

Análise Exergoeconômica de um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito em serie com disposição em torre

João Luiz de -Medeiros Neto¹, Carlos Antonio Cabral- dos Santos²

¹Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, Brasil. Email: eng.joaomedeiros@gmail.com

²Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, Brasil. Email: carloscabralsantos@yahoo.com.br

Resumo

O presente trabalho tem a finalidade de realizar um estudo exergoeconômico para um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito, numa unidade tipo torre, com uso do gás natural, utilizando o método SPECO (Specific Exergy Costing). O sistema usa como fluidos de trabalho o par água e Brometo de lítio e a queima direta do gás natural como fonte energética para o gerador de vapor 1. O método escolhido para realização do estudo é o SPECO (Specific Exergy Costing), que é composto por três etapas, sendo a primeira caracterizada pela determinação dos fluxos de exergia de forma separada (térmica, mecânica e química) para a obtenção de resultados mais precisos. A segunda etapa é baseada na definição dos produtos e dos combustíveis de cada componente, levando em consideração o resultado desejado produzido por cada componente e a fonte consumida para obter esse resultado. Na última etapa são utilizadas equações que associem o custo de um sistema térmico com o ambiente e suas fontes de irreversibilidades. Um código computacional foi desenvolvido em uma plataforma de modelagem matemática para os balanços de 1ª e 2ª leis da Termodinâmica, bem como para os balanços exergoeconômicos com a utilização dos conceitos de produtos, combustíveis e equações auxiliares para cada volume de controle da unidade. Os resultados do estudo exergoeconômico mostraram que o gerador de vapor 1 necessita de otimização tanto no âmbito energético como no monetário.

Palavras-chave: Refrigeração por absorção de vapor; Exergia; Exergoeconomia; SPECO.

Abstract

The present work aims to conduct an exergoeconomic study of a double-effect vapor absorption refrigeration system in a tower-type unit using natural gas, employing the Specific Exergy Costing (SPECO) method. The system uses water and lithium bromide as working fluids, and the direct combustion of natural gas as the energy source for the first steam generator. The chosen method, SPECO, consists of three stages. The first stage involves the separate determination of exergy flows (thermal, mechanical, and chemical) to achieve more precise results. The second stage defines the products and fuels for each component, considering the desired output produced by each component and the source consumed to obtain this result. In the final stage, equations are used to associate the cost of a thermal system with the environment and its sources of irreversibility. A computational code was developed on a mathematical modeling platform for the first and second laws of thermodynamics balances, as well as for the exergoeconomic balances using the concepts of products, fuels, and auxiliary equations for each control volume of the unit. The exergoeconomic study results indicated that the first steam generator requires optimization both in energy and monetary terms.

Keywords: Vapor absorption refrigeration; Exergy; Exergoeconomics; SPECO.

1. Introdução

A análise exergoeconômica é uma metodologia crucial para a avaliação do desempenho e viabilidade econômica de sistemas térmicos complexos, incluindo sistemas de refrigeração por absorção. Este tipo de análise combina os princípios da Termodinâmica com a análise econômica para identificar ineficiências e custos associados ao uso de recursos energéticos. No contexto dos sistemas de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito em série com disposição em torre, a análise exergoeconômica proporciona uma visão detalhada sobre como otimizar a eficiência e reduzir os custos operacionais.

Sistemas de refrigeração por absorção são uma alternativa eficiente e ambientalmente amigável aos sistemas de refrigeração por compressão de vapor, especialmente quando integrados com fontes de energia renovável. A configuração de duplo efeito, em particular, permite a recuperação de calor em duas etapas, aumentando significativamente a eficiência do sistema. Estudos recentes destacam a importância da análise exergoeconômica na identificação das principais fontes de perda de exergia e nos custos relacionados [1].

A configuração em torre dos sistemas de absorção de duplo efeito permite um melhor gerenciamento térmico e uma distribuição mais uniforme da carga térmica, contribuindo para uma maior eficiência operacional. [2] destacam que a disposição em torre pode proporcionar melhorias significativas na performance exérgica e na economia de operação, especialmente em condições de carga variável. A integração de técnicas de inteligência artificial também tem sido explorada para otimizar o controle e a operação desses sistemas complexos [1].

