



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

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS DE ESTUDO  
EXERGOCONÔMICO PARA UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO  
DE VAPOR DE DUPLO EFEITO**

**Por**

**JOÃO LUIZ DE MEDEIROS NETO**

**JOÃO LUIZ DE MEDEIROS NETO**

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS DE ESTUDO  
EXERGOCONÔMICO PARA UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO  
DE VAPOR DE DUPLO EFEITO**

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

**Orientador : Professor Doutor Carlos Antônio Cabral do Santos**

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

N469a Neto, João Luiz de Medeiros.

ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS DE ESTUDO  
EXERGOCONÔMICO PARA UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR  
ABSORÇÃO DE VAPOR DE DUPLO EFEITO / João Luiz de  
Medeiros Neto. - João Pessoa, 2018.  
102 f.

Orientação: Carlos Antonio Cabral dos Santos.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Refrigeração por absorção. 2. Exergia. 3.  
Exergoeconomia. 4. TCE. 5. SPECO. I. Antonio Cabral dos  
Santos, Carlos. II. Título.

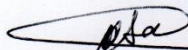
UFPB/BC

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS DE ESTUDO  
EXERGOECONÔMICO PARA UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO  
POR ABSORÇÃO DE VAPOR DE DUPLO EFEITO**

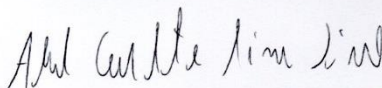
por

**JOÃO LUIZ DE MEDEIROS NETO**

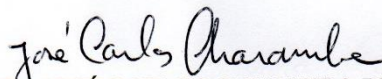
*Dissertação aprovada em 20 de julho de 2018*



**Prof. Dr. CARLOS ANTONIO CABRAL DOS SANTOS**  
*Orientador – UFPB*



**Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO**  
*Examinador Interno - UFPB*



**Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA**  
*Examinador Externo – UFPE*

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Tadeu e Branca, pelo apoio e compreensão.

Dedico também à minha noiva Ellen, pela paciência e carinho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pois sem ele eu não teria forças para superar as dificuldades financeiras e pessoais vivenciados ao longo da elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus pais que me ajudaram, financeiramente e pessoalmente, no período em que estive sem auxílio financeiro (bolsa) dos órgãos de fomento à pesquisa e quando foi necessário usar o notebook do meu pai, porque o meu queimou e eu não tinha condições financeiras de adquirir outro (outubro de 2017 a maio de 2018).

À minha noiva Ellen, pelo incentivo e apoio constante.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos, pela orientação, compreensão, confiança e disponibilidade.

Ao doutorando Adriano da Silva Marques, pelas discussões em torno do tema proposto e pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas que contribuíram de alguma forma com a elaboração deste estudo.

À FAPESQ (Fundação de Apoio à Pesquisa do estado da Paraíba) pelo apoio financeiro nos últimos meses de elaboração deste trabalho.

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS DE ESTUDO  
EXERGEOCONÔMICO PARA UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO  
DE VAPOR DE DUPLO EFEITO**

**RESUMO**

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um estudo comparativo das metodologias exergoeconômicas: Teoria do Custo Exergético (TCE) e o Custo Exergético Específico (SPECO) – aplicado na análise de um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito em série, com distribuição em torre, que trabalha com o par de fluidos, água (fluido refrigerante) e brometo de lítio (fluido absorvente), em desenvolvimento no Instituto de Energias Sustentáveis – IES, no Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. A análise termodinâmica é feita levando em consideração as visões energéticas e exergéticas baseadas na primeira e segunda lei da termodinâmica, para obter informações que são usadas no estudo exergoeconômico. A aplicação do método TCE é baseada nas proposições desenvolvidas por Valero e Lozano, e o método SPECO usa como suporte os princípios de combustível (F) e produto (P) difundido pelos autores Lazaretto e Tsatsaronis. O estudo exergoeconômico aloca os custos exergéticos e monetários associados aos fluxos exergéticos da unidade, como também permite a tomada de decisão acerca da otimização de equipamentos do sistema. A partir dos resultados obtidos, através dos dois métodos citados, foi feita uma análise das diferenças e peculiaridades de ambos. O chiller de absorção em estudo é composto por: dois geradores de vapor, sistema de condensação, evaporador, absorvedor, válvulas de expansão, bomba de solução e um trocador de calor. O código computacional é desenvolvido, em plataforma EES (Solução de Equações de Engenharia), devido a facilidade de obtenção das propriedades dos fluidos de trabalho.

**Palavras chaves:** Refrigeração por absorção, Exergia, Exergoeconomia, TCE, SPECO.

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS DE ESTUDO  
EXERGUECONÔMICO PARA UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO  
DE VAPOR DE DUPLO EFEITO**

**ABSTRACT**

The present work has the objective of presenting a comparative study of the exergetic cost methodologies: Exergetic Cost Theory (TCE) and the Exergetic Cost Specific (SPECO) - applied in the analysis of a series double-effect vapor absorption refrigeration system with distribution in a tower, which works with the pair of fluids, water (refrigerant) and lithium bromide (absorbing fluid), under development at the Institute of Sustainable Energies - IES, at the technology center of the Federal University of Paraíba. The thermodynamic analysis is done taking into account the energy and exergetic visions based on the first and second law of thermodynamics to obtain necessary information in the application of the ex-economic study. The application of the TCE method is based on the propositions developed by Valero and Lozano, and the SPECO method uses the principles of fuel (F) and product (P) diffused by the authors Lazaretto and Tsatsaronis as support. The economic-economic study allocates the exergetic and monetary costs associated with the exergy flows of the unit, as well as the decision on the optimization of the system's equipment. From the results obtained, through the two methods mentioned, an analysis of the differences and peculiarities of both was made. The absorption chiller under study consists of: two steam generators, condensation system, evaporator, absorber, expansion valves, solution pump and a heat exchanger. The computational code is developed, in EES (Solution of Engineering Equations) platform, due to the ease of obtaining the properties of the work fluids

**Key – words: Absorption Cooling, Exergy, Exergoeconomics, TCE, SPECO.**

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	1
<b>1.2. MOTIVAÇÃO</b> .....	2
<b>1.3 OBJETIVOS</b> .....	3
<b>1.3.1 OBJETIVO GERAL</b> .....	3
<b>1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	3
<b>1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO</b> .....	4
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	5
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	9
<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	9
<b>3.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO</b> .....	9
<b>3.1.1 FLUIDOS DE TRABALHO</b> .....	12
<b>3.2 LEIS DA TERMODINÂMICA</b> .....	14
<b>3.2.1 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA</b> .....	14
<b>3.2.2 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA</b> .....	15
<b>3.3 EXERGIA</b> .....	17
<b>3.4 APLICAÇÕES EM COGERAÇÃO</b> .....	20
<b>3.5 EXERGONOMIA</b> .....	23
<b>3.5.1 MÉTODO SPECO</b> .....	28
<b>3.5.1.a Princípio F</b> .....	29
<b>3.5.1.b Princípio P</b> .....	30
<b>3.5.2 TEORIA DO CUSTO EXERGÉTICO</b> .....	30
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	33
<b>METODOLOGIA</b> .....	33
<b>4.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE DUPLO EFEITO EM SÉRIE</b> .....	33

<b>4.2 ANÁLISE TERMODINÂMICA .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3. BALANCEAMENTO DA EQUAÇÃO QUÍMICA DO GÁS NATURAL .....</b>	<b>36</b>
4.3.1 Balanceamento da reação.....	37
4.3.2 Determinação da razão ar-combustível.....	38
<b>4.4 ANÁLISE EXERGOECONÔMICA - SPECO .....</b>	<b>39</b>
4.4.1 - Gerador de vapor I.....	40
4.4.1a – Balanço de custo exergético unitário .....	40
4.4.1b – Balanço de custo monetário.....	41
4.4.2 - Gerador de vapor II.....	42
4.4.2a – Balanço de custo exergético unitário .....	42
4.4.2b – Balanço de custo monetário.....	43
4.4.3 – Sistema de condensação.....	44
4.4.3a – Balanço de custo exergético unitário .....	44
4.4.3b – Balanço de custo monetário.....	45
4.4.4 - Evaporador .....	45
4.4.4a – Balanço de custo exergético unitário .....	46
4.4.4b – Balanço de custo monetário.....	46
4.4.5 - Absorvedor .....	47
4.4.5a – Balanço de custo exergético unitário .....	47
4.4.5b – Balanço de custo monetário.....	48
4.4.6 – Bomba de solução.....	49
4.4.6a – Balanço de custo exergético unitário .....	49
4.4.6b – Balanço de custo monetário.....	49
4.4.7 – Trocador de calor.....	50
4.4.7a – Balanço de custo exergético unitário .....	51
4.4.7b – Balanço de custo monetário.....	51
<b>4.5 ANÁLISE EXERGOECONÔMICA – TCE .....</b>	<b>52</b>
4.5.1 Gerador de Vapor I.....	52
4.5.1a – Balanço de custo exergético unitário .....	52
4.5.1b – Balanço de custo monetário.....	53
4.5.2 Gerador de Vapor II.....	54
4.5.2a – Balanço de custo exergético unitário .....	54
4.5.2b – Balanço de custo monetário.....	54
4.5.3 Sistema de condensação .....	55
4.5.3a – Balanço de custo exergético unitário .....	55

4.5.3b – Balanço de custo monetário.....	55
4.5.4 Evaporador.....	56
4.5.4a – Balanço de custo exergético unitário .....	56
4.5.4b – Balanço de custo monetário.....	57
4.5.5 Absorvedor .....	57
4.5.5a – Balanço de custo exergético unitário .....	57
4.5.5b – Balanço de custo monetário.....	58
4.5.6 Bomba de solução .....	58
4.5.6a – Balanço de custo exergético unitário .....	58
4.5.6b – Balanço de custo monetário.....	59
4.5.7 Trocador de calor .....	59
4.5.7a – Balanço de custo exergético unitário .....	59
4.5.7b – Balanço de custo monetário.....	60
4.6 DEFINIÇÃO DOS CUSTOS MONETÁRIOS.....	60
CAPÍTULO V.....	62
RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	62
5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE TERMODINÂMICA.....	62
5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE EXERGOECONÔMICA - SPECO.....	65
5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE EXERGOECONÔMICA - TCE.....	69
5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE OS MÉTODOS SPECO E TCE.....	73
CAPÍTULO VI .....	79
CONCLUSÃO E SUGESTÕES .....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Sistema de refrigeração por compressão de vapor. (Adaptado de Balmer, 2011).....	10
Figura 3.2 – Sistema de refrigeração por absorção destacando o compressor térmico. (Adaptado de Balmer, 2011).....	10
Figura 3.3 – Ilustração do sistema de cogeração.....	20
Figura 3.4 - Exemplos de combustíveis e produtos obtidos. (Fonte: ECOGEN 2017).....	21
Figura 3.5 - Ilustração da geração topping. (Fonte: autor).....	21
Figura 3.6 - Ilustração da geração bottoming. (Fonte: Autor).....	21
Figura 3.7 - Sistema de cogeração com produção de energia elétrica, vapor de processo e água gelada. (Fonte: ECOGEN 2017).....	22
Figura 3.8 - Sistema de cogeração com produção de energia elétrica e ar quente. (Fonte: ECOGEN 2017).....	23
Figura 3.9 - Sistema de cogeração com produção de energia elétrica e água gelada. (Fonte: ECOGEN 2017).....	23
Figura 3.10 – Demonstração dos custos envolvidos na análise exergoeconômica. (Fonte: autor)....	26
Figura 4.1 – Esquema do sistema de refrigeração por absorção de duplo em série (Fonte: autor)....	34
Figura 4.2 – Volume de controle do gerador de vapor I. (Fonte: autor).....	40
Figura 4.3 – Volume de controle do gerador de vapor II. (Fonte: autor).....	42
Figura 4.4 – Volume de controle do sistema de condensação. (Fonte: autor).....	44
Figura 4.5 – Volume de controle do evaporador. (Fonte: autor).....	46
Figura 4.6 – Volume de controle do absorvedor. (Fonte: autor).....	47
Figura 4.7 – Volume de controle da bomba de solução. (Fonte: autor).....	49
Figura 4.8 – Volume de controle do trocador de calor. (Fonte: autor).....	50
Figura - 5.1 - Irreversibilidade dos subsistemas do sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito.....	64
Figura - 5.2 – Gráfico da eficiência exergética pela análise do método SPECO.....	67
Figura 5.3 – Gráfico da taxa de custos totais pela análise do método SPECO.....	67
Figura 5.4 – Gráfico da diferença relativa de custos do produto e do combustível pela análise do método SPECO.....	68
Figura 5.5 – Gráfico do fator exergoeconômico da unidade de refrigeração pela análise do método SPECO.....	68
Figura 5.6 – Gráfico da exergia destruída pela análise do método SPECO.....	69

Figura 5.7 – Gráfico da taxa de exergia destruída pela análise do método SPECO.....	69
Figura 5.8 – Gráfico da eficiência exérgica pela análise do método TCE.....	71
Figura 5.9 – Gráfico da taxa de custos totais pela análise do método TCE.....	72
Figura 5.10 – Gráfico da diferença relativa de custos do produto e do combustível pela análise do método TCE.....	72
Figura 5.11 – Gráfico do fator exergoeconômico da unidade de refrigeração pela análise do método TCE.....	73
Figura 5.12 – Gráfico da exergia destruída pela análise do método TCE.....	73
Figura 5.13 – Gráfico da taxa de exergia destruída pela análise do método TCE.....	74
Figura 5.14 – Comparativo dos custos exérgicos unitários e monetário do fluxo de dissipação de calor do sistema de condensação do chiller de absorção. (Fonte:autor).....	75
Figura 5.15 – Comparativo das perdas monetárias do fluxo 18 (gases de exaustão) do chiller de absorção. (Fonte:autor).....	75
Figura 5.16 – Comparativo dos resultados do custo exérgico unitario do chiller de absorção. (Fonte:autor).....	76
Figura 5.17 – Comparativo dos resultados do custo específico do chiller de absorção. (Fonte:autor).....	76
.....	76
Figura 5.18 – Comparativo dos resultados do custo monetário do chiller de absorção. (Fonte:autor).....	77
Figura 5.19 – Comparativo dos resultados do fator $r_k$ do chiller de absorção. (Fonte:autor).....	77
Figura 5.20 – Comparativo dos resultados da taxa de destruição de exergia do chiller de absorção. (Fonte:autor).....	78
Figura 5.21 – Comparativo dos resultados do fator exergoeconomico do chiller de absorção. (Fonte:autor).....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais fluidos de trabalho utilizados em sistemas de absorção (Fonte: adaptado de Herold 2016).....	12
Tabela 3.2 – Comparativo entre os dois pares de fluidos de trabalho mais utilizados em aplicações de sistemas de absorção. (Fonte: adaptado de Herold 2016).....	13
Tabela 4.1 – Composição e propriedades do gás natural comercializado pela Pbgás. (consulta feita em novembro de 2017, as 10:35, no site <a href="http://www.pbgas.com.br/?page_id=195">http://www.pbgas.com.br/?page_id=195</a> ).....	36
Tabela 4.2 – Fator de rateamento do investimento do sistema de absorção. (Fonte: autor).....	61
Tabela 5.1 - Dados de entrada para o desenvolvimento da análise energética e exérgica.....	62
Tabela 5.2 - Resultados da análise energética e exérgica.....	63
Tabela 5.3 - Irreversibilidade dos subsistemas do sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito.....	64
Tabela 5.4 - Parâmetros de manutenção e operação da unidade de refrigeração. (Fonte: Herrera 2014).....	65
Tabela 5.5 - Resultado da análise exergoeconômica -SPECO.....	66
Tabela 5.6 - Resultado parâmetros de avaliação -SPECO.....	66
Tabela 5.7 - Resultado da análise exergoeconômica -TCE.....	70
Tabela 5.8 - Resultado parâmetros de avaliação -TCE.....	71

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- AC - Razão ar-combustível em base mássica
- ACmolar - Razão - ar-combustível em base molar
- c - Custo monetário por exergia (R\$/kJ)
- cf - Custo monetário por exergia do combustível (R\$/kJ)
- cp - Custo monetário por exergia do produto (R\$/kJ)
- cp - Calor específico a pressão constante (kJ/kg.K)
- C - Custo monetário (R\$/s)
- $\dot{C}_D$  - Taxa de exergia destruída (R\$/s)
- COP - Coeficiente de performance
- CRF - Fator de recuperação de capital
- E - Fluxo exergético (kJ/s)
- $E_D$  – Exergia destruída (kJ/s)
- $E_{física}$  – Exergia física (kJ/s)
- $E_{cinética}$  – Exergia cinética (kJ/s)
- $E_{química}$  – Exergia química (kJ/s)
- $E_{potencial}$  – Exergia potencial (kJ/s)
- $E^*$  - Custo exergético (kJ/kg)
- e - Exergia específica (kJ/ kg)
- fk - Fator exergoeconômico (%)
- g - Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)
- h - Entalpia específica (kJ/kg)
- I - Irreversibilidade (kJ/s)
- i - Taxa anual de juros (%)
- k - Custo exergético unitário (kJ/kJ)
- M - Massa molecular
- m - Massa (kg)

$\dot{m}$  - Fluxo de massa (kg/s)

*nano* - vida útil em anos

*nb* - número de horas de operação por ano

*n* - Número de moles

$\phi$  - Fator de manutenção

$\varepsilon$  - Eficiência exergética (%)

*P* - Pressão (bar)

PCI - Poder calorífico inferior (kJ/kg)

PCS - Poder calorífico superior (kJ/kg)

Pot - Potência (kJ/s)

*Q* - Fluxo de calor (kJ/s)

*R* - Constante universal dos gases (kJ/kmol.K)

*rk* - Diferença relativa entre o custo do produto e o custo do combustível (%)

*s* - Entropia específica (kJ/kg.K)

*T* - Temperatura (°C)

*T0* - Temperatura de referência - ambiente (°C)

TR - Tonelada de refrigeração

*t* - Tempo (s)

*u* - Energia interna específica (kJ/kg)

*V* - Volume (m<sup>3</sup>)

*v* - Volume específico (m<sup>3</sup>/kg)

*V* - Velocidade (m/s)

*W* - Trabalho (kJ/s)

*xsol* - Concentração da solução água brometo de lítio

*Z* - Custo de aquisição (R\$)

$\dot{Z}$  - Custo com despesas totais (R\$/s)

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO**

Diante da demanda energética mundial e da necessidade de otimização de sistemas industriais, tecnologias e metodologias que visam a economia do consumo de energia elétrica, preservação da ambiência, mensuração e identificação de gastos energéticos são de grande valia para o desenvolvimento sustentável mundial.

No campo da climatização e refrigeração, temos como alternativa aos sistemas tradicionais de produção de frio, os sistemas de refrigeração por absorção de vapor que utiliza pouca energia elétrica e não faz uso de fluidos prejudiciais ao meio ambiente. A tecnologia de absorção, aplicado em refrigeração, é sustentada com energia térmica, sendo possível aproveitar conteúdos energéticos (como gases de escapamento dos motores de combustão, entre outros) e usa, como fluido de trabalho, misturas binárias (como água-brometo de lítio e água-amônia), diferentemente dos sistemas por compressão de vapor que faz uso de um compressor mecânico (que é responsável pelo alto consumo energia elétrica) e utiliza fluidos prejudiciais à camada de ozônio.

Além da atratividade energética e ambiental, é necessário que o SRA mostre vantagens econômicas. Oliveira Junior (2012) afirma que os custos monetários dos produtos gerados em processos de conversão de energia podem ser determinados

por um critério de partição de custos em função do conteúdo exergético de cada fluxo existente no processo que está sendo estudado. Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) define essa combinação entre fluxos exergéticos e princípios da economia aplicado a sistemas térmicos como exergoeconomia.

Diante do que foi exposto e considerando aumento da demanda de consumo energético, elevada participação de combustíveis fósseis na matriz energética mundial, emissões de gases do efeito estufa e o processo de produção de frio como um processo com elevado consumo de energia, se faz necessário propor tecnologias sustentáveis e alternativas em relação aos processos de climatização e refrigeração tradicionais. A tecnologia de refrigeração por absorção vem sendo proposta devido a sua capacidade de aproveitamento de energia térmica que são desperdiçadas nos processos industriais, fazendo com que tais aparatos possam ser aplicados em plantas de cogeração. Entretanto se faz necessária a proposição de metodologias que permitam avaliar esta tecnologia em termos de eficiência energética/exergética e econômica, de forma a justificar sua aplicação.

## **1.2. MOTIVAÇÃO**

Após quase 30 anos do desafio CGCAM (problema criado por especialistas em exergoeconomia da época para aplicar metodologias exergoeconômicas e comparar resultados), existe a necessidade de realização de novas análises devido ao desejo de determinação de custos energéticos e monetários em outros sistemas térmicos, distintos do sistema aplicado no CGCAM.

A tese doutoral elaborada na Universidade de Campinas por Cerqueira, 1999 comparou as principais metodologias exergoeconômicas aplicado a um sistema semelhante ao problema CGCAM e os resultados foram publicados na revista Energy (Cerqueira e Nebra, 1999).

Porém, alguns anos já se passaram desde a tese doutoral de (Cerqueira, 1999) e existe uma motivação para que as metodologias termoeconômicas sejam comparadas em outros sistemas térmicos, como por exemplo, os sistemas de

refrigeração por absorção de vapor, na perspectiva de avaliar qual método melhor se encaixa no sistema mencionado.

Outros parâmetros de análise exergoeconômica também surgiram com o passar do tempo, tais parâmetros permitem a avaliação de componentes do sistema com o objetivo de melhorar o desempenho e otimizar o processo, melhorando assim a eficiência global do ciclo.

