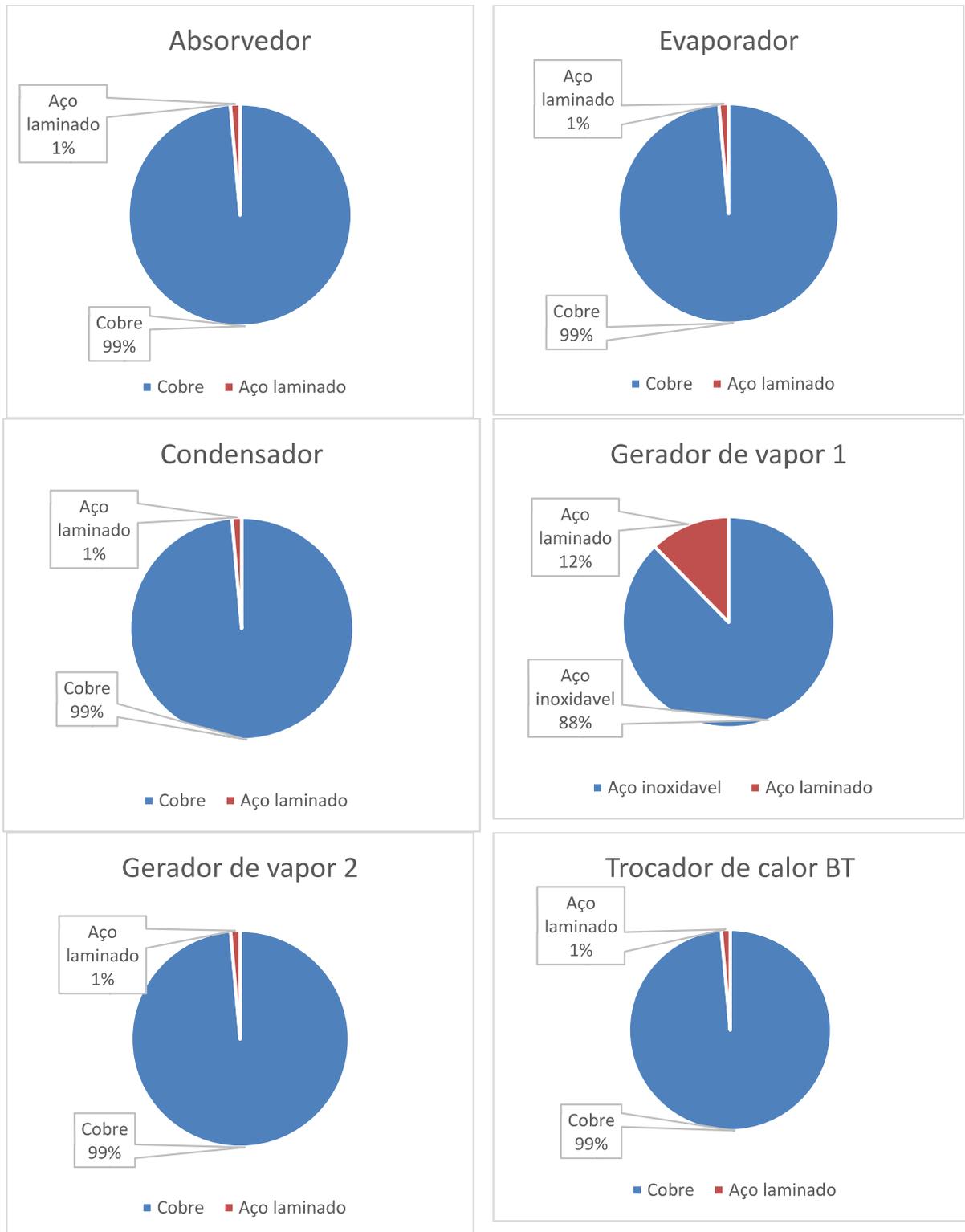
5.8.2. Análise de Dominância

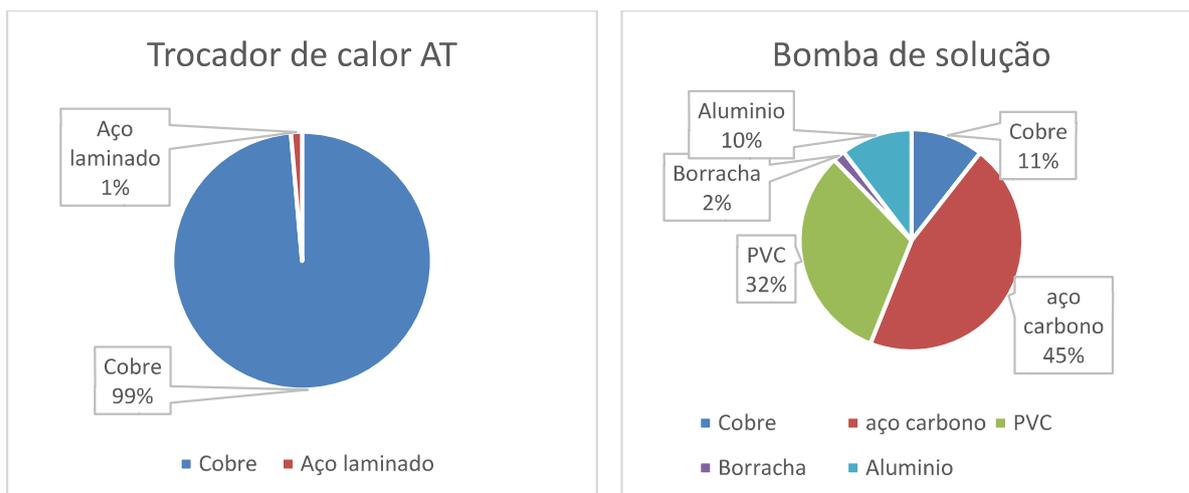
A análise de Dominância emerge como uma abordagem valiosa para discernir os maiores contribuintes para os efeitos ecológicos de um produto ou processo durante uma análise de ciclo de vida. O propósito reside na comparação da relevância relativa de cada componente que integra um determinado objeto de estudo (Baumann et al. 2011). Em consonância com essa definição, esta seção tem como intuito identificar as fontes preponderantes dos efeitos ambientais nas etapas de fabricação, transporte, operação do sistema e descarte delineados no âmbito da pesquisa (Figura 44). Os impactos são delineados por meio dos resultados obtidos por intermédio do método Recipe.

5.8.2.1. Análise de Dominância usando o método Recipe

A figura 59 mostra os maiores causadores de impacto ambiental relacionado a fase de fabricação dos componentes do sistema de refrigeração por absorção de vapor comercial. A unidade de referência é o quilograma (kg) e os resultados são mostrados em porcentagem de impacto ambiental por material em Pt (points).

Figura 59 - Estudo de dominância do processo de fabricação do chiller de refrigeração por absorção de vapor de 352 kW usando o método RECIPE.



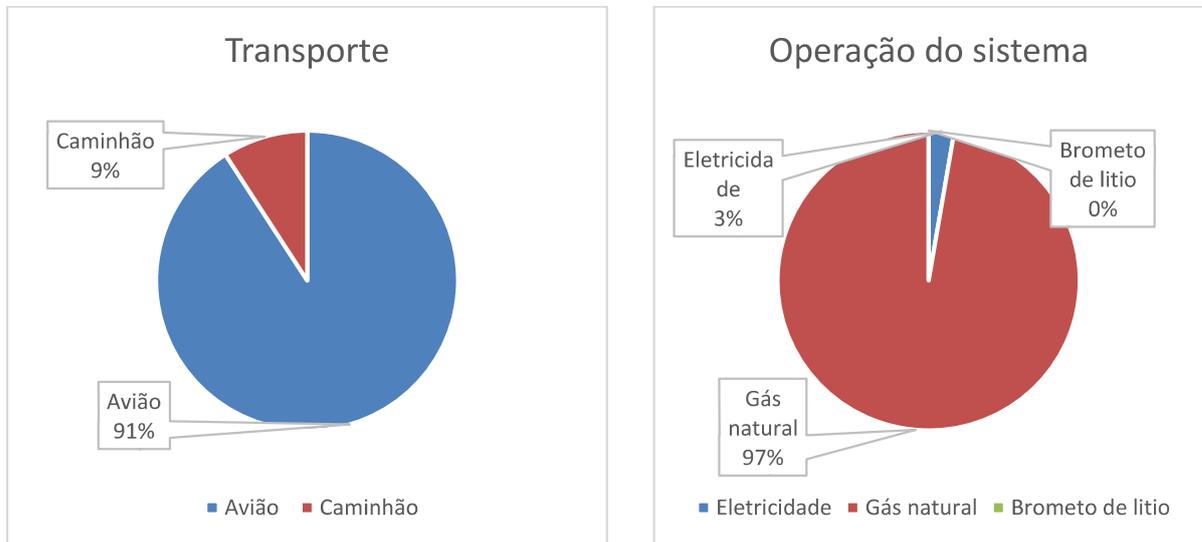


Fonte: Elaborado pelo autor.

A utilização de cobre na produção da maioria dos elementos ocasionou efeitos ambientais, uma vez que o cobre está associado a etapas de extração e fabricação que demandam um elevado consumo energético, principalmente devido à geração de eletricidade a partir de carvão (Dong, 2020), sobretudo em nações produtoras como a China, responsável por 40% do total de cobre processado globalmente em 2019 (IEA, 2021).