Estudos recentes, como o [1] e [2], focam na aplicação de modelos matemáticos e simulações para prever o comportamento dos sistemas de refrigeração por absorção em diferentes condições operacionais. Essas simulações permitem uma avaliação detalhada das interações entre os componentes do sistema e dos efeitos das variáveis operacionais na eficiência exérgica e nos custos operacionais. O uso de algoritmos avançados de otimização ajuda a identificar as configurações mais eficientes e economicamente viáveis.

Dentre os métodos exergoeconômicos disponíveis na literatura, o utilizado no presente trabalho é o método SPECO (Specific Exergy Costing), desenvolvido por Lazaretto e Tsatsaronis em 1999. Tal método é baseado na exergia específica, custo do produto e do combustível por unidade de exergia, eficiência exérgica e equações auxiliares [3]. Este método é composto por três etapas distintas: 1. Determinação dos fluxos de exergia total. 2. Definição dos produtos e combustíveis (insumos) de cada fluxo energético para cada volume de controle, levando em consideração o resultado desejado/ produzido por cada equipamento e

a fonte consumida para obter esse resultado. 3. Na última etapa são utilizadas equações que associem o custo de um sistema térmico com o ambiente e suas fontes de irreversibilidades. Desta forma, obtém-se os balanços para os produtos, para os combustíveis e as equações auxiliares para fechar a matriz de incidência. Os autores [3] conduziram um estudo exergoeconômico utilizando o método SPECO (Custo Específico de Exergia) em uma caldeira de uma indústria alimentícia, visando não apenas mensurar custos, mas também sugerir ações concretas para melhorar sua eficiência. O estudo concentrou-se em minimizar as perdas de energia em caldeiras de biomassa na indústria Saudali, localizada em Ponte Nova, Minas Gerais, Brasil. A metodologia empregada foi desenvolvida com base na análise exergoeconômica utilizando o método SPECO. Para viabilizar essa abordagem, todos os fluxos exérgicos foram mapeados e seus valores termodinâmicos determinados. O teor de umidade médio do combustível foi medido em cerca de $(25 \pm 1\%)$ para calcular um Poder Calorífico Inferior de 15.960 kJ/kg. As taxas mássicas e os valores de exergia foram determinados por meio de equipamentos de medição, tabelas termodinâmicas e informações da empresa. Os resultados revelaram uma eficiência exérgica de 51,74%, com um custo do vapor de 0,0446 R\$/ (kWh) e um custo do combustível de 0,01490 R\$/ (kWh). Esses dados demonstraram uma relação de custo entre produto e combustível de 1,99, indicando que o custo do produto é aproximadamente o dobro do custo do combustível. A aplicação do método SPECO na indústria Saudali destacou aspectos importantes e frequentemente negligenciados, como o impacto da umidade na exergia disponível da biomassa e a significativa disparidade entre os custos de vapor e combustível.

Os autores [4] discutiram o potencial do sistema de refrigeração por absorção de vapor (SRAV) usando água e brometo de lítio na utilização de calor residual industrial e no aumento da eficiência energética. Eles descrevem os componentes do SRAV e destacam a necessidade da modelagem e a análise dinâmica para otimizar sua operação em ambientes variáveis. Para lidar com esses desafios, é proposta uma abordagem utilizando a linguagem de modelagem Modelica, que permite uma modelagem mais eficaz e dinâmica do sistema. Uma biblioteca Modelica personalizada é desenvolvida para modelar o SRAV, considerando a dinâmica dos principais componentes e utilizando o método de volume finito para capturar as mudanças no estado do meio. O modelo é validado e usado para conduzir uma análise energética e exérgica, identificando o ponto de operação ótimo e as características dinâmicas do sistema. Os resultados apontam que o SRAV pode atingir um alto coeficiente de desempenho (COP) em determinadas condições operacionais e revelam ideias sobre as respostas dinâmicas das variáveis de entrada e saída do sistema.