O problema proposto no presente trabalho é aplicar duas metodologias exergoeconômicas (TCE e SPECO) em um sistema compacto de refrigeração por absorção de vapor, de duplo efeito, com disposição em torre e mostrar peculiaridades entre os métodos, como também obter os resultados de parâmetros que ajudem a identificar os componentes que necessitam de intervenção para melhorar o desempenho do sistema.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral do presente estudo é comparar os resultados das análises exergoeconômicas pelos métodos TCE (Teoria do Custo Exergético) e SPECO (*Specific Exergy Costing*) aplicado em um sistema de refrigeração por absorção de vapor, de duplo efeito, com disposição em torre, que utiliza água e Brometo de lítio como fluidos de trabalho.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar o estudo energético (Primeira lei da termodinâmica);
- Realizar o estudo exergético (Segunda Lei da termodinâmica);
- Balancear a equação química da combustão do gás natural;

- Realizar análise Exergoeconômica para o SRA utilizando o método SPECO;
- Realizar análise Exergoeconômica para o SRA utilizando o método TCE;
- Comparar os resultados (método SPECO x método TCE);
- Apontar os equipamentos que necessitem de otimização de projeto.

#### **1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O presente trabalho é composto por 6 capítulos e as referências bibliográficas, onde no primeiro capítulo é feita uma introdução do tema em estudo e são apresentados os objetivos, específicos e geral, esperados. O segundo capítulo mostra a revisão bibliográfica do estudo, exibindo aplicações dos métodos TCE e SPECO.

O capítulo 3 apresenta conceitos necessários para desenvolvimento do estudo, como a explanação dos princípios dos sistemas de refrigeração por absorção, leis da termodinâmica, exergia, aplicações dos sistemas de refrigeração em plantas de cogeração e métodos de análise exergoeconômicos. O capítulo 4 é composto pela metodologia empregada no estudo, iniciando pela descrição do ciclo de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito com disposição em torre, em seguida é explanado acerca da análise termodinâmica, o balanceamento da equação química do gás natural, a análise exergoeconômica pelo método SPECO, estudo exergoeconômico utilizando o método TCE, e por fim, foi discutido a diferença e peculiaridades dos métodos estudados no presente trabalho.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com base nas análises realizadas. Por fim o capítulo 6 apresenta a conclusão, considerações finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nesse capítulo é apresentado uma breve revisão da literatura sobre as diversas aplicações das metodologias exergoeconômicas, Speco e TCE, no campo da Engenharia. O objetivo do capítulo é informar as pesquisas recentes acerca do tema em estudo.

Embora alguns registros acadêmicos mostrarem que o professor Keenan foi o pioneiro no estudo da termoeconomia em 1932, a palavra “termoeconomia” foi usada pela primeira vez pelos pesquisadores Tribus e Evans para ilustrar uma disciplina que unia conceitos da termodinâmica com os da economia no intuito de fornecer informações não disponíveis em uma análise energética e econômica que seriam fundamentais no projeto e operação de sistemas térmicos (Valero et al., 2006)

Na década de 80, surgiram novas metodologias, nomenclaturas, definições e aplicações na área da termoeconomia. Uma nova denominação para termoeconomia foi criada pelo pesquisador Tsatsaronis em 1985 e foi chamada de exergoeconomia. Essa nova designação tinha como objetivo combinar o conceito de exergia da termodinâmica com o conceito de custo oriundo da economia.

Outras metodologias foram criadas por pesquisadores da área para resolver impasses ainda existente nos métodos convencionais. Com a finalidade de comparar tais metodologias, um grupo de especialistas se uniram em 1990 e

criaram um problema de otimização chamado CGAM (o nome do problema faz alusão ao primeiro nome de cada especialista participante do desafio, C. Frangopoulos, G. Tsatsaronis, A. Valero e M. Von Sakovsky) para aplicar as novas técnicas exergoeconômicas.

É crescente as tentativas matemáticas para otimizar e reduzir custos nas diversas áreas da engenharia, incluindo os sistemas de geração de frio e água gelada, no intuito de usar recursos da melhor forma possível. A seguir são apresentados alguns estudos utilizando métodos exergoeconômicos, principalmente o método SPECO e TCE, aplicados em sistemas de absorção e áreas afins.

Gungor (2012) usou o método SPECO para analisar um secador constituído por uma bomba de calor e um motor a gás (acoplado a bomba de calor). De acordo com Fortes (2017), os autores do supracitado estudo verificaram ainda a influência do estado morto nas eficiências exergéticas e custos exergéticos dos componentes do sistema e concluiu que o condensador e a câmara de secagem apresentam redução de eficiência exergética e aumento do custo exergético de seus produtos com o aumento da temperatura do estado morto.

Farshi (2013) realizou uma análise exergoeconômica em um sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito, que trabalha com água – Brometo de lítio, em três configurações distintas, em série, paralelo e paralelo reverso. O objetivo era investigar a influência de vários parâmetros operacionais na construção dos custos do produto. Os resultados mostraram vantagens e desvantagens de cada configuração estudada no intuito de auxiliar no projeto de novos sistemas de absorção.

Herrera (2014) executou um estudo exergoeconômico em um sistema de cogeração composto por um motor diesel e um sistema de refrigeração por absorção. Foi feita a comparação do motor funcionando com uma mistura de óleo e hidrogênio. Os gases do escape do motor foram utilizados como fonte térmica para o sistema de refrigeração por absorção. O objetivo do estudo foi obter

informações exergéticas e exergoeconômicas da usina, levando em consideração diferentes condições de carga e diferentes concentrações de hidrogênio e óleo. Os resultados do estudo mostraram que a combustão do motor é o processo de maior destruição de exergia do sistema de cogeração.

Shokati (2014) fez uma análise exergoeconômica, utilizando o método SPECO, entre um sistema de cogeração, constituído de um sistema de absorção e uma turbina a vapor e o ciclo rankine, ambos com a mesma fonte de calor. Os resultados mostraram que. O ciclo de absorção tem maior COP na primeira lei, porem o custo para produção de eletricidade na turbina é maior do que no ciclo rankine. O estudo concluiu que o gerador de vapor, absorvedor e a caldeira tem o maior custo de investimento, operação, manutenção, destruição de exergia e perda de exergia.

Já Guedes (2015) descreve as diversas metodologias exergoeconômicas existente na literatura, antes e depois do problema CGAM, e aplica todas no problema CGAM, comparando os resultados e descrevendo as peculiaridades de cada método.

Anvari (2017) executou uma análise termoeconômica em um ciclo combinado de resfriamento, aquecimento e potência. O principal objetivo do trabalho era verificar a viabilidade termodinâmicos e exergoeconomica de um ciclo de trigeriação composto por um ciclo Rankine orgânico, ciclo de refrigeração por absorção e um ciclo de gerador de vapor com turbina a gás.

Uysal (2017) realizou uma análise exergética e exergoeconômica em uma usina termelétrica a carvão com capacidade de 160 MW, localizado na Turquia. Dois métodos foram aplicados, separadamente, o SPECO e o MOPSA (Análise de estrutura produtiva modificado) e depois os resultados foram comparados e discutidos. A eficiência exergética da usina de carvão foi de 39,89%. O resultado obtido usando o método SPECO foi de 12,14 US \$ / GJ e utilizando o método MOPSA, o resultado foi 14,06 US \$ / GJ.

Seguindo a ideia de Uysal (2017), será feito no presente trabalho, o estudo comparativo, utilizando o método SPECO e o método TCE, de forma separada, aplicado em um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito com disposição vertical, em seguida, os resultados vão ser comparados e discutidos.

## **CAPÍTULO 3**

### **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo são mostrados os principais conceitos que embasam e auxiliam o desenvolvimento da dissertação. Será abordado temas como: Sistemas de refrigeração por absorção, fluidos de trabalhos, leis da termodinâmica, aplicações dos sistemas de absorção em plantas de cogeração e as metodologias de análise exergoeconômica aplicado neste trabalho, tais quais, o método SPECO (Specific Exergy Costing) e o método TCE (Teoria do Custo exergético).

#### **3.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO**

O ciclo de refrigeração por absorção é distinto do ciclo de refrigeração por compressão de vapor pela forma que o fluido é comprimido. No ciclo convencional de refrigeração por compressão de vapor, o vapor é comprimido entre o evaporador e o condensador através de um compressor mecânico, já nos SRA's o fluido refrigerante do sistema é absorvido por um segundo fluido, denominado fluido absorvente, formando uma solução líquida. A solução líquida formada é bombeada para uma pressão maior e como o volume específico da solução líquida é bem menor do que o volume do vapor de refrigerante, os sistemas de refrigeração por absorção necessitam de uma menor potência de acionamento em comparação com os sistemas de refrigeração por compressão de vapor. Tal processo nos sistemas SRA's é conhecido como compressor térmico. As figuras 3.1 e 3.2 ilustram o sistema de refrigeração por compressão de vapor e o sistema de refrigeração por absorção respectivamente.

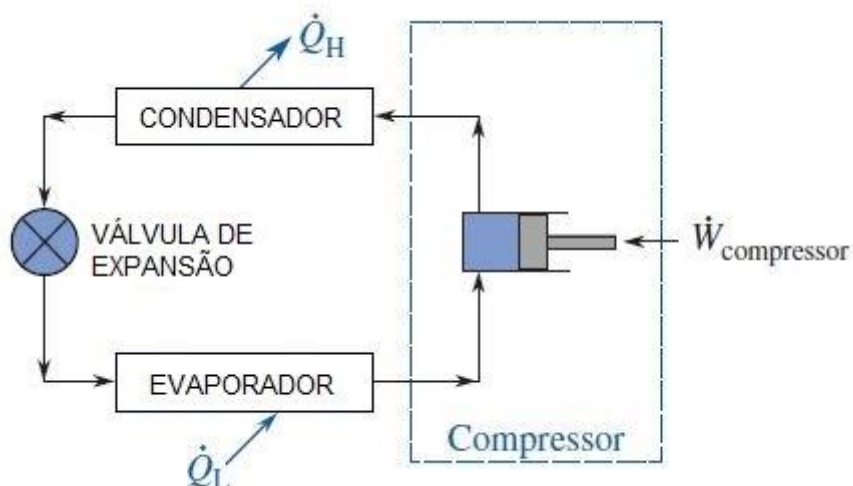


Figura 3.1 – Sistema de refrigeração por compressão de vapor. (Adaptado de Balmer, 2011)

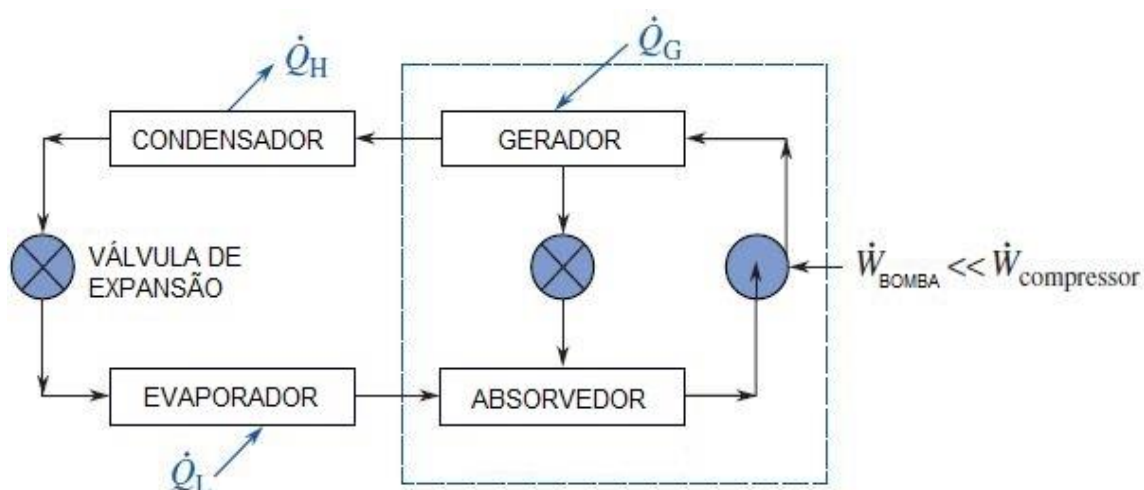


Figura 3.2 – Sistema de refrigeração por absorção destacando o compressor térmico. (Adaptado de Balmer, 2011)

De uma forma geral, os ciclos de refrigeração por absorção simplificados são compostos por quatro processos, dois deles existe troca de calor e os outros dois ocorrem trocas simultâneas de calor e massa. Tais processos são:

- Vaporização do refrigerante no evaporador, produzindo o efeito frigorífico;
- Absorção do fluido refrigerante (na fase vapor), executado pelo fluido absorvedor, ao chegar no absorvedor;

- O fluido refrigerante se separa do fluido absorvedor no gerador de vapor, ao receber energia térmica, a alta temperatura, de uma fonte externa;
- Perda de calor do fluido refrigerante ao chegar no condensador, através de trocas de calor com o meio ambiente.

Os sistemas de refrigeração por absorção possuem algumas classificações, sendo a primeira delas referente ao número de efeitos. Denomina-se um sistema de simples efeito quando é produzido vapor, a partir da solução líquida, com o uso de uma fonte térmica que aquece o interior do gerador de vapor, gerando vapor para o processo. Em um sistema de duplo efeito, o vapor é produzido duas vezes, nos dois geradores de vapor do sistema, a partir da solução líquida e no sistema de triplo efeito, o vapor é produzido três vezes, através de três geradores de vapor e assim por diante nos demais sistemas. Quanto mais efeitos conter o sistema, maior será o COP, devido ao aumento da vazão de fluido refrigerante e do efeito frigorífico. Vale destacar que cada sistema mencionado trabalha com níveis de pressões distintos, o sistema de simples efeito funciona com dois níveis de pressões, o de duplo efeito com três níveis de pressões e o de triplo efeito com 4 níveis de pressões distintos.

Outra classificação inerente aos sistemas de absorção é com relação ao bombeamento da solução líquida advindo do absorvedor, quando o fluido é bombeado direto para o primeiro gerador de vapor (para os sistemas com mais de um efeito), aquele que possui a maior pressão, nesse caso é dito que o sistema é em série, porém existe outra maneira de distribuição da solução após o bombeamento, que é quando a solução é bombeada para todos os geradores de vapor do sistema de forma simultânea, esse modo é classificado como sistemas de absorção em paralelo.

O detalhamento dos tipos de ciclos não será feito no presente estudo, pois não é o foco do trabalho. No capítulo quatro será descrito o funcionamento do sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em série, que é o ciclo aplicado no estudo.

### 3.1.1 FLUIDOS DE TRABALHO

Os sistemas de refrigeração por absorção necessitam de um par de fluidos para ser possível o funcionamento da unidade, sendo um dos fluidos o refrigerante (fluido com função de arrefecer) e o outro o absorvente, cuja a função é absorver o fluido refrigerante.

Segundo Herold (2016), o rendimento e a eficiência de ciclos de refrigeração reversíveis (ideias) são independentes das propriedades dos fluidos de trabalho em uso, no entanto, em máquinas reais ambos são determinados em grande escala pelas propriedades destes fluidos. Também o custo inicial e o custo de operação de uma máquina de refrigeração são extremamente dependentes das propriedades do fluido.

São diversos, os fluidos de trabalho utilizados em máquinas de refrigeração por absorção, a tabela 3.1 mostra os principais fluidos encontrados na literatura.

Tabela 3.1 – Principais fluidos de trabalho utilizados em sistemas de absorção (Fonte: adaptado de Herold 2016)

FLUIDO ABSORVENTE	FLUIDO REFRIGERANTE
Água	Amônia, Metil amina ou outras aminas alifáticas
Solução de Água e Brometo de Lítio	Água
Solução de Cloreto de Lítio e Metanol	Metanol
Ácido Sulfúrico	Água
Hidróxido de Sódio ou Potássio ou misturas	Água
Nitrato de Lítio	Amônia
Sulfocianeto de Amônia	Amônia
Tetracloroetano	Cloreto de Etila
Dimetil Éter Tetraetileno Glicol	Cloreto de Metileno
Óleo de Parafina	Tolueno ou Pentano
Glicol Etilico	Metil Amina
Éter Dimetílico ou Glicol Tetraetílico	Monofluor Dicloro Metano ou Diclorometano

Os fluidos, para serem aplicados em sistemas de absorção, tem que possuir propriedades adequadas, como por exemplo, a necessidade de afinidade entre o fluido absorvente e o fluido refrigerante. A tabela 3.2 mostra o comparativo entre os dois principais pares de fluidos de trabalho usados em sistemas de absorção, água-brometo de lítio e amônia-água.

Tabela 3.2 – Comparativo entre os dois pares de fluidos de trabalho mais utilizados em aplicações de sistemas de absorção. (Fonte: adaptado de Herold 2016)

PROPRIEDADES	AMÔNIA - ÁGUA	ÁGUA - BROMETO DE LÍTIO
	REFRIGERANTE	
Calor latente de vaporização	Bom	Excelente
Pressão de vapor	Muito alta	Muito baixa
Temperatura de resfriamento	Excelente	Aplicações limitadas
Viscosidade	Boa	Boa
	ABSORVENTE	
Pressão de vapor	Ruim	Excelente
Viscosidade	Boa	Boa
	MISTURA	
Inexistência de fase sólida	Excelente	Aplicações limitadas
Toxicidade	Ruim	Bom
Afinidade entre os fluidos de trabalho	Boa	Boa

De acordo com a tabela 3.2, observamos que os fluidos refrigerantes possuem calor latente de vaporização interessante, tal fato resulta na redução da vazão necessária para desenvolvimento do efeito frigorífico. Já no tocante a pressão de vaporização, os fluidos refrigerantes citados na tabela 3.2, não possuem características adequadas. Na amônia é alta demais e na água é baixa demais, gerando a necessidade de deixar o sistema em vácuo (considerando a pressão atmosférica como referência) para evaporar em baixas temperaturas.

O par de fluidos utilizados no presente trabalho será água (refrigerante) e o Brometo de lítio (Absorvente). O par escolhido possui um excelente calor latente de

vaporização para aplicação em questão, não é tóxico, o que faz priorizar a segurança do usuário.

### 3.2 LEIS DA TERMODINÂMICA

A ciência denominada termodinâmica é constituída basicamente de três leis fundamentais, lei zero, primeira lei e segunda lei. A lei zero estabelece que se dois corpos estiverem em equilíbrio térmico com outro corpo, os três estarão em equilíbrio térmico entre si. A primeira lei da termodinâmica trata do princípio da conservação da energia, ou seja, a energia pode sofrer diversas interações, mas o total da energia se mantém constante. Por fim, a segunda lei da termodinâmica afirma que a energia possui qualidade e quantidade e os processos apontam para a diminuição da qualidade energética.

#### 3.2.1 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

Segundo Van Wylen (2003), a primeira lei da termodinâmica estabelece que, durante qualquer ciclo percorrido por um sistema, a integral cíclica do calor é proporcional a integral cíclica do trabalho. Matematicamente essa expressão é definida da seguinte forma:

$$\oint \delta.Q = \oint \delta.W \quad (3.1)$$

Joule detectou, nas transformações envolvendo calor e trabalho em sistemas fechados, que a diferença  $\delta.Q - \delta.W$  é pertinente a uma propriedade intrínseca ao sistema, tendo como diferencial uma função de ponto e, portanto, independe do processo realizado. Tal propriedade é definida como a energia do sistema, logo a primeira lei para sistemas é denominada da seguinte forma:

$$dE = \delta.Q - \delta.W \quad (3.2)$$

A primeira lei da termodinâmica trata também da conservação da massa cujo sua representação matemática é:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_e m_e - \sum_s m_s \quad (3.3)$$

No tocante a aplicação da primeira da termodinâmica em volume de controle, é necessário considerar a parcela do fluxo de massa no escoamento do fluido que entra e que sai do volume de controle. Essa parcela é definida como a propriedade termodinâmica entalpia, que é expressa como:

$$H = U + PV \quad (3.4)$$

Considerando a parte de energia que é transportada pelo fluxo de massa que é transportado na entrada e saída do volume de controle, a primeira lei para volume de controle é dada por:

$$\frac{dE_{v.c.}}{dt} = Q_{v.c.} - W_{v.c.} + \sum m_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum m_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (3.5)$$

O estudo baseado só com a primeira lei da termodinâmica é limitado, necessitando do uso da segunda lei da termodinâmica. A primeira lei não mostra e nem identifica as causas das irreversibilidades. Mesmo com as limitações, ela possui sua importância no cálculo dos fluxos de calor e de massa que servirá de apoio para a análise exérgica do presente estudo.

### 3.2.2 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Segundo Shapiro (2016), a segunda lei da termodinâmica permite: prever o sentido dos processos; estabelecer condições para o equilíbrio; determinar o melhor desempenho teórico do ciclo, motores e outros dispositivos; avaliar quantitativamente, os fatores que impedem o alcance do melhor nível de desempenho teórico.

A segunda lei da termodinâmica vem sendo utilizada em outras áreas do conhecimento, entre elas, na economia, filosofia e na termodinâmica aplicada a

Engenharia. Devido a essa variedade de áreas de aplicação, não é fácil produzir um enunciado que atenda a todos. Alguns enunciados foram criados no intuito de iniciar o estudo da segunda lei da termodinâmica e suas consequências.

O primeiro enunciado apresentado no presente trabalho é o enunciado de Clausius, o mesmo afirma que:

*“É impossível um sistema qualquer trabalhar de tal maneira que o resultado singular seja transferência de energia sob a forma de calor de um corpo com menor temperatura para um corpo com maior temperatura”.*

Ou seja, o enunciado diz que é impossível uma máquina de refrigeração ou uma bomba de calor, funcionar sem uma entrada de energia da vizinhança, por exemplo, a refrigeração de produtos alimentícios é adquirida por refrigeradores movidos por compressores mecânicos que necessitam de energia elétrica de sua vizinhança para operar.