O próximo resultado do estudo de dominância visa apresentar os maiores causadores de impacto ambiental relacionado as fases de transporte, operação e descarte do sistema de refrigeração por absorção de vapor comercial. A unidade de referência para o transporte é o t.km (tonelada por quilômetro). No tocante a operação a unidade de referência para o consumo de eletricidade e gás natural é o kWh, para o brometo de lítio é o kg e por fim, para o consumo de água, a unidade é o m³. O valor de referência para o descarte é o kg. Os resultados são mostrados em porcentagem baseado no impacto ambiental em Pt (points).

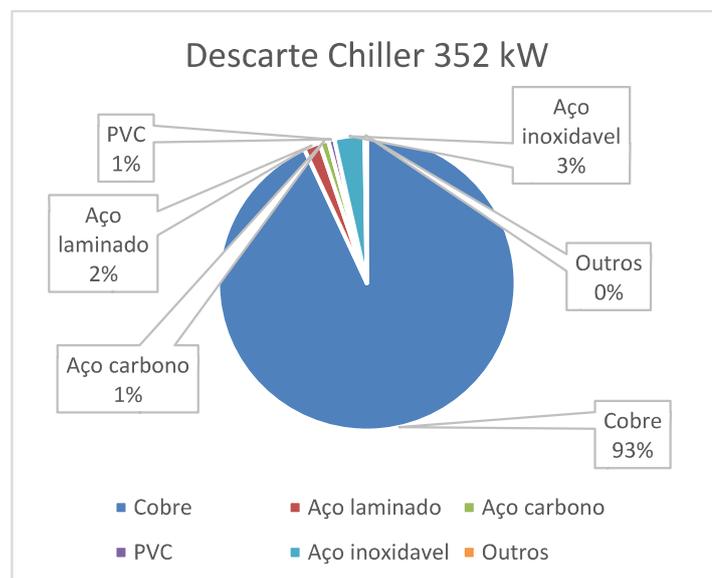
Figura 60 - Estudo de dominância do transporte e operação do chiller de refrigeração por absorção de vapor de 352 kW usando o método RECIPE.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os impactos ambientais do estudo de dominância relacionado ao transporte e operação mostra que para o transporte, o maior impacto é o transporte por via aérea, devido a massa do chiller e a distância da fábrica de referência até o aeroporto de Guarulhos, São Paulo, Brasil. O impacto de maior parcela referente a operação é o uso do gás natural no período de 20 anos (tempo de vida útil do chiller)

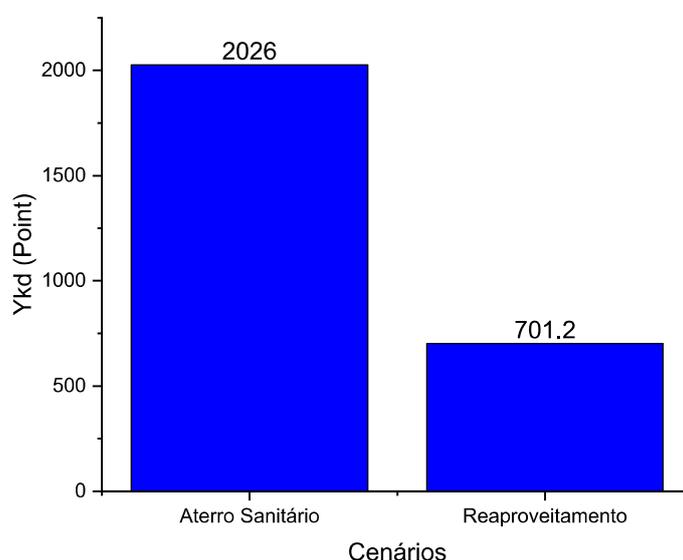
Figura 61 - Estudo de dominância do descarte do chiller de refrigeração por absorção de vapor de 352 kW usando o método RECIPE.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico apresentado na figura 61 revela que a fração de impacto mais significativa no descarte do chiller está relacionada ao cobre, representando uma parcela de 93%. Essa constatação pode ser associada à decisão de destinar o chiller ao aterro sanitário municipal ao término de sua vida útil. Vale destacar que o cobre é um material passível de reciclagem e pode ser separado para coleta seletiva no aterro, prevenindo assim a incineração ou o enterramento do material. A figura 62, utilizada para fins de análise, compara o descarte do cobre em dois cenários. No primeiro cenário, o cobre é destinado ao aterro sanitário municipal, enquanto no segundo cenário, o material é reutilizado. Os dados são expressos em Pt (pontos).

Figura 62 - Estudo comparativo de impacto ambiental de descarte do cobre em dois cenários.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 62 evidencia que a transição do Cenário 1 para o Cenário 2 promove uma redução nos impactos ambientais associados ao descarte do cobre presente na composição do chiller de refrigeração por absorção de vapor. Essa mudança específica resultou em uma diminuição de 34,61% nos impactos, destacando a notável eficácia da proposta. Portanto, a alteração proposta não apenas atesta sua relevância, mas também ressalta seu impacto positivo na mitigação dos efeitos adversos decorrentes do descarte de componentes, reforçando contribuição para práticas mais sustentáveis.

Concluída a fase de análise do ciclo de vida (ACV), em conformidade com os propósitos específicos deste estudo, os resultados dos balanços exergoambientais são agora expostos para

cada volume de controle. Em outras palavras, são delineados os fluxos de entrada e saída relativos a cada componente do sistema abordado no estudo exergoambiental.

Tabela 15 - Resultados do indicador ambiental específico e das taxas de impacto ambiental para cada fluxo do Chiller comercial de 352 kW.

| Pontos | Ex (kW) | b (Pts/kW) | \dot{B} (Pts/h) | Pontos | Ex (kW) | b (Pts/kW) | \dot{B} (Pts/h) |
|--------|---------|------------|-------------------|--------|---------|------------|-------------------|
| 1 | 89,45 | 305,2 | 3,117 | 12 | 72,69 | 1120 | 9,29 |
| 2 | 89,47 | 348,5 | 3,559 | 13 | 80,05 | 5039 | 46,043 |
| 3 | 130,6 | 2793 | 41,643 | 14 | x | 862,69 | 0,0005 |
| 4 | 143,5 | 1616 | 26,480 | 15 | 2,886 | 0 | 0 |
| 5 | 70,99 | 1860 | 15,075 | 16 | 9,7390 | 11167 | 12,415 |
| 6 | 80,68 | 3428 | 31,573 | 17 | 21,05 | 0 | 0 |
| 7 | 39,29 | 3428 | 37,414 | 18 | 5,768 | 0 | 0 |
| 8 | 3,896 | 5039 | 2,241 | 19 | 13,38 | 590,4 | 0,902 |
| 9 | 0,00904 | x | x | 20 | 151,4 | 2,449 | 0,042 |
| 10 | 0,00635 | 5039 | 0,004 | 21 | 30,02 | 2,449 | 0,008 |
| 11 | -16,16 | 5039 | -9,295 | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela a seguir apresenta os principais resultados da análise exergoambiental, incluindo os impactos ambientais específicos dos insumos e produtos, os efeitos causados pela destruição de exergia, a taxa anual de impacto ambiental derivada da análise do ciclo de vida, a diferença relativa nos impactos ambientais e o fator exergoambiental. Assim como na análise exergoeconômica, as unidades dos parâmetros foram ajustadas para facilitar a apresentação dos dados.

Tabela 16 - Resultados da análise ambiental de cada equipamento do Chiller comercial de 352 kW.

| Equipamento | Yk (Pts/ano) | Bd (Pts/ano) | bf (Pts/kJ) | bp (Pts/kJ) | rbk (%) | fbk (%) |
|-------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|---------|---------|
| Gerador de vapor 1 | 34482 | 215,99 | 2,449 | 1047 | 42657 | 99,38 |
| Gerador de vapor 2 | 11699 | 123495,00 | 3428 | 5039 | 46,98 | 8,551 |
| Condensador | 11699 | 3863,00 | 1038 | 5039 | 385,5 | 74,59 |
| Evaporador | 27302 | 24464,00 | 5039 | 9615 | 90,83 | 52,43 |
| Absorvedor | 27302 | 30924,00 | 1030 | 1077 | 4,656 | 46,65 |
| Bomba | 3872 | 4,59 | 3,1 | 21,66 | 29839 | 75,2 |
| Trocador de calor baixa | 11699 | 1477000,00 | 43739 | 8111 | 439,2 | 0,776 |
| Trocador de calor alta | 11699 | 47877,00 | 14915 | 10297 | 30,96 | 31,78 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme evidenciado na tabela anterior, os componentes do sistema de refrigeração por absorção que apresentam a maior taxa de impacto ambiental, segundo o estudo de análise do ciclo de vida, são: Gerador de vapor 1, evaporador e condensador. Essa observação pode ser justificada pelo tamanho do gerador de vapor 1, que é o componente mais massivo do sistema, contribuindo para aumentar o impacto ambiental em todas as fases do ciclo de vida. Além disso, esse componente desempenha um papel substancial na etapa operacional, influenciando a entrada de combustível no sistema e a liberação de gases de exaustão para o meio ambiente.