Em um estudo conduzido por [5], os autores analisaram uma instalação de refrigeração por absorção de vapor, visando encontrar as condições ideais de operação para uma rede de chillers de absorção de vapor, levando em consideração aspectos energéticos e financeiros. Os resultados indicaram que operar nas condições ótimas identificadas pelos autores reduziu os custos totais nivelados da instalação em 8,5% em relação à condição inicial de projeto

Diante do exposto, o presente trabalho visa à realização de um estudo exergoeconômico, aplicando o método SPECO em uma unidade de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito, composto por dois geradores de vapor, sistema de condensação, evaporador, absorvedor, bomba de solução e um trocador de calor intermediário.

2. Metodologia

2.1. Descrição da unidade proposta

O sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em série da Figura 1, opera da seguinte forma: O vapor de refrigerante de baixa pressão, proveniente do evaporador, é absorvido pelo brometo de lítio no absorvedor. Em seguida, a solução resultante, enfraquecida em relação ao fluido absorvente, é bombeada para o gerador de vapor 1, onde recebe calor de uma fonte térmica, separando o vapor do fluido refrigerante da solução de brometo de lítio.

Ainda de acordo com [7] Do Gerador de vapor 1, sai vapor de refrigerante de alta pressão e uma solução de água e brometo de lítio com concentração média de brometo de lítio. A solução expelida do Gerador de vapor 1 passa por um dispositivo de expansão antes de entrar no Gerador de vapor 2, onde o vapor do fluido refrigerante aquece a solução proveniente deste último, transformando-se em líquido saturado.

Enquanto isso, a solução aquecida no Gerador de vapor 2 libera o restante do vapor, resultando na saída de vapor refrigerante de alta pressão e brometo de lítio concentrado. O brometo de lítio que sai do Gerador de vapor 2 retorna para o absorvedor, pré-aquecendo a solução que sai do absorvedor por meio de um trocador de calor intermediário. Simultaneamente, do Gerador de vapor 2 saem fluido refrigerante no estado de líquido saturado (ponto 24) e vapor de água (ponto 7).

O vapor de água entra no condensador onde perde calor para o ambiente, devido a um sistema de arrefecimento, e é condensado. O fluido refrigerante no estado de líquido saturado passa pelo dispositivo de expansão 2, e vai para o misturador. No misturador, o condensado vindo do condensador no estado de água líquida se mistura o fluxo que vem do ponto 25 do ciclo. O fluxo do fluido refrigerante que sai do misturador, passa pela válvula de expansão 3 (VE 3) e vai para o evaporador. No evaporador, o fluido refrigerante retira calor do ambiente e em seguida retorna para o absorvedor para reiniciar o ciclo.

