

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

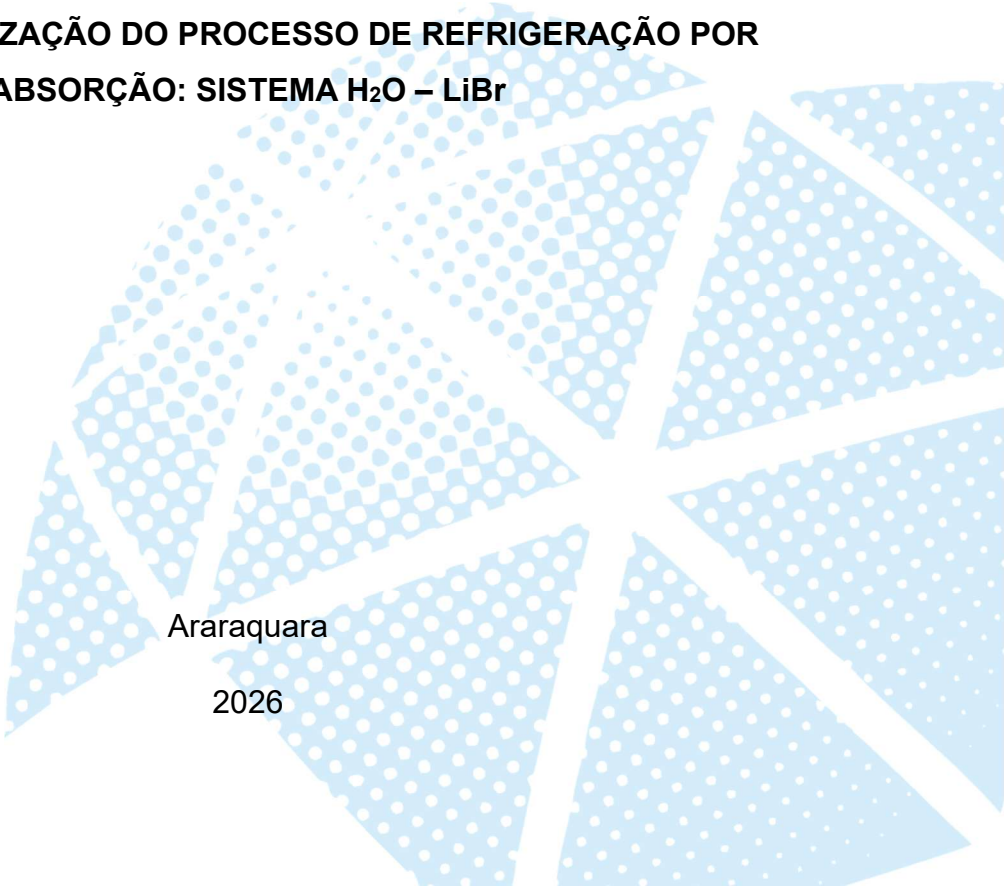
Instituto de Química - Câmpus de Araraquara

MARIA LUISA CARMELITO SANTOS

**ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE REFRIGERAÇÃO POR
ABSORÇÃO: SISTEMA H₂O – LiBr**

Araraquara

2026



MARIA LUISA CARMELITO SANTOS

**ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE REFRIGERAÇÃO POR
ABSORÇÃO: SISTEMA H₂O-LiBr**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Química,
Araraquara, para obtenção do título de
Bacharela em Engenharia Química.

Orientador(a): Prof. Dr. Elias de Souza
Monteiro Filho

Araraquara

2026

S237e

Santos, Maria Luisa Carmelito

Estudo e otimização do processo de refrigeração por absorção: sistema H_2O - LiBr / Maria Luisa Carmelito Santos. -- Araraquara, 2026

34 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Química) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara

Orientador: Elias de Souza Monteiro Filho

1. Ciclos. 2. Processo de refrigeração. 3. Simulação (Computadores digitais). I. Título.

MARIA LUISA CARMELITO SANTOS

**ESTUDO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE REFRIGERAÇÃO POR
ABSORÇÃO:**

Sistema H₂O – LiBr

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Instituto de Química, Araraquara, para obtenção
do título de Bacharela em Engenharia Química.