Outro enunciado da segunda lei da termodinâmica, o enunciado de Kelvin-Planck, alega que:

*“É impossível para qualquer sistema operar em ciclo termodinâmico e fornecer uma quantidade líquida de trabalho para sua vizinhança enquanto recebe energia por transferência de calor de um único reservatório térmico”.*

Antes de comentar o enunciado acima, é necessário definir o que é um reservatório térmico. Segundo Shapiro (2016), reservatório térmico é um tipo especial de sistema que sempre permanece á temperatura constante, mesmo adicionando ou removendo energia através de transferência de calor.

De acordo com o enunciado de Kelvin-Planck, quando um sistema percorre um ciclo e se comunica só com um reservatório térmico, este sistema não pode fornecer uma quantidade líquida de trabalho positivo para sua vizinhança. Analiticamente, o enunciado de Kelvin-Planck é:

$$W_{ciclo} \leq 0 \text{ (Reservatório único)} \quad (3.6)$$

O último enunciado descrito no presente estudo é o enunciado da entropia da segunda lei da termodinâmica, que estabelece o seguinte:

*“É impossível para qualquer sistema atuar de uma forma que a entropia seja destruída”.*

Ou seja, diferente da massa e da energia (que se conservam), a entropia no interior de sistemas reais (com irreversibilidades) pode ser positivo ou nulo, mas nunca será negativo.

Para um estudo que envolva volumes de controle, como é o caso do presente trabalho, a taxa de geração de entropia é representada pela seguinte expressão:

$$\frac{dS_{v.c.}}{dt} = \sum m_e (S_e) - \sum \dot{m}_s (S_s) + S_{ger} + \sum \frac{Q_{v.c.}}{T} \quad (3.7)$$

### 3.3 EXERGIA

Foi visto, em tópicos anteriores, que a energia se conserva em qualquer dispositivo ou processo, ou seja, ela não pode ser destruída. A energia consumida em sistemas ou processos, na forma de combustível, eletricidade, água e assim por diante, resulta em produtos e subprodutos. Porém a ideia de conservação da energia para esses casos é inconveniente para descrever tais aspectos de gasto de recursos.

A propriedade mais adequada para quantificar o potencial de utilização dos recursos é a exergia, tal propriedade não é conservada e é destruída pelas irreversibilidades do sistema.

Segundo Shapiro (2016), o conceito de exergia é definido como sendo o máximo de trabalho teórico possível de ser atingido usando como referência um sistema global, constituído por um sistema e um ambiente, conforme ele atinge o estado morto ou estado de equilíbrio

Já Kotas (1985) define exergia como sendo o máximo de trabalho ou de potência que pode ser produzido por um sistema ou fluxo, quando o mesmo percorre um processo inteiramente reversível, até atingir o estado morto ou estado de equilíbrio com as condições ambientais.

O estado morto ou estado de equilíbrio é quando o sistema de interesse está em equilíbrio com a vizinhança, ou seja, é quando a temperatura, pressão, concentração química, velocidade e altura do sistema é igual a temperatura, pressão, concentração química, velocidade e altura da vizinhança. No estado morto não existe interação entre o sistema e o ambiente, logo não há potencial para produzir trabalho.

Na forma geral, para obtenção de fluxos de exergia, no tocante a volume de controle, é utilizado a equação da taxa de irreversibilidade em função das disponibilidades térmicas, é dado por:

$$I = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q - (W_{v.c.}) + \sum(m_e \cdot e_e) - \sum(m_s \cdot e_s) \quad (3.7)$$

Utilizando o teorema de Guy-Stodola, a expressão 3.7 fica:

$$I = T_0 \cdot \left[ \sum(m_s \cdot s_s) - \sum(m_e \cdot s_e) - \frac{Q_{v.c.}}{T} \right] \quad (3.8)$$

É possível dividir a exergia de um fluxo em quatro componentes: exergia cinética ( $E_{cinética}$ ), exergia potencial ( $E_{potencial}$ ), exergia física ( $E_{física}$ ) e exergia química ( $E_{química}$ ). A soma das parcelas citadas dar origem a exergia total.

A exergia cinética é a energia cinética considerando a velocidade relativa da superfície da terra e é representada pela seguinte expressão:

$$E_{cinética} = \frac{m \cdot V_0^2}{2} \quad (3.9)$$

A exergia potencial é a mesma energia potencial quando é admitido que o referencial é a superfície da terra. A expressão que representa a exergia potencial é:

$$E_{potencial} = m \cdot g_0 \cdot Z_0 \quad (3.10)$$

Na maioria das análises, a exergia cinética e potencial são desprezadas, por se tratarem de valores inferiores em relação as demais parcelas de exergia do componente.

A exergia física, ou termomecânica, como também é denominada, é o trabalho possível de ser realizado em processos reversíveis quando uma quantidade de matéria sai de um estado inicial (Pressão e Temperatura) e vai até o estado de equilíbrio (ou estado morto). A exergia física para um fluxo de massa que atravessa os limites do volume de controle é representada pela seguinte expressão:

$$E_{física} = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (3.11)$$

Segundo Cavalcanti (2016), cada fluido deve ter um estado de referência, como por exemplo, os sistemas de absorção, cada solução forte e fraca apresenta estados de referência distinto pela concentração em relação a pressão e temperatura de referência.

Kotas (1985) denomina exergia química como sendo o máximo de capacidade de produzir trabalho quando a substância de referência estiver em condições de temperatura e pressão de estado morto e é trazido a condição de

equilíbrio químico com o ambiente através de processos que circundam transferência de calor e troca de substância apenas com o ambiente.

Quando se trata de uma mistura de substâncias puras, Kotas (1985) expressa a exergia química da seguinte forma:

$$E_{química} = \sum_i x_i \cdot e_i^{química} + R \cdot T_0 \cdot \sum_i (x_i \cdot \ln \gamma_i \cdot x_i) \quad (3.12)$$

Se existir a possibilidade de considerar a mistura dos gases como ideal, o coeficiente de atividade que é designado por “ $\gamma$ ” é igual a 1, logo a expressão 2.11 fica:

$$E_{química} = \sum_i x_i \cdot e_i^{química} + R \cdot T_0 \cdot \sum_i (x_i \cdot \ln x_i) \quad (3.13)$$

### 3.4 APLICAÇÕES EM COGERAÇÃO

A cogeração é denominada como sendo a produção, de forma simultânea, de duas formas de energia usando um único combustível, por exemplo a produção de energia elétrica ou mecânica e energia térmica, originadas mediante uma única fonte térmica. Segundo ASHRAE (2012), aproveitando a energia que seria desperdiçada, a aplicação de sistemas de cogeração promoveria uma eficiência maior que os níveis obtidos quando calor ou potência elétrica são fabricados de forma independente. Utilizando cogeração, a eficiência dos sistemas pode ter um aumento de até 70%.

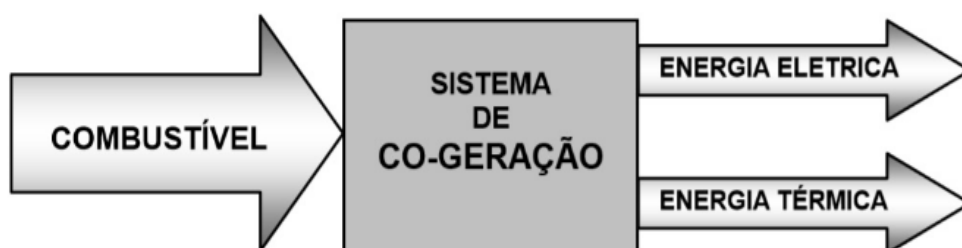


Figura 3.3 – Ilustração do sistema de cogeração (Fonte: cengel, 2013)

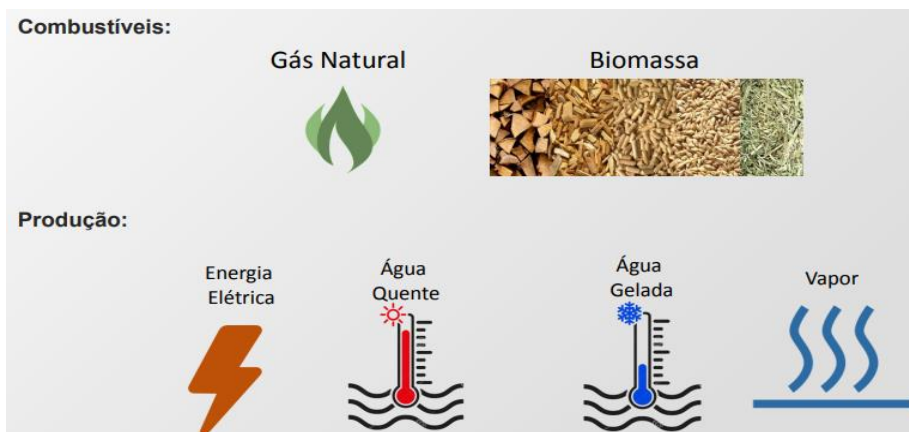


Figura 3.4 - Exemplos de combustíveis e produtos obtidos. (Fonte: ECOGEN BRASIL)

Existe dois tipos de aplicações de cogeração que relaciona a sequência relativa de geração de energia eletromecânica para térmica: geração topping e geração bottoming.

Na geração topping, a energia fornecida pelo combustível é aproveitada para gerar primeiro energia eletromecânica e depois é usada para gerar calor útil. Já na geração bottoming ocorre o inverso, primeiro a energia contida no combustível é aplicada na geração de calor útil e em seguida para geração de energia eletromecânica.



Figura 3.5: Ilustração da geração topping. (Fonte: autor)

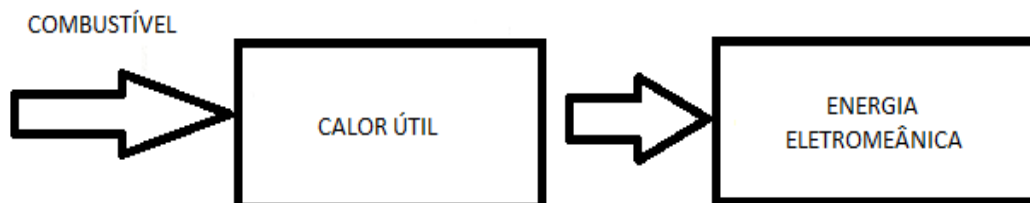


Figura 3.6: Ilustração da geração bottoming. (Fonte: Autor)

O Brasil vem incentivando a aplicação de sistemas de cogeração, principalmente no setor do açúcar e álcool, através do aproveitamento do vapor produzido no processo. Outros setores também estão usando sistemas de cogeração para aumentar a eficiência dos sistemas, merece destaque a indústria siderúrgica, de papel e celulose.

A energia térmica necessária para o funcionamento dos sistemas de refrigeração por absorção pode ser obtida através do aproveitamento do calor rejeitado em processos de produção de vapor, gases expelidos de motores de combustão interna, calor perdido após a combustão em turbinas e no aproveitamento do calor produzido em coletores solares, dentre outras maneiras.

Segue alguns exemplos de aplicações de sistemas de cogeração da empresa ECOGEN na área industrial e comercial.

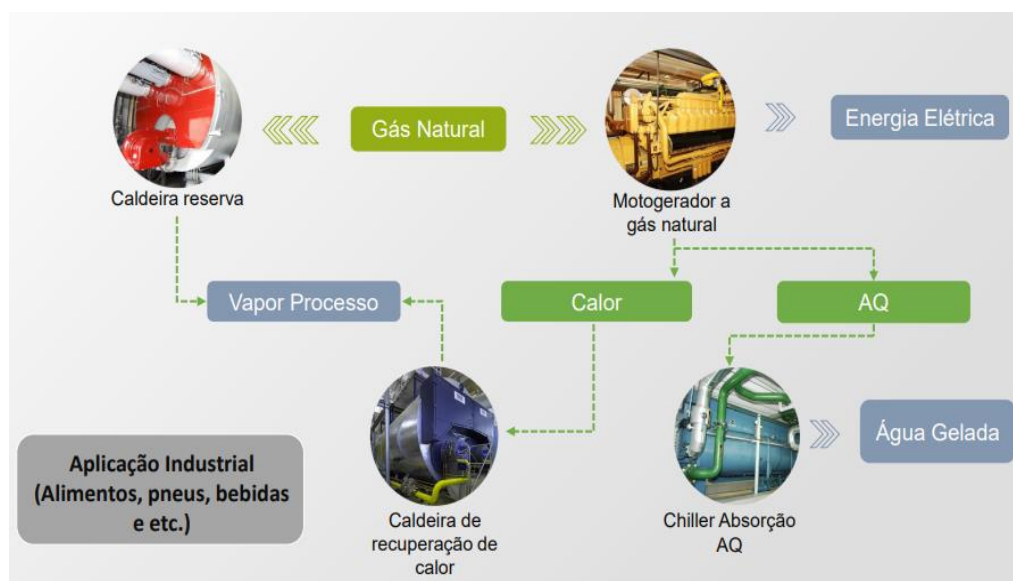


Figura 3.7: Sistema de cogeração com produção de energia elétrica, vapor de processo e água gelada. (Fonte: ECOGEN BRASIL)

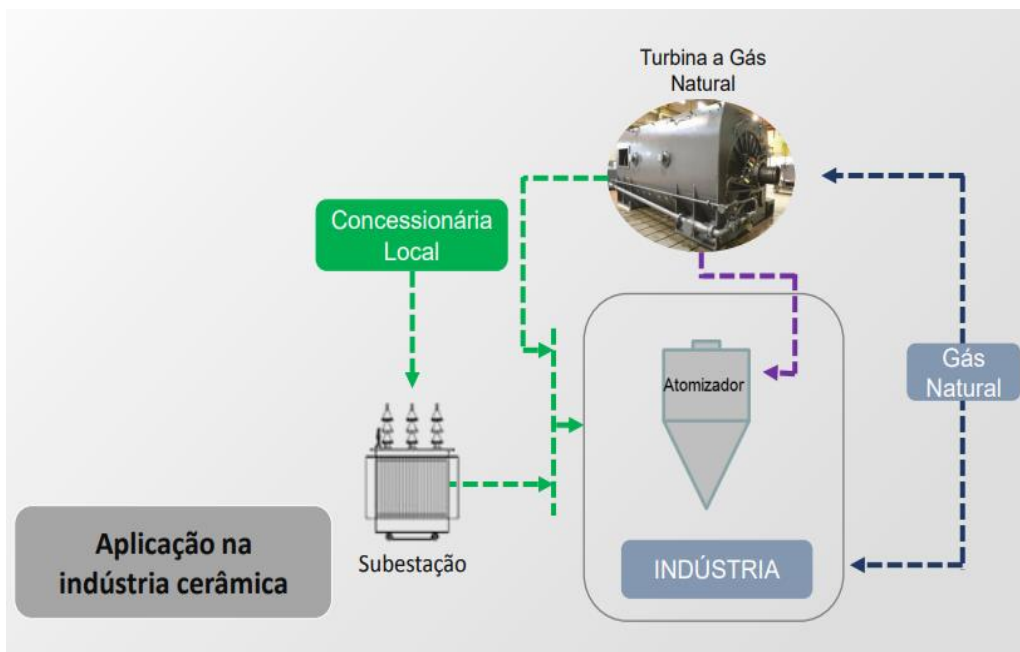


Figura 3.8 - Sistema de cogeração com produção de energia elétrica e ar quente. (Fonte: ECOGEN BRASIL)

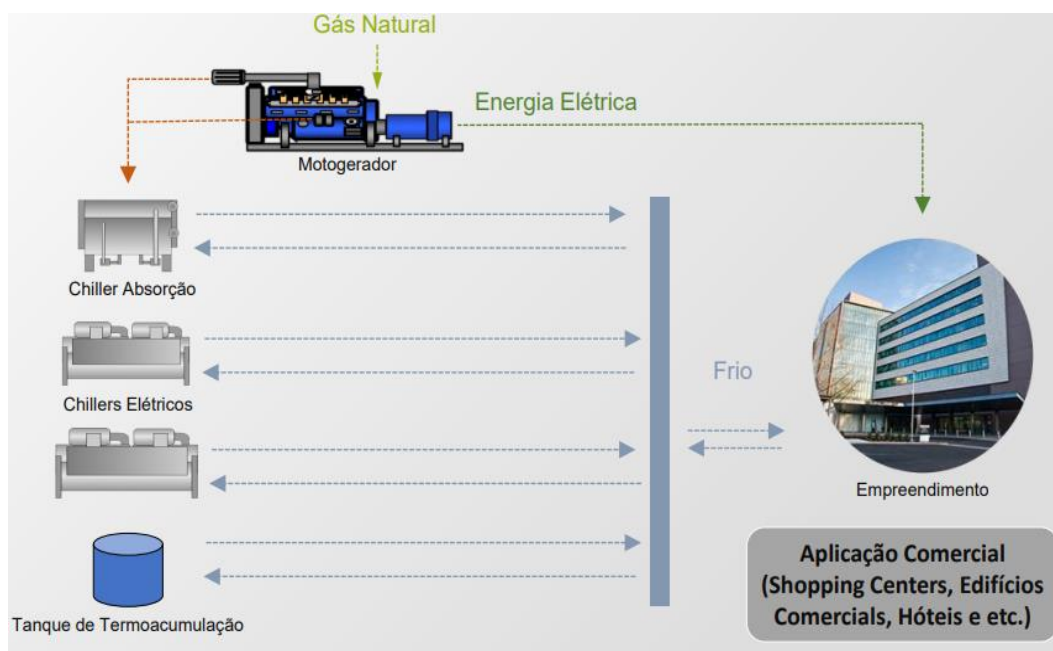


Figura 3.9 - Sistema de cogeração com produção de energia elétrica e água gelada. (Fonte: ECOGEN BRASIL)

### 3.5 EXERGONOMIA

A exergonomia ou termoeconomia é uma metodologia de análise baseada em estudos termodinâmicos e econômicos de sistemas. Essas análises

tem como objetivo identificar e determinar os fluxos energéticos, exergéticos e os custos associados à aquisição e manutenção de equipamentos que compõem um ciclo. Tais informações são utilizadas para construir balanços de custos para cada unidade. Segundo Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), existe quatro objetivos a serem alcançados quando se aplica a análise exergoeconômica:

- I. Calcular, de forma independente, os custos de cada produto fabricado por um sistema que produz mais de um produto;
- II. Compreender a formação de custos e o fluxo dos custos em um sistema;
- III. Otimizar variáveis específicas em um componente singular;
- IV. Otimizar todo o sistema.

O balanço exergoeconômico tem como característica atribuir custos aos valores exergéticos de um portador de energia e obter o valor monetário de cada um dos fluxos. A taxa de custo é atrelada a cada fluxo de exergia. Logo, para cada corrente exergética de entrada ( $C_e$ ) e saída ( $C_s$ ), potência ( $C_w$ ) e transferência de calor ( $C_q$ ), a representação matemática é:

$$C_e = c_e \cdot E_e = c_e \cdot m_e \cdot e_e \quad (3.14)$$

$$C_s = c_s \cdot E_s = c_s \cdot m_s \cdot e_s \quad (3.15)$$

$$C_w = c_w \cdot W \quad (3.16)$$

$$C_q = c_q \cdot E_q = c_q \cdot q \left[ 1 - \frac{T}{T_o} \right] \quad (3.17)$$

Os termos do lado esquerdo das equações acima são denominados de custos médios por unidade de exergia. Para cada componente do ciclo estudado é feito um balanço de custo expressado pela equação abaixo:

$$\sum_s (c_s \cdot E_s)_k + c_w \cdot W = c_q \cdot E_q + \sum_i (c_e \cdot E_e)_k + Z_k \quad (3.18)$$

Sendo o  $Z_k$  a taxa de custo com despesas totais e é composta pelas parcelas de compra dos componentes ( $Z^{CI}$ ), operação e manutenção do sistema ( $Z^{OM}$ ).

$$Z_k = Z^{CI} + Z^{OM} \quad (3.19)$$

No intuito de otimizar e diminuir os custos relacionados a operação e investimento, existe a possibilidade de obter os custos unitários dos combustíveis, produtos e a exergia destruída em cada componente. Logo, a equação 2.17 pode ser reescrita levando em consideração os produtos e os combustíveis, portanto a expressão fica:

$$C_p = C_f \cdot Z_k = c_p \cdot E_p = c_f \cdot E_f + Z_k \quad (3.20)$$

Os termos  $c_p$  e  $c_f$  são conhecidos como o custo médio por unidade de exergia do produto e do combustível, respectivamente. Segundo Cavalcanti (2016), A determinação dos custos monetários pode determinar gargalos no sistema. A figura 2.11 demonstra os custos envolvidos na análise exergoeconômica de um componente do sistema.