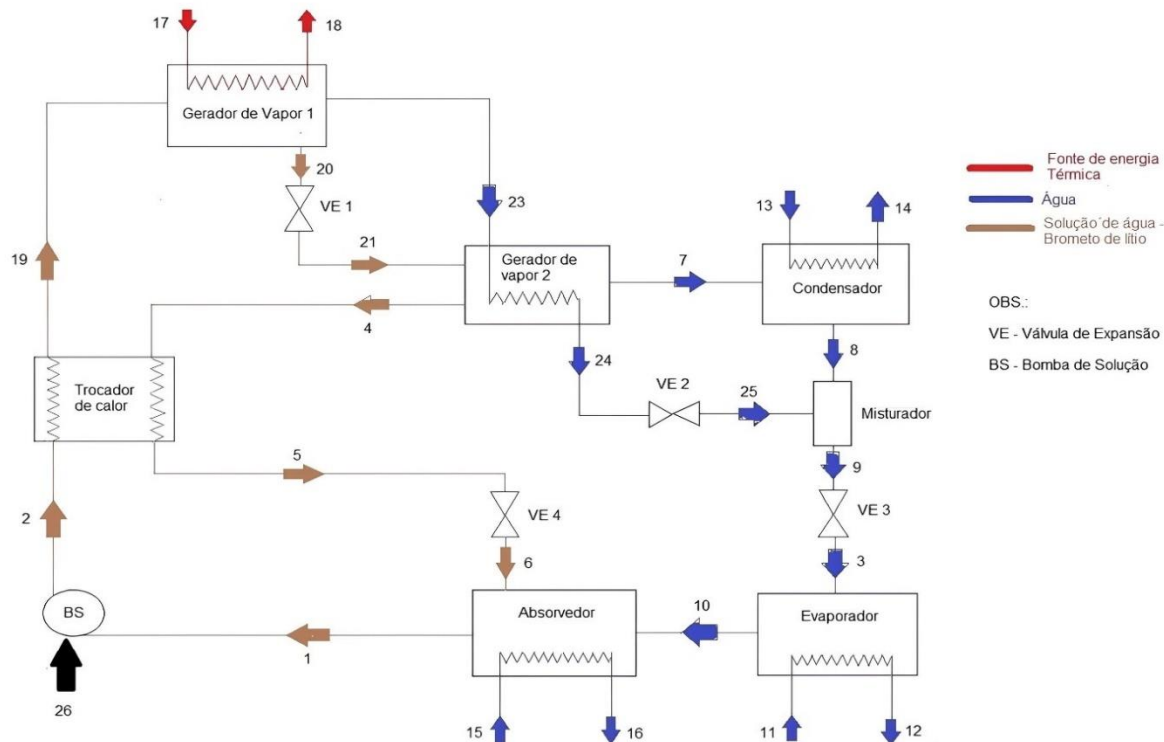


Figura 1. Esquema do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito em série com disposição em torre. Fonte: elaboração própria.

2.2. Modelagem exergetica

Para a realização da análise termodinâmica do SRAV foram realizadas as seguintes condições simplificadoras: a bomba de solução é isentrópica; as variações das energias cinéticas e potencial são desprezíveis; no condensador e evaporador só passa o fluido refrigerante; as válvulas de expansão são adiabáticas; na saída do evaporador e do condensador, o refrigerante foi assumido em condições de saturação; a solução de brometo de lítio tem condições de equilíbrio nas saídas do absorvedor e do gerador de vapor; não há transferência de calor entre os trocadores de calor e sua vizinhança; devido à baixa viscosidade da mistura e ao fluxo laminar do sistema, as perdas de carga por atrito nos trocadores de calor, nas tubulações e nas bombas são consideradas desprezíveis; o sistema de condensação é composto pelo condensador e pelo misturador, logo ambos serão tratados como um único equipamento.

Foi utilizado os recursos disponíveis na plataforma EES (Engineering Equation Solver) para determinar as propriedades termodinâmicas de cada ponto do sistema e os balanços termodinâmicos.

A análise energética e exergetica do ciclo de absorção foi conduzida utilizando as equações de balanço de massa equação (1), balanço de energia equação (2) e taxa de geração de entropia equação (3) para cada volume de controle individualmente, determinado pelas fronteiras de cada componente do sistema proposto.

$$\sum_{e=1}^n \dot{m}_e - \sum_{s=1}^m \dot{m}_s = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum_{e=1}^n \dot{m}_e \times h_e - \sum_{s=1}^m \dot{m}_s \times h_s = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{e=1}^n \dot{m}_e (s_e) - \sum_{s=1}^m \dot{m}_s (s_s) + S_{ger} + \sum_{v.c.=1}^n \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} = 0 \quad (3)$$

A exergia física Equação (4) para volumes de controle é determinada pela expressão dada por [8]:

$$ex_{física} = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (4)$$

De acordo com [8], a parcela de exergia química é determinada pela equação (5). A variável y_i pode ser menor, igual ou maior que zero. No presente estudo a mistura foi considerada uma solução totalmente

homogênea e ideal, ou seja, uma solução sem alteração de volume ou entalpia, logo o valor de y_i será igual a um.

$$ex_{química} = \sum_{i=1}^n x_i \times e_i^{química} + R \times T_0 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \times (\ln x_i) \times y_i \quad (5)$$

2.3. Modelagem Exergoeconômica - SPECO

Existe mais de uma abordagem na literatura para análise exergoeconômica de sistemas de conversão de energia. No presente estudo, o método escolhido foi o difundido por [6] que 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. Portanto, a equação primitiva para o desenvolvimento do balanço de custos exergeticos da unidade proposta é dada pela equação (6).

$$\sum_s (c_s \cdot E_s)_k + c_w \cdot W = c_q \cdot E_q + \sum_e (c_e \cdot E_e)_k + Z_k \quad (6)$$

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}).