Data da defesa: 29/06/2026

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
ELIAS DE SOUZA MONTEIRO FILHO
Data: 03/07/2026 15:13:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Elias de Souza Monteiro Filho



Documento assinado digitalmente
GEISA ALBINI
Data: 03/07/2026 20:59:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Geisa Albini



Documento assinado digitalmente
LORENA OLIVEIRA PIRES
Data: 06/07/2026 11:30:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lorena Oliveira Pires

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Ivair Santos e Rosenilda Carmelito, pelo suporte e incentivo ao longo da vida, por sempre fazerem dos estudos uma prioridade em nossa família.

Agradeço à minha irmã, Ana Clara Santos, pelo companheirismo de toda a vida e por se manter presente mesmo durante os anos em que estivemos distantes fisicamente.

Agradeço ao meu namorado, Guilherme Vianna, por incentivar a realização dos meus sonhos desde o início e por estar presente apesar da distância.

Agradeço aos meus tios e, em especial, ao Maykon Santos, pelo apoio e por serem meus maiores exemplos. Agradeço também aos meus avós por, mesmo diante de circunstâncias adversas, mostrarem à família que o estudo é o caminho para o crescimento.

Agradeço às minhas primas por todo o suporte ao longo dos cinco anos de graduação e pelo apoio incondicional.

Agradeço aos meus amigos de turma por tornarem a graduação mais leve, mesmo diante dos desafios e da distância de casa.

Agradeço ao meu orientador, Elias Monteiro de Souza Filho, pela oportunidade de iniciação científica que abriu o caminho para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A crescente demanda por eficiência energética e sustentabilidade nos processos industriais tem impulsionado a busca por alternativas para o aproveitamento de fontes térmicas residuais. Nesse contexto, os sistemas de refrigeração por absorção destacam-se por utilizarem energia térmica como principal fonte de acionamento, reduzindo o consumo de energia elétrica em comparação aos sistemas convencionais de compressão de vapor. O presente trabalho teve como objetivo estudar e otimizar um sistema de refrigeração por absorção utilizando o par água–brometo de lítio (H_2O – LiBr), empregando como fonte energética o calor residual proveniente das caldeiras de uma indústria sucroalcooleira. A simulação foi realizada no software DWSIM, utilizando um modelo previamente validado na literatura. A otimização das condições operacionais foi conduzida por meio da ferramenta *Experiment Designer*, avaliando-se a influência da vazão mássica da solução, da fração molar de água e da pressão da bomba sobre o coeficiente de performance (COP) do ciclo. Foram realizados 2.000 experimentos, dos quais 1.964 apresentaram convergência e atenderam às restrições energéticas estabelecidas. Os resultados indicaram que a condição inicial do sistema apresentava COP igual a 0,29, enquanto a condição otimizada alcançou COP de 0,68, representando um aumento de 134%. O melhor ponto foi obtido com fração molar de água igual a 0,90, vazão mássica de 26,78 kg/s e pressão da bomba de 1.197 mbar. A análise de correlação demonstrou que a fração molar de água foi a variável com maior influência sobre o desempenho do ciclo. Além disso, a comparação com os resultados obtidos por Santos, 2024 utilizando o par NH_3 – H_2O revelou desempenho superior do sistema H_2O – LiBr , que apresentou COP aproximadamente 113% maior. Os resultados demonstram o potencial da integração entre sistemas de refrigeração por absorção e fontes de calor residual para aumentar a eficiência energética em aplicações industriais.

Palavras-chave: ciclos; refrigeração; absorção; água; simulação; otimização.

ABSTRACT

The growing demand for energy efficiency and sustainability in industrial processes has encouraged the development of alternatives to recover waste thermal energy. In this context, absorption refrigeration systems stand out for using thermal energy as their primary driving source, thereby reducing electricity consumption compared to conventional vapor-compression systems. This study analyzed and optimized an absorption refrigeration system employing the water–lithium bromide (H_2O –LiBr) working pair, using waste heat from the boilers of a sugarcane processing plant as the energy source. Process simulation was carried out in the DWSIM software, based on a model previously validated in the literature. Operational conditions were optimized through the Experiment Designer tool by evaluating the influence of solution mass flow rate, water mole fraction, and pump pressure on the cycle's coefficient of performance (COP). A total of 2,000 simulations were performed, of which 1,964 successfully converged and satisfied the established energy constraints. Results showed that the initial system configuration presented a COP of 0.29, while the optimized condition achieved a COP of 0.68, corresponding to a 134% increase. The optimum operating point was obtained with a water mole fraction of 0.90, a solution mass flow rate of 26.78 kg/s, and a pump pressure of 1,197 mbar. Correlation analysis indicated that the water mole fraction was the variable with the greatest influence on system performance. Furthermore, comparison with a previous study employing the NH_3 – H_2O pair demonstrated the superior performance of the H_2O –LiBr system, which achieved a COP approximately 113% higher. These findings highlight the potential of integrating absorption refrigeration systems with waste heat sources to enhance energy efficiency in industrial applications.