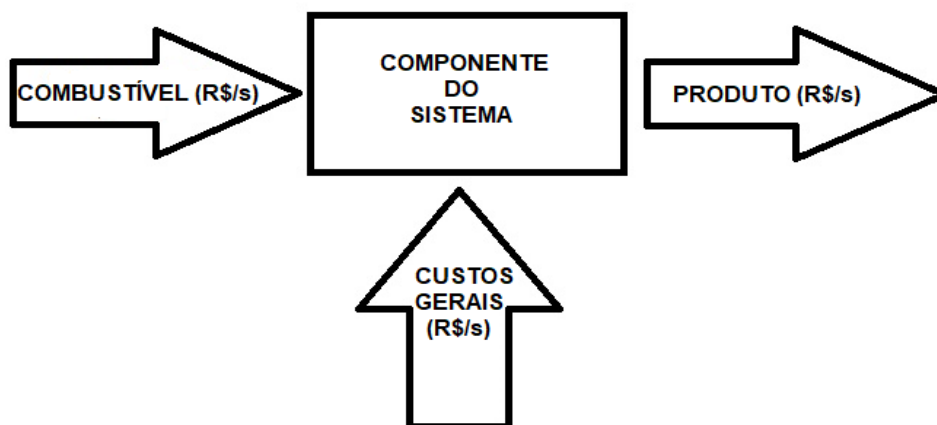


Figura 3.10 – Demonstração dos custos monetários envolvidos na análise exergoeconômica. (Fonte: autor)

Logo, os custos médios do produto e do combustível por unidade de exergia é obtido pelas seguintes expressões, respectivamente:

$$c_p = \frac{C_p}{E_p} \quad (3.21)$$

$$c_f = \frac{C_f}{E_f} \quad (3.22)$$

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:

$$Z_i = z_i \cdot CRF \cdot \phi \text{ [$/s]} \quad (3.23)$$

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:

$$CRF = i \cdot \left[ \frac{(1+i)^{n \text{ ano}}}{(1+i)^{n \text{ ano}} - 1} \right] \cdot \frac{1}{n_{\text{ano}} \cdot n_h \cdot 3600} \quad (3.24)$$

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

$$\varepsilon = \frac{E_p}{E_f} \quad (3.25)$$

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

$$k = \frac{E_f}{E_p} = \frac{E_i^*}{E_j} \quad (3.26)$$

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:

$$E_F = E_P + E_D \quad (3.27)$$

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

$$\dot{C}_D = c_f \cdot E_D \quad (3.28)$$

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

$$r_k = \frac{c_P - c_f}{c_f} \quad (3.29)$$

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:

$$f_k = \frac{\dot{Z}}{c_f \cdot E_D + \dot{Z}} \quad (3.30)$$

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.

### 3.5.1 MÉTODO SPECO

Diversos métodos exergoeconômicos são estudados e aplicados, como o método executado pelos autores Lozano e Valero (1993) denominado TCE – Teoria do custo exergético. Dentre tais metodologias existe o SPECO (Specific Exergy Costing) defendido primeiramente pelos autores Tsatsaronis e Lin (1990) e depois por Lazaretto e Tsatsaronis (1999).

Tal técnica tem como base a exergia específica, custo do produto e do combustível por unidade de exergia, eficiência exergética e equações auxiliares (Cavalcanti, 2016). Segundo Lazaretto e Tsatsaronis (2006), o método contém três etapas, a identificação dos fluxos de exergia, a definição de produto e combustível e por último a aplicação de equações de custo.

Na primeira etapa, é necessário escolher os componentes que vão fazer parte do objeto de estudo ou aplicação em relação ao uso da exergia total ou da exergia de forma separada (térmica, mecânica e química). Após essa

determinação, todos os fluxos de massa, calor e trabalho da saída e da entrada devem ser identificados e obtidos suas respectivas exergias.

Na segunda etapa são definidos os produtos e os combustíveis, tendo como base o propósito de cada componente e a fonte utilizada para obter o resultado, logo, o produto é definido como todos os valores de exergia na saída mais o aumento de exergia entre a entrada e a saída desde que esteja de acordo com a função do componente. De maneira semelhante, o combustível são todos os valores de exergia na entrada mais a redução de exergia entre a entrada e a saída, subtraindo o aumento de exergia que não está relacionado com a finalidade do componente.

Na terceira e última etapa, o objetivo é associar o custo de um sistema térmico com sua vizinhança e suas fontes de irreversibilidades. Normalmente existe um número de corrente exérgica maior do que o número de equipamentos. Esse fato repercute na formação da matriz incidência, logo é necessário a inclusão de equações auxiliares para “fechar” a matriz. A metodologia SPECO tem uma solução para esse inconveniente, que é a aplicação do princípio de produto (P) e combustível (F).

### **3.5.1.a Princípio F**

O princípio F diz que o custo específico (custo por unidade de exergia) 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, ou seja, a “grosso modo” é dito que o combustível paga a conta do produto, por este motivo, o custo específico é igual. Diante da definição do princípio F, Cavalcanti (2016) expõe 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 ficará o produto.
- c. O conceito apresentado pode ser aplicado em qualquer componente de um sistema, observando-se, sempre, a função do componente.

### **3.5.1.b 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  $C_p$ .

Por regra, um fluxo de exergia só pode ser associado, uma única vez, ou ao combustível ou ao produto.

Aplicando o princípio F e o princípio P, define-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.

### **3.5.2 TEORIA DO CUSTO EXERGÉTICO**

A Teoria do Custo exergético (TCE) foi pensada para formular soluções para o problema de alocação de custos em sistemas térmicos, porém ela também pode ser usada para otimização e diagnóstico.

Lozano & Valero (1989) define o TCE afirmando ser uma teoria de contabilidade termoeconômica que liga a termodinâmica (através da segunda lei) com a economia, com o objetivo de obter, mediante critérios do sistema térmico, os fluxos ou correntes de toda instalação.

Alguns critérios ou premissas são necessárias na aplicação do TCE. Serra (1994) mostra tais critérios:

- a. A representação da estrutura do sistema é uma matriz incidência  $A$  ( $n \times m$ ), sendo  $n$  o número de componentes de um sistema e  $m$  o número de fluxos. Os elementos da matriz apresentam valores  $-1, 1$  e  $0$ , onde  $-1$  significa que o fluxo sai do componente,  $1$  diz que o fluxo entra no componente e por último o  $0$  (zero) mostra que o fluxo não tem relação com o componente;
- b. Todos os fluxos do sistema são adquiridos através da propriedade extensiva exergia, sendo denominada pelo produto de sua quantidade e sua qualidade;
- c. Cada componente tem equações características de acordo seu número de entradas, onde a equação característica relaciona a magnitude de um fluxo que entra no componente com as magnitudes dos fluxos que saem e um conjunto de parâmetros que descrevem e dependem somente do comportamento do sistema.
- d. As equações características são funções homogêneas de grau um com relação às magnitudes de saída, tendo em vista que as equações utilizadas na TCE para expressar as entradas em função das saídas são lineares.

De acordo com Lourenço (2016), o método de análise exergoeconômica TCE tem como alicerce conceitos de: produto (produção exérgica de um processo), insumo (quantidade de exergia consumida de um processo), eficiência (razão entre o produto de um processo e seu respectivo insumo) e custo exérgico unitário (quantidade de insumos exérgicos externos de um sistema ou subsistema necessário para se obter uma unidade exérgica de um determinado recurso interno ou produto).

Lozano (1989) diz que para determinar os custos exérgicos unitários é necessário seguir cinco proposições:

1. O custo exergetico é uma grandeza conservativa, onde para cada componente da estrutura produtiva, o somatório dos custos exergeticos dos fluxos que entram deve ser igual ao somatório dos custos exergeticos que saem,

$$\sum_{\text{entrada}} \text{somatório custo exergeticos} = \sum_{\text{saída}} \text{somatório custo exergeticos}$$

2. Para um sistema ou volume de controle com mais de um insumo energético, entrando ou saindo, os custos exergeticos unitários dos fluxos de exergia (combustível) que entram num subsistema, será igual aos custos exergeticos unitários dos fluxos de exergia que saem (regra dos insumos);
3. Se um sistema, cujo o produto é formado por vários fluxos, o custo exergetico será o mesmo para cada um deles (regra dos produtos);
4. Aos fluxos das perdas externas deve se atribuir custo exergetico nulo, pois não haverá utilização posterior;
5. Na ausência de valoração externa, o custo exergetico dos fluxos que entram no sistema é igual a sua exergia.

## **CAPÍTULO 4**

### **METODOLOGIA**

Este capítulo descreve o ciclo de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito, usado no presente trabalho, como também a modelagem termodinâmica, exergoeconômica (pelo método SPECO e pelo método TCE) e o balanceamento da equação química do gás natural comercializado pela companhia de gás da paraíba (PBGás). Toda a análise apresentada neste capítulo, exceto o balanceamento da equação química do gás natural que será mostrado na integra, foi auxiliado pela plataforma EES (Solução de Equação de Engenharia).

#### **4.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE DUPLO EFEITO EM SÉRIE**

Os sistemas de refrigeração por absorção de duplo efeito em série possuem um COP superior aos sistemas de absorção de simples efeitos, pois utiliza o calor de entrada, vindo do gerador de vapor 1, outra vez no gerador de vapor 2. O sistema de duplo efeito contém sete trocadores de calor, uma bomba para recirculação da água (fluidos refrigerante) e outra bomba responsável pelo bombeamento da solução de água e brometo de lítio. O mesmo trabalha com três níveis de pressão (duas abaixo da pressão atmosférica e uma acima). A figura 4.1 mostra o funcionamento do ciclo em estudo.



solução vinda do gerador II se transformando em líquido saturado. Em contrapartida a solução aquecida no gerador II vai liberar a parte restante do vapor, sendo assim, do gerador II saem vapor refrigerante com pressão elevada e brometo de lítio (com concentração forte). O brometo de lítio que sai do gerador 2, retorna para o absorvedor, porém no trajeto de retorno, o mesmo preaquece a solução que sai do absorvedor, por meio de um trocador de calor intermediário. Enquanto isso, o fluido refrigerante no estado de líquido saturado percorre um dispositivo de expansão, tornando-se mistura. Em seguida, se junta com o vapor fabricado no gerador II, antes de passar pelo condensador. No condensador, o fluido refrigerante perde calor para o ambiente devido a um sistema de arrefecimento, e é condensado. Por fim, o condensado passa por um dispositivo de expansão, chegando no evaporador e no absorvedor, respectivamente, recomeçando o ciclo.

## 4.2 ANÁLISE TERMODINÂMICA

A modelagem termodinâmica do sistema de absorção em estudo é baseada nas equações da conservação de massa, da espécie, primeira e segunda lei da termodinâmica. Além das equações citadas, serão utilizadas correlações matemáticas empíricas, para a obtenção das propriedades da solução de água e brometo de lítio.

O código computacional desenvolvido na plataforma EES, analisa os aspectos energéticos e exergeticos do sistema. No tocante ao estudo energético, foram obtidos os fluxos de calor de cada equipamento e as propriedades termodinâmicas. Na análise exergetica, o objetivo é determinar a exergia e as irreversibilidades de cada ponto do sistema.

A análise termodinâmica para ciclos é realizada usando as leis da termodinâmica para volume de controle. Cada equipamento terá o volume de controle com a finalidade de facilitar a abordagem de diferentes definições. Algumas suposições são necessárias para a realização da análise, dentre elas estão:

1. Todos os equipamentos serão analisados considerando a operação em regime permanente;
2. As energias, cinética e potencial, serão desconsideradas para efeitos de análise, sem comprometer os resultados finais;
3. Na saída do evaporador e do condensador, o refrigerante é considerado em condição de saturação para fins de análise;
4. Nas saídas do absorvedor e dos geradores de vapor, é suposto que o brometo de lítio está em condição de equilíbrio;
5. Não tem troca de calor entre os trocadores de calor e sua vizinhança;
6. As perdas de cargas por atrito nos trocadores de calor e nas tubulações não serão levadas em consideração no presente estudo;

A demonstração da modelagem termodinâmica foi suprimida neste estudo, por não ser o foco do trabalho, porém foi feito o código computacional e a modelagem similar pode ser consultada em Santos (2005).

#### **4.3. BALANCEAMENTO DA EQUAÇÃO QUÍMICA DO GÁS NATURAL**

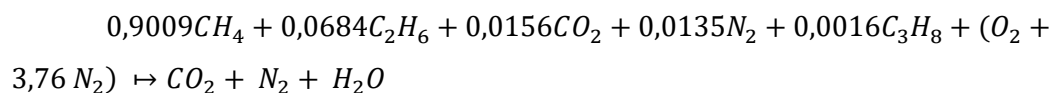
O problema consiste em balancear a equação química da combustão do gás natural, comercializado pela PBgás, considerando que a combustão é completa com quantidade de ar teórico e sem excesso de ar.

A tabela abaixo mostra a composição média do gás natural da PBgás e as suas propriedades:

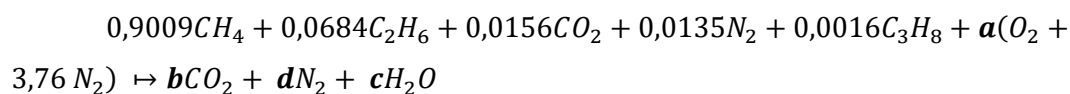
Tabela 4.1 – composição e propriedades do gás natural comercializado pela Pbgás.  
(consulta feita em novembro de 2017, as 10:35, no site [http://www.pbgas.com.br/?page\\_id=195](http://www.pbgas.com.br/?page_id=195))

COMPOSIÇÃO MÉDIA DO GÁS NATURAL DA PBGÁS	% VOLUME
METANO (CH <sub>4</sub> )	90,09
ETANO (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	6,84
DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> )	1,56
NITROGÊNIO (N <sub>2</sub> )	1,35
PROPANO (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	0,16
PROPRIEDADES (VALORES MÉDIOS)	
PODER CALORÍFICO SUPERIOR (Kcal/m <sup>3</sup> )	9,100
DENSIDADE RELATIVA DO AR	0,614
MASSA ESPECÍFICA (Kg/m <sup>3</sup> )	0,737

A equação que descreve a reação de combustão do gás natural é dada por :



#### 4.3.1 Balanceamento da reação



O objetivo é determinar os valores de **a, b, d e c** da equação acima, logo:

- Aplicando conservação da massa para o carbono, temos:

$$0,9009 + 2x0,0684 + 0,0156 + 3x0,0016 = b$$

$$b = 1,0581$$

- Aplicando conservação da massa para o Hidrogênio, temos :

$$4x(0,9009) + 6x0,0684 + 8x0,0016 = 2xc$$

$$c = 2,0134$$

- Aplicando conservação da massa para o Oxigênio, temos :

$$2x0,0156 + 2xa = 2xb + 2xc$$

$$,0312 + 2xa = 2x1,0581 + 2,0134$$

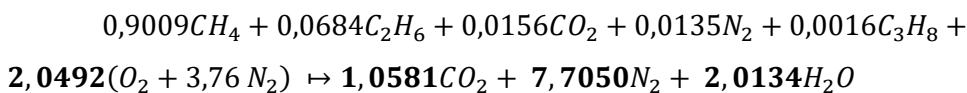
$$a = 2,0492$$

- Aplicando conservação da massa para o Nitrogênio, temos :

$$ax2x3,76 = 2xd$$

$$d = 7,7050$$

Portanto, a equação da combustão do gás natural balanceada é:



A partir da análise da equação acima, observamos que os dados do produto (Gases de Exaustão), úteis para determinação da exergia química dos gases de combustão que entra no gerador de vapor de alta pressão, do sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito, são:  $CO_2 \rightarrow 105,81\%$  ,  $H_2O \rightarrow 201,34\%$  e  $N_2 \rightarrow 770,50\%$ .

#### 4.3.2 Determinação da razão ar-combustível

A determinação da razão ar-combustível na reação de combustão do gás natural é determinado assim:

- Razão Ar-Combustível na base molar :

$$AC_{molar} = \frac{\text{Massa de ar}}{\text{Massa de Combustível}} = \frac{9,7542}{1} = 9,7542 \frac{\text{Kmol (ar)}}{\text{Kmol (Combustível)}}$$

$$AC_{molar} = 9,7542 \frac{Kmol (ar)}{Kmol (Combustível)}$$

- Razão Ar-Combustível na base mássica :

$$AC = AC_{molar} \cdot \frac{M_{ar}}{M_c} = 9,7542 \cdot \frac{28,97}{148,2267} = 1,9064 \frac{Kg (ar)}{Kg (Combustível)}$$

$$AC = 1,9064 \frac{Kg (ar)}{Kg (Combustível)}$$

#### 4.4 ANÁLISE EXERGOECONÔMICA - SPECOS

Diferentes abordagens foram apresentadas na literatura para análises exergoeconômicas de sistemas que trabalham com conversão de energia. Nesta etapa do estudo, foi utilizado o método SPECOS, para avaliar, do ponto de vista exergoeconômico, o sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito em série. 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). Portanto, a equação primitiva para o desenvolvimento do balanço de custos exergeticos da unidade proposta é equação 2.17, mencionada no capítulo dois.

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 SPECOS.

As válvulas de expansão presentes no ciclo, foram incorporadas aos equipamentos sucessores, pois o significado econômico dos fluxos exergeticos na entrada e na saída serem considerados desprezíveis com relação aos fluxos restantes da unidade em estudo MARQUES (2005).

Os custos monetários e a exergia de entrada dos equipamentos que recebem água de arrefecimento para dissipar calor foram considerados zero, pois

tal sistema funciona em recirculação, portanto não existe perda de água de arrefecimento.

Com relação ao estudo aplicado para obtenção dos custos exergéticos unitários no método SPECÓ, foi feita uma adaptação dos princípios P e F, para ser possível realizar os balanços e obter tais informações para efeitos de comparação com o método TCE, tendo em vista que na literatura não consta o supracitado estudo para o método SPECÓ.

#### 4.4.1 - Gerador de vapor I

A figura 4.2 apresenta o volume de controle determinado para o gerador de vapor I. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico.

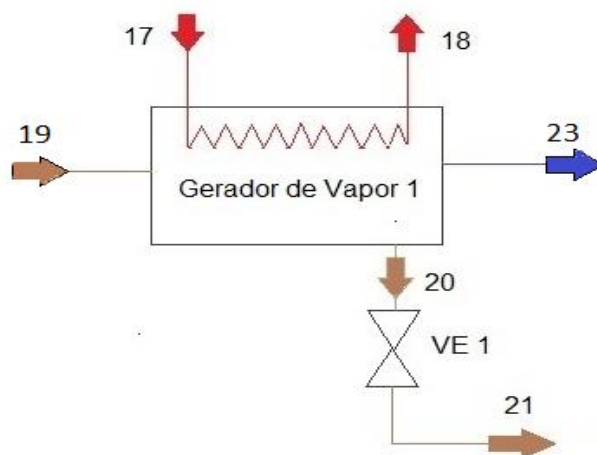


Figura 4.2 – Volume de controle do gerador de vapor I. (Fonte: autor)

##### 4.4.1a – Balanço de custo exergético unitário

A equação do balanço de custo exergético unitário, baseado nos princípios P e F descritos no capítulo 3 é:

$$(E_{17}^*) + (E_{19}^*) - (E_{18}^*) - (E_{23}^*) - (E_{20}^*) = 0 \quad (4.1)$$

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:

$$k_{17} = k_{18} \quad (4.2)$$

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:

$$k_{19} = \frac{E_{20}^* + E_{23}^*}{E_{20} + E_{23}} \quad (4.3)$$

#### 4.4.1b – Balanço de custo monetário

A equação do produto do gerador de vapor I é:

$$P: (c_{18} \cdot E_{18}) + (c_{23} \cdot E_{23}) + (c_{20} \cdot E_{20}) \quad (4.4)$$

A equação do combustível do gerador de vapor I é:

$$F: (c_{19} \cdot E_{19}) + (c_{17} \cdot E_{17}) \quad (4.5)$$

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:

$$c_{19} = \frac{c_{20} + c_{23}}{E_{20} + E_{23}} \quad (4.6)$$

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:

$$c_{17} = c_{18} \quad (4.7)$$

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

$$(c_{18} \cdot E_{18}) + (c_{23} \cdot E_{23}) + (c_{20} \cdot E_{20}) = (c_{19} \cdot E_{19}) + (c_{17} \cdot E_{17}) + Z_{gerador1} \quad (4.8)$$

#### 4.4.2 - Gerador de vapor II

A figura 4.3 exibe o volume de controle determinado para o gerador de vapor II. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico:

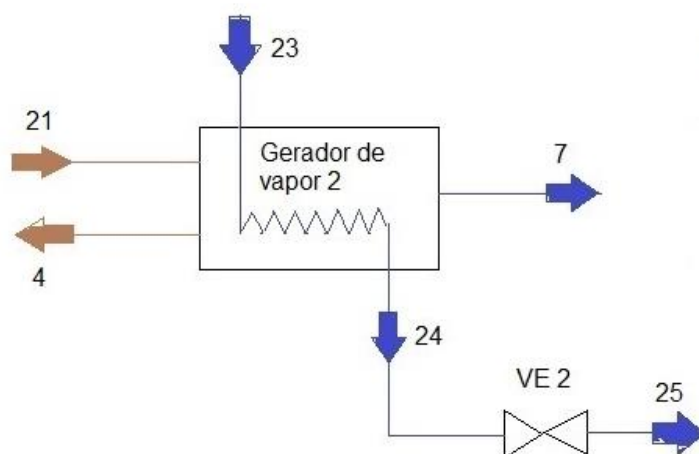


Figura 4.3 – Volume de controle do gerador de vapor II. (Fonte: autor)

##### 4.4.2a – Balanço de custo exergético unitário

A equação do balanço de custo exergetico unitário, como no gerador de vapor I, foi feito tomando como base os princípios P e F, logo:

$$(E_{21}^*) + (E_{23}^*) - (E_4^*) - (E_7^*) - (E_{24}^*) = 0 \quad (4.9)$$

A equação auxiliar do combustível a partir do princípio F:

$$k_{20} = \frac{E_{23}^* + E_{24}^*}{E_{23} + E_{24}} \quad (4.10)$$

A equação auxiliar do Produto a partir do Princípio P:

$$k_7 = k_4 \quad (4.11)$$

#### 4.4.2b – Balanço de custo monetário

A equação do produto do gerador de vapor II fica:

$$P: (c_4 \cdot E_4) + (c_7 \cdot E_7) + (c_{24} \cdot E_{24}) \quad (4.12)$$

A equação do combustível do gerador de vapor II fica:

$$F: (c_{20} \cdot E_{20}) + (c_{23} \cdot E_{23}) \quad (4.13)$$

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

$$c_4 = c_7 \quad (4.14)$$

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

$$c_{20} = \frac{c_{23} - c_{24}}{E_{23} - E_{24}} \quad (4.15)$$

Logo, o balanço geral para o gerador de vapor II, incluindo os custos com despesas totais, é expressado por:

$$(c_4 \cdot E_4) + (c_7 \cdot E_7) + (c_{24} \cdot E_{24}) = (c_{20} \cdot E_{20}) + (c_{23} \cdot E_{23}) + Z_{gerador2} \quad (4.16)$$

#### 4.4.3 – Sistema de condensação

A figura 4.4 mostra o volume de controle determinado para o sistema de condensação. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico:

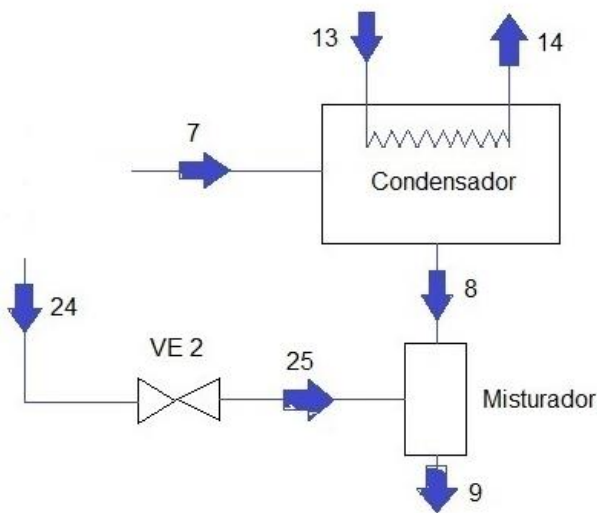


Figura 4.4 – Volume de controle do sistema de condensação. (Fonte: autor)

#### 4.4.3a – Balanço de custo exergético unitário

A equação do balanço de custo exergético unitário para o sistema de condensação é:

$$(E_7^*) + (E_{13}^*) - (E_{24}^*) - (E_{14}^*) - (E_9^*) = 0 \quad (4.17)$$

A equação auxiliar do combustível do sistema de condensação fica:

$$k_9 = \frac{E_7^* + E_{24}^*}{E_7 + E_{24}} \quad (4.18)$$

A equação auxiliar do Produto para o sistema de condensação é:

$$k_{13} = k_{14} \quad (4.19)$$

#### 4.4.3b – Balanço de custo monetário

A equação do produto para o sistema de condensação é:

$$P: (c_9 \cdot E_9) + (c_{14} \cdot E_{14}) \quad (4.20)$$

A equação do combustível para o sistema de condensação fica:

$$F: (c_7 \cdot E_7) + (c_{24} \cdot E_{24}) + (c_{13} \cdot E_{13}) \quad (4.21)$$

A equação auxiliar do produto, utilizando o princípio P, no sistema de condensação não é aplicado.