A análise do desempenho exergetico dos equipamentos é realizada aplicando o conceito de eficiência exergetica, que é determinada pela proporção entre a exergia dos produtos e a exergia dos insumos. A equação (7) apresenta a expressão:

$$\epsilon = \frac{E_P}{E_F} \quad (7)$$

Outro parâmetro relevante para avaliação exergoeconomica é a taxa de exergia destruída determinada pela equação (8).

$$E_D = E_F - E_P \quad (8)$$

O custo da exergia destruída é determinado pelo produto entre o custo específico dos insumos (cf) e o valor da exergia destruída no equipamento. Tal parâmetro é determinado pela equação (9).

$$\dot{C}_D = c_f \cdot E_D \quad (9)$$

O parâmetro que informa o aumento relativo no custo médio por unidade de exergia entre o combustível e o produto é determinado pela equação (10)

$$r_k = \frac{c_p - c_f}{c_f} \quad (10)$$

Onde o c_p e o c_f são os custos específicos do produto e do combustível, respectivamente.

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 [9].

Um fator de suma importância para avaliação da viabilidade de investimento de cada equipamento é o fator exergoeconômico determinado pela equação (11):

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{c_f \cdot E_D + \dot{Z}_k} \quad (11)$$

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.

A tabela 1 mostra o balanço exergoeconômico para o volume de controle de cada equipamento do ciclo, destacando os fluxos referente ao produto e ao combustível, bem como suas respectivas equações auxiliares.

Tabela 1 – Balanço exergoeconômico usando o método Speco

Equipamento	Produto	Combustível	Equação Auxiliar
Gerador de vapor 1	$c_{21} \cdot \dot{E}x_{21} + c_{23} \cdot \dot{E}x_{23} - c_{19} \cdot \dot{E}x_{19}$	$c_{17} \cdot \dot{E}x_{17} - c_{18} \cdot \dot{E}x_{18}$	$F: c_{17} = c_{18}$ $P: \frac{\dot{C}_{21} - \dot{C}_{19}}{\dot{E}x_{21} - \dot{E}x_{19}} = \frac{\dot{C}_{23} - \dot{C}_{19}}{\dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{19}}$
Gerador de vapor 2	$c_7 \cdot \dot{E}x_7 + c_4 \cdot \dot{E}x_4 - c_{21} \cdot \dot{E}x_{21}$	$c_{23} \cdot \dot{E}x_{23} - c_{25} \cdot \dot{E}x_{25}$	$F: c_{23} = c_{25}$
Sistema de condensação	$c_{14} \cdot \dot{E}x_{14} - c_{13} \cdot \dot{E}x_{13}$	$c_7 \cdot \dot{E}x_7 + c_{25} \cdot \dot{E}x_{25} - c_3 \cdot \dot{E}x_3$	$F: c_3 = \frac{\dot{C}_7 - \dot{C}_{25}}{\dot{E}x_7 - \dot{E}x_{25}}$
Evaporador	$c_{12} \cdot \dot{E}x_{12} - c_{11} \cdot \dot{E}x_{11}$	$c_3 \cdot \dot{E}x_3 - c_{10} \cdot \dot{E}x_{10}$	$F: c_3 = c_{10}$
Absorvedor	$c_{16} \cdot \dot{E}x_{16} - c_{15} \cdot \dot{E}x_{15} + c_1 \cdot \dot{E}x_1 - c_{10} \cdot \dot{E}x_{10}$	$c_6 \cdot \dot{E}x_6$	$P: \frac{\dot{C}_1 - \dot{C}_{10}}{\dot{E}x_1 - \dot{E}x_{10}} = \frac{\dot{C}_{16} - \dot{C}_{15}}{\dot{E}x_{16} - \dot{E}x_{15}}$
Trocador de calor	$c_{19} \cdot \dot{E}x_{19} - c_2 \cdot \dot{E}x_2$	$c_4 \cdot \dot{E}x_4 - c_6 \cdot \dot{E}x_6$	$F: c_4 = c_6$
Bomba de solução	$c_2 \cdot \dot{E}x_2 - c_1 \cdot \dot{E}x_1$	$c_{26} \cdot \dot{E}x_{26}$	Não aplicado

. Fonte: elaboração própria.