A diferença relativa dos impactos ambientais do insumo e do produto (rbk) reflete a eficácia ambiental do dispositivo. À medida que os números aumentam, cresce a importância de aprimorar o desempenho ambiental. Na última coluna, encontram-se os valores do fator exergoambiental. Números mais baixos indicam a necessidade de aprimoramento, seja pela diminuição do impacto ambiental do dispositivo ou pela redução da degradação da exergia ocorrida no mesmo.

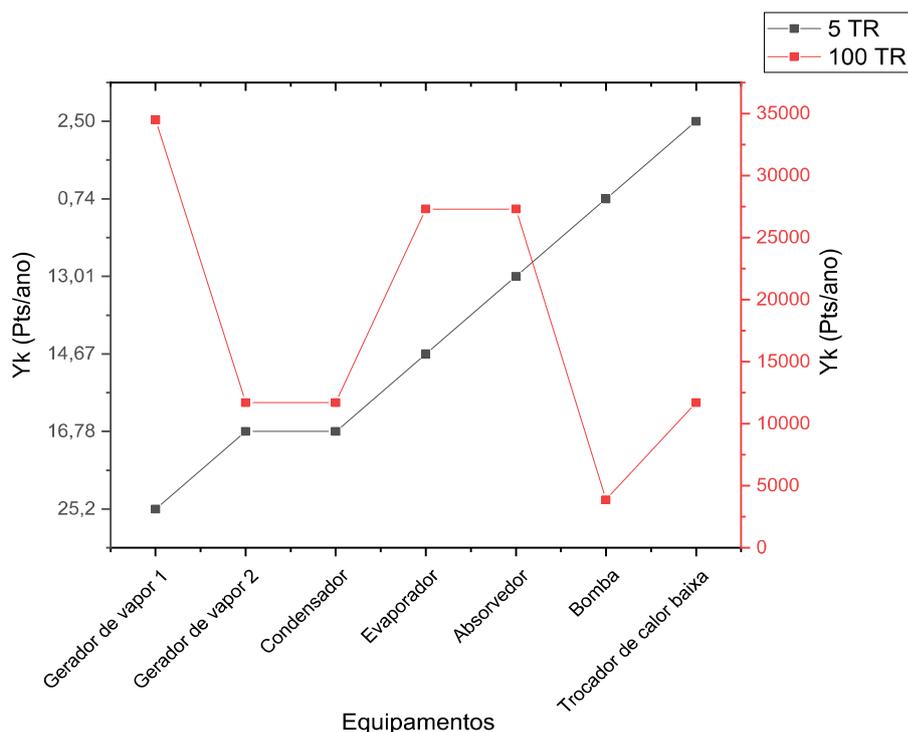
Ainda na tabela 15, torna-se possível identificar os equipamentos que demandam aprimoramentos por meio da análise da diferença relativa de impacto ambiental. Dessa forma, os equipamentos são os seguintes: 1) Gerador de vapor 1; 2) Trocador de calor de baixa; 3) Condensador. Os equipamentos que necessitam de aprimoramentos conforme o fator exergoambiental são: 1) Trocador de calor de baixa; 2) Gerador de vapor 2; 3) Trocador de calor de alta.

A seguir serão expostos os comparativos da análise exergoambiental entre o chiller de 5 TR e o chiller de 100 TR.

A primeira comparação diz respeito à taxa de impacto ambiental (Y_k) entre os dois chillers. Para o chiller de 5 TR, a avaliação do Y_k foi conduzida no software Simapro, enquanto para o chiller de 100 TR, essa análise foi executada por meio do software OpenLCA. Ambos os sistemas operam de maneira semelhante, com a distinção de que o chiller de 100 TR incorpora um trocador de calor adicional para pré-aquecer a solução de brometo de lítio.

Conforme esperado, o chiller de 100 TR apresenta uma taxa de impacto ambiental mais elevada em comparação ao chiller de 5 TR. Em ambos os chillers, destaca-se que o gerador de vapor registra o valor mais alto de Yk.

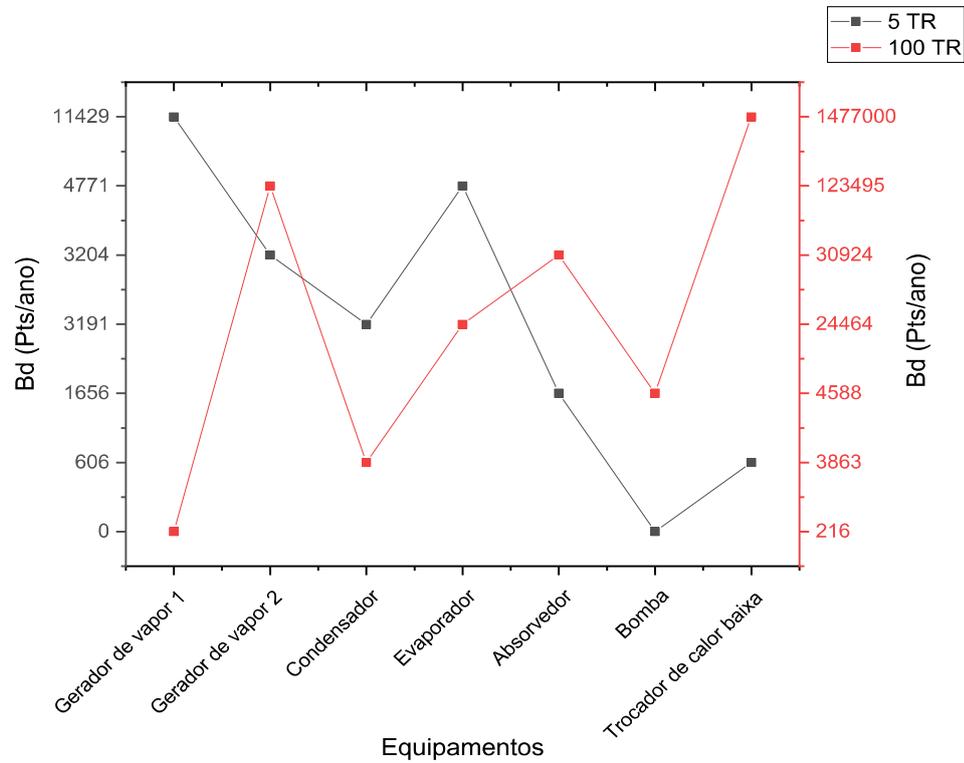
Figura 63 - Comparação da taxa de impacto ambiental entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto à segunda comparação, que diz respeito à taxa de impacto ambiental associada à destruição exergética, no chiller de 5 TR, o Gerador de vapor 1 registrou o maior valor. Isso ocorre porque esse chiller possui apenas um trocador de calor para pré-aquecer a solução, o que demanda mais combustível para liberar a água do brometo de lítio no Gerador de vapor 1. Já no chiller de 100 TR, o valor mais elevado foi observado no trocador de calor de baixa.

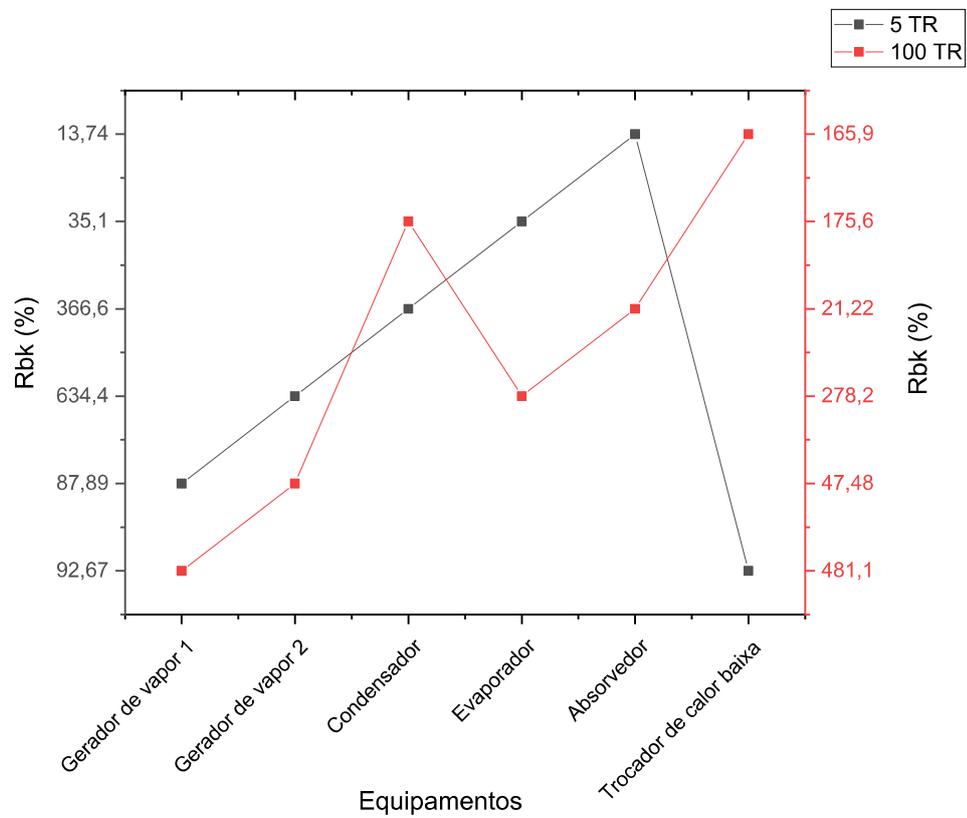
Figura 64 - Comparação da taxa de impacto ambiental associada a destruição exergética (Bd) entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise da diferença relativa de impacto ambiental (rk) é apresentada na figura abaixo. No chiller de 5 TR, os três maiores valores estão associados aos equipamentos: Gerador de vapor 2, condensador e trocador de calor de baixa (solução). Por outro lado, no chiller de 100 TR, os três maiores valores referem-se aos seguintes equipamentos: Gerador de vapor 1, trocador de calor de baixa e condensador. Consequentemente, é imperativo otimizar esses equipamentos nos respectivos chillers.