A equação auxiliar do combustível no sistema de condensação, tendo como base o princípio F, fica:

$$c_9 = \frac{c_7 - c_{24}}{E_7 - E_{24}} \quad (4.22)$$

Logo, o Balanço geral para o sistema de condensação, somando os custos com despesas totais é:

$$(c_9 \cdot E_9) + (c_{14} \cdot E_{14}) = (c_7 \cdot E_7) + (c_{24} \cdot E_{24}) + (c_{13} \cdot E_{13}) + Z_{Scondensação} \quad (4.23)$$

#### 4.4.4 - Evaporador

A figura 4.5 mostra o volume de controle determinado para o evaporador. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico:

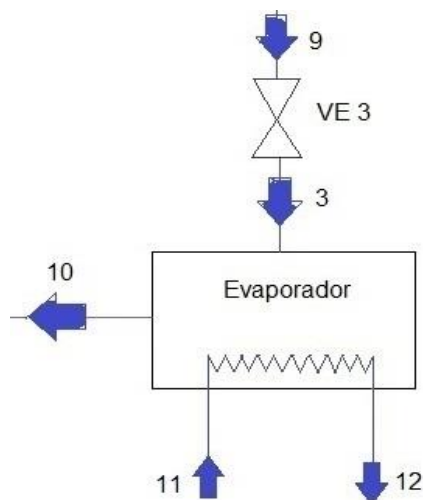


Figura 4.5 – Volume de controle do evaporador. (Fonte: autor)

#### 4.4.4a – Balanço de custo exergético unitário

A equação do balanço de custo exergético unitário para o condensador é:

$$(E_9^*) + (E_{11}^*) - (E_{10}^*) - (E_{12}^*) = 0 \quad (4.24)$$

A equação auxiliar do combustível para o condensador fica:

$$k_{10} = k_9 \quad (4.25)$$

#### 4.4.4b – Balanço de custo monetário

A equação do produto baseado na finalidade do evaporador é:

$$P: (c_{10} \cdot E_{10}) + (c_{12} \cdot E_{12}) \quad (4.26)$$

A equação do combustível baseado na finalidade do evaporador é:

$$F: (c_9 \cdot E_9) + (c_{11} \cdot E_{11}) \quad (4.27)$$

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

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

$$C_{10} = C_9 \quad (4.28)$$

Logo, o balanço geral para o evaporador, acrescentando os custos com despesas totais é:

$$(c_{10} \cdot E_{10}) + (c_{12} \cdot E_{12}) = (c_9 \cdot E_9) + (c_{11} \cdot E_{11}) + Z_{evaporador} \quad (4.29)$$

#### 4.4.5 - Absorvedor

A figura 4.6 mostra o volume de controle determinado para o absorvedor. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico:

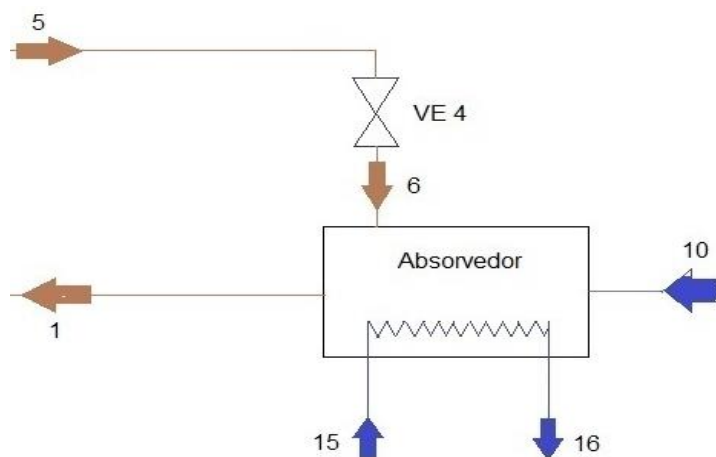


Figura 4.6 – Volume de controle do absorvedor. (Fonte: autor)

#### 4.4.5a – Balanço de custo exergético unitário

A equação do balanço de custo exergético unitário para o absorvedor é:

$$(E_5^*) + (E_{10}^*) + (E_{15}^*) - (E_1^*) - (E_{16}^*) = 0 \quad (4.30)$$

A equação auxiliar do combustível, tendo como base o princípio F, para o absorvedor fica:

$$k_{16} = \frac{E_{10}^* + E_5^*}{E_{10} + E_5} \quad (4.31)$$

A equação auxiliar do Produto, baseado no princípio P, para o absorvedor é:

$$\frac{E_1^* - E_{10}^*}{E_1 - E_{10}} = \frac{E_{16}^* - E_{15}^*}{E_{16} - E_{15}} \quad (4.32)$$

#### 4.4.5b – Balanço de custo monetário

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

$$P: (c_1 \cdot E_1) + (c_{16} \cdot E_{16}) \quad (4.33)$$

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

$$F: (c_5 \cdot E_5) + (c_{15} \cdot E_{15}) + (c_{10} \cdot E_{10}) \quad (4.34)$$

A equação auxiliar do produto para o absorvedor é:

$$\frac{C_1 - C_{10}}{E_1 - E_{10}} = \frac{C_{16} - C_{15}}{E_{16} - E_{15}} \quad (4.35)$$

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

Portanto, o balanço geral para o absorvedor, incluindo os custos com despesas totais, fica:

$$(c_1 \cdot E_1) + (c_{16} \cdot E_{16}) = (c_5 \cdot E_5) + (c_{15} \cdot E_{15}) + (c_{10} \cdot E_{10}) + Z_{\text{absorvedor}} \quad (4.36)$$

#### 4.4.6 – Bomba de solução

A figura 4.7 mostra o volume de controle determinado para a bomba de solução. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico:



Figura 4.7 – Volume de controle da bomba de solução. (Fonte: autor)

##### 4.4.6a – Balanço de custo exergético unitário

A equação do balanço de custo exergético unitário para a bomba de solução é:

$$(E_{26}^*) + (E_1^*) - (E_2^*) = 0 \quad (4.37)$$

##### 4.4.6b – Balanço de custo monetário

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

$$P: (c_2 \cdot E_2) \quad (4.38)$$

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

$$F: (c_1 \cdot E_1) + (c_{26} \cdot E_{26}) \quad (4.39)$$

A equação auxiliar do produto para a bomba de solução não é necessário 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 o custo com despesas totais é:

$$(c_2 \cdot E_2) = (c_{26} \cdot E_{26}) + (c_1 \cdot E_1) + Z_{bomasolução} \quad (4.40)$$

#### 4.4.7 – Trocador de calor

A figura 4.8 mostra o volume de controle determinado para o trocador de calor. Em seguida são apresentadas as equações que regem o modelo exergoeconômico:

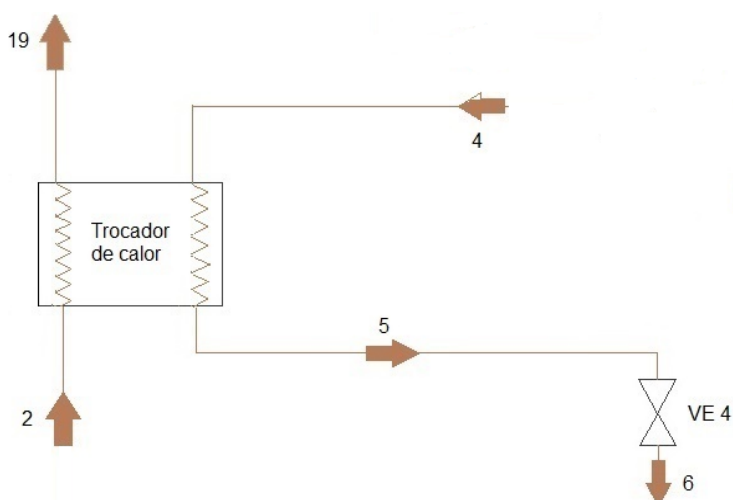


Figura 4.8 – Volume de controle do trocador de calor. (Fonte: autor)

#### 4.4.7a – Balanço de custo exergético unitário

A equação do balanço de custo exergético unitário para o trocador de calor é:

$$(E_2^*) + (E_4^*) - (E_{19}^*) - (E_5^*) = 0 \quad (4.41)$$

A equação auxiliar do combustível, baseado no princípio F, para o trocador de calor fica:

$$k_5 = k_4 \quad (4.42)$$

#### 4.4.7b – Balanço de custo monetário

A equação do produto baseado na função do equipamento é:

$$P: (c_5 \cdot E_5) + (c_{19} \cdot E_{19}) \quad (4.43)$$

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

$$F: (c_2 \cdot E_2) + (c_4 \cdot E_4) \quad (4.44)$$

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:

$$c_5 = c_4 \quad (4.45)$$

Portanto, o balanço geral para o trocador de calor, incluindo os custos com despesas totais é:

$$(c_5 \cdot E_5) + (c_{19} \cdot E_{19}) = (c_2 \cdot E_2) + (c_4 \cdot E_4) + Z_{TC} \quad (4.46)$$

#### 4.5 ANÁLISE EXERGOECONÔMICA – TCE

A análise exergoeconômica, utilizando o método da teoria do custo exergético, é feito de forma semelhante ao método SPECOC, tendo duas opções: a primeira é pela criação e resolução de uma matriz incidência e a segunda é através de equações que representam a conservação de custos exergéticos. A modelagem exergoeconômica realizada no presente trabalho segue as proposições propostas por Valero et al. (1996) e citadas no capítulo 2 do presente estudo. Utiliza-se a forma de equações no intuito de igualar o número de equações ao número de variáveis, pois a quantidade de volume de controle é menor do que o número de fluxos do sistema.

Aplicando-se a metodologia TCE na unidade descrita na figura 4.1, determina-se o balanço exergético unitário e o balanço de custos monetários para todos os fluxos do sistema.

##### 4.5.1 Gerador de Vapor I

O volume de controle aplicado no gerador de vapor I para análise do método TCE é o mesmo usado na modelagem do método SPECOC, figura 4.2, não sendo necessário a repetição da superfície de controle.

##### 4.5.1a – Balanço de custo exergético unitário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(E_{17}^*) + (E_{19}^*) - (E_{18}^*) - (E_{23}^*) - (E_{20}^*) = 0 \quad (4.47)$$

Averiguando a proposição II, observamos que:

$$\frac{E_{19}^*}{E_{19}} = \frac{E_{20}^*}{E_{20}} \quad (4.48)$$

De acordo com a proposição V, obtêm se:

$$E_{17}^* = E_{17} \quad (4.49)$$

A proposição IV diz que os fluxos das perdas externas devem-se atribuir custo exergetico igual a zero, pois não haverá utilização posterior.

$$k_{18} = 0 \quad (4.50)$$

#### 4.5.1b – Balanço de custo monetário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(c_{17} \cdot E_{17}) + (c_{19} \cdot E_{19}) - (c_{18} \cdot E_{18}) - (c_{23} \cdot E_{23}) - (c_{20} \cdot E_{20}) = 0 \quad (4.51)$$

Averiguando a proposição II, observamos que:

$$\frac{C_{19}}{E_{19}} = \frac{C_{20} + C_{23}}{E_{20} + E_{23}} \quad (4.52)$$

A proposição 3, denominada de regra dos produtos, é aplicado ao gerador de vapor I, pois o mesmo tem dois produtos, vapor refrigerante (fluxo 23) e solução com concentração média de brometo de lítio (fluxo 20), portanto:

$$\frac{C_{20}}{E_{20}} = \frac{C_{23}}{E_{23}} \quad (4.53)$$

Portanto, o Balanço geral do gerador de vapor I, incluindo os custos com despesas totais (aquisição, operação e manutenção) é:

$$(c_{18} \cdot E_{18}) + (c_{23} \cdot E_{23}) + (c_{20} \cdot E_{20}) = (c_{17} \cdot E_{17}) + (c_{19} \cdot E_{19}) + Z_{ger1} \quad (4.54)$$

#### 4.5.2 Gerador de Vapor II

O volume de controle aplicado no gerador de vapor II para análise do método TCE é o mesmo usado na modelagem do método SPECO, figura 4.3, não sendo necessário a repetição da superfície de controle.

##### 4.5.2a – Balanço de custo exergético unitário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(E_{20}^*) + (E_{23}^*) - (E_4^*) - (E_7^*) - (E_{24}^*) = 0 \quad (4.55)$$

Averiguando a proposição II, observamos que:

$$\frac{E_{23}^*}{E_{23}} = \frac{E_{24}^* + E_7^*}{E_{20} + E_7} \quad (4.56)$$

$$\frac{E_{23}^*}{E_{23}} = \frac{E_{24}^*}{E_{24}} \quad (4.57)$$

##### 4.5.2b – Balanço de custo monetário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(c_{20} \cdot E_{20}) + (c_{23} \cdot E_{23}) - (c_4 \cdot E_4) - (c_7 \cdot E_7) - (c_{24} \cdot E_{24}) = 0 \quad (4.58)$$

Averiguando a proposição II, observamos que:

$$\frac{C_{20}}{E_{20}} = \frac{C_4 + C_7}{E_4 + E_7} \quad (4.59)$$

A proposição 3, denominada de regra dos produtos, é aplicado também ao gerador de vapor II, pois o mesmo tem três produtos, vapor refrigerante que vai para o condensador (fluxo 7), vapor refrigerante em direção ao misturador (fluxo 24) e solução com concentração fraca de brometo de lítio (fluxo 4), portanto:

$$\frac{C_7}{E_7} = \frac{C_4}{E_4} \quad (4.60)$$

Logo, o balanço geral para o gerador de vapor II, acrescentando os custos com as despesas totais é:

$$(c_4 \cdot E_4) + (c_7 \cdot E_7) + (c_{24} \cdot E_{24}) = (c_{23} \cdot E_{23}) + (c_{20} \cdot E_{20}) + Z_{ger2} \quad (4.61)$$

#### 4.5.3 Sistema de condensação

O volume de controle aplicado no sistema de condensação para análise do método TCE é o mesmo usado na modelagem do método SPECO, figura 4.4, não sendo necessário a repetição da superfície de controle.

##### 4.5.3a – Balanço de custo exerético unitário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(E_{13}^*) + (E_7^*) + (E_{24}^*) - (E_{14}^*) - (E_9^*) = 0 \quad (4.62)$$

Avaliando na visão da proposição III, resulta-se:

$$\frac{E_9^*}{E_9} = \frac{E_7^* + E_{24}^*}{E_9 + E_{24}} \quad (4.63)$$

##### 4.5.3b – Balanço de custo monetário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(c_{13} \cdot E_{13}) + (c_7 \cdot E_7) + (c_{24} \cdot E_{24}) - (c_{14} \cdot E_{14}) - (c_9 \cdot E_9) = 0 \quad (4.64)$$

Averiguando a proposição II, observamos que:

$$\frac{C_9}{E_9} = \frac{C_7 + C_{24}}{E_7 + E_{24}} \quad (4.65)$$

Portanto, o balanço geral para o sistema de condensação, incluindo os custos com despesas totais, é expresso por:

$$(c_{14} \cdot E_{14}) + (c_9 \cdot E_9) = (c_{13} \cdot E_{13}) + (c_7 \cdot E_7) + (c_{24} \cdot E_{24}) + Z_{scond} \quad (4.66)$$

#### 4.5.4 Evaporador

O volume de controle aplicado no evaporador para análise do método TCE é o mesmo usado na modelagem do método SPECO, figura 4.5, não sendo necessário a repetição da superfície de controle.

##### 4.5.4a – Balanço de custo exerético unitário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(E_9^*) + (E_{11}^*) - (E_{10}^*) - (E_{12}^*) = 0 \quad (4.67)$$

Averiguando a proposição II, observamos que:

$$\frac{E_{10}^*}{E_{10}} = \frac{E_9^*}{E_9} \quad (4.68)$$

Aplicando a proposição V:

$$E_{11}^* = E_{11} \quad (4.69)$$

#### 4.5.4b – Balanço de custo monetário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(c_9 \cdot E_9) + (c_{11} \cdot E_{11}) - (c_{10} \cdot E_{10}) - (c_{12} \cdot E_{12}) = 0 \quad (4.70)$$

Averiguando a proposição III, observamos que:

$$\frac{C_{12}}{E_{12}} = \frac{C_{10}}{E_{10}} \quad (4.71)$$

Logo, o balanço geral para o evaporador é:

$$(c_{10} \cdot E_{10}) + (c_{12} \cdot E_{12}) = (c_9 \cdot E_9) + (c_{11} \cdot E_{11}) + Z_{evap} \quad (4.72)$$

#### 4.5.5 Absorvedor

O volume de controle aplicado no absorvedor para análise do método TCE é o mesmo usado na modelagem do método SPECO, figura 4.6, não sendo necessário a repetição da superfície de controle.

#### 4.5.5a – Balanço de custo exergético unitário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(E_5^*) + (E_{10}^*) - (E_{15}^*) - (E_1^*) - (E_{16}^*) = 0 \quad (4.73)$$

Averiguando a proposição II, observamos que:

$$\frac{E_1^*}{E_1} = \frac{E_5^* + E_{10}^* + E_{15}^*}{E_5 + E_{10} + E_{15}} \quad (4.74)$$

De acordo com a proposição V, obtêm se:

$$E_{15}^* = E_{15} \quad (4.75)$$

#### 4.5.5b – Balanço de custo monetário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(c_5 \cdot E_5) + (c_{10} \cdot E_{10}) + (c_{15} \cdot E_{15}) - (c_1 \cdot E_1) - (c_{16} \cdot E_{16}) = 0 \quad (4.76)$$

Averiguando a proposição II, observamos que:

$$\frac{C_1}{E_1} = \frac{C_5 + C_{10}}{E_5 + E_{10}} \quad (4.77)$$

A proposição V proposta por Valero & Lozano diz que: Na ausência de valoração externa, o custo exergético dos fluxos que entram no sistema é igual a sua exergia, logo:

$$C_{15} = E_{15} \quad (4.78)$$

Portanto, o balanço geral para o absorvedor é:

$$(c_1 \cdot E_1) + (c_{16} \cdot E_{16}) = (c_5 \cdot E_5) + (c_{10} \cdot E_{10}) + (c_{15} \cdot E_{15}) + Z_{absorv} \quad (4.79)$$

#### 4.5.6 Bomba de solução

O volume de controle aplicado na bomba de solução para análise do método TCE é o mesmo usado na modelagem do método SPECO, figura 4.7, não sendo necessário a repetição da superfície de controle.

#### 4.5.6a – Balanço de custo exergético unitário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(E_{26}^*) + (E_1^*) - (E_2^*) = 0 \quad (4.80)$$

De acordo com a proposição V, obtêm-se:

$$E_{26}^* = W_{bomba} \quad (4.81)$$

#### 4.5.6b – Balanço de custo monetário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(c_{26} \cdot E_{26}) + (c_1 \cdot E_1) - (c_2 \cdot E_2) = 0 \quad (4.82)$$

Logo, o balanço geral para a bomba de solução fica:

$$(c_2 \cdot E_2) = (c_{26} \cdot E_{26}) + (c_1 \cdot E_1) + Z_{bomba} \quad (4.83)$$

#### 4.5.7 Trocador de calor

O volume de controle aplicado no trocador de calor para análise do método TCE é o mesmo usado na modelagem do método SPECO, figura 4.8, não sendo necessário a repetição da superfície de controle.

