

Análise energética e exergetica de um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito em série com disposição em torre

João Luiz de Medeiros Neto^{[1]*}, Carlos Antônio Cabral dos Santos^[2]

^[1] eng.joaomedeiros@gmail.com. Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil

^[2] carloscabraldosantos@yahoo.com.br. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil

* autor correspondente

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo energético e exergetico detalhado de um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito em série com disposição em torre. Esse sistema, que emprega água e brometo de lítio como fluidos de trabalho, usa como fonte de energia térmica para acionar o gerador de vapor, a queima direta do gás natural, e tem como propósito principal a produção de água gelada para um sistema de climatização. Desenvolvido e refinado no Laboratório de Energia Sustentável do Instituto de Energia Sustentável da Universidade Federal da Paraíba, este estudo serve como um suporte valioso e um parâmetro crucial para a otimização do protótipo do sistema. No âmbito da análise termodinâmica realizada, são examinados aspectos energéticos e exergeticos para avaliar tanto quantitativa quanto qualitativamente as irreversibilidades e eficiências dos componentes do sistema em estudo. Utilizou-se o software Engineering Equation Solver para resolver as interações no processo de modelamento matemático dos processos analisados. O *chiller* de absorção em análise é composto por dois geradores de vapor, um sistema de condensação, evaporador, absorvedor, válvulas de expansão, bomba de solução e um trocador de calor. Os resultados da análise exergetica revelam que, em termos de eficiência de segunda lei (racional), o evaporador destaca-se como o componente mais eficiente, registrando uma eficiência de 76,14%, seguido pelo gerador de vapor 1 e o trocador de calor, com eficiências de 53,31% e 51,96%, respectivamente. Em relação às irreversibilidades, o gerador de vapor I e II apresentaram, respectivamente, 58,93% e 22,59% do total das irreversibilidades do sistema. O coeficiente de desempenho do sistema ficou em 1,183.

Palavras-chave: brometo de lítio; duplo efeito; estudo energético e exergetico; refrigeração por absorção; eficiência exergetica.

Exergetic analysis of a double-effect series vapor absorption refrigeration system

Abstract

This paper presents a detailed energetic and exergetic study of a double-effect vapor absorption refrigeration system in series with a tower arrangement. This system, which employs water and lithium bromide as working fluids, utilizes direct natural gas combustion as the thermal energy source to drive the vapor generator. Its primary purpose is producing chilled water for an air conditioning system. Developed and refined at the Sustainable Energy Laboratory of the Institute of Sustainable Energy at the Federal University of Paraíba, this study serves as valuable support and a crucial parameter for optimizing the system prototype. Within the scope of the thermodynamic analysis conducted, energetic and exergetic aspects are examined to evaluate both quantitatively and qualitatively the irreversibilities and efficiencies of the system's components under study. The Engineering Equation Solver software was used to resolve interactions in the mathematical modeling process of the analyzed processes. The absorption chiller under analysis comprises two vapor generators, a condensation system, an evaporator, an absorber, expansion valves, a solution pump, and a heat exchanger. The results of the exergetic analysis reveal that, in terms of second law efficiency (rational), the evaporator stands out as the most efficient component, registering an efficiency of 76.14%, followed by vapor generator 1 and the heat exchanger, with efficiencies of 53.31% and 51.96%, respectively. Regarding irreversibilities, generators I and II presented,

respectively, 58.93% and 22.59% of the total irreversibilities of the system. The coefficient of performance of the system was 1.183.

Keywords: absorption refrigeration; double effect; energetic and exergetic study; exergetic efficiency; lithium bromide.

Nomenclatura:

a	Coeficiente estequiométrico para o ar
β	Eficiência exergetica
b, c, d	Coeficientes estequiométricos – ver Eq. 10
COP	Coeficiente de Performance
EES	Engineering Equation Solver
Ex	Fluxo de exergia [kW]
ex	Exergia específica [kJ/kg]
$ex_{física}$	Exergia física específica [kJ/kg]
$ex_{química}$	Exergia química [kJ/kg]
$e_i^{química}$	Exergia química padrão para cada componente i [kJ/kg]
$evap$	Evaporador
g	Gravidade [m/s ²]
ger	Gerador de vapor
gn	Gás natural
h	Entalpia específica [kJ/kg]
h_e	Entalpia específica na entrada [kJ/kg]
h_s	Entalpia específica na saída [kJ/kg]
h_0	Entalpia de referência [kJ/kg]
I	Irreversibilidade [kJ]
\dot{m}	Fluxo de massa [kg/s]
\dot{m}_e	Fluxo de massa na entrada [kg/s]
\dot{m}_s	Fluxo de massa na saída [kg/s]
\dot{m}_{gn}	Fluxo de massa do gás natural [kg/s]
P	Pressão [kPa]
PCI	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
PCI_i	Poder calorífico inferior para o componente i [kJ/kg]

\dot{Q}	Fluxo de calor [kW]
Q_g	Calor gerado [kW]
$\dot{Q}_{v.c}$	Calor no volume de controle [kW]
\dot{Q}_{evap}	Calor no evaporador [kW]
\dot{Q}_{ger1}	Calor no gerador de vapor 1 [kW]
R	Constante Universal dos gases [kJ/kg.K]
s	Entropia específica [kJ/kg.K]
s_e	Entropia específica na entrada [kJ/kg.K]
s_s	Entropia específica na saída [kJ/kg.K]
s_0	Entropia de referência [kJ/kg.K]
S_{ger}	Geração de Entropia [kW]
SRAV	Sistema de Refrigeração por Absorção de Vapor
T	Temperatura (°C)
T_0	Temperatura de referência (°C)
v_e	Velocidade na entrada [m/s]
v_s	Velocidade na saída [m/s]
VE	Válvula de Expansão
v.c.	Volume de controle
\dot{W}	Fluxo de Trabalho [kW]
$\dot{W}_{v.c}$	Trabalho no volume de controle [kW]
\dot{W}_{bomba}	Trabalho na bomba [kW]
X_{sol}	Concentração da solução [%]
X_e	Concentração na entrada [%]
X_s	Concentração na saída [%]
X_i	Fração molar dos componentes da mistura [%]
z_e	Altura da entrada [m]
z_i	Altura da saída [m]
y_i	Coefficiente de atividade química (Eq. 6); Fração mássica (Eq. 12)
η_{comb}	Eficiência de combustão

1 Introdução

Nos últimos anos, devido ao aumento da temperatura mundial, houve um crescimento na demanda por sistemas de resfriamento, o que tem contribuído para o agravamento do aquecimento global devido às emissões de gases de efeito estufa e a destruição da camada de ozônio (Castaño-Rosa *et al.*, 2021). Os sistemas de refrigeração que visam obter o máximo de eficiência energética têm sido o caminho mais provável para atenuar essa conjuntura, além de garantir o progresso da humanidade (Alcântara *et al.*, 2024). Os sistemas de refrigeração por absorção de vapor (SRAV) são uma tecnologia de refrigeração promissora devido ao uso de fluidos que não prejudicam a camada de ozônio e à utilização de energia térmica proveniente de rejeitos térmicos.