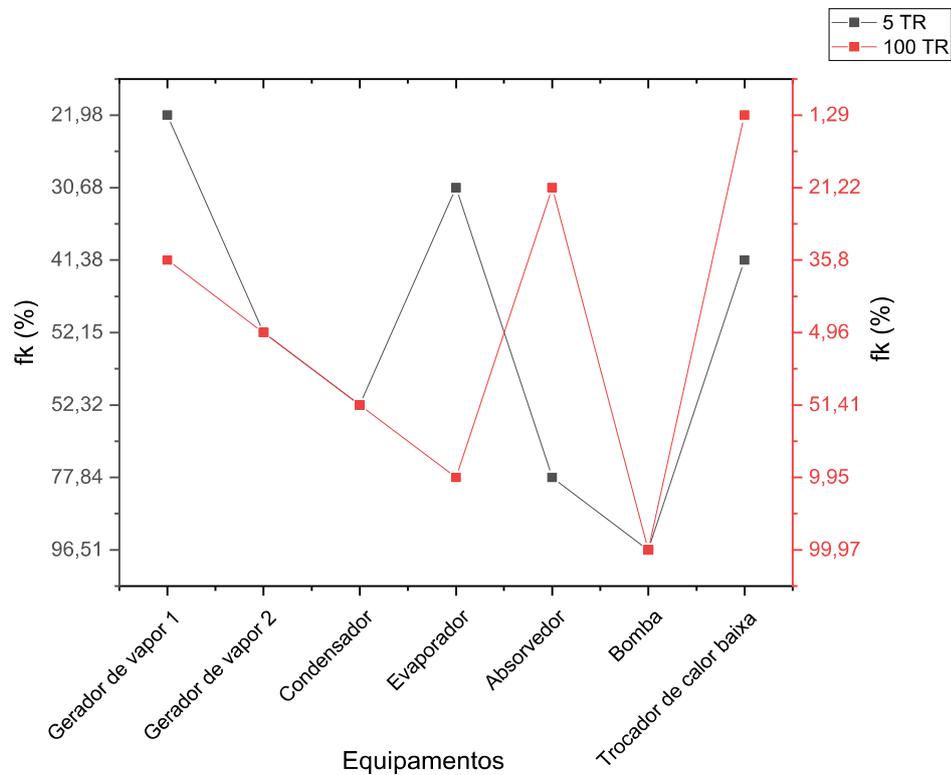
Figura 65 - Comparação da diferença relativa de impacto ambiental (rk) entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A última comparação de resultados refere-se à variável exergoambiental, conhecida como fator exergoambiental. Quando os valores desse fator são baixos para um determinado equipamento, indica-se a necessidade de otimização. Ao analisar a figura abaixo, no chiller de 5 TR, os equipamentos que demandam otimização são: Gerador de vapor 1, evaporador e trocador de calor de baixa. Já para o chiller de 100 TR, os equipamentos que necessitam de otimização são: Trocador de calor de baixa, Gerador de vapor 2 e o absorvedor.

Figura 66 - Comparação do fator exergoambiental (fk) entre os dois chillers, 5 TR CORDEIRO (2018) e o de 100 TR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A realização de comparações entre chillers desempenha um papel importante no campo da eficiência energética e gestão ambiental. Essas análises fornecem ideias valiosas sobre o desempenho relativo dos sistemas de refrigeração, permitindo a identificação de áreas que demandam otimização. Ao examinar fatores como a taxa de impacto ambiental, a destruição exérgica e o fator exergoambiental, é possível determinar quais componentes dos chillers contribuem significativamente para a eficiência global e para o impacto ambiental associado. Essa abordagem sistemática não apenas orienta a melhoria contínua dos equipamentos, mas também respalda a tomada de decisões informadas no planejamento e na implementação de estratégias sustentáveis em sistemas de refrigeração, promovendo a redução do consumo de energia e minimizando os impactos ambientais associados à operação desses sistemas. Dessa forma, as comparações entre chillers desempenham um papel fundamental na busca por soluções mais eficientes e ecologicamente responsáveis no âmbito da climatização e refrigeração industrial.

A ausência de trabalhos semelhantes na literatura que integrem as análises exergoeconômica e exergoambiental em sistemas específicos como os analisados e o método utilizado, dificulta uma comparação direta dos resultados. Ademais, a fase de prototipagem do chiller em desenvolvimento implica desafios técnicos que podem influenciar os resultados obtidos. Outra limitação foi a abordagem em um cenário específico de operação, o que restringe a generalização das conclusões para outras condições ou aplicações. Além disso, o uso de combustíveis renováveis, como o biometano, pode ser um diferencial ambiental interessante, com potencial para mitigar emissões e tornar a instalação mais sustentável. Esse tipo de análise pode beneficiar o avanço da tecnologia em refrigeração por absorção, promovendo soluções mais eficientes e ambientalmente responsáveis para o setor energético.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este estudo teve como objetivo principal analisar dois ciclos de refrigeração por absorção de duplo efeito em série, empregando como fluido de trabalho o par água/brometo de lítio. Um dos ciclos corresponde ao protótipo em desenvolvimento na Recogas, com capacidade de 5 TR, enquanto o outro abrange um chiller comercial com capacidade de 100 TR. O modelo adotado para a elaboração deste trabalho foi desenvolvido por Georgio Tsatsaronis, visando avaliar economicamente e ambientalmente sistemas térmicos em conformidade com os fluxos exergéticos. Essas análises, denominadas exergoeconomia e exergoambiental, possuem abordagens específicas. A análise exergoeconômica busca atribuir custos aos fluxos de exergia do sistema, enquanto o estudo exergoambiental tem como objetivo atribuir fatores de impacto ambiental aos referidos fluxos de exergia.

Este estudo resultou na criação de três códigos computacionais na plataforma EES (Solução de Equações de Engenharia) para a análise Termodinâmica, Exergoeconômica e Exergoambiental de uma unidade de refrigeração por absorção de vapor, destinada a suprir a demanda de água gelada para a climatização em um instituto de pesquisa. Além disso, destacou-se a implementação de uma rotina computacional na plataforma OpenLCA para a investigação do ciclo de vida em chillers de refrigeração por absorção de vapor.

A promoção do estudo de tecnologias voltadas para a produção de frio, com ênfase na redução do consumo de energia elétrica e dos impactos ambientais, revela-se como uma iniciativa interessante. Este objetivo não apenas responde à necessidade imperativa de enfrentar os desafios globais relacionados à eficiência energética e à sustentabilidade ambiental, mas também abre caminho para inovações. Ao encorajar a pesquisa e o desenvolvimento nesse campo, estimula as ações para soluções mais inteligentes, ecoeficientes e alinhadas com os

princípios de conservação ambiental. Este compromisso não só impulsiona avanços tecnológicos, mas também contribui para uma abordagem mais consciente e responsável em relação aos recursos naturais, consolidando, assim, um caminho rumo a um futuro mais sustentável e equitativo.

A proposta de alternativas tecnológicas para atender às demandas de água gelada destinada à climatização representa uma abordagem estratégica e inovadora. Ao buscar soluções além dos métodos convencionais, é aberto o espaço para a implementação de tecnologias mais eficientes e sustentáveis. A consideração de alternativas não apenas visa otimizar o suprimento de água gelada, mas também contribui para a mitigação dos impactos ambientais e a eficiência no consumo de recursos. Nesse contexto, o desenvolvimento e a adoção de tecnologias inovadoras não só atendem às necessidades presentes de climatização, mas também posicionam as práticas relacionadas à gestão térmica em consonância com os imperativos contemporâneos de sustentabilidade. Este enfoque proativo não apenas antecipa desafios futuros, mas também promove a criação de ambientes mais eficientes e ecologicamente equilibrados, demonstrando a importância da busca por alternativas tecnológicas na construção de um futuro mais sustentável.

As vantagens dos sistemas de refrigeração por absorção de vapor representam um avanço no campo da gestão térmica, destacando-se por sua capacidade de aproveitamento energético e impacto ambiental reduzido. Ao usar energia proveniente de fontes menos poluentes, esses sistemas proporcionam uma economia de eletricidade, contribuindo não apenas para a redução de custos operacionais, mas também para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Embora os sistemas de refrigeração por absorção de vapor possam apresentar desafios operacionais específicos, como complexidade e requisitos de manutenção, as vantagens associadas superam esses obstáculos, justificando o interesse contínuo e investimentos em pesquisa e desenvolvimento. Em última análise, esses sistemas emergem como catalisadores essenciais na transição para uma abordagem mais sustentável e inteligente no gerenciamento térmico, contribuindo para a construção de um futuro onde o aproveitamento energético e a preservação ambiental caminham lado a lado.