##### 4.5.7a – Balanço de custo exergético unitário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(E_4^*) + (E_2^*) - (E_{19}^*) - (E_5^*) = 0 \quad (4.84)$$

Averiguando a proposição II, observamos que:

$$\frac{E_2^*}{E_2} = \frac{E_{19}^*}{E_{19}} \quad (4.85)$$

#### 4.5.7b – Balanço de custo monetário

Com o auxílio da proposição I, tem-se:

$$(c_4 \cdot E_4) + (c_2 \cdot E_2) - (c_{19} \cdot E_{19}) - (c_5 \cdot E_5) = 0 \quad (4.86)$$

Averiguando a proposição II, observamos que:

$$\frac{C_2}{E_2} = \frac{C_{19}}{E_{19}} \quad (4.87)$$

Portanto, o balanço geral para o trocador de calor é expresso pela seguinte expressão:

$$(c_{19} \cdot E_{19}) + (c_5 \cdot E_5) = (c_4 \cdot E_4) + (c_2 \cdot E_2) + Z_{TC} \quad (4.88)$$

#### 4.6 DEFINIÇÃO DOS CUSTOS MONETÁRIOS

Para dar o “ponta pé inicial” em qualquer empreendimento é interessante conhecer os custos monetários atrelados ao projeto MARQUES (2005). Com a utilização da análise exergoeconômica, tem-se a possibilidade de mensurar em termos monetário, os fluxos envolvidos no sistema, utilizando a base exergética, sendo possível a identificação do valor monetário dos equipamentos que compõem uma máquina. Esta análise fornece os custos financeiros aos fluxos exergéticos da instalação térmica, levando em consideração as unidades produtivas da planta. Assim, tem-se a possibilidade de atuação em melhorias termodinâmicas e econômicas da unidade. MARQUES (2005)

O sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito em série é uma unidade compacta, logo o valor total de investimento foi rateado entre seus componentes internos. O rateio foi feito atribuindo um fator a cada equipamento (ou subsistema) da unidade de refrigeração por absorção em estudo. O código

computacional desenvolvido permite que esses fatores sejam modificados, permitindo simular outros cenários. Para o estudo em questão, os valores atribuídos encontram-se na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Fator de rateamento do investimento do sistema de absorção. (Fonte: autor)

VALOR DE AQUISIÇÃO DO CHILLER	
R\$ 30.000,00	
EQUIPAMENTO (SUBSISTEMA)	FATOR (%)
GERADOR DE VAPOR I	19,4
GERADOR DE VAPOR II	19,4
SISTEMA DE CONDENSAÇÃO	9
EVAPORADOR	17,5
ABSORVEDOR	18
BOMBA DE SOLUÇÃO	2,5
TROCADOR DE CALOR	13
VÁLVULA DE EXPANSÃO	4x0,3
TOTAL	100

## **CAPÍTULO V**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são exibidos e discutidos os resultados do código computacional desenvolvido no EES (Solução de Equações de Engenharia) para o sistema de refrigeração proposto no estudo. O código computacional foi dividido em duas etapas, na primeira foi feita a análise termodinâmica e na segunda à análise exergoeconômica. Dentre os dados apresentados estão os resultados energéticos, exergéticos, exergoeconômicos (pelo método SPECO e pela metodologia TCE). Por fim foi discutido as diferenças dos dois métodos exergoeconômicos aplicados no presente trabalho.

#### **5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE TERMODINÂMICA**

Através da aplicação dos conceitos apresentados no capítulo 2 do presente estudo (em geral os princípios da primeira e segunda lei da termodinâmica), foram obtidos, pelo código computacional desenvolvido, as principais propriedades termodinâmicas dos fluxos do sistema de absorção, necessário para iniciar o estudo das metodologias exergoeconômicas, que é o foco desse trabalho. A tabela 5.1 exibe os dados de entrada retirados de Herold et al (2016), a tabela 5.2. exibe os resultados da análise termodinâmica e a tabela 5.3 apresenta a irreversibilidade de cada subsistema do sistema.

Os parâmetros determinados na análise são: vazão mássica ( $\dot{m}$ ), temperatura (T), pressão (P), concentração de solução (xsol), entalpia (h), entropia (s), exergia específica (e) e por unidade de massa (E).

Tabela 5.1 - Dados de entrada para o desenvolvimento da análise energética e exérgica. (Fonte: Herold, 2016)

<b>Energia em forma de calor disponível no gerador</b>	<b>21,101 kW</b>
<b>Temperatura de entrada dos produtos de combustão (Fluxo 17)</b>	<b>700 °C</b>
<b>Temperatura de saída dos produtos de combustão (Fluxo 18)</b>	<b>500 °C</b>
<b>Temperatura entrada água de arrefecimento no absorvedor (Fluxo 15)</b>	<b>25 °C</b>
<b>Temperatura saída água de arrefecimento no absorvedor (Fluxo 16)</b>	<b>33,65 °C</b>
<b>Temperatura entrada água de arrefecimento no Condensador (Fluxo 13)</b>	<b>25 °C</b>
<b>Temperatura saída água de arrefecimento no Condensador (Fluxo 14)</b>	<b>28,16 °C</b>
<b>Temperatura de entrada água gelada no evaporador (Fluxo 11)</b>	<b>12 °C</b>
<b>Temperatura de saída água gelada no evaporador (Fluxo 12)</b>	<b>7 °C</b>
<b>Temperatura do condensador (Fluxo 9)</b>	<b>30 °C</b>
<b>Temperatura do evaporador (Fluxo 10)</b>	<b>5 °C</b>
<b>Diferencial de temperatura no trocador de calor</b>	<b>19,7 °C</b>
<b>Concentração da solução nível baixo (Fluxo 19)</b>	<b>52,9 %</b>
<b>Concentração da solução nível médio (Fluxo 20)</b>	<b>57,325 %</b>
<b>Concentração da solução nível alto (Fluxo 4)</b>	<b>62,656 %</b>
<b>Pressão no gerador de vapor I</b>	<b>77,52 kPa</b>

Tabela 5.2 - Resultados da análise energética e exérgica. (Fonte: autor)

Fluxos	P (kPa)	T (°C)	x <sub>sol</sub> (%)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)	s <sup>s</sup> (kJ/Kg.k)	e (kJ/kg)
1	0,87	29,9	52,9	0,05528	66,06	0,2026	10,2100
2	77,52	29,93	52,9	0,05528	66,11	0,2028	20,2800
3	0,87	5	*	0,01049	125,7	0,4525	0,0743
4	4,243	78,32	62,66	0,04479	202	0,4302	78,3000
5	4,243	50,50	62,66	0,04479	64,77	0,2792	71,2100
6	0,7761	46,76	62,66	0,04479	64,77	0,2581	62,3400
7	4,243	68,9	*	0,006224	2629	8,68	45,5600
8	4,243	29,0	*	0,006224	125,4	0,4364	0,1100
9	4,243	30	*	0,010490	125,7	0,4364	0,1057
10	0,7761	5	*	0,010490	2510	9,067	-188,9000
11	*	12	*	1,19400	50,36	0,1804	1,1190
12	*	7	*	1,19400	29,42	0,1063	2,1610
13	*	25	*	5,26000	104,8	0,3669	0,0000
14	*	28,16	*	5,26000	118,1	0,411	0,0696
15	*	25	*	3,38400	104,8	5,69	0,0000
16	*	33,65	*	3,38400	141	5,719	0,5149
17	*	700	*	0,006621	8760	15,1	4339,0000
18	*	500	*	0,006621	6002	11,93	2525,0000
19	77,52	49,63	52,9	0,05528	107,9	0,5083	12,9800
20	77,52	138,6	57,33	0,051010	300,7	0,791	69,4400
21	4,243	66,7	57,33	0,051010	300,7	0,4043	184,7000
23	77,52	134,9	*	0,004267	2714	1,302	459,5000
24	77,52	92,71	*	0,004267	388	7,576	27,9600
25	4,243	28	*	0,004267	388	1,223	4,3950

Tabela 5.3 - Irreversibilidade dos subsistemas do sistema de refrigeração (Fonte: autor)

SUBSISTEMA	IRREVERSIBILIDADE (kW)
GERADOR DE VAPOR I	9,052
GERADOR DE VAPOR II	7,511
SISTEMA DE CONDENSAÇÃO	0,227
EVAPORADOR	0,429
ABSORVEDOR	0,557
BOMBA DE SOLUÇÃO	0,00028
TROCADOR DE CALOR	0,141

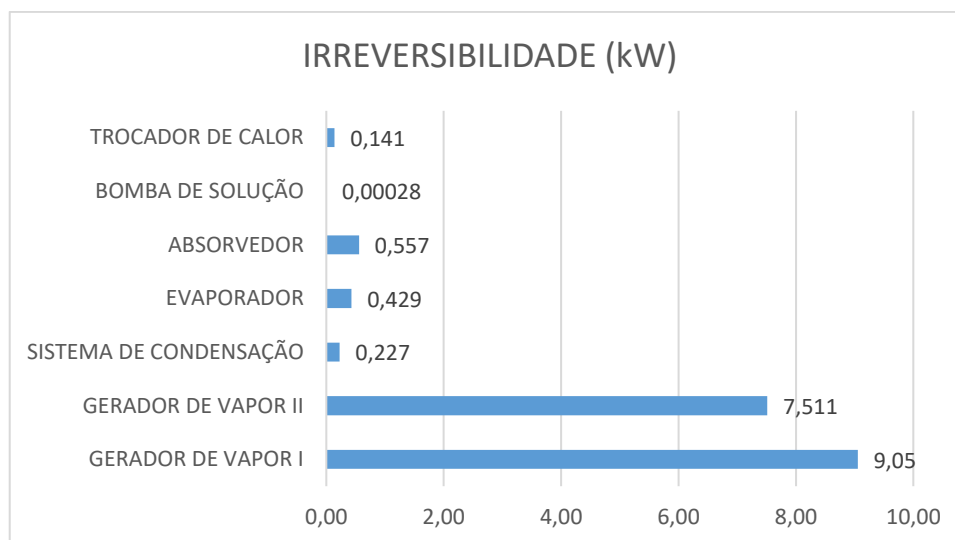


Figura - 5.1 - Irreversibilidade dos subsistemas do sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito. (Fonte: autor)

## 5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA - SPECO

Nesta sessão, são apresentados os resultados da análise exergoeconômica pelo método SPECO, da unidade de refrigeração por absorção de duplo efeito em série. Esta avaliação associa os custos monetários aos fluxos exergéticos da unidade em estudo. Os dados de entrada para determinação dos custos das despesas totais são mostrados na tabela 5.2. O estudo foi baseado nos princípios de combustível, produtos e equações auxiliares pertinentes ao método SPECO.

O investimento estimado para aquisição da unidade de refrigeração foi de R\$ 30.000,00. Os parâmetros de investimento para a simulação foram obtidos do trabalho de Herrera et al (2014). A tabela 5.3, mostra tais dados.

Tabela 5.4 - parâmetros de manutenção e operação da unidade de refrigeração. (Fonte: Herrera 2014).

<b>Tempo de operação</b>	<b>6000 h/ano</b>
<b>Tempo estimado de vida do equipamento</b>	<b>20 anos</b>
<b>Fator de manutenção</b>	<b>5%</b>
<b>Taxa anual de juros</b>	<b>10%</b>

Como resultados deste estudo, é mostrado informações de custos de produção dos fluxos energéticos da unidade, enfocando os custos associados aos combustíveis e aos produtos. O custo exergético unitário e monetário são uma medida de eficiência dos processos e seus valores devem ser maior do que os valores do fluxo de calor de entrada do sistema (Fluxo 17), no caso do presente estudo. Outros parâmetros de avaliação também são exibidos, tais quais: eficiência exergética ( $\epsilon$ ), exergia destruída ( $E_d$ ), Custo médio dos produtos ( $C_p$ ), custo médio dos combustíveis ( $C_f$ ), taxa de custo da exergia destruída ( $C_d$ ), diferença relativa de custos do produto e do combustível ( $r_k$ ), custo de despesas totais e o fator exergoeconômico ( $f_k$ ). As tabelas e gráficos abaixo irão mostrar os resultados mencionados.

Tabela 5.5 - Resultado da análise exergoeconômica -SPECO. (Fonte: autor)

F	Descrição	E (kJ/s)	E* (kJ/s)	k	c * 10 <sup>-5</sup> (R\$/kJ)	C * 10 <sup>-5</sup> (R\$/s)
1	Solução com baixa concentração de Brometo de lítio	0,564	0,741	1,31	38,320	21,620
2	Solução com baixa concentração de Brometo de lítio	0,564	0,743	1,32	1,409	0,795
4	Solução com concentração alta de Brometo de lítio	3,507	14,580	4,16	301,100	1056,000
5	Solução com concentração alta de Brometo de lítio	3,190	13,260	4,16	301,100	960,500
7	Fluido Refrigerante	0,290	1,205	4,16	301,100	87,270
9	Fluido Refrigerante	0,011	0,006	5,38	451,700	0,500
10	Fluido Refrigerante	-1,982	-10,650	5,38	451,700	895,100
11	Água gelada	1,336	1,336	1,00	0,000	0,000
12	Água gelada	2,703	11,990	4,44	35,420	95,740
13	Água de arrefecimento	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000
14	Água de arrefecimento	0,088	1,344	15,30	1559,000	137,000
15	Água de arrefecimento	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000
16	Água de arrefecimento	0,418	1,870	4,48	36,010	15,050
17	Combustível	32,910	32,910	1,00	63,730	2097,000
18	Gases de exaustão	19,040	19,040	1,00	63,730	1213,000
19	Solução com baixa concentração de Brometo de lítio	0,718	2,064	2,88	197,300	141,600
20	Solução com concentração média de Brometo de lítio	3,542	10,320	2,91	198,300	702,500
23	Fluido Refrigerante	1,997	5,615	2,81	198,300	390,400
24	Fluido Refrigerante	0,119	0,145	1,22	150,600	17,970
26	Energia elétrica para Bomba	0,003	0,003	1,00	5,034	13,740

Tabela 5.6 - Resultado parâmetros de avaliação -SPECO. (Fonte: autor)

SUBSISTEMA	$\epsilon$ (%)	$E_D$ (R\$/kJ)	$C_P$ (R\$/kJ)	$C_F$ (R\$/kJ)	$C_D$ (R\$/s)	$Z_T$ (R\$/s)	$r_k$ (%)	$f_k$ (%)
Gerador de vapor I	34,76	9,049	0,00197	0,000637	0,005767	0,0006736	209,60	10,46
Gerador de vapor II	70,06	1,623	0,00301	0,001983	0,003219	0,000684	51,82	17,53
Sistema de condensação	21,54	0,320	0,01559	0,002567	0,000822	0,0003229	83,54	28,21
Evaporador	68,94	0,616	0,00701	0,004517	0,002782	0,0006181	55,06	18,18
Absorvedor	92,92	0,226	0,00360	0,003011	0,000680	0,0006354	19,58	48,32
Bomba da solução	99,54	0,003	0,00040	0,000242	0,000132	0,00008681	102,20	99,27
Trocador de calor	48,21	0,165	0,00930	0,003011	0,000495	0,0004514	208,80	47,68

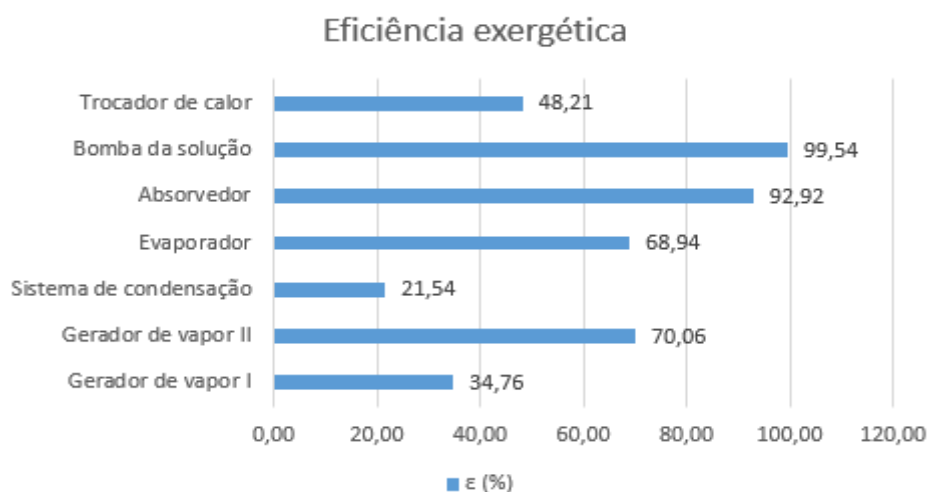


Figura - 5.2 – Gráfico da eficiência exergética pela análise do método SPECO. (Fonte: autor)

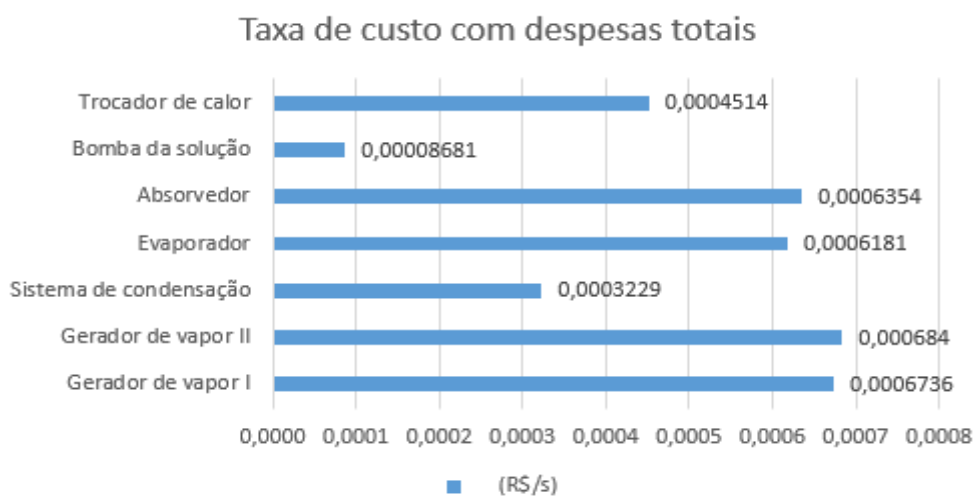


Figura 5.3 – Gráfico da taxa de custos totais pela análise do método SPECO. (Fonte: autor)

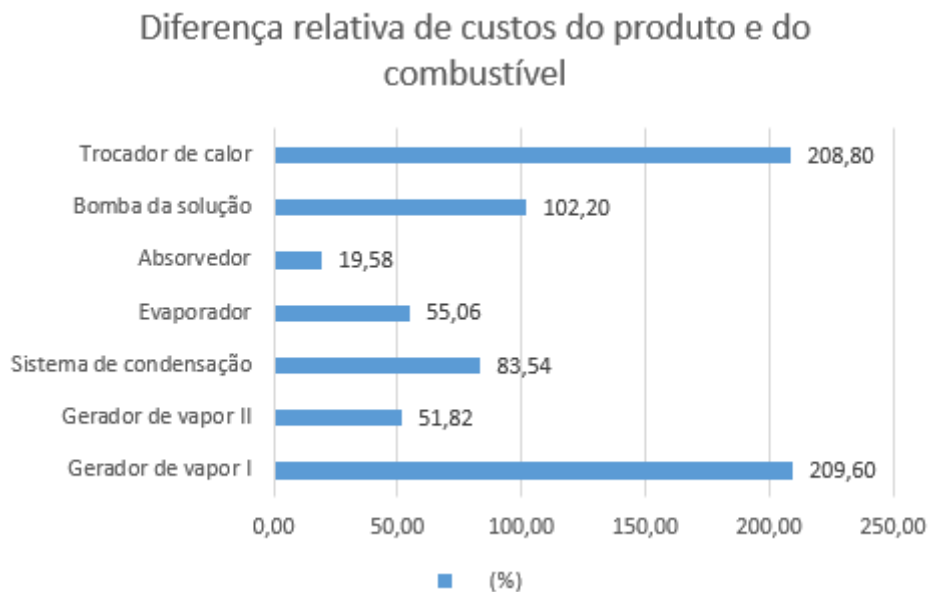


Figura 5.4 – Gráfico da diferença relativa de custos do produto e do combustível pela análise do método SPECO. (Fonte: autor)