Os sistemas de refrigeração por absorção de vapor (SRAV) possuem algumas vantagens em relação aos sistemas de refrigeração por compressão de vapor convencional. Os sistemas de refrigeração por compressão convencional utilizam um compressor mecânico que requer uma alta entrada de energia elétrica para operar, além de empregar gases que impactam a camada de ozônio. Por outro lado, os SRAVs utilizam diversas fontes de calor de baixa temperatura como entrada de energia para o compressor térmico. De acordo com Marques (2018) na operação do SRAVs é necessário apenas uma pequena quantidade de trabalho (na forma de energia elétrica) para acionar a bomba de solução. No entanto, os SRAVs apresentam um coeficiente de desempenho (COP) menor em comparação com os sistemas convencionais, além de um custo de aquisição e implantação elevado. Os SRAVs de duplo efeito possui um COP em torno de 1,2 (Alhamid *et al.*, 2020).

Contudo, para que a adoção dos sistemas de absorção se torne competitiva e represente uma alternativa viável aos convencionais, é imprescindível buscar maneiras de aumentar a eficiência dos equipamentos. Isso requer aprimoramento do projeto e seleção de tecnologia (Arshad *et al.*, 2019), bem como a identificação das melhores condições operacionais (Leite *et al.*, 2021; Panahizadeh *et al.*, 2021). Em um estudo conduzido por Panahizadeh *et al.* (2022), os autores analisaram uma instalação de absorção, 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. Outros pesquisadores exploraram diferentes abordagens para aprimorar a eficiência dos equipamentos, conduzindo estudos sobre os efeitos de parâmetros como as temperaturas externas (Yu *et al.*, 2022), a eficiência dos componentes (Bellos; Chatzovoulos; Tzivanidis, 2021) e a concentração dos pares de fluidos trabalhados (Xu *et al.*, 2021) no desempenho desses sistemas.

A literatura possui várias contribuições no campo da refrigeração por absorção de vapor. O estudo de Herold, Radermacher e Klein (2016; p.162-169) compara duas configurações de ciclos de refrigeração por absorção: fluxo em série e fluxo paralelo. O fluxo em série é preferido em alguns casos por sua simplicidade de projeto e operação, especialmente em sistemas menores, mesmo que seu coeficiente de desempenho (COP) seja menor que o do fluxo paralelo. A configuração de fluxo em série apresenta uma maior capacidade de refrigeração devido às mudanças nas taxas de fluxo de vapor dos geradores de vapor e no desempenho dos trocadores de calor. No entanto, a maior irreversibilidade e o sub-resfriamento na entrada dos geradores de vapor afetam negativamente o desempenho termodinâmico. Apesar de o fluxo paralelo oferecer maior desempenho, o fluxo em série é mais fácil de controlar. Portanto, a escolha entre as duas configurações depende das necessidades específicas do sistema e das condições operacionais.

Ahmad *et al.*, (2022) discutiram uma análise detalhada de energia para sistemas de refrigeração por absorção de vapor de efeito único, utilizando os pares de trabalho LiBr-H₂O e LiCl-H₂O, em diferentes condições climáticas de operação. Foram investigados os parâmetros de desempenho, como COP, concentração da solução e carga térmica em diferentes componentes, para ambas as configurações. Os resultados mostram que o sistema LiCl-H₂O apresenta um COP melhor e uma carga mínima no gerador menor em comparação com o LiBr-H₂O, especialmente em temperaturas de evaporação mais baixas. Além disso, a temperatura operacional ideal do gerador foi determinada para cada sistema.

Nagraj *et al.* (2022) abordaram a otimização multiobjetivo de sistemas de refrigeração por absorção de vapor (SRAV), utilizando o par LiBr-H₂O, e de um SRAV modificado, com o objetivo de minimizar o custo operacional anual total e a destruição de exergia do sistema. Essa otimização é conduzida por meio de algoritmos genéticos multiobjetivos, otimização por enxame de partículas e

otimização baseada em aprendizado sanitizado. O estudo também compara as variáveis de decisão obtidas para os modelos básicos e modificados, destacando que diferentes algoritmos podem ser empregados com sucesso para alcançar objetivos específicos, como a minimização do custo operacional ou da destruição de exergia, proporcionando ideias sobre as melhores estratégias de operação para os sistemas de refrigeração por absorção de vapor.

Cavalcanti (2021) abordou um sistema de trigerção acionado por um motor marítimo de duplo combustível. Os fabricantes de motores marítimos desenvolveram a versão de duplo combustível (DC) para melhorar a combustão e reduzir as emissões gasosas poluentes. O objetivo foi avaliar o desempenho do combustível diesel-gás e do diesel puro com base em análises exergéticas e exergoambientais. Foram realizados balanços de energia, exergia e exergoambientais considerando o efeito das emissões poluentes. Foi aplicada a abordagem de custo específico de exergia (SPECO), que utiliza a definição de combustível e produto. O motor marítimo a diesel original produzia 6,90 MW de potência elétrica, 28,16 kW de água de resfriamento e 278,2 e 588 kW de aquecimento. Os resultados revelaram que o efeito do combustível diesel-gás reduziu as eficiências energética e exergética em 87% em relação ao modo de diesel puro. O motor a diesel apresentou a maior destruição de exergia com 3051 kW.

Ainda no trabalho de Cavalcanti (2021), foram observadas que as emissões de NO contribuíram com 92% da taxa de impacto ambiental associada à formação de poluentes. As menores eficiências energéticas e exergética e as maiores taxas de impacto ambiental dos componentes foram investigadas. Foram apresentadas as taxas de impacto ambiental por unidade exergética de energia elétrica, água de resfriamento do *chiller* de absorção de vapor e água de aquecimento. A redução da taxa de impacto ambiental devido à formação de poluentes é a principal responsável pelo melhor desempenho ambiental do motor marítimo de duplo combustível. Apesar da redução nas eficiências energética e exergética, a tecnologia de duplo combustível (DF) foi capaz de controlar as emissões poluentes e melhorar o desempenho exergoambiental sem grandes modificações no motor.