3. Resultados

Para a unidade de refrigeração analisada, foram determinados os estados termodinâmicos em cada

ponto do ciclo. Esses estados representam os fluxos de entrada e saída por volume de controle, utilizando um software de modelagem matemática. Os dados de entrada para o estudo energético e exergético foi

baseado no trabalho de [10]. A tabela 2 mostra os resultados da análise termodinâmica que são a base para as avaliações exergoeconômica.

Tabela 2 – Parâmetros termodinâmicos de cada ponto do sistema de refrigeração

Pontos	T (°C)	P (kPa)	xsol (%)	\dot{m} (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	ex (kJ/kg)	Ex (kW)
1	29,9	0,87	52,9	0,05528	66,06	0,2026	10,21	0,5643
2	29,93	77,52	52,9	0,05528	66,11	0,2028	10,21	0,5644
3	5	0,87	–	0,01047	125,70	0,4525	–4,703	–0,0492
4	78,32	4,24	62,66	0,04481	202	0,4302	78,3	3,509
5	50,51	4,24	62,66	0,04481	150,50	0,2793	71,74	3,215
6	48,68	0,87	62,66	0,04481	150,50	0,2690	74,81	3,352
7	73,5	4,24	–	0,00620	2637,00	8,7050	46,73	0,2898
8	29	4,243	–	0,00622	125,4	0,4364	0,1100	0,0007
9	30	4,24	–	0,01047	125,7	0,4364	0,1116	0,00117
10	5	0,87	–	0,01047	2510	9,0250	–176,4	–1,847
11	12	–	–	1,19100	50,36	0,1804	1,119	1,334
12	7	–	–	1,19100	29,42	0,1063	2,268	2,703
13	25	–	–	1,26300	104,80	0,3669	0	0
14	28,16	–	–	1,26300	118,10	0,4110	0,06956	0,08787
15	25	–	–	0,81150	104,80	0,3669	0	0
16	33,65	–	–	0,81150	141,00	0,4866	0,5149	0,4179
17	300	–	–	0,01447	3925,00	9,2960	1202	17,4
18	200	–	–	0,01447	2467,00	6,500	577	8,35
19	49,63	77,52	52,9	0,05528	107,9	0,3336	12,98	0,7173
20	138,60	77,52	57,33	0,05101	300,70	0,7910	69,44	3,542
21	66,70	4,24	57,33	0,05101	300,70	0,4043	184,7	9,424
23	134,90	77,52	–	0,00427	2748,00	7,6620	468,1	1,997
24	92,71	77,52	–	0,00427	388,30	1,2240	28,02	0,1196
25	29,99	4,24	–	0,00427	388,30	1,3030	4,399	0,01877

. Fonte: elaboração própria

Na Tabela 3, são apresentados os resultados da avaliação exergoeconômica, incluindo os custos específicos de cada fluxo exergético e a taxa de custos para cada ponto da unidade de refrigeração analisada. Como dado de entrada, foi utilizado o valor monetário

do gás natural. Nota-se um alto custo do combustível e dos gases utilizados para o acionamento do gerador de vapor

Tabela 3 – Resultados da Análise exergoeconômica

Fluxo	Descrição	Ex (kW)	$c * 10^{-5}$ (R\$/kJ)	$C * 10^{-5}$ (R\$/s)
1	Solução com baixa concentração de Brometo de lítio	0,5643	38,320	21,620
2	Solução com baixa concentração de Brometo de lítio	0,5644	1,409	0,795
4	Solução com concentração alta de Brometo de lítio	–0,0492	301,100	1056,000
6	Solução com concentração alta de Brometo de lítio	3,352	301,100	960,500
7	Fluido Refrigerante	0,2898	301,100	87,270
3	Fluido Refrigerante	–0,0492	451,700	0,500
10	Fluido Refrigerante	–1,847	451,700	895,100
11	Água gelada	1,334	0,000	0,000