À medida que avançamos para um futuro cada vez mais centrado na busca por alternativas sustentáveis, a criação de ferramentas computacionais especializadas como essa desempenha um papel fundamental na promoção da eficiência, responsabilidade ambiental e avanço contínuo nas tecnologias de refrigeração.

A avaliação utilizando a primeira lei da termodinâmica revelou os desfechos dos fluxos térmicos em cada componente da unidade de refrigeração por absorção de vapor de escala comercial. Esses desfechos oferecem informações, por exemplo, sobre a quantidade de energia associada aos produtos de combustão, a quantidade de energia a ser removida do ambiente a ser resfriado e a quantidade de calor introduzida no sistema pela ação do combustível.

Na análise qualitativa em cada volume de controle, conduziu-se a avaliação exergetica, utilizando a segunda lei da termodinâmica. Por meio dessa análise, calculou-se a exergia da combustão do gás natural. Além disso, foram estabelecidas as exergias de fluxo, tanto na entrada quanto na saída, em cada componente do sistema de refrigeração.

Através da Análise Exergoeconômica, foi possível estabelecer uma correlação entre os valores exergeticos de cada fluxo do sistema e seus equivalentes monetários. No aspecto financeiro, foi essencial contabilizar as tarifas dos insumos do chiller, incluindo o consumo de gás natural e energia elétrica, assim como os custos associados à aquisição, manutenção e operação do chiller de refrigeração em análise.

Os gastos referentes aos investimentos nos equipamentos são submetidos a uma avaliação de amortização, utilizando o fator de recuperação de capital. Este método busca remunerar o capital investido ao longo de um determinado período, considerando uma taxa de juros específica. Dessa maneira, é possível identificar os custos monetários associados aos equipamentos em momentos específicos.

Com base na análise da diferença entre o custo médio específico do produto e do insumo, os equipamentos que demandam otimização são identificados como o Gerador de Vapor 1, o Condensador e o Trocador de Calor de Baixa. Por outro lado, o fator exergoeconômico indica que os seguintes equipamentos são passíveis de otimização: Trocador de Calor de Baixa, Gerador de Vapor 2 e Trocador de Calor de Alta.

A comparação dos resultados entre o chiller de 5 TR e o chiller de 100 TR revela algumas diferenças no desempenho e na eficiência térmica desses sistemas de refrigeração. Notavelmente, destaca-se o papel do segundo trocador de calor no chiller de 100 TR, que desempenha um papel na dissipação de calor e na eficiência global do sistema. Enquanto o chiller de 5 TR lida com demandas térmicas em menor escala, o chiller de 100 TR enfrenta desafios distintos devido à sua capacidade maior.

Dada a crescente ênfase nas discussões acerca dos impactos ambientais e do desenvolvimento sustentável nos meios de produção, sobretudo no contexto dos sistemas térmicos, este estudo foi concebido para realizar uma avaliação do ciclo de vida de um chiller de refrigeração por absorção de vapor. Este chiller, com uma capacidade de 352 kW, considerado para funcionar na Universidade Federal da Paraíba. Essa pesquisa busca fornecer uma análise dos aspectos ambientais e sustentáveis associados ao ciclo de vida deste equipamento, contribuindo assim para a tomada de decisões informadas e ecologicamente responsáveis no âmbito da gestão térmica.

O escopo estabelecido para este estudo abrange diversos aspectos, incluindo a fase de fabricação dos componentes que constituem o chiller de absorção de vapor, o transporte integral do chiller, os impactos decorrentes da operação do equipamento e o processo de descarte. Essa abordagem abrangente visa analisar todo o ciclo de vida do chiller, desde sua origem na fabricação até seu fim, considerando os diversos estágios e suas implicações ambientais.

A análise dos impactos ambientais globais evidenciou uma contribuição por parte dos recursos, totalizando 43,8% dos impactos totais. Essa predominância é principalmente atribuída à utilização do gás natural que é um combustível fóssil ao longo do ciclo de vida operacional do chiller de absorção de vapor. No que diz respeito aos impactos na saúde humana, observou-se uma proporção significativa de 37,0%, enquanto os impactos no ecossistema representaram 19,1%. Embora as categorias mencionadas (Saúde humana e Ecossistema) contribuam com uma parcela menor do total de impactos, sua soma equivale a mais de 50% dos impactos totais, destacando a importância desses fatores em conjunto na avaliação abrangente dos impactos ambientais do chiller.

No que diz respeito às etapas de produção e transporte, os impactos geralmente seguem uma relação direta com a massa de cada componente. No entanto, ao aplicar o método ReCiPe, observou-se uma modificação nessa proporção, especialmente para os componentes que contêm aço e cobre em sua composição. Em relação à fase de operação, as maiores contribuições de impacto são atribuídas ao combustível utilizado como fonte de calor.

A comparação entre o uso de gás natural e biometano no chiller de absorção destaca considerações no contexto da sustentabilidade e eficiência energética. O gás natural, frequentemente utilizado como fonte de calor no processo de absorção, é uma opção convencional, porém, sua extração e utilização contribuem para emissões de gases de efeito estufa. Por outro lado, o biometano, derivado de fontes renováveis, como resíduos orgânicos e biomassa, emerge como uma alternativa mais sustentável, reduzindo as pegadas de carbono associadas ao funcionamento do chiller. Além disso, o biometano apresenta potencial para promover a transição para uma matriz energética mais limpa e renovável. Ao considerar a viabilidade econômica e os benefícios ambientais, a escolha entre gás natural e biometano no chiller de absorção representa uma decisão estratégica para otimizar a eficiência operacional e alinhar o sistema térmico às metas de sustentabilidade.

Ao analisar o desempenho operacional do chiller ao longo de um período de 20 anos, observou-se que o gás natural acumulou 942,100 points, enquanto o biometano totalizou 223,100 points. Notavelmente, a adoção do biometano como fonte de energia térmica resultou em uma redução de 76,32% nos impactos ambientais ao longo da vida útil do chiller. Essa comparação destaca claramente a vantagem ambiental do biometano em relação ao gás natural, reforçando sua contribuição positiva para a sustentabilidade do sistema térmico em questão.

No estudo de dominância, a fase de fabricação, destaca-se o uso de cobre nos tubos dos componentes, responsável por mais de 90% dos impactos ambientais. No transporte, a principal fonte de impacto é o transporte aéreo, contribuindo com 91% dos impactos. Durante a operação, o destaque vai para o gás natural utilizado na queima direta no gerador de vapor 1, representando 97% dos impactos ambientais associados ao funcionamento do chiller. Na etapa de descarte, o cobre novamente lidera, e um estudo específico analisou dois cenários distintos. No Cenário 1, em que o cobre é descartado junto com outros componentes em um aterro

sanitário, o processo resulta em 2026 pontos. No Cenário 2, que propõe a retirada e reutilização do cobre, o impacto é reduzido para 701,20 pontos, representando uma diminuição de 34,61%.

A conclusão da simulação da unidade inclui a avaliação exergoambiental, a qual emprega princípios e equações semelhantes aos utilizados na avaliação exergoeconômica. A análise do ciclo de vida de cada equipamento, um dos parâmetros de entrada para essa simulação, foi conduzida com o suporte do software de código aberto OpenLCA 3.30.1.

Com base na avaliação da diferença relativa de impacto ambiental, identificam-se como prioritários para otimização o Gerador de Vapor 1, o Condensador e o Trocador de Calor de Baixa. Por outro lado, ao considerar o fator exergoambiental, observa-se que os equipamentos com potencial para otimização são o Trocador de Calor de Baixa, o Gerador de Vapor 2 e o Trocador de Calor de Alta.

A escolha dos equipamentos para otimização, tanto na análise exergoeconômica quanto na exergoambiental, reflete uma abordagem abrangente e integrada na busca por eficiência energética e redução do impacto ambiental. A seleção comum dos equipamentos, como o Trocador de Calor de Baixa, Gerador de vapor1, Gerador de Vapor 2, condensador e o Trocador de Calor de Alta, evidencia a sinergia entre os objetivos econômicos e ambientais. Ao priorizar esses componentes em ambas as análises, a estratégia de otimização visa não apenas maximizar a eficiência energética e econômica, mas também minimizar os efeitos adversos ao meio ambiente. Essa abordagem integrada reforça o compromisso com práticas sustentáveis e destaca a importância de considerar tanto os aspectos econômicos quanto os ambientais no processo decisório para melhorar o desempenho global do sistema.

As contribuições fundamentais desta tese de doutorado compreendem:

1. A formulação de equações auxiliares que viabilizam a aplicação do método SPECO em chillers de refrigeração por absorção de vapor em escala comercial.
2. Informações sobre os impactos ambientais causados por chillers de absorção de vapor com potência de 100 TR, obtidos por meio do estudo do ciclo de vida.

3. A elaboração de um modelo decisório e três códigos computacionais dedicados à avaliação termodinâmica, exergoeconômica e exergoambiental de chillers de refrigeração por absorção de vapor.