Alcântara *et al.*, (2022) elaboraram um estudo para simular o comportamento quase dinâmico de *chillers* de absorção de vapor. O objetivo principal foi desenvolver e validar um modelo matemático utilizando o método da equação característica, incorporando princípios termodinâmicos de conservação de massa e energia, juntamente com parâmetros externos como temperaturas e vazões dos circuitos de água quente, fria e gelada, além dos coeficientes globais de transferência de calor. O software F-Chart EES[®] foi utilizado para resolver as equações do método da equação característica, enquanto o MATLAB foi empregado para a simulação com o modelo transitório. A validação do modelo foi realizada comparando os resultados simulados com dados experimentais da literatura, mostrando boa concordância com erros relativos abaixo de 5% dentro das incertezas de medição. Além disso, uma análise de sensibilidade revelou ideias sobre o comportamento dinâmico do *chiller* de absorção sob diferentes condições de operação. Os resultados demonstraram a eficácia do modelo desenvolvido para capturar o comportamento quase dinâmico desses sistemas, oferecendo oportunidades para otimização e controle mais eficientes.

Alcântara *et al.* (2023) realizaram um estudo que retratou a complexidade dos *chillers* por absorção em comparação com os *chillers* mecânicos, destacando desafios como os processos de transferência de calor e massa, os fluidos de trabalho utilizados e as limitações enfrentadas, como problemas de cristalização e pressões de vácuo. Além disso, o supracitado autor aborda a dificuldade de analisar o comportamento dinâmico desses sistemas devido à sua natureza complexa. Para superar esses desafios, o trabalho propôs uma estratégia metodológica que utiliza métodos inteligentes de regressão para determinar o comportamento transitório de *chillers* de absorção. Essa metodologia é desenvolvida considerando dados externos dos circuitos de água quente, fria e gelada, e integração de modelos físicos com técnicas de aprendizado de máquina. O estudo demonstra que essa abordagem permite estimar com precisão o comportamento dos *chillers* de absorção em diferentes condições operacionais, fornecendo informações valiosas para melhorar a eficiência e o controle desses sistemas. Os resultados mostram uma boa concordância entre os modelos propostos e os dados experimentais, indicando que essa estratégia pode ser uma ferramenta robusta e precisa para análise dinâmica de *chillers* de absorção em operação plena ou parcial.

Saoud *et al.*, (2023) abordaram sistemas inovadores de refrigeração por absorção, destacando o *Chiller* de Absorção de Duplo Elevador de Efeito Único (CADEEU) como uma alternativa promissora

para converter fontes de energia de baixa temperatura em resfriamento útil. Utilizando um modelo detalhado baseado na primeira lei da termodinâmica, o desempenho deste sistema é investigado e comparado com um *chiller* de absorção de efeito único convencional, mantendo condições operacionais semelhantes. Um estudo paramétrico é realizado para analisar o efeito de diferentes variáveis nas métricas de desempenho, como COP, Capacidade de Refrigeração (CC) e Temperatura de Deslizamento (ΔT). Os resultados indicam que o CADEEU possui uma capacidade de produção de resfriamento significativamente maior em comparação com o *chiller* convencional, tornando-o adequado para diversas fontes de calor de baixa temperatura, como por exemplo, o uso de energia térmica gerada por coletores solares planos. Além disso, o CADEEU permite o uso eficiente de calor de baixo grau, apresentando uma alta temperatura de deslizamento, o que contribui para a melhoria da produção de frio.

Ordenez, Cavalcanti e Carvalho (2022) apresentam uma revisão da literatura sobre os métodos de energia, exergia, minimização da geração de entropia e análises exergoambientais aplicados a sistemas energéticos. A revisão destaca a importância de abordagens que vão além da simples eficiência energética, como a maximização do aproveitamento do potencial termodinâmico dos recursos e a minimização da geração de entropia para aumentar a eficiência global dos sistemas. Essas metodologias combinadas constituem uma poderosa caixa de ferramentas para o projeto, análise e otimização de sistemas energéticos, permitindo a quantificação precisa dos impactos energéticos e ambientais. O artigo enfatiza a relevância dessas análises na orientação de decisões de projeto e na busca por soluções que atendam às demandas atuais por eficiência energética e sustentabilidade ambiental.

Schwanz *et al.* (2022) 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 exergéticos 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 exergética 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.

Zhou *et al.*, (2023) 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 exergética, 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.

Diante do exposto, o presente estudo propõe uma análise energética e exergética, fundamentada nos princípios da termodinâmica, de um sistema de refrigeração por absorção de vapor de 5 TR (toneladas de refrigeração) em série, empregando o par água e brometo de lítio, e alimentado pela queima indireta do combustível gás natural. As principais contribuições do presente trabalho são: i) desenvolvimento de um modelo termodinâmico computacional para análise de sistemas de

refrigeração por absorção de vapor; ii) análise de sensibilidade dos principais parâmetros do sistema SRAV para otimização.

O restante do artigo foi estruturado da seguinte forma: a Seção 2 descreve a fundamentação teórica que embasa o presente estudo; a Seção 3 descreve o funcionamento do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito e a metodologia utilizada para obter os resultados da análise energética e exérgica do sistema; a Seção 4 mostra as discussões e interpretações dos resultados obtidos. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões mais relevantes do presente estudo.

2 Fundamentação teórica básica

Na presente seção são abordados os conceitos básicos dos sistemas de refrigeração por absorção de vapor, incluindo sua classificação e os fluidos de trabalho utilizados.

2.1 Sistemas de refrigeração por absorção de vapor

O ciclo de refrigeração por absorção difere do ciclo de refrigeração por compressão de vapor na forma como o fluido é comprimido. No ciclo convencional de refrigeração por compressão de vapor, o vapor é comprimido entre o evaporador e o condensador por meio de um compressor mecânico. Por outro lado, nos sistemas de refrigeração por absorção de vapor (SRAV), o refrigerante do sistema é absorvido por um segundo fluido, chamado fluido absorvente, resultando na formação de uma solução líquida. Essa solução líquida é então bombeada para uma pressão mais elevada. Como o volume específico da solução líquida é significativamente menor do que o volume do vapor de refrigerante, os sistemas de refrigeração por absorção requerem uma potência de acionamento menor em comparação com os sistemas de refrigeração por compressão de vapor. Esse processo nos SRAV é conhecido como compressão térmica.

Em geral, os ciclos simplificados de refrigeração por absorção consistem em quatro processos, nos quais dois envolvem a transferência de calor, enquanto os outros dois implicam trocas simultâneas de calor e massa. Os processos são: i) o processo de vaporização do refrigerante no evaporador, produzindo o efeito frigorífico; ii) o processo de absorção do fluido refrigerante (na fase vapor), executado pelo fluido absorvedor, ao chegar no absorvedor; iii) o fluido refrigerante se separa do fluido absorvedor no gerador de vapor, ao receber energia térmica, a alta temperatura, de uma fonte externa; iv) perda de calor do fluido refrigerante ao chegar no condensador, através de trocas de calor com o meio ambiente (Medeiros Neto, 2018).