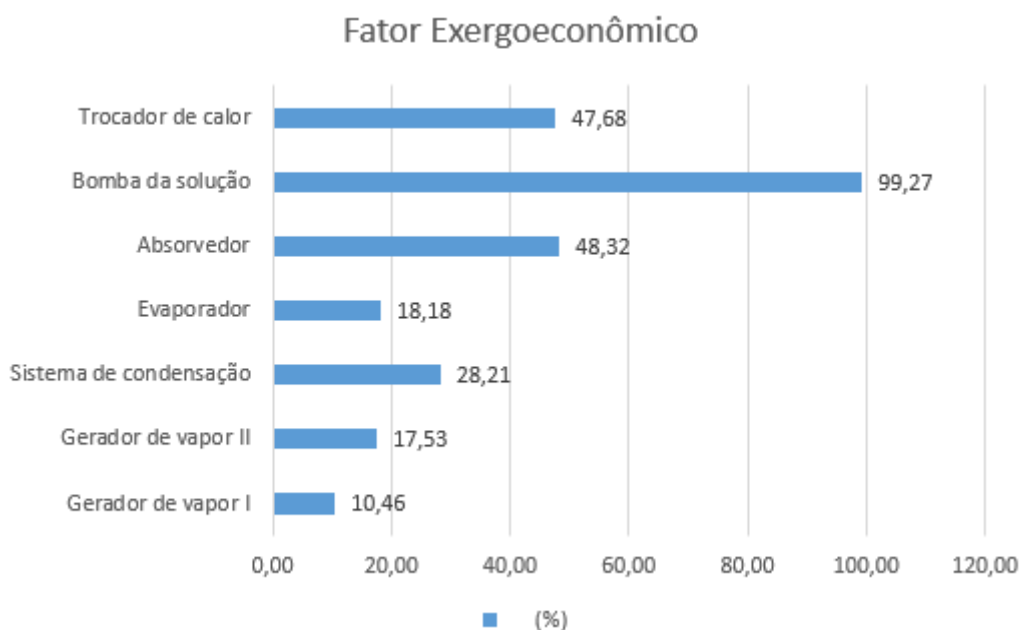


Figura 5.5 – Gráfico do fator exergoeconômico da unidade de refrigeração pela análise do método SPECO. (Fonte: autor)

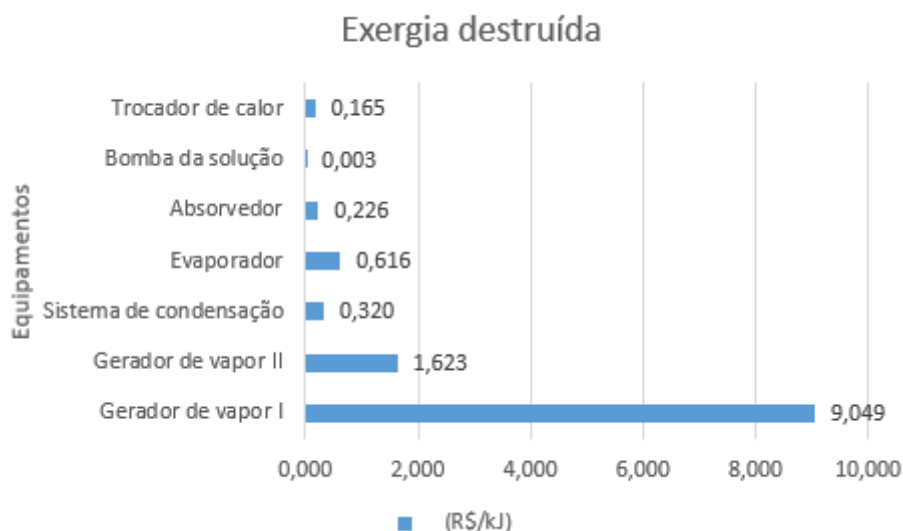


Figura 5.6 – Gráfico da exergia destruída pela análise do método SPECO. (Fonte: autor)

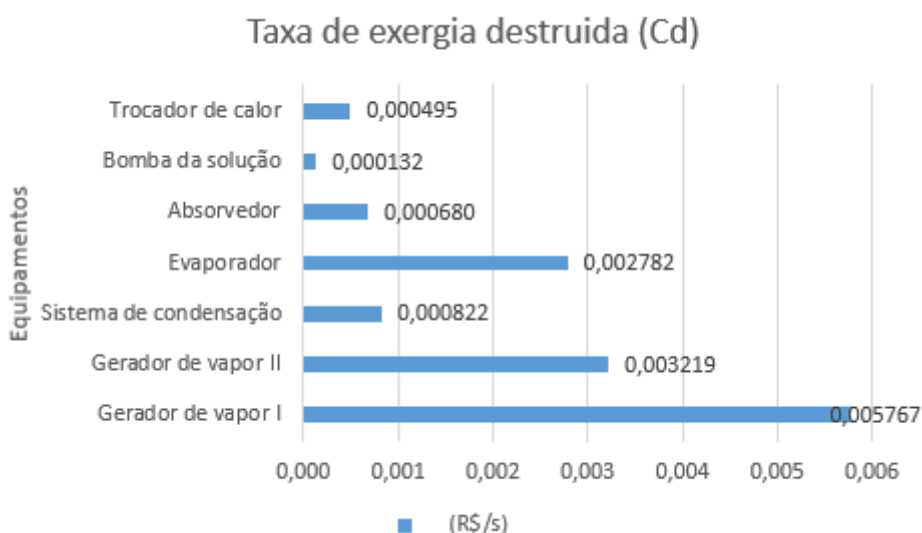


Figura 5.7 – Gráfico da taxa de exergia destruída pela análise do método SPECO. (Fonte: autor)

## 5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA - TCE

Nesta sessão será mostrado os resultados da análise exergoeconômica utilizando o método da teoria do custo exergético, aplicado no sistema de refrigeração por absorção de vapor em estudo. O balanço exergoeconômico é baseado em 5 proposições, difundida por Valero e Lozano (1993), no intuito de igualar o número de equações ao número de fluxos do sistema.

Os dados para obtenção dos custos das despesas totais é o mesmo utilizado no método SPECO, bem como, as equações para determinação dos parâmetros de avaliação exergoeconômico. Tal iniciativa tem o objetivo de comparar os resultados e peculiaridades dos dois métodos exergoeconômicos em estudo. A tabela e os gráficos abaixo exibem os resultados da análise exergoeconômica fazendo uso do método TCE.

Tabela 5.7 - Resultado da análise exergoeconômica -TCE. (Fonte: autor)

F	Descrição	E (kJ/s)	E* (kJ/s)	k	$c * 10^{-5}$ (R\$/kJ)	$C * 10^{-5}$ (R\$/s)
1	Solução com baixa concentração de Brometo de lítio	0,564	2,850	5,051	3,515	1,984
2	Solução com baixa concentração de Brometo de lítio	0,564	2,853	5,055	36,210	20,440
4	Solução com concentração alta de Brometo de lítio	3,507	31,620	8,971	36,210	127,000
5	Solução com concentração alta de Brometo de lítio	3,190	30,850	9,621	52,230	166,600
7	Fluido Refrigerante	0,290	3,803	13,670	36,210	10,490
9	Fluido Refrigerante	0,001	0,013	12,410	347,000	0,384
10	Fluido Refrigerante	-1,982	-23,810	12,410	86,210	170,800
11	Água gelada	1,336	1,336	1,000	0,000	0,000
12	Água gelada	2,703	25,160	9,595	86,210	233,000
13	Água de arrefecimento	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14	Água de arrefecimento	0,088	4,903	57,610	1979,000	173,900
15	Água de arrefecimento	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	Água de arrefecimento	0,418	4,182	7,779	146,600	61,280
17	Combustível	32,910	32,910	1,000	63,730	2097,000
18	Gases de exaustão	19,040	0,000	0,000	104,500	1990,000
19	Solução com baixa concentração de Brometo de lítio	0,718	3,627	5,055	36,210	25,980
20	Solução com concentração média de Brometo de lítio	3,542	17,910	5,055	36,210	128,200
23	Fluido Refrigerante	1,997	18,630	9,330	36,210	72,310
24	Fluido Refrigerante	0,119	1,113	9,330	1102,000	131,500
26	Energia elétrica para Bomba	0,0027	0,0027	1,000	5,035	13,740

Tabela 5.8 - Resultado parâmetros de avaliação -TCE. (Fonte: autor)

SUBSISTEMA	$\epsilon$ (%)	$E_D$ (R\$/kJ)	$C_P$ (R\$/kJ)	$C_F$ (R\$/kJ)	$C_D$ (R\$/s)	$Z_T$ (R\$/s)	$r_k$ (%)	$f_k$ (%)
Gerador de vapor I	34,76	9,0490	0,00036	0,002947	0,02667	0,0006736	87,71	2,46
Gerador de vapor II	70,06	1,6230	0,00036	0,000128	0,00021	0,000684	184,10	76,78
Sistema de condensação	21,54	0,3201	0,01979	0,003470	0,00111	0,0003229	470,20	22,52
Evaporador	68,94	0,6158	0,00171	0,000864	0,00053	0,0006181	97,41	53,75
Absorvedor	92,92	0,2257	0,00078	0,000522	0,00012	0,0006354	48,66	84,35
Bomba da solução	99,54	0,0026	2,24200	0,050340	0,00013	0,00008681	42,74	99,38
Trocador de calor	95,96	0,1645	0,00036	0,001247	0,00021	0,0004514	36,12	88,34

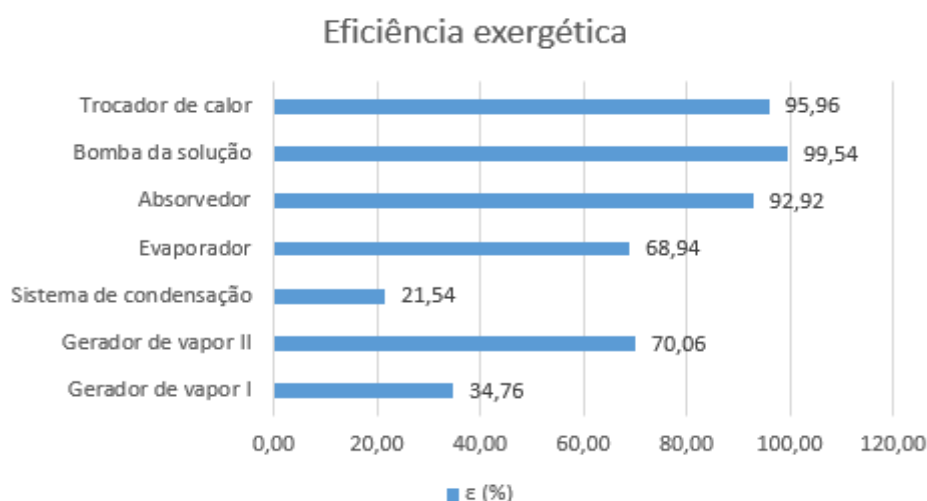


Figura 5.8 – Gráfico da eficiência exergetica pela análise do método TCE. (Fonte: autor)

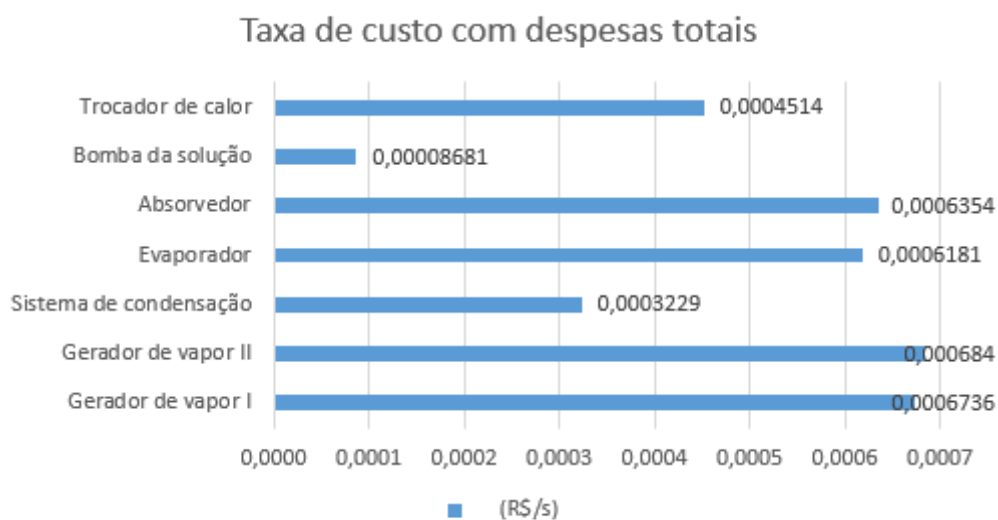


Figura 5.9 – Gráfico da taxa de custos totais pela análise do método TCE.(Fonte: autor)

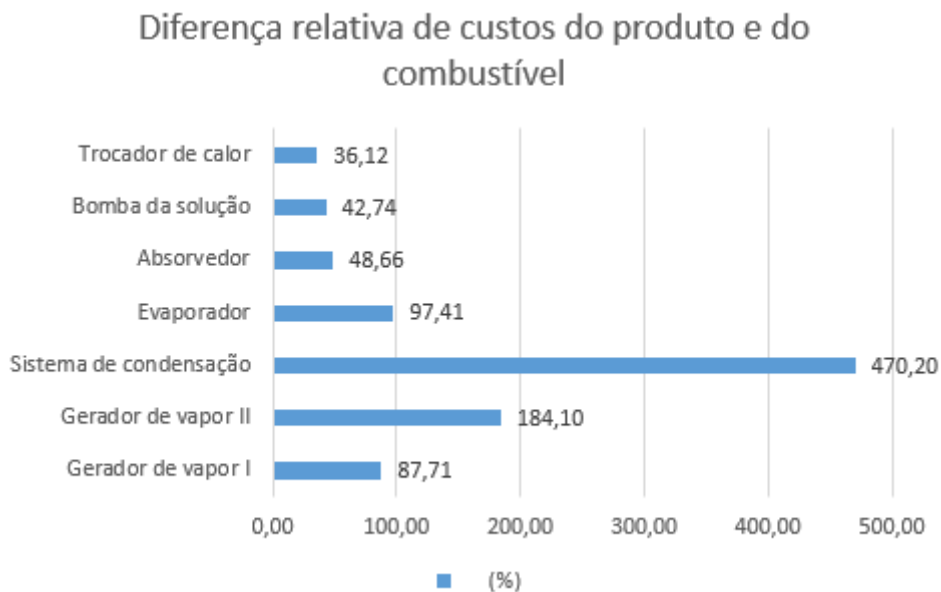


Figura 5.10 – Gráfico da diferença relativa de custos do produto e do combustível pela análise do método TCE. (Fonte: autor)

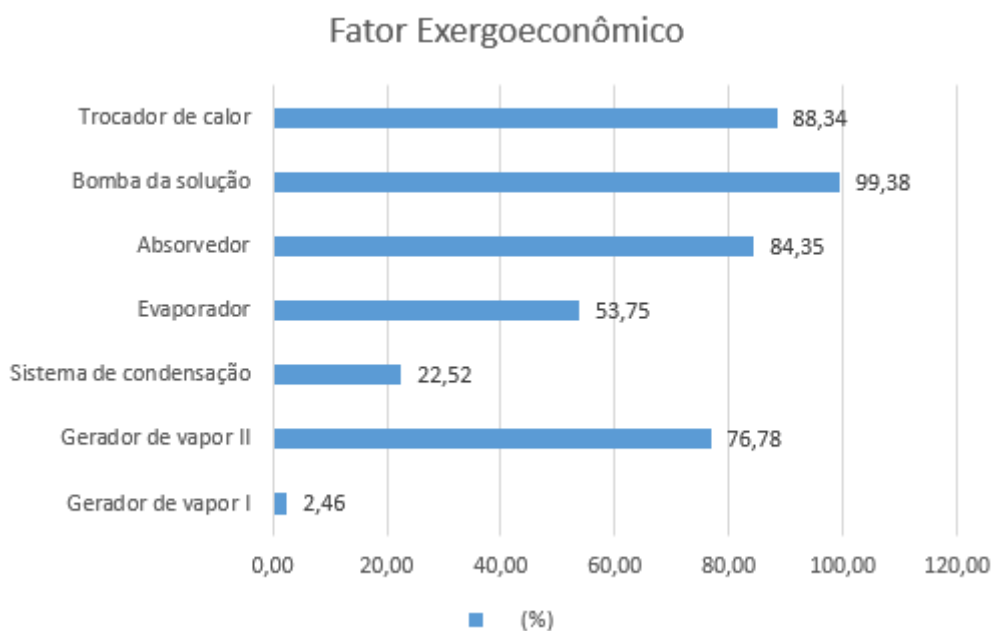


Figura 5.11 – Gráfico do fator exergoeconômico da unidade de refrigeração pela análise do método TCE. (Fonte: autor)

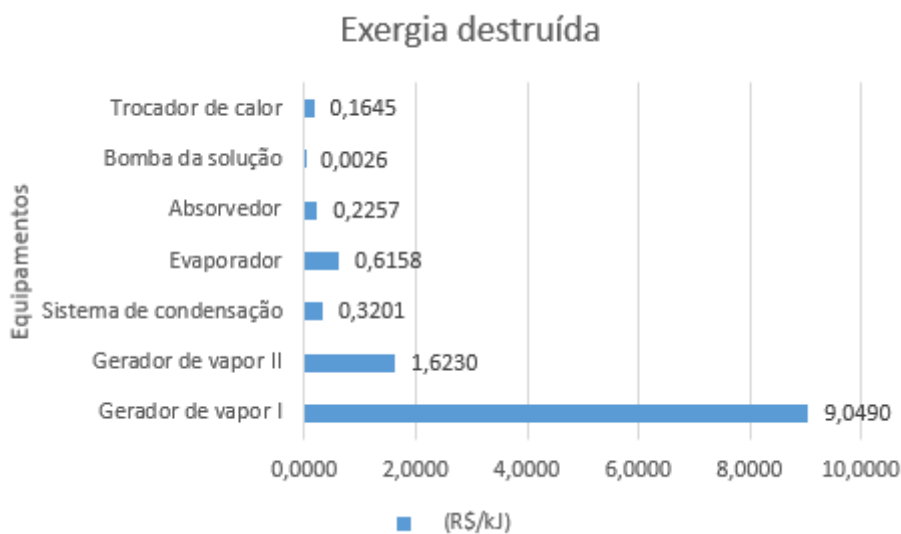


Figura 5.12 – Gráfico da exergia destruída pela análise do método TCE. (Fonte: autor)



Figura 5.13 – Gráfico da taxa de exergia destruída pela análise do método TCE. (Fonte: autor)

### 5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE OS MÉTODOS SPECO E TCE

Segundo Lozano e Valero (1993), a metodologia da teoria do custo exergético (TCE), exibiu dificuldades no tocante ao tratamento racional de resíduos (perdas), originados dos equipamentos (subsistemas) dissipativos, como os condensadores dos ciclos de refrigeração por absorção de vapor, portanto tal

modelo deve apresentar um custo, exergético unitário e monetário, maior em equipamentos que dissipam calor. A comparação é feita entre os métodos, TCE e o método SPECO (que aloca os custos exergéticos da dissipação de calor nos subsistemas que originam os resíduos). O gráfico 5.14 mostra um comparativo dos custos exergéticos unitários e monetários do fluxo de dissipação de calor (fluxo 14) do sistema de condensação do chiller de absorção.

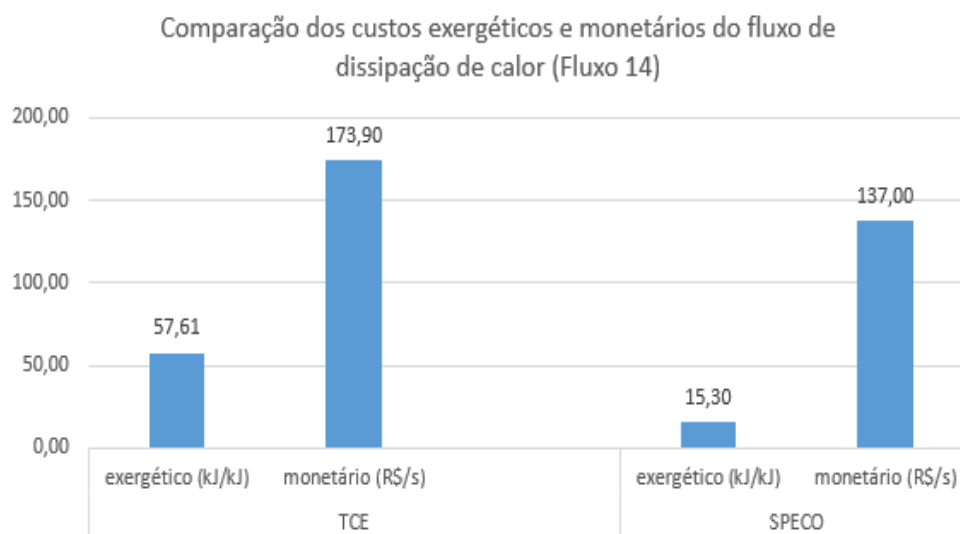


Figura 5.14 – Comparativo dos custos exergéticos unitários e monetário do fluxo de dissipação de calor do sistema de condensação do chiller de absorção. (Fonte: autor)

Na elaboração de uma análise de custo, num chiller de refrigeração ou em qualquer processo produtivo, é interessante destacar os gastos monetários, na tentativa de minimizar e otimizar o uso sustentável dos recursos. No tocante ao sistema em estudo, o gráfico 5.15 apresenta um comparativo dos custos monetários da perda no fluxo 18 (gases de exaustão) na visão do método TCE e em seguida na concepção do método SPECO.

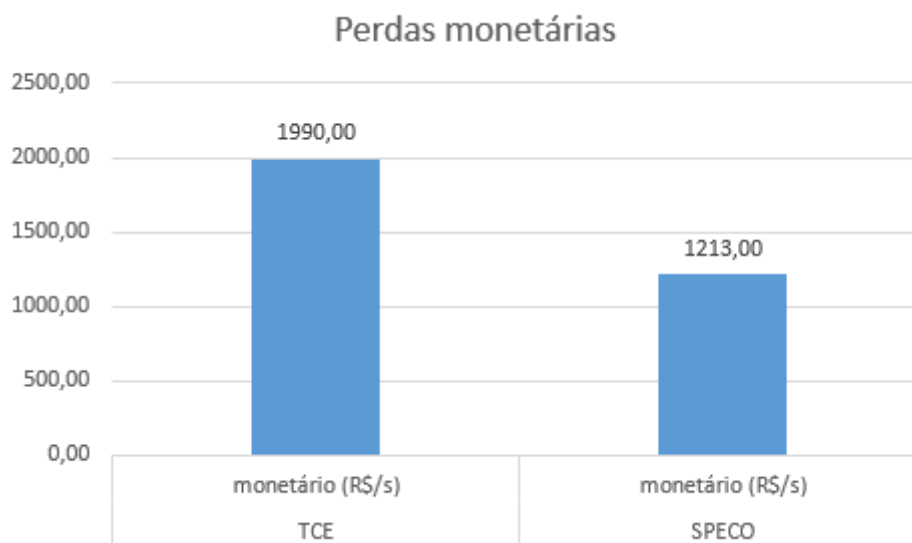


Figura 5.15 – Comparativo das perdas monetárias do fluxo 18 (gases de exaustão) do chiller de absorção. (Fonte: autor)

Os próximos gráficos irão expor as comparações dos resultados exergoeconômicos, tais quais o custo exergético unitário, custo exergético específico e o custo monetário, na visão das duas metodologias aplicadas nesse estudo.