Como sugestões e orientações para futuras pesquisas, destacam-se:

- Aplicar a base de dados desenvolvida, composta por programas e equações, em ciclos de refrigeração por absorção, abrangendo configurações em paralelo, triplo efeito, assim como em ciclos que envolvam diferentes fluidos de trabalho.
- Utilização de modelos adicionais, como o Modelo E, H&S e UFS, com o objetivo de realizar uma análise exergoeconômica mais aprofundada. A intenção é desagregar a exergia nos equipamentos dissipativos do ciclo, permitindo uma compreensão mais detalhada e específica da eficiência e dos custos associados a cada componente do sistema.
- Aprimorar o simulador desenvolvido.
- Prosseguir com o desenvolvimento de um banco de dados de impacto ambiental específico para a América Latina.
- Avaliar a viabilidade prática da implementação das sugestões de otimização em escala comercial e seu impacto global no ciclo de vida do equipamento.
- Validação dos resultados obtidos pelo código computacional por meio da avaliação experimental do chiller de refrigeração em estudo.
- Avaliar os impactos ambientais na etapa de operação do chiller usando diferentes fontes de energia como a energia solar térmica e o hidrogênio verde.
- Realizar uma análise de sensibilidade no estudo exergoeconômico e no estudo exergoambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014). NBR ISO 14040: gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida, princípios e estruturas. Rio de Janeiro.

ABNT NBR ISO 14044. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requerimentos e Orientações, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Disponível em . Acesso em 28 maio. 2020.

AHMAD, T.; AZHAR, M.; SINHA, M. K.; MERAJ, M.; MAHBUBUL, I. M.; AHMAD, A. Energy analysis of lithium bromide-water and lithium chloride-water based single effect vapour absorption refrigeration system: a comparison study, **Cleaner Engineering and Technology**, v. 7, p. 100432, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100432>.

ALCÂNCARA, S. C. S.; OCHOA, A. A. V.; COSTA J. Â. P.; MENEZES, F. D.; LEITE G. N. P.; MICHIMA, P. S. A.; MARQUES, A. S. Development of a method for predicting the transient behavior of an absorption chiller using artificial intelligence methods. **Applied Thermal Engineering**, v. 231, p. 120978, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120978>.

ALCÂNTARA, S. C. S.; LIMA, A. A. S.; OCHOA, A. A. V.; LEITE, G. N. P.; COSTA J. Â. P.; SANTOS, C. A. C.; CAVALCANTI, E. J. C.; MICHIMA, P. S. A. Implementation of the characteristic equation method in quasi-dynamic simulation of absorption chillers: modeling, validation and first results. **Energy Conversion and Management**: X, v. 13, p. 100165, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100165>.

BAHLAWAN, Hilal; POGANIETZ, Witold-Roger; SPINA, Pier Ruggero; VENTURINI, Mauro. Cradle-to-gate life cycle assessment of energy systems for residential applications by

accounting for scaling effects. *Applied Thermal Engineering*, v. 171, 2020, p. 115062. ISSN 1359-4311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115062>.

BAUMANN H., BERLIN J., BRUNKLAUS B., LINDKVIST M., LÖFGREN B., TILLMAN AM. The Usefulness of an Actor's Perspective in LCA. In: Finkbeiner M. (eds) *Towards Life Cycle Sustainability Management*. Springer 2011, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1899-9_8.

BEJAN, A., TSATSARONIS, G., MORAN, M. "Thermal Design and Optimization". John Wiley & Sons Inc., 1996.

BELLOS, Evangelos; TZIVANIDIS, Christos. Energetic and financial analysis of solar cooling systems with single effect absorption chiller in various climates. *Applied Thermal Engineering*, v. 126, 2017, p. 809-821. ISSN 1359-4311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.005>.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. *Fundamentals of Thermodynamics*. 7 ed. John Wiley e Sons, 2009.

BOBROFF-MALUF, A. "Exergoeconomia aplicada à cogeração e à geração no setor sucroenergético." *Revista Ciência e Tecnologia*, v. 20, n. 37, pp. 55 – 66, 2017.

BHOWMICK, Amit; KUNDU, Balaram. Avaliação exergoeconômica e otimização de um chiller de absorção de duplo efeito integrado com um sistema de dessalinização por um processo de umidificação-desumidificação. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Jadavpur, 188, Raja S.C. Mallick Rd, Kolkata 700032, West Bengal, Índia.

CAVALCANTI, Eduardo J. Cidade. *Análise exergoeconômica e exergoambiental*. São Paulo: Blucher 2016.

CAVALCANTI, Eduardo J. C.; CARVALHO, Monica; OCHOA, Alvaro A. V. Exergoeconomic and exergoenvironmental comparison of diesel-biodiesel blends in a direct

injection engine at variable loads. *Energy Conversion and Management*, v. 183, 2019, p. 450-461. ISSN 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.113>.

CAVALCANTI, Eduardo J. C.; FERREIRA, João Victor M.; CARVALHO, Monica. On the consideration of different dead states in the exergy assessment of a solar-assisted combined cooling, heat and power system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 47, 2021, p. 101361. ISSN 2213-1388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101361>.

ÇENGEL, Y. A., BOLES, M. A., 2013, “Termodinâmica”, 7º Edition, McGraw-Hill.

CHEN, Lintao; XIAO, Kai; HU, Fan; LI, Yajun. Performance evaluation and optimization design of integrated energy system based on thermodynamic, exergoeconomic, and exergoenvironmental analyses. *Applied Energy*, v. 326, 2022, p. 119987. ISSN 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119987>.

DADPOUR, Daryoush; DEYMI-DASHTERBAYAZ, Mahdi; ABBASZADEH-BAJGIRAN, Majid; SOLTANIYAN, Salman; HOSEINI-MODAGHEGH, Amir; TAYYEBAN, Edris. Proposing a new method for waste heat recovery from the internal combustion engine for the double-effect direct-fired absorption chiller. *Applied Thermal Engineering*, v. 203, 2022, p. 119114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119114>.

DONG, Di; VAN OERS, Laurant; TUKKER, Arnold; VAN DER VOET, Ester. Assessing the future environmental impacts of copper production in China: Implications of the energy transition. *Journal of Cleaner Production*, v. 274, 2020, p. 122825. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122825>.

ECOINVENT (2016). Base de dados, versão 3. Disponível em: < <http://www.ecoinvent.ch> >. Acesso em: 18 de junho de 2019. [Em inglês]

ECO-INDICATOR 99 Manual for Designers - Pre-Sustainability. Available at: [accessed 2.2.2022].

FORTES, A. F. C. (2017). Análise termoeconômica e ambiental de um secador por bomba de calor. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Centro de tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia mecânica.

GARCIA, L. C., 2021, Análise comparativa das emissões de gases de efeito estufa para dois sistemas de climatização em um edifício universitário no Rio Grande do Norte. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB;

GEORGE, G., SCHILLEBEECKX, S.J., LIAK, T.L., 2018, “The management of natural resources: An overview and research agenda”, In: Managing Natural Resources, Cheltenham: Edward Elgar Publishing.

HEROLD, K. E.; RADERMARCHER, R.; KLEIN, S. A. Absorption Chillers and Heat Pumps. CRC Press, USA, 2016.

IEA (2021), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris. Available at: [acessado em 10.3.2022]

IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). (2018). Relatório de Avaliação de Sexto Ano. Genebra, Suíça: IPCC.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040: 2006: environmental management - life cycle assessment - principles and framework. Geneva: ISO; 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14044: 2006: environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines. Geneva: ISO; 2006b.

IEA (2021), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris. Available at: [accessed 10.3.2022].

KOTAS, T. J., 1995, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.

KOTAS, T. J. *The exergy method of thermal power analysis*. Tiptree, Essex, Great Britain: Anchor Brendon Ltd, 1985.

LAZZARETTO, Andrea; TSATSARONIS, George. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, v. 31, n. 8-9, 2006, p. 1257-1289. ISSN 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.03.011>.

LOZANO, M. A.; VALERO, A.; GUALLAR, J. *Teoría del coste exergético, I. Conceptos básicos*. Zaragoza, Espanha. Publicação interna da Universidad de Zaragoza, 1989.

LOZANO, M. A.; VALERO, A. *Teoría del coste exergético, II. Aplicación a pruebas de rendimiento*. Zaragoza, Espanha: Publicação interna da Universidad de Zaragoza, 1989.

LOZANO, M. A.; VALERO, A.; SERRA, L. *Theory of exergetic cost and thermoeconomic optimization*. Zaragoza, Espanha: Publicação interna da Universidad de Zaragoza 1993;

MARQUES, A. S., 2018, *Avaliação exergoeconômica e ambiental de uma unidade de micro-trigeração*. Tese de D.S.c ,— Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB;

MEDEIROS, J. L. N, MARQUES, A. S., DOS SANTOS, C.A.C., 2017, “análise exergoeconômica pelo método speco na cogeração automotiva para uso de um sistema de refrigeração por absorção” In: *13º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica* , Lisboa, Portugal.

MIRZA, Zaid; KOLI, Tushar; AZHAR, Md; THAKUR, Mayur; MAHAJAN, Kishor. A review of multistage vapor absorption refrigeration system under different heat sources. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, v. 08, n. 01, jan. 2024. ISSN 2582-3930. DOI: 10.55041/IJSREM27932

MOHTARAM, Oheil; WU, Weidong; CASTELLANOS, Humberto Garcia; ARYANFAR, Yashar; AL MESFER, Mohammed K.; DANISH, Mohd; IRSHAD, Kashif. Enhancing energy efficiency and sustainability in ejector expansion transcritical CO₂ and lithium bromide water vapour absorption refrigeration systems. *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 43, 2023, p. 101983. ISSN 2451-9049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101983>.

MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N., 2016, Princípios de Termodinâmica para Engenharia. 6^a Edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ.

NAGRAJ, S. M.; KOMMADATH, R.; KOTECHA, P.; ANANDALAKSHMI, R. Multi-objective optimization of vapor absorption refrigeration system for the minimization of annual operating cost and exergy destruction, **Journal of Building Engineering**, v. 49, p. 103925, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103925>.

OKONKWO, E. C., ESSIEN, E. A., KAVAZ, D., ABID, M., and RATLAMWALA, T. A. H. Olive Leaf-Synthesized Nanofluids for Solar Parabolic Trough Collector—Thermal Performance Evaluation." ASME. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**. August 2019; 11(4): 041009. <https://doi.org.ez15.periodicos.capes.gov.br/10.1115/1.4043820>

ORDONEZ, J. C.; CAVALCANTI, E. J. C.; CARVALHO, M. Energy, exergy, entropy generation minimization, and exergoenvironmental analyses of energy systems: a mini-review. **Frontiers in Sustainability**. v. 3, p. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.902071>

OCHOA, A. A. V., DUTRA, J.C.C., GUERRERO J. R. H. “Introdução á análise de sistemas de Refrigeração por absorção”. Ed. Universitária da UFPE – Recife, 2016.

PBGAS – Companhia Paraibana de Gás. João Pessoa PB. Disponível em: Acesso em 15 julho 2020.

PRÉ SUSTAINABILITY B.V. Available at: <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/> [acessado em 15.2.2022]

ROSSI, Federico; PARISI, Maria Laura; MARANGHI, Simone; MANFRIDA, Giampaolo; BASOSI, Riccardo; SINICROPI, Adalgisa. Environmental impact analysis applied to solar pasteurization systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 212, 2019, p. 1368-1380. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.020>.

SEEG, 2021. SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Seeg Brasil. Emissões de CO₂. [S.l.]. Seeg Brasil, 2021. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission. Acesso em: 10 jan. 2023.

SANTOS, D.H.P. (2005). Análise exerérgica de sistemas de refrigeração por absorção de múltiplos efeitos com o par brometo de lítio - água. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Centro de tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica.

STOECKER, W. F., JONES, J. W., 1985, Refrigeração e Ar Condicionado. Editora Mc Graw Hill, São Paulo, SP.

SOUZA, R. J.; DOS SANTOS, C. A. C.; OCHOA, A. A. V.; MARQUES, A. S.; NETO, J. L. M.; MICHIMA, J. L. M. Proposal and 3E (energy, exergy, and exergoeconomic) assessment of a cogeneration system using an organic Rankine cycle and an Absorption Refrigeration System in the Northeast Brazil: Thermodynamic investigation of a facility case study. *Energy Conversion and Management*, v. 217, p. 113002, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113002>.

CORDEIRO, L.C. M. (2018). Avaliação Termodinâmica, Exergoeconômica e Exergoambiental de um sistema de Refrigeração por Absorção de Duplo Efeito em Série Utilizando o Par Água-Brometo de Lítio. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba. Centro de tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica.

TSATSARONIS, G., 1993, "Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy Systems". *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 19, nº 3, pp. 227-257.

VALERO, A., LOZANO, M. A., BARTOLOMÉ, J. L., 1996, “On-line Monitoring of Power-Plant Performance Using Exergetic Cost”. Applied Thermal Engineering, Vol. 16, nº 12, pp. 933-948.

WYLEN, G. J. V., SONNTAG, R.E. & BORGNAKKE, C., 1998, Fundamentos da Termodinâmica. 5ª Edição, Editora Edgard Blücher, São Paulo, SP.

APÊNDICE A

A seguir, serão apresentados os resultados individuais obtidos pelo OPENLCA no estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para as fases de fabricação, transporte, operação e descarte.

Resultados do estudo de ACV da etapa de fabricação do chiller de 352 kW.

Figura 67 – Inventário da etapa de fabricação do chiller de absorção de 352 kW.



Fonte: Elaborado pelo autor.

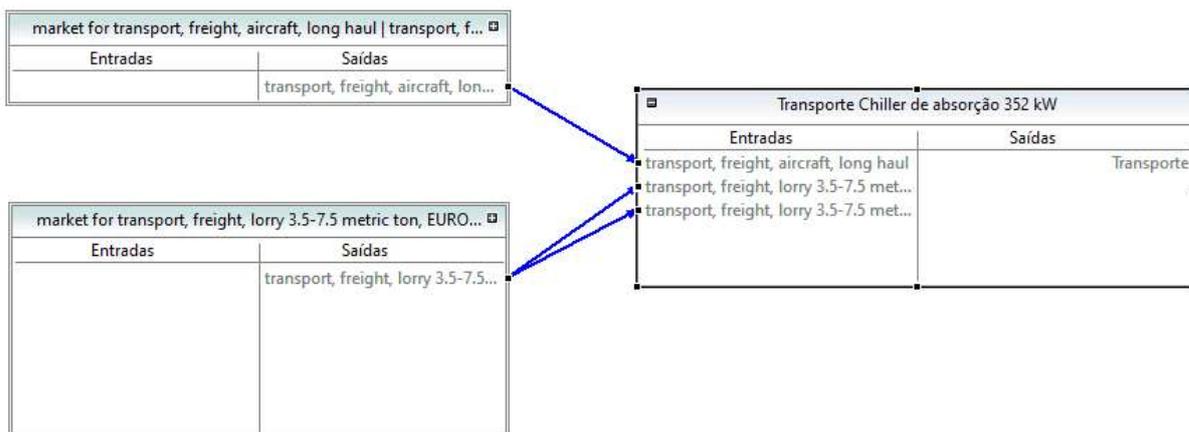
Tabela com os resultados dos impactos ambientais da etapa de fabricação pelo método Recipe Endpoint (H,A).

Tabela 15 – Resultados dos impactos ambientais da etapa de fabricação do chiller de absorção de 352 kW.

| Nome | Categoria | Resultado d... | Fator de im... | Resultado do impacto | Uni... |
|--|-----------|----------------|----------------|----------------------|--------|
| > ecosystem quality - freshwater eutrophication | | | | 2.19353 | points |
| > ecosystem quality - urban land occupation | | | | 50.10868 | points |
| > ecosystem quality - natural land transformation | | | | 16.12601 | points |
| > human health - ionising radiation | | | | 0.09972 | points |
| > ecosystem quality - freshwater ecotoxicity | | | | 1.89218 | points |
| > human health - climate change, human health | | | | 85.91552 | points |
| > resources - metal depletion | | | | 1268.58846 | points |
| > ecosystem quality - total | | | | 133.15065 | points |
| > human health - ozone depletion | | | | 0.01026 | points |
| > ecosystem quality - terrestrial ecotoxicity | | | | 0.20336 | points |
| > resources - total | | | | 1377.68651 | points |
| > human health - human toxicity | | | | 363.50829 | points |
| > human health - particulate matter formation | | | | 215.02089 | points |
| > resources - fossil depletion | | | | 109.09805 | points |
| > ecosystem quality - climate change, ecosystems | | | | 54.30388 | points |
| > human health - photochemical oxidant formatio | | | | 1.43482 | points |
| > human health - total | | | | 665.98951 | points |
| > total - total | | | | 2176.82667 | points |
| > ecosystem quality - terrestrial acidification | | | | 0.51652 | points |
| > ecosystem quality - agricultural land occupation | | | | 7.45508 | points |
| > ecosystem quality - marine ecotoxicity | | | | 0.35142 | points |

Fonte: OpenLCA 3.10.3

Figura 68 - Inventário da etapa de transporte do chiller de absorção de 352 kW.



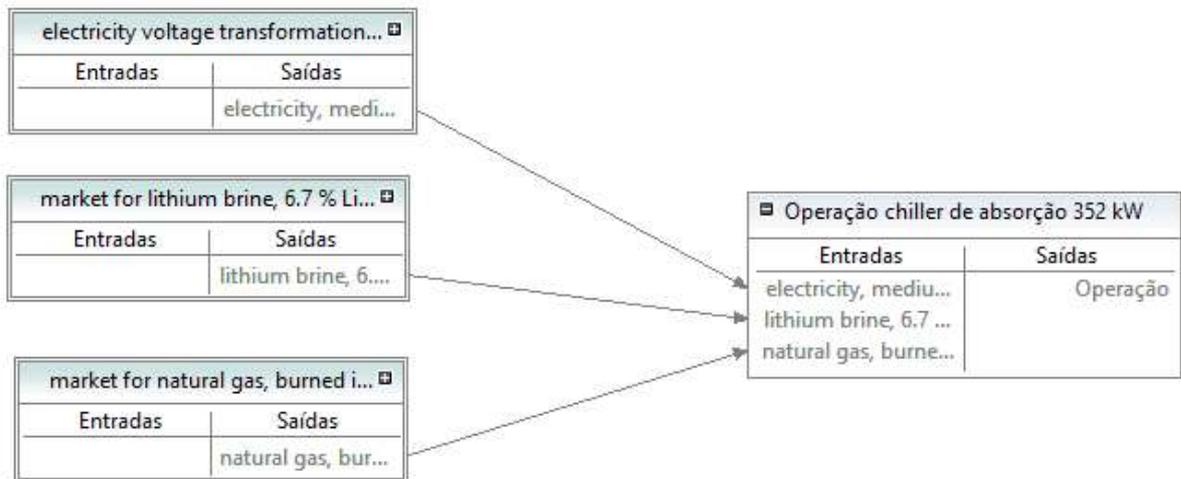
Fonte: OpenLCA 3.10.3

Tabela 17 - Resultados dos impactos ambientais da etapa de transporte do chiller de absorção de 352 kW.