2.2 Classificação dos sistemas de refrigeração por absorção de vapor

Os sistemas de refrigeração por absorção são classificados de acordo com algumas características, sendo a primeira delas o número de efeitos. Um sistema é classificado como de simples efeito quando o vapor é produzido uma vez a partir da solução líquida, utilizando uma fonte térmica que aquece o gerador de vapor, fornecendo vapor de água para o processo. Em contraste, um sistema de duplo efeito produz vapor duas vezes, em dois geradores de vapor diferentes do sistema, utilizando a solução líquida. Já no sistema de triplo efeito, o vapor é produzido três vezes, por meio de três geradores de vapor distintos, e assim por diante para sistemas com mais efeitos. Quanto mais efeitos o sistema tiver, maior será o seu COP, devido ao aumento da vazão do fluido refrigerante e do efeito de refrigeração. É importante ressaltar que cada tipo de sistema opera em diferentes níveis de pressão: o sistema de simples efeito trabalha com dois níveis de pressão, o de duplo efeito com três níveis e o de triplo efeito com quatro níveis de pressão distintos.

Outra classificação importante dos sistemas de absorção está relacionada ao bombeamento da solução líquida que vem do absorvedor. Em sistemas com mais de um efeito, essa solução pode ser bombeada diretamente para o primeiro gerador de vapor, aquele com a maior pressão. Nesse caso, o sistema é denominado em série. No entanto, há outra abordagem para a distribuição da solução após o bombeamento, na qual a solução é direcionada simultaneamente para todos os geradores de vapor do sistema. Esse método é conhecido como sistemas de absorção em paralelo.

2.3 Fluidos de trabalho utilizados nos sistemas de refrigeração por absorção de vapor

Para o funcionamento dos sistemas de refrigeração por absorção, é necessário um par de fluidos: o refrigerante, responsável pelo arrefecimento; e o absorvente, que tem a função de absorver o refrigerante.

Conforme Herold, Radermacher e Klein (2016) mencionam o rendimento e a eficiência dos ciclos de refrigeração reversíveis (ideais) não são afetados pelas propriedades dos fluidos de trabalho em uso, mas em máquinas reais, onde são amplamente determinados pelas características desses fluidos. Além disso, o custo inicial e o custo operacional de uma máquina de refrigeração estão altamente ligados às propriedades do fluido.

Para serem utilizados em sistemas de absorção, os fluidos devem possuir propriedades adequadas, como a necessidade de afinidade entre o fluido absorvente e o fluido refrigerante. O Quadro 1 apresenta uma comparação entre os dois principais pares de fluidos de trabalho utilizados em sistemas de absorção: água-brometo de lítio e amônia-água.

Quadro 1 – Comparativo entre os dois pares de fluidos de trabalho mais utilizados em aplicações de sistemas de absorção

Propriedades	Água – amônia	Água – brometo de lítio
	Refrigerantes	
Calor latente de vaporização	Bom	Excelente
Pressão de vapor	Muito alta	Muito baixo
Temperatura de resfriamento	Excelente	Aplicações limitadas
Viscosidade	Boa	Boa
	Absorvente	
Pressão de vapor	Ruim	Excelente
Viscosidade	Boa	Boa
	Mistura da solução	
Inexistência de fase sólida	Excelente	Aplicações limitadas
Toxicidade	Ruim	Bom
Afinidade entre os fluidos de trabalho	Boa	Boa

Fonte: adaptado de Herold, Radermacher e Klein (2016)

De acordo com as informações apresentadas no Quadro 1, pode ser observado que os fluidos refrigerantes têm um calor latente de vaporização significativo, resultando na redução da vazão necessária para a obtenção do efeito de resfriamento desejado. Entretanto, em relação à pressão de vaporização, os fluidos refrigerantes listados no Quadro 1 não possuem características ideais. A amônia apresenta uma pressão de vaporização muito alta, enquanto a água possui uma pressão de vaporização muito baixa, o que significa que é necessário criar um vácuo no sistema (com base na pressão atmosférica como referência) para permitir a evaporação em temperaturas mais baixas.

3 Metodologia

Os sistemas de refrigeração por absorção de duplo efeito em série apresentam um COP superior aos sistemas de absorção de efeito simples, pois reaproveitam o calor de entrada proveniente do gerador de vapor 1 no gerador de vapor 2. Esse sistema de duplo efeito inclui dois geradores de vapor, um sistema de condensação, evaporador, absorvedor, válvulas de expansão e uma bomba responsável

por bombear a solução de água e brometo de lítio e um trocador de calor intermediário. Ele opera em três níveis de pressão (dois abaixo da pressão atmosférica e um acima).

O protótipo em estudo foi construído na configuração em forma de torre, composta por três vasos de pressão cilíndricos separados por flanges. O vaso superior abriga o gerador de vapor I; o vaso central inclui o gerador de vapor II e o condensador; enquanto o vaso inferior é destinado ao absorvedor e ao evaporador. Além desses componentes principais, estão anexadas válvulas de expansão, um trocador de calor de solução do tipo casco e tubo, bem como dutos para interligação dos componentes, o sistema de controle e a bomba de solução. A Figura 1 ilustra o protótipo em desenvolvimento no Instituto de Energia Sustentável.