12	Água gelada	2,703	35,420	95,740
13	Água de arrefecimento	0	0,000	0,000
14	Água de arrefecimento	0,0879	1559,000	137,000
15	Água de arrefecimento	0	0,000	0,000
16	Água de arrefecimento	0	36,010	15,050
17	Combustível	17,4	63,730	2097,000
18	Gases de exaustão	8,35	63,730	1213,000
19	Solução com baixa concentração de Brometo de lítio	0,7173	197,300	141,600
20	Solução com concentração média de Brometo de lítio	3,542	198,300	702,500
23	Fluido Refrigerante	1,997	198,300	390,400
25	Fluido Refrigerante	0,188	150,600	17,970
26	Energia elétrica para Bomba	0,003	5,034	13,740

. Fonte: elaboração própria

A tabela 4 apresenta outros resultados da avaliação exergoeconômica, como o valor da exergia destruída em cada equipamento. Observam-se também os custos associados ao investimento aquisição, operação e manutenção dos equipamentos utilizados na unidade (Z_k). Foram utilizados como dados de entrada da avaliação exergoeconômica, os custos de operação do sistema, os custos de investimento do sistema de refrigeração por absorção de vapor e os custos de manutenção. O custo monetário do sistema de refrigeração foi estimado pelos autores por ser baseado em um prototipo em construção no laboratório do instituto de energia renovável da Universidade Federal da Paraíba – Brasil, e utilizado uma taxa de rateio entre os componentes de acordo com as funções de cada um [11].

Foi utilizado como valor de investimento no chiller R\$ 30.000,00. Além disso, foi utilizado um tempo de vida útil do equipamento de 20 anos, fator de manutenção de 5% e uma taxa real de juros de 10% ao ano para a obtenção dos custos exergéticos e monetários.

Outro parâmetro avaliado nesta análise foi o aumento relativo no custo médio por unidade de exergia entre combustível e o produto (r_k), onde observa-se altos valores para o gerador de vapor 1, Trocador de calor e para a bomba de solução, indicando necessidade de otimização. Por fim, são apresentados os resultados do fator exergoeconômico (f_k) de cada equipamento, os equipamentos com valores baixos indicam a necessidade de redução das irreversibilidades. Ambos os parâmetros relacionados e os seus respectivos resultados estão expostos na tabela 4.

Tabela 4 – Resultado dos parâmetros de avaliação exergoeconômico utilizando o método SPECO

SUBSISTEMA	ϵ (%)	Ed (R\$/kJ)	Cd (R\$/s)	Z_k (R\$/s)	r_k (%)	f_k (%)
Gerador de vapor I	34,76	9,049	0,005767	0,0006736	209,60	10,46
Gerador de vapor II	70,06	1,623	0,003219	0,000684	51,82	17,53
Sistema de condensação	21,54	0,320	0,000822	0,0003229	83,54	28,21
Evaporador	68,94	0,616	0,002782	0,0006181	55,06	18,18
Absorvedor	92,92	0,226	0,000680	0,0006354	19,58	48,32
Bomba da solução	99,54	0,003	0,000132	0,00008681	102,20	99,27
Trocador de calor	48,21	0,165	0,000495	0,0004514	208,80	47,68

Fonte: elaboração própria

4. Conclusões

O método SPECO demonstrou ser eficaz para a avaliação exergoeconômica aplicada a sistemas de

refrigeração por absorção de vapor, conforme proposto neste trabalho. Foi possível associar os fluxos de exergia de entrada e saída de cada equipamento da unidade aos respectivos custos monetários. Utilizando

corretamente os conceitos de "produtos" e "combustíveis" associados à função e objetivo dos equipamentos, foi possível determinar os balanços exergéticos e econômicos, apresentando resultados compatíveis com os encontrados na literatura disponível.