| Nome | Categoria | Resultado d... | Fator de im... | Resultado do impacto | Uni... |
|--|-----------|----------------|----------------|----------------------|--------|
| > ecosystem quality - freshwater eutrophication | | | | 87.03290 | points |
| > ecosystem quality - urban land occupation | | | | 9205.39792 | points |
| > ecosystem quality - natural land transformation | | | | 3.73352E4 | points |
| > human health - ionising radiation | | | | 556.69372 | points |
| > ecosystem quality - freshwater ecotoxicity | | | | 64.81457 | points |
| > human health - climate change, human health | | | | 7.48881E5 | points |
| > resources - metal depletion | | | | 4.67741E4 | points |
| > ecosystem quality - total | | | | 5.24696E5 | points |
| > human health - ozone depletion | | | | 248.76861 | points |
| > ecosystem quality - terrestrial ecotoxicity | | | | 447.97354 | points |
| > resources - total | | | | 1.19738E6 | points |
| > human health - human toxicity | | | | 5.07108E4 | points |
| > human health - particulate matter formation | | | | 2.17311E5 | points |
| > resources - fossil depletion | | | | 1.15061E6 | points |
| > ecosystem quality - climate change, ecosystems | | | | 4.73339E5 | points |
| > human health - photochemical oxidant formatio | | | | 849.05675 | points |
| > human health - total | | | | 1.01856E6 | points |
| > total - total | | | | 2.74064E6 | points |
| > ecosystem quality - terrestrial acidification | | | | 1434.10650 | points |
| > ecosystem quality - agricultural land occupation | | | | 2767.80726 | points |
| > ecosystem quality - marine ecotoxicity | | | | 15.22713 | points |

Fonte: OpenLCA 3.10.3

Figura 69 - Inventário da etapa de operação do chiller de absorção de 352 kW.



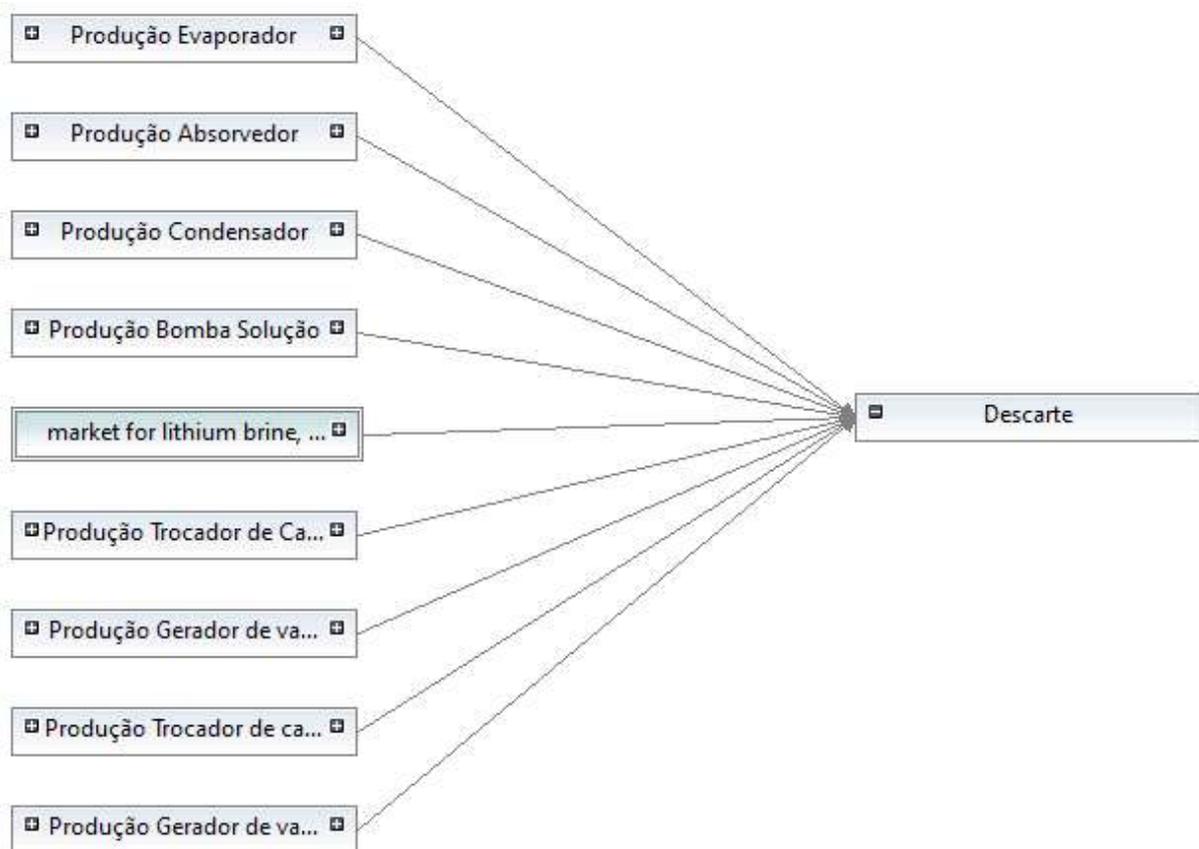
Fonte: OpenLCA 3.10.3

Tabela 18 - Resultados dos impactos ambientais da etapa de operação do chiller de absorção de 352 kW.

| Nome | Categoria | Resultado d... | Fator de im... | Resultado do impacto | Uni... |
|--|-----------|----------------|----------------|----------------------|--------|
| > ecosystem quality - freshwater eutrophication | | | | 7.60621 | points |
| > ecosystem quality - urban land occupation | | | | 220.86243 | points |
| > ecosystem quality - natural land transformation | | | | 4705.08943 | points |
| > human health - ionising radiation | | | | 7.93594 | points |
| > ecosystem quality - freshwater ecotoxicity | | | | 80.12573 | points |
| > human health - climate change, human health | | | | 2.63154E5 | points |
| > resources - metal depletion | | | | 1.00087E4 | points |
| > ecosystem quality - total | | | | 1.71854E5 | points |
| > human health - ozone depletion | | | | 38.21892 | points |
| > ecosystem quality - terrestrial ecotoxicity | | | | 207.48828 | points |
| > resources - total | | | | 4.87829E5 | points |
| > human health - human toxicity | | | | 5501.34590 | points |
| > human health - particulate matter formation | | | | 1.48651E4 | points |
| > resources - fossil depletion | | | | 4.77820E5 | points |
| > ecosystem quality - climate change, ecosystems | | | | 1.66329E5 | points |
| > human health - photochemical oxidant formatio | | | | 113.14651 | points |
| > human health - total | | | | 2.83680E5 | points |
| > total - total | | | | 9.43362E5 | points |
| > ecosystem quality - terrestrial acidification | | | | 110.35290 | points |
| > ecosystem quality - agricultural land occupation | | | | 187.77885 | points |
| > ecosystem quality - marine ecotoxicity | | | | 4.86556 | points |

Fonte: OpenLCA 3.10.3

Figura 70 - Inventário da etapa de descarte do chiller de absorção de 352 kW.



Fonte: OpenLCA 3.10.3

Tabela 19 - Resultados dos impactos ambientais da etapa de descarte do chiller de absorção de 352 kW.

| Nome | Categoria | Resultado d... | Fator de im... | Resultado do impacto | Uni... |
|---|-----------|----------------|----------------|----------------------|--------|
| > ecosystem quality - freshwater eutrophication | | | | 2.19356 | points |
| > ecosystem quality - urban land occupation | | | | 50.14109 | points |
| > ecosystem quality - natural land transformation | | | | 16.14895 | points |
| > human health - ionising radiation | | | | 0.09976 | points |
| > ecosystem quality - freshwater ecotoxicity | | | | 1.89219 | points |
| > human health - climate change, human health | | | | 85.96447 | points |
| > resources - metal depletion | | | | 1268.60221 | points |
| > ecosystem quality - total | | | | 133.23795 | points |
| > human health - ozone depletion | | | | 0.01028 | points |
| > ecosystem quality - terrestrial ecotoxicity | | | | 0.20358 | points |
| > resources - total | | | | 1377.77715 | points |
| > human health - human toxicity | | | | 363.51432 | points |
| > human health - particulate matter formation | | | | 215.04586 | points |
| > resources - fossil depletion | | | | 109.17494 | points |
| > ecosystem quality - climate change, ecosystems | | | | 54.33482 | points |
| > human health - photochemical oxidant formatio | | | | 1.43498 | points |
| > human health - total | | | | 666.06967 | points |
| > total - total | | | | 2177.08476 | points |
| > ecosystem quality - terrestrial acidification | | | | 0.51664 | points |
| > ecosystem quality - agricultural land occupation | | | | 7.45571 | points |
| > ecosystem quality - marine ecotoxicity | | | | 0.35142 | points |

Fonte: OpenLCA 3.10.3