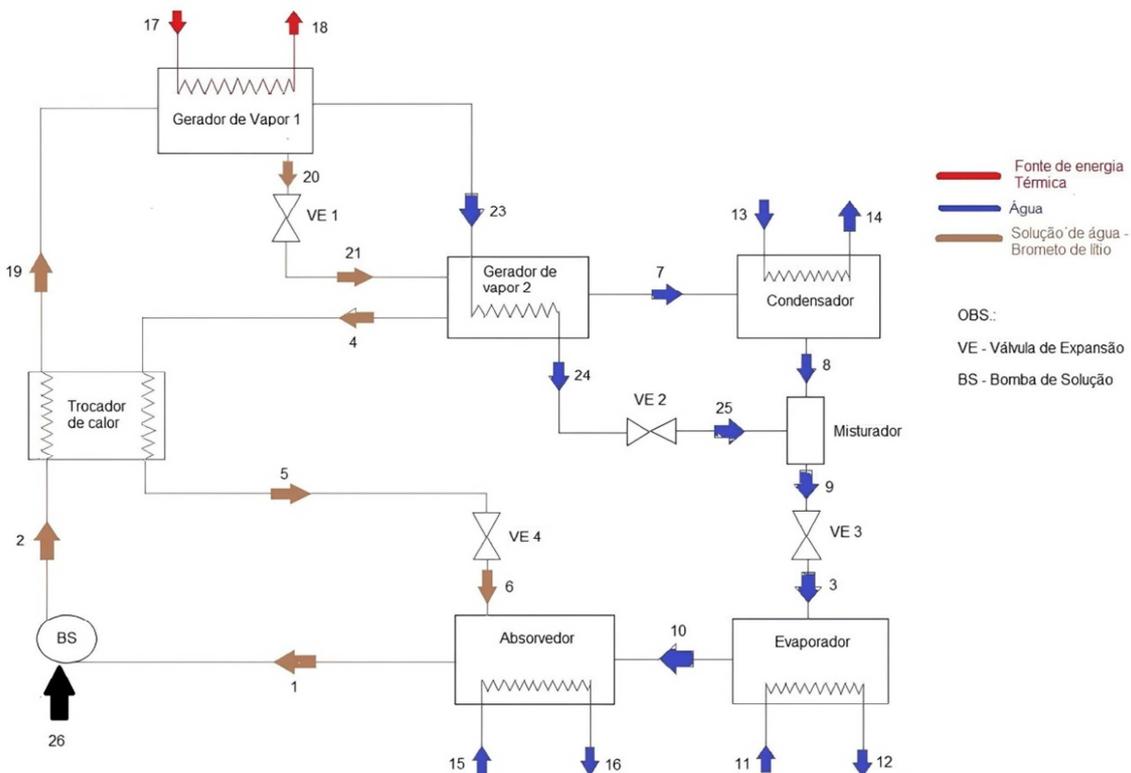
Figura 1 – Protótipo do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo em série com disposição em torre



Fonte: arquivo dos autores

O sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em série da Figura 1, conforme o esquema da Figura 2, 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.

Figura 2 – Esquema do sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo em série com disposição em torre



Fonte: elaborado pelos autores

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.

O Quadro 2 discrimina cada um dos pontos do ciclo e as características do fluido de trabalho inerentes aos mesmos. Quando o ponto for discriminado como uma mistura da solução, o nível de concentração será informado ao lado, entre parênteses). As informações de concentração são baseadas em Herold, Radermacher e Klein (2016, p. 168), onde: I – Nível de concentração I, onde há 52,90% de brometo de lítio na mistura; II – nível de concentração II, onde há 57,33% de brometo de lítio na mistura; III – Nível de concentração III, onde há 62,66% de brometo de lítio na mistura.

Quadro 2 – Descrição dos pontos do sistema

Ponto	Descrição
1	Solução vinda do absorvedor para entrar na bomba de solução (I)

2	Solução sai da bomba e entra no trocador de calor (I)
3	Mistura de líquido – vapor de água da VE 3 para o evaporador
4	Solução do Gerador de Vapor 2 para o trocador de calor (III)
5	Solução vinda do trocador de calor para a VE 4 (III)
6	Solução sai da VE 4 e vai para o absorvedor (III)
7	Vapor de água saindo do Gerador de Vapor 2 para o condensador
8	Água líquida proveniente do condensador para o misturador
9	Água líquida saindo do misturador para VE 3
10	Vapor de água gelada saindo do evaporador com destino ao absorvedor
11	Entrada de água gelada no evaporador
12	Saída de água gelada no evaporador
13	Entrada de água de arrefecimento no condensador
14	Saída de água de arrefecimento no condensador
15	Entrada de água de arrefecimento no absorvedor
16	Saída de água de arrefecimento no absorvedor
17	Entrada dos produtos da combustão
18	Saída dos produtos da combustão
19	Solução pré-aquecida do trocador de calor para o Gerador de Vapor 1 (I)
20	Solução de água -brometo de lítio saindo do Gerador de Vapor 1 para VE 1 (II)
21	Solução de água -brometo de lítio saindo da VE 1 para o Gerador de Vapor 2 (II)
23	Vapor de água a alta temperatura saindo do Gerador de Vapor 1 e indo para o Gerador de Vapor 2
24	Água líquida a alta temperatura saindo do Gerador de Vapor 2 e indo para VE 2
25	Água líquida saindo da VE 2 e indo para o misturador
26	Entrada de potência elétrica para acionar a bomba de solução

Fonte: dados da pesquisa

3.1 Modelagem termodinâmica do SRAV

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.

A análise energética e exergetica desse sistema foi realizada por meio da ferramenta computacional EES utilizando as equações da primeira lei e da segunda lei da Termodinâmica, aplicando o balanço de energia (Equação 1), balanço de massa (Equação 2), conservação das espécies (Equação 3), balanço de segunda lei (equação 4), exergia física (Equação 5), exergia química (Equação 6), irreversibilidade pelo teorema de Guy-Stodola (Equação 7), eficiência exergetica (Equação 8) e o Coeficiente de performance COP (Equação 9)

A equação 1, referente ao balanço de energia no volume de controle, utiliza os índices "e" e "s" nas somatórias para representar as entradas e saídas no volume de controle de cada componente do sistema SRAV, respectivamente. Os índices "n" e "m" indicam o número total de entradas e saídas no volume de controle, respectivamente.

$$\dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum_{e=1}^n \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + g \times z_e \right) - \sum_{s=1}^m \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + g \times z_s \right) = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{e=1}^n \dot{m}_e - \sum_{s=1}^m \dot{m}_s = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{e=1}^n \dot{m}_e \times x_e - \sum_{s=1}^m \dot{m}_s \times x_s = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{e=1}^n \dot{m}_e (s_e) - \sum_{s=1}^m \dot{m}_s (s_s) + S_{ger} + \sum_{v.c.=1}^n \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} = 0 \quad (4)$$

A exergia física (Equação 5) para volumes de controle é determinada pela expressão (Bejan, Tsatsaronis e Moran, 1996, p. 126), dada por:

$$ex_{física} = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (5)$$

De acordo com Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996, p. 134), a parcela de exergia química é determinada pela equação 6. 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.

$$ex_{química} = \sum_{i=1}^n x_i \times e_i^{química} + R \times T_0 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \times (\ln x_i) \times y_i \quad (6)$$

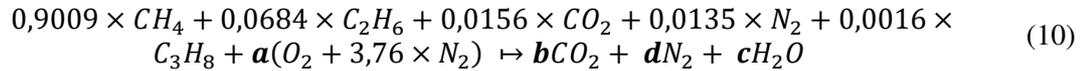
$$I = T_0 \cdot S_{ger} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\text{Exergia útil produzida}}{\text{Exergia de entrada total}} \quad (8)$$

O coeficiente de performance (COP) é a relação entre energia útil pela energia requerida do sistema (Marques, 2018) e é determinada, para os sistemas de refrigeração por absorção de vapor, pela Equação 9.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{ger} + \dot{W}_{bomba}} \quad (9)$$

De acordo com Alcântara *et al.* (2024), a energia térmica dos gases de combustão é obtida usando a lei da conservação das espécies, tendo como referência a quantidade de cada hidrocarboneto observado no gás. A Equação 10 representa a reação de combustão do gás natural. As etapas seguintes consistem no balanceamento estequiométrico da reação e na determinação dos coeficientes da equação de combustão.