Como se observou nos resultados apresentados na tabela 3, os maiores custos de exergia estão associados aos fluxos dos produtos de combustão que são jogados na atmosfera após o uso no gerador de vapor 1. Isto indica que estes gases ainda possuem potencial de uso para outras aplicações, como por exemplo, em um sistema de cogeração.

Entre os equipamentos do sistema de absorção, o gerador de vapor 1 foi o que apresentou maior valor de destruição de exergia, indicando necessidade de minimização de perdas.

Os resultados apresentados na tabela 4 demonstram necessidade de otimização exérgica e econômica para os equipamentos da unidade. Com relação ao parâmetro r_k , os equipamentos que necessitam de otimização são: Gerador de vapor 1, o trocador de calor e a bomba de solução. Na visão do parâmetro f_k , os equipamentos que necessitam de otimização são: Gerador de vapor 1, Gerador de vapor 2 e o evaporador. Este estudo é parte integrante de uma pesquisa mais ampla que abordará aspectos exergoambientais e a análise do ciclo de vida dos componentes do sistema de refrigeração por absorção de vapor, tanto de forma isolada quanto integrando um sistema de cogeração. Resultados detalhados dessas análises serão apresentados em trabalhos futuros, proporcionando uma visão abrangente sobre a eficiência energética, impactos ambientais e a sustentabilidade dos sistemas de refrigeração e cogeração.

Agradecimento

O autor 1, bolsista da FAPESQ/CAPES/Brasil, agradece o apoio financeiro para a pesquisa.

Referências

- [1] AHAMED, J. U.; AHAMED, M. S.; SAIDUR, R.; MASJUKI, H. H. Artificial intelligence techniques in refrigeration system modelling. Disponível em: <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/96Lymvx4/>. Acesso em: 11 julho 2024.
- [2] IBRAHIM, N. I.; SHUIB, M. N.; RAHMAN, M. M. Exergoeconomic analysis of double effect absorption refrigeration systems. 2020. Disponível em: <http://eprints.utm.my/101463/1/NasirulShaqIbrahimPSKM2020.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- [3] SCHWANZ, C. J.; CAMPOS, J. C. C.; SIQUEIRA, A. M. O.; SILVA, C. L.; CRUZ, M. L.; MINETTE, L. J. Exergoeconomic analysis in a food industry boiler: a case study. **International Journal for Innovation Education and Research**, v. 10 n. 9, p. 381-393. DOI: <https://doi.org/10.31686/ijer.vol10.iss9.3925>
- [4] ZHOU, Y.; PAN, L.; HAN, X.; SUN, L. Dynamic modeling and thermodynamic analysis of lithium bromide absorption refrigeration system using Modelica. **Applied Thermal Engineering**, v. 225, p.120106, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120106>
- [5] PANAHAZADEH, F.; HAMZEHEI, M.; FARZANEH-GORD, M.; VILLA, A. A. O. Thermo-economic analysis and optimization of the steam absorption chiller network plant. **Thermal Science**, v. 26, n. 1, part A, p. 95-106, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI200619058P>.
- [6] LAZARRETO, A.; TSATSARONIS, G. "SPECOC: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems", *Revista Energy* 1:1258-1289, 2002.
- [7] MEDEIROS NETO, João Luiz de; SANTOS, Carlos Antônio Cabral dos. Análise energética e exérgica de um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito em série com disposição em torre. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, mai. 2024. ISSN 2447-9187. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/8362>>. Acesso em: 12 Jul. 2024. doi:<http://dx.doi.org/10.18265/2447-9187a2024id8362>.
- [8] BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN M. **Thermal design and optimization**. John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [9] MEDEIROS NETO, J. L. **Análise comparativa das metodologias de estudo exergoeconômico para um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/12975>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- [10] HEROLD, K. E.; RADERMARCHER, R.; KLEIN, S. A. **Absorption chillers and heat pumps**. CRC Press, 2016.
- [11] WU, C.; WANG, S.; FENG, X.; LI, J. "SPECOC: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems", *Revista Energy Conversion and Management* 1:362-376, 2017.