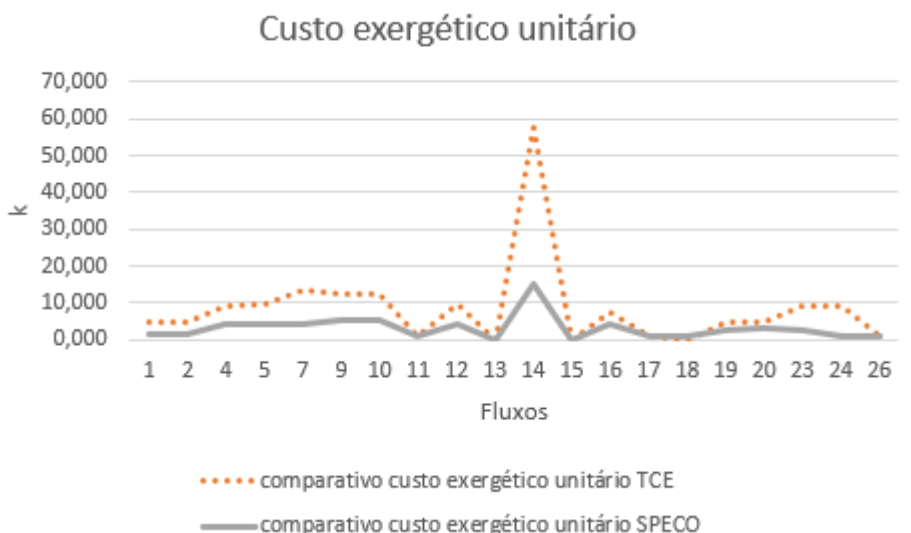


Figura 5.16 – Comparativo dos resultados do custo exergético unitario do chiller de absorção. (Fonte:autor)

No gráfico apresentado na figura 5.16 mostra uma diferença relevante no fluxo 14 (saída do condensador) nos resultados das duas metodologias aplicadas.

Tal fato pode ser explicado pela dificuldade do método da teoria do custo exergético (TCE) em alocar custos originados de equipamentos dissipativos. No método SPECO, esta alocação é mais fundamentada e os valores deste custo são distribuídos para o ciclo.

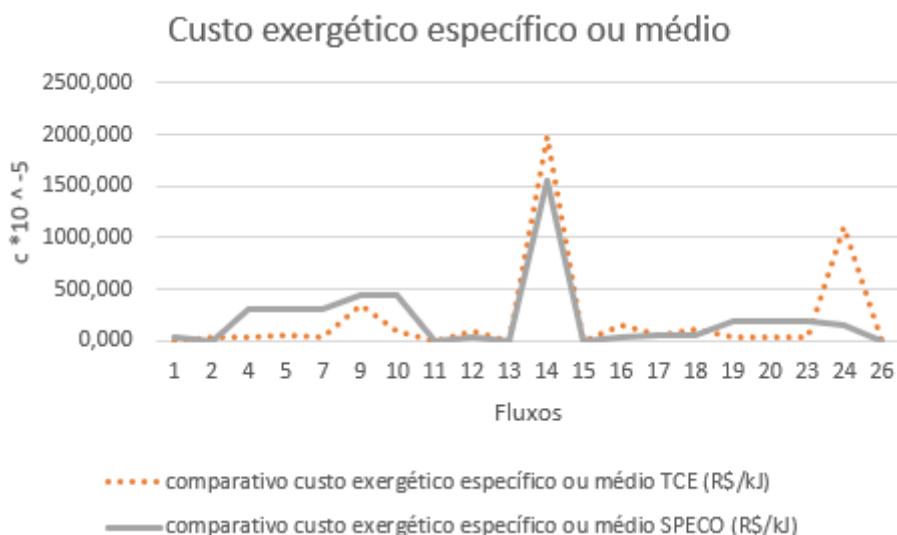


Figura 5.17 – Comparativo dos resultados do custo específico do chiller de absorção. (Fonte: autor)

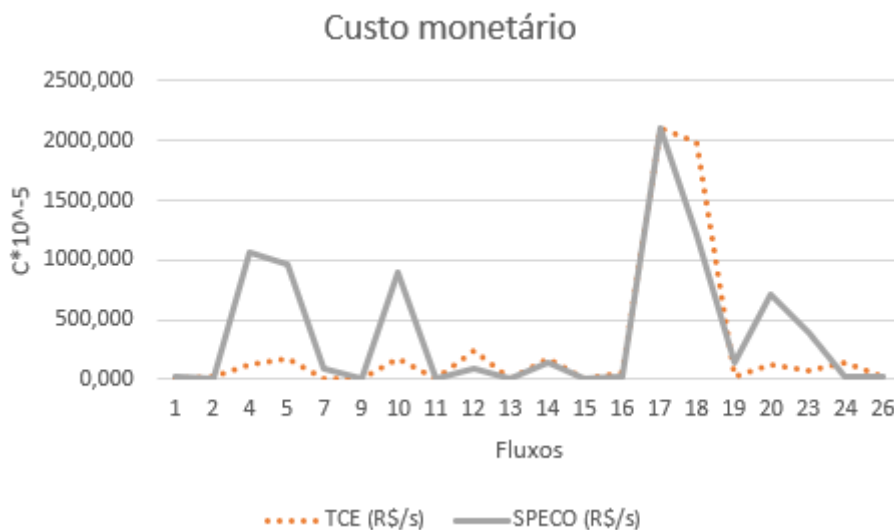


Figura 5.18 – Comparativo dos resultados do custo monetário do chiller de absorção. (Fonte: autor)

O gráfico exposto na figura 5.18 é referente ao custo monetário na visão dos dois métodos exergoeconômicos, é visível que o maior custo é o de entrada de combustível no fluxo 17 e os dois métodos confirmam esse fato.

Alguns parâmetros são utilizados para avaliar o desempenho de cada equipamento do sistema, o fator  $r_k$  é a diferença relativa entre o custo do produto e o custo do combustível. Tal parâmetro deve apresentar resultados distintos entre os dois métodos exergoeconômico, devido a forma de alocação de custos do produto e do combustível serem diferentes, por exemplo no método TCE usa-se proposições para obtenção dos balanços exergoeconômicos e no SPECO é utilizado os princípios F e P. O gráfico 5.19 mostra a comparação dos resultados.

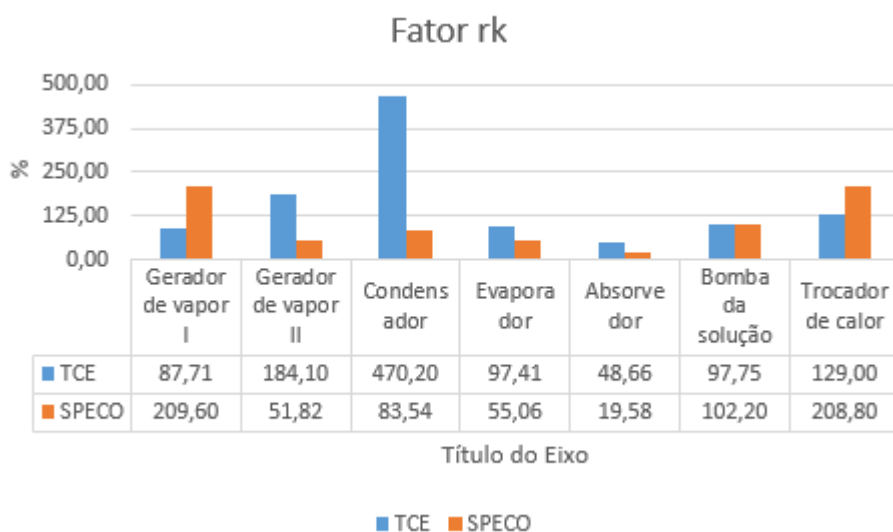


Figura 5.19 – Comparativo dos resultados do fator  $r_k$  do chiller de absorção. (Fonte: autor)

Pelo mesmo motivo apresentado pelo fator  $r_k$ , a taxa de destruição de exergia ( $C_d$ ) e o fator exergoeconômico ( $f_k$ ) também apresentam resultados distintos nos dois métodos. Os gráficos 5.20 e 5.21 mostram a comparação.

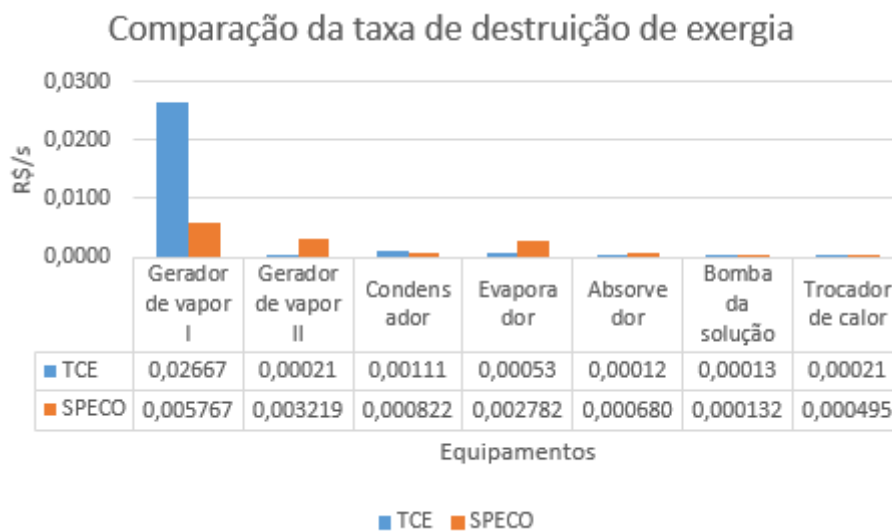


Figura 5.20 – Comparativo dos resultados da taxa de destruição de exergia do chiller de absorção. (Fonte: autor)

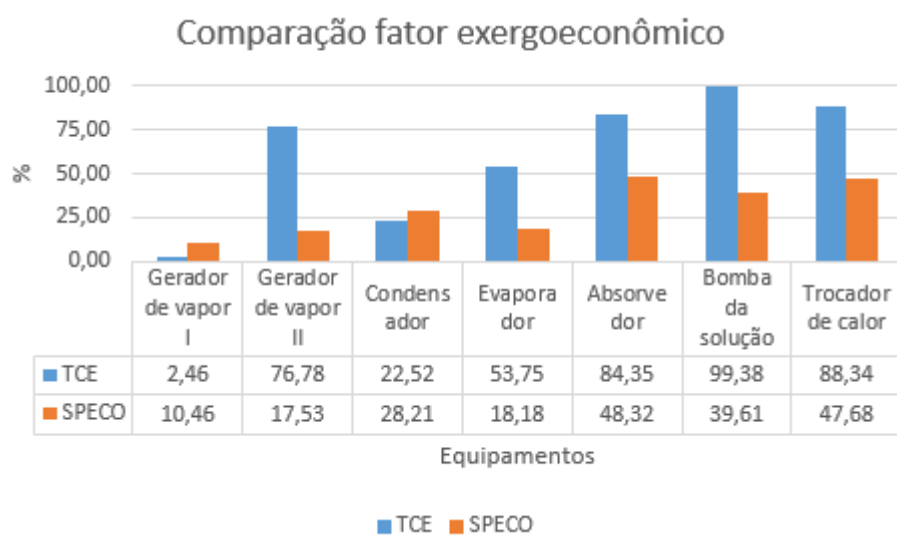


Figura 5.21 – Comparativo dos resultados do fator exergoeconômico do chiller de absorção. (Fonte: autor)

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Esta dissertação teve como objetivo a realização de um estudo comparativo entre as metodologias exergoeconômicas, teoria do custo exergético (TCE) e custo exergético específico (SPECO), aplicado em um sistema de refrigeração por absorção de vapor, de duplo efeito, em série com disposição em torre, que trabalha com os fluidos, água (refrigerante) e brometo de lítio (absorvente), que se encontra em desenvolvimento no centro de tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. Foram apresentados os resultados termodinâmicos (energéticos e exergéticos) e os exergoeconômicos.

Para auxiliar na obtenção das propriedades termodinâmicas e nos cálculos dos balanços exergoeconômicos, foi utilizado a plataforma EES, devido a facilidade de determinação das propriedades dos fluidos de trabalho do sistema de absorção de vapor do presente estudo.

As equações termodinâmicas aliados com os conceitos exergoeconômico dos dois métodos aplicados no presente trabalho, permitiu associar os fluxos de exergia de entrada e saída de cada subsistema da unidade com os custos monetários. Através do uso correto das proposições sugeridas por Valero e Lozano, no caso da metodologia TCE, e os princípios F e P defendidos por Lazaretto e Tsatsaronis, no SPECO, foi possível obtenção dos balanços exergeticos e econômicos, apresentando resultados compatíveis com outros trabalhos disponíveis na literatura.

Como observado nos resultados apresentados em ambos os métodos (tabela 5.5 e 5.7), os maiores custos de exergia e monetário, estão associados aos fluxos dos produtos de combustão que são perdidos no gerador de vapor I. Porém estes gases ainda possuem potencial de uso para outras aplicações.

Devido à dificuldade de alocar custos provenientes de equipamentos dissipativos, a metodologia TCE tem um maior custo exergético unitário e monetário em relação ao método SPECOS. No gráfico 5.15 tem-se que o custo exergético unitário, pelo método TCE é 57,61, já no método SPECOS esse valor fica 15,30. No tocante ao custo monetário, no método TCE fica 173,90 R\$/s e no SPECOS, a resultância foi de 137,00 R\$/s. Tal informação é de suma importância, pois corrobora com a deficiência do método TCE, no tocante a alocação de custos em equipamentos dissipativos, como também serve de base para escolha do melhor método a ser aplicado no sistema de absorção de vapor em estudo.

A respeito dos parâmetros exergoeconômicos aplicados no presente trabalho, alguns comparativos foram feitos no capítulo 5. Os gráficos 5.19, 5.20 e 5.21, que trata da comparação dos resultados do fator  $r_k$ , taxa de destruição de exergia ( $C_d$ ) e o fator exergoeconômico ( $f_k$ ), respectivamente, expõem diferenças significativas entre os métodos. Tais diferenças podem ser explicadas pelo fato de que no método TCE, por exemplo, o balanço de custos (tanto econômico, como exergético) é feito obedecendo proposições difundidas pelos autores Valero e Lozano, e no método SPECOS, a orientação para a realização do balanço de custos é baseado nos princípios F e P, defendidos pelos autores Lazarreto e Tsatsaronis, portanto a alocação de custos do combustível e do produto diferem nos dois métodos.

Os resultados dos parâmetros exergoeconômicos também apontaram os equipamentos que necessitam de otimização, dentre eles: o gerador de vapor I, gerador de vapor II, sistema de condensação e evaporador.

O método SPECO se mostrou mais adequado na aplicação do sistema em estudo, devido a clareza do método na alocação de custos dos insumo e produtos do ciclo, como também o melhor tratamento dos resíduos oriundos dos equipamentos dissipativos, o que não acontece no método TCE.

## **6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Sugere-se a realização da análise do sistema proposto utilizando-se outras metodologias exergoeconômicas, tais quais: Análise funcional termoeconômica (AFT), Análise funcional de Engenharia (AFE), modelo E, modelo E&S, modelo H&S, dentre outros, a fim de comparar os resultados obtidos por tais metodologias.

Sugere-se ainda uma análise econômica mais apurada, baseada em índices de avaliação de investimento, como Payback, valor presente líquido (VPL) e Taxa interna de retorno (TIR).

Com relação aos impactos ambientais causados ao longo da vida útil do chiller de absorção de vapor em desenvolvimento na UFPB, recomenda-se uma avaliação do ciclo de vida (ACV) com o objetivo de quantificar tais impactos ambientais e buscar otimizações no sentido de diminuí-los.

Propõe-se ainda estudos no sentido de otimizar os processos de dessorção e absorção, pois estes volumes de controle que englobam os equipamentos que participam desses processos apresentaram as maiores taxas de irreversibilidade conforme demonstrou a análise de segunda lei da termodinâmica.

No tocante a simulação numérica, é aconselhável a realização do estudo com outros parâmetros de avaliação, tais quais: combustíveis, fluidos de trabalho, cogeração, potência do queimador, entre outros, no intuito de identificar o melhor cenário de trabalho do protótipo em desenvolvimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANVARI S., TAGHAVIFAR H., PARVISHI A.,(2017). **Thermo- economical consideration of Regenerative organic Rankine cycle coupling with the absorption chiller systems incorporated in the trigeration system.** Energy conversion and Management, 148 (2017), 317-329.

ALKAN, M. A.; KEÇEBAS, A.; YAMANKARADENIZ, N. "Exergoeconomic analysis of a district heating system for geothermal energy using specific exergy cost method", Revista Energy 1:426-434, 2013.

BALMER, Robert T. Modern Engineering Thermodynamics. Academic Press, 2010.

BEJAN, Adrian. Advanced engineering thermodynamics. John Wiley & Sons, 2016.

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

CAVALCANTI, E. J. C., Livro Análise exergoeconômica e exergoambiental, Editora Blucher, 2016.

CAVALCANTI, E. J.C.; MOTTA, H. "Exergoeconomic analysis of a solar-powered/fuel assisted Rankine cycle for power generation", Revista Energy 1:556-562, 2014.

Cerqueira, S. A. A. G. (1999). Metodologias de Análise Termoeconômica de Sistemas. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

Cerqueira, S. A. A. G. e Nebra, S. A. (1999). Cost Attribution Methodologies in Cogeneration Systems. Energy 40 (1999) 1587-1597.

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

ECOGEN Brasil, energia inteligente, 2017. Disponível em: <https://www.copergas.com.br/wp-content/uploads/2016/05/Coperg--s-Gera----o-G-s-Natural-27nov17.pdf>. Acesso em: 10 de janeiro de 2018.

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.

FARSHI, G. L., MAHMOUDI S.M.S, ROSEN M.A., YARI M., AMIDPOUR M. (2013). **Exergoeconomic analysis of double effect absorption refrigeration systems**. Energy conversion and Management, 65 (2013), 13-25.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A.T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 7 ed. LTC. 2011.

GUNGOR, A.; ERBAY, Z.; HEPBASLI, A, (2012). **Exergoeconomic (thermoeconomic) analysis and performance assessment of a gas engine-driven heat pump drying system based on experimental data**. Drying Technology, v. 30, n. 1, p. 52-62, 2012.

GUEDES, S.R. (2015). **Avaliação dos Modelos Termodinâmicos e Abordagem da Alocação de CO<sub>2</sub> em Termoeconomia**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal Do Espírito Santo. Centro de tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica.

HERRERA, M. D. M., ARRIETA F.R.P., SODRÉ J.R., (2014). **Thermoeconomic assessment of an absorption refrigeration and hydrogen-fueled diesel power**

**generator cogeneration system.** International journal of hydrogen energy, 39 (2013), 4590-4599.

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

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.

LOZANO, M. A., VALERO, A., 1993, "Theory of Exergetic Cost. Energy". Pergamon Press. Vol. 18, nº 9, pp 939-960.

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 Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Lisboa, Portugal.

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

MARLON, C.S.S. (2005). **Análise exergoeconômica de uma unidade de cogeração a gás natural com refrigeração por absorção.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Centro de tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica

MARQUES, A.S. (2005). **Análise termoeconômica de um sistema de refrigeração automotivo por absorção.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Centro de tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica.

OLIVEIRA JUNIOR, S. **Exergy: Production, Cost and Renewability**. Springer Science e Business Media, 2012.

LAZARRETO, A.; TSATSARONIS, G. (2002) "**SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems**", Revista Energy 1:1258-1289, 2002.

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

LOZANO, M. A.; VALERO, A. Teoria del coste exergético, II. Aplicacion 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

LOURENÇO, A. B. Uma Nova Abordagem Termoeconômica Para O Tratamento De Equipamentos Dissipativos. Dissertação de Mestrado. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica. Vitória, 2012.

LOURENÇO, A. B. Uma Abordagem Termoeconômica Sistemática Para Modelagem De Ciclos Termodinâmicos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade Federal Do ABC. Santo André, 2016.

SANTOS, R. G. (2015), **Avaliação dos Modelos Termodinâmicos e Abordagem da Alocação de CO2 em Termoeconomia**, Vitória, 161p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo.

SANTOS, D.H.P. (2005). **Análise exergética 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.

Shokati, N., Ranjbar F., Yari M., Hua L., (2014). **A comparative analysis of rankine and absorption power cycles from exergoeconomic viewpoint**. Energy conversion and Management, 88 (2014), 657-668.

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

UYSAL C., KURT H., KWAK H., (2017). **Exergetic and thermoeconomic analyses of a coal-fired power plant**. International Journal of Thermal Sciences, 117 (2017) , 106-120.

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.

WU, C.; WANG, S.; FENG, X.; LI, J. "SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems", Revista Energy Conversion and Management 1:362-376, 2017.