Os coeficientes *a*, *b*, *c* e *d* pertencentes à equação da combustão que foram determinados no balanceamento estequiométrico com o auxílio do software EES.

A primeira lei da termodinâmica para sistemas reagentes afirma que a interação de transferência de calor e trabalho resulta da variação da propriedade de entalpia em base molar. No princípio clássico da conservação de energia sem reação química, as propriedades são dadas em relação a um estado arbitrário de referência, onde a entalpia é definida como zero. Essa abordagem é satisfatória quando há apenas o mesmo fluido de trabalho. Devido aos diferentes componentes químicos, como produtos e reagentes, a propriedade de entalpia deve ser dada no mesmo estado de referência. Portanto, a entalpia de formação foi desenvolvida para todos os elementos com o mesmo estado de referência padrão definido por 25 °C e 1 atm (Borgnakke; Sonntag, 2009).

A avaliação da combustão dos produtos do gás natural envolveu o cálculo da entalpia de formação. Esse valor é determinado considerando a composição dos diferentes componentes presentes no gás natural e é obtido através de uma média ponderada pela fração molar de cada componente. Na combustão do gás natural, os principais produtos resultantes são dióxido de carbono (CO₂), vapor d'água (H₂O) e calor liberado. A entalpia de formação leva em conta as contribuições individuais de cada componente para a energia liberada durante a combustão.

A Tabela 1 apresenta a composição média do gás natural comercializado pela Companhia Paraibana de Gás (PBGAS) usada neste trabalho, considerando que a combustão é completa e sem excesso de ar.

Tabela 1 – Composição molar do gás natural comercializado pela PBGás

Substância	Fórmula química	Porcentagem (%)
Metano	CH ₄	90,09
Etano	C ₂ H ₆	6,84
Propano	C ₃ H ₈	0,16
Dióxido de carbono	CO ₂	1,56
Nitrogênio	N ₂	1,35

Fonte: PBGAS, 2024

A energia contida no combustível que vai acionar termicamente o gerador de vapor 1, do *chiller* de absorção, através da queima direta, é determinada pela Equação 11.

$$Q_g = \frac{\dot{m}_{gn} \times PCI}{\eta_{comb}} \quad (11)$$

sendo o Q_g a energia térmica fornecida ao Gerador de Vapor 1, o \dot{m}_{gn} a vazão mássica do gás natural, o PCI (poder calorífico inferior) do gás natural e o η_{comb} é a eficiência de combustão que no presente estudo foi considerado 90%.

O PCI do gás natural foi obtido (Equação 12) a partir da fração mássica e o poder calorífico de cada hidrocarboneto, designado por y_i e PCI_i , respectivamente.

$$PCI = \sum_i y_i \times PCI_i \quad (12)$$

Os dados de entrada para a análise do sistema foram obtidos do catálogo da empresa Trane Company (1992) e dos estudos realizados por Moreira (2004) e Santos (2005), enquanto os valores de concentração da solução foram extraídos de Herold, Radermacher e Klein (2016). A Tabela 2 apresenta os valores de entrada para a análise energética e exergetica do *chiller*.

Tabela 2 – Dados de entrada da análise energética e exergetica do SRAV

Parâmetros	Valores
Pressão no Gerador de Vapor 1	77,520 kPa
Temperatura de entrada dos produtos da combustão do GN	300 °C
Temperatura de saída dos produtos da combustão do GN	200 °C
Temperatura no condensador	30 °C
Temperatura no evaporador	5 °C
Temperatura de entrada da água de arrefecimento do absorvedor	25 °C
Temperatura de saída da água de arrefecimento do absorvedor	23 °C
Temperatura de entrada da água de arrefecimento do condensador	25 °C
Temperatura de saída da água de arrefecimento do condensador	28,16 °C
Temperatura de entrada da água gelada no evaporador	12 °C
Temperatura de saída da água gelada no evaporador	7 °C

Fonte: dados da pesquisa

4 Resultados e discussões

Após a aplicação das equações pertinentes e a utilização dos dados de entrada auxiliada pela simulação computacional realizada é apresentado na Tabela 3, os valores dos seguintes parâmetros: temperatura (T), pressão (P), título da mistura (xsol), vazão mássica (\dot{m}), entalpia (h), entropia (s) e exergia específica (ex) (soma da exergia física com a exergia química) e a taxa de exergia (Ex).

Tabela 3 – Parâmetros termodinâmicos de cada ponto do sistema do SRAV

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: dados da pesquisa

Os valores obtidos em cada ponto do sistema SRAV estão em conformidade com as informações disponíveis na literatura. Estudos conduzidos por Herold, Radermacher e Klein (2016), Misra, Sahoo e Gupta (2005), Moreira (2004) e Santos (2005), investigaram ciclos de refrigeração por absorção de vapor que utilizam dois trocadores de calor de solução. Os resultados desses estudos anteriores orientaram a concepção deste trabalho e a validação da simulação será realizada com base nos dados experimentais da unidade em estudo quando estiver em operação.

Os valores negativos de exergia nos pontos 10 e 3 são resultados da comparação com o estado padrão, que é definido pela temperatura ambiente de 25 °C e pressão atmosférica de 101,325 kPa. Nos pontos mencionados, tanto a pressão quanto a temperatura estão abaixo desses valores de referência, o que faz com que a exergia seja negativa.

A ausência de um segundo trocador de calor de solução neste trabalho implica que o fluxo da mistura que entra no gerador de vapor I não recebe calor adicional de um segundo trocador de calor de solução, e o fluxo que sai do gerador de vapor I não perde energia que poderia ser usada para pré-aquecer a mistura que entra nele. Como resultado, é necessário empregar uma válvula de expansão para garantir que a mistura alcance o gerador de vapor II (ponto 21) com a temperatura e a pressão adequadas.

O estudo de Misra, Sahoo e Gupta (2005) exibe temperaturas mais elevadas devido à temperatura de entrada no gerador de vapor I ser aproximadamente de 500 °C. Por outro lado, o Herold, Radermacher e Klein (2016, p. 168) possui uma temperatura de entrada de 150 °C. Finalmente, os estudos de Moreira (2004) e Santos (2005) apresentam temperaturas de entrada iguais ao presente estudo.

Outro parâmetro importante para comparar são os valores de exergia. Os valores obtidos por Santos (2005) são semelhantes aos obtidos no presente estudo. Herold, Radermacher e Klein (2016) não apresentam uma análise exergética, assim como Moreira (2004). Já Misra, Sahoo e Gupta (2005), por ter valores maiores de entrada de energia, apresenta valores bem superiores.

A Tabela 4 exibe os valores de eficiência exergética (β), as taxas de transferência de calor de cada componente do sistema (\dot{Q}) e o COP (Coeficiente de Performance) do sistema.

Tabela 4 – Resultados da eficiência exergética, taxas de transferência de calor de cada componente e o COP do sistema

Componentes	β (%)	\dot{Q} (kW)
Gerador de Vapor 1	53,31	21,10
Gerador de Vapor 2	43,65	10,07
Sistemas de condensação	28,59	16,70
Evaporador	76,14	24,96
Absorvedor	44,42	29,36
Trocador de calor solução	51,96	2,31
Desempenho		
COP	1,183	

Fonte: dados da pesquisa

A eficiência segundo a segunda lei da termodinâmica será maior quanto maior for o "efeito térmico desejado". Um aumento na eficiência racional indica que o sistema está melhor aproveitando a exergia, com perdas mínimas. Nesse sentido, o evaporador é o equipamento mais eficiente, seguido pelo Gerador de Vapor 1 e pelo trocador de calor de solução. O COP encontrado é consistente com a literatura, sendo maior do que os sistemas de refrigeração por absorção de simples efeito e menor do que os sistemas de refrigeração por compressão de vapor.

De acordo com Marques (2018), o valor das irreversibilidades aponta os equipamentos que necessitam de uma atenção especial sob a ótica da otimização energética, pois representam fonte de perdas e consequentemente redução de eficiência Termodinâmica. A Tabela 5 apresenta os valores de irreversibilidade dos componentes do SRAV e mostra que os Geradores de Vapor 1 e 2, como também o absorvedor necessitam de otimização no projeto para reduzir as perdas de calor e aumentar o aproveitamento energético.

Tabela 5 – Resultados da irreversibilidade dos componentes do sistema SRAV

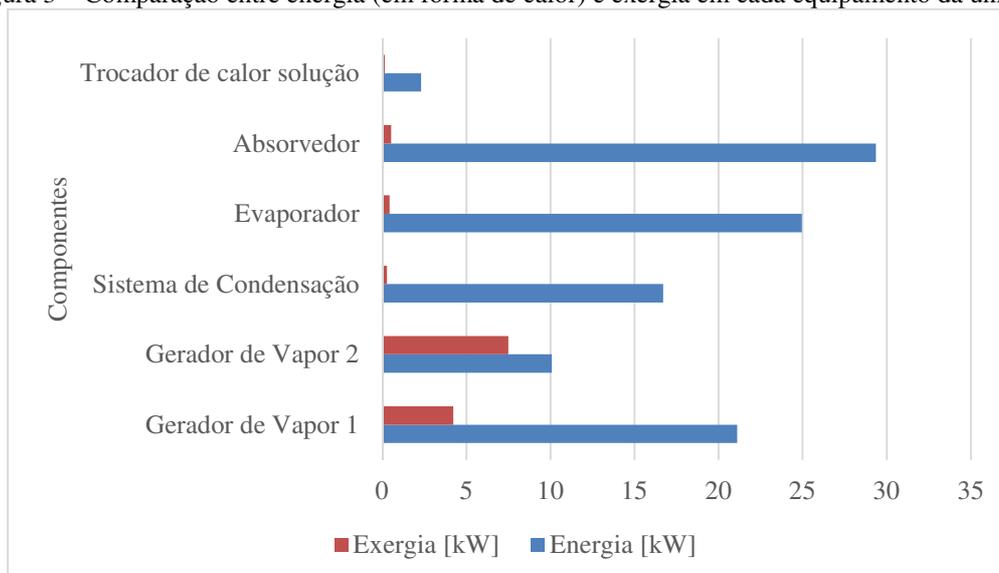
Componentes	I (kW)	(%)
Gerador de Vapor 1	4,228	58,93
Gerador de Vapor 2	1,621	22,59
Sistema de condensação	0,386	5,38
Evaporador	0,320	4,46
Absorvedor	0,479	6,68
Trocador de calor solução	0,141	1,96

Fonte: dados da pesquisa

Os dados referentes ao desempenho da bomba de solução do Sistema de Refrigeração por Absorção de Vapor (SRAV) foram deliberadamente excluídos do conjunto de informações analisadas. Essa decisão foi motivada pela constatação de que tais dados exibiam valores que, por sua vez, se mostraram de pouca relevância em termos da influência sobre a análise do desempenho operacional do sistema como um todo.

A Figura 3 indica uma comparação de forma gráfica dos valores de energia, na forma de calor, e exergia das entradas e saídas de cada equipamento da unidade de refrigeração por absorção em desenvolvimento.

Figura 3 – Comparação entre energia (em forma de calor) e exergia em cada equipamento da unidade



Fonte: dados da pesquisa

4 Conclusão/Considerações finais

O objetivo do presente estudo foi conduzir uma análise energética e exergética em um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito em série, com disposição em torre, utilizando o

par H₂O-LiBr como fluidos de trabalho. O sistema em questão está em fase de desenvolvimento no Instituto de Energia Sustentável da UFPB, e os resultados desta pesquisa serão aplicados para otimizar o protótipo.

Este estudo resultou na criação de um código computacional na plataforma EES (Engineering Equation Solver) para a avaliação termodinâmica de uma unidade de refrigeração por absorção de vapor, destinada a atender às demandas de água gelada para climatização.

A análise conforme a primeira lei da termodinâmica revelou os fluxos de calor em cada equipamento da unidade de refrigeração por absorção de vapor. Esses resultados oferecem informações sobre a quantidade de energia contida nos produtos de combustão, a demanda energética do ambiente a ser resfriado e o calor introduzido no sistema pela ação do combustível.

Além disso, a análise energética proporcionou outros resultados significativos, como as quantidades de energia dissipadas pelo condensador e pelo absorvedor. Nota-se que o absorvedor dissipa uma quantidade de energia maior que o condensador, devido ao caráter exotérmico presente na reação de absorção.

O COP do sistema de refrigeração por absorção de vapor foi determinado como 1,183, valor este consistente com a literatura. Este valor, dentro dos padrões esperados, confirma a viabilidade e eficácia do sistema de refrigeração por absorção de vapor em desenvolvimento.

Para complementar a análise quantitativa em cada volume de controle, foi realizada uma avaliação exérgica com base na segunda lei da termodinâmica. Com esta análise, determinou-se a exérgia do gás natural. Além disso, foram calculadas as exérgias de entrada e saída em cada componente do sistema de refrigeração.

A partir da avaliação exérgica, foi possível identificar as irreversibilidades termodinâmicas de cada equipamento. A maior irreversibilidade encontrada no sistema de refrigeração foi no gerador de vapor, representando mais de 58% do total. No gerador de vapor, ocorre o processo de dessorção, que é a separação do vapor do refrigerante da solução.

Para os próximos passos desta pesquisa, é crucial direcionar esforços para a realização dos testes experimentais no *chiller* em estudo. Até o momento, a execução desses testes tem sido impossibilitada devido à limitação de recursos financeiros para a aquisição da instrumentação necessária. Assim que os equipamentos adequados forem obtidos, será possível validar e aprimorar os modelos e simulações em desenvolvimento.

Ademais, após a validação dos resultados, será realizado o estudo exergoeconômico do sistema de refrigeração, visando compreender a relação entre os custos operacionais e a eficiência exérgica do *chiller*. Tal análise permitirá identificar oportunidades de otimização e redução de custos no processo.

Outro aspecto relevante que será abordado é a análise exergoambiental do sistema, que vai avaliar os impactos ambientais associados ao funcionamento do *chiller*. Essa abordagem inclui a análise das emissões de poluentes e do uso de recursos naturais, contribuindo para uma visão geral da sustentabilidade do sistema.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece ao Instituto de Energia Sustentável da UFPB pelo apoio técnico na elaboração deste trabalho.

Financiamento

Os autores agradecem a Fundação de apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba – FAPESQ pelo apoio financeiro (através da bolsa de doutorado) para o desenvolvimento deste trabalho (Processo 88887.616915/2021-00).

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

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

ALCÂNTARA, S. C. S.; VILLA, A. A. O.; COSTA, J. A. P.; CÉZAR, K. L. Análise energética de um chiller de absorção integrado a uma unidade de cogeração a gás natural. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, Early View, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/2447-9187a2024id8129>.

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

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

ALHAMID, M. I.; CORONAS, A.; LUBIS, A.; AYOU, D. S.; NASRUDDIN; SAITO, K.; YABASE, H. Operation strategy of a solar-gas fired single/double effect absorption chiller for space cooling in Indonesia. **Applied Thermal Engineering**, v. 178, p. 115524, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115524>.

ARSHAD, M. U.; GHANI, M. U.; ULLAH, A.; GÜNGÖR, A.; ZAMAN, M. Thermodynamic analysis and optimization of double effect absorption refrigeration system using genetic algorithm, **Energy Conversion and Management**, v. 192, p. 292-307, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.083>.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN M. **Thermal design and optimization**. John Wiley & Sons Inc., 1996.

BELLOS, E.; CHATZOVOULOS, I.; TZIVANIDIS, C. Yearly investigation of a solar-driven absorption refrigeration system with ammonia-water absorption pair, **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 23, p.100885, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100885>.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: Blücher, 2009.

CAVALCANTI, E. J. C. Energy, exergy and exergoenvironmental analyses on gas-diesel fuel marine engine used for trigeneration system. **Applied Thermal Engineering**, v. 184, p. 116211, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116211>.

CASTAÑO-ROSA R.; BARRELLA R.; SANCHEZ-GUEVARA, C.; BARBOSA, R.; KYPRIANOU, I.; PASCHALIDOU, E.; THOMAIDIS, N. S.; DOKUPILOVA, D.; GOUVEIA, J. P.; KÁDÁR, J.; HAMED, T. A.; PALMA, P. Cooling degree models and future energy demand in the residential sector. a seven-country case study. **Sustainability**, v. 13, n. 5, p. 2987, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13052987>.

HEROLD, K. E.; RADERMARCHER, R.; KLEIN, S. A. **Absorption chillers and heat pumps**. CRC Press, 2016.

LEITE, C. A. A. F.; ALCÂNTARA, S. C. S.; OCHOA, A. A. V.; SANTOS, C. A. C.; DUTRA, J. C. C.; COSTA, J. A. P.; MICHIMA, P. S. A.; SILVA, H. C. N. Natural gas based cogeneration system proposal to a textile industry: a financial assessment. **Energy Efficiency**. v.14, p. 20, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09927-2>.

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

MARQUES, A. S. **Avaliação exergoeconômica e exergoambiental de uma unidade de micro-trigeração**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

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.

MISRA, R. D.; SAHOO, P. K.; GUPTA, A. Thermoeconomic evaluation and optimization of a double-effect H₂O/LiBr vapour-absorption refrigeration system. **International Journal of Refrigeration**, v. 28, n. 3, p. 331-343, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.09.006>.

MOREIRA, H. L. **Análise termoeconômica de sistemas de refrigeração por absorção com o par água-brometo de lítio**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa PB, 2004.

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

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>.

PANAHAZADEH, F.; HAMZEHEI, M.; FARZANEH-GORD, M.; VILLA, A. A. O. Evaluation of machine learning-based applications in forecasting the performance of single effect absorption chiller network. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 26, p. 101087, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101087>.

PBGAS – Companhia Paraibana de Gás. João Pessoa PB. Disponível em: <https://pbgas.com.br/o-que-e-gas-natural>. Acesso em: 20 fev. 2024.

SAOUD, A.; BRUNO, J. C.; BOUKHCHANAA, Y.; FELLAH, A. Performance investigation and numerical evaluation of a single-effect double-lift absorption chiller. **Applied Thermal Engineering**, v. 227, p. 120369, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120369>.

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>.

SANTOS, D. H. P. **Análise exergética de sistemas de refrigeração por absorção de múltiplos efeitos com o par brometo de lítio-água**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

TRANE COMPANY, **catálogo**, 1992. Thermachill direct-fired absorption chillers.

XU, M.; LI, S.; JIN, Z.; JIANG, W.; DU, K. Experimental investigation of the effect of LiBr on the high-pressure part of a ternary working fluid ammonia absorption refrigeration system. **Applied Thermal Engineering**, v.186, p.116521, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116521>.

YU, M.; LIU, X.; CHEN, Y.; ZHANG, Z.; WANG, Y.; ZHANG, J.; HAN, Y. A 4E analysis of a novel coupling process of syngas purification and CO₂ capture, transcritical CO₂ power and absorption refrigeration. **Chemical Engineering Journal**, v. 445, p.136757, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136757>.

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>.