Keywords: cycles; refrigeration; absorption; water; simulation; optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de refrigeração por absorção a energia solar	15
Figura 2 - Ciclo de refrigeração por absorção no DWSim	23
Figura 3 - Gráfico de dispersão COP vs fração molar	28
Figura 4 - Gráfico de dispersão COP vs vazão mássica	28
Figura 5 - Gráfico de dispersão COP vs pressão da bomba	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos gases descartados pela caldeira da indústria sucroalcooleira	21
Tabela 2 - Condições de processo	24
Tabela 3 - Variáveis dependentes e independentes	25
Tabela 4 - Intervalo das variáveis independentes.....	25
Tabela 5 - Ponto com maior COP.....	26
Tabela 6 - Comparação entre a condição original e condição otimizada.....	27
Tabela 7 - Coeficiente de correlação R^2 das variáveis independentes em relação ao COP	30
Tabela 8 - Comparação entre os sistemas H_2O - LiBr e NH_3 - H_2O	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASPEN	Advanced System for Process Engineering
COP	Coeficiente de Performance (Coefficient of Performance)
DWSIM	Dynamic Waste Simulator (simulador de processos químicos de código aberto)
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NRTL	Non-Random Two-Liquid (modelo de coeficiente de atividade)
UNIFAC	Universal Quasi-Chemical Functional-group Activity Coefficients
UNIQUAC	Universal Quasi-Chemical Activity Coefficients

LISTA DE SÍMBOLOS

CO₂	Dióxido de carbono
H₂O	Água
LiBr	Brometo de lítio
N₂	Nitrogênio
NH₃	Amônia
O₂	Oxigênio
Q_{ev}	Calor absorvido no evaporador [kW]
Q_{ger}	Calor fornecido ao gerador [kW]
R²	Coeficiente de correlação (adimensional)
W_b	Trabalho da bomba [kW]
W_{ciclo}	Energia total fornecida ao ciclo [kW]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Refrigeração	13
2.2	Refrigeração por absorção.....	14
2.3	Simulação de processos	17
2.3.1	Escolha do pacote termodinâmico	18
2.4	DWSIM.....	19
2.4.1	Estudos realizados com auxílio do DWSIM	20
3.	OBJETIVOS	21
4.	MATERIAL E MÉTODOS	21
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1	Influência das variáveis independentes	27
5.2	Comparação com sistema $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$	30
6.	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS	33

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade em processos industriais é um dos principais temas abordados nos últimos anos. O aproveitamento máximo de energia e a minimização da geração de resíduos durante o processo figuram entre os pontos centrais dessa discussão, especialmente em setores de elevado consumo energético. Nesse contexto, a refrigeração industrial representa um dos segmentos de maior demanda elétrica em diversos setores produtivos, sendo a busca por alternativas mais eficientes uma necessidade tanto econômica quanto ambiental (IEA, 2018).

O setor sucroalcooleiro apresenta grande potencial em relação a alternativas energéticas. Nessas indústrias, o bagaço de cana é utilizado como combustível em caldeiras, gerando eletricidade por meio de sistemas de cogeração. Os gases oriundos dessa queima deixam o processo a temperaturas superiores a 100 °C, carregando uma significativa quantidade de energia que, na ausência de aproveitamento, é descartada para o ambiente. O reaproveitamento desse calor residual em processos auxiliares representa, portanto, uma oportunidade concreta de ganho em eficiência energética global da planta (PELLEGRINI; OLIVEIRA JUNIOR, 2011).

Uma das formas de reutilização dessa energia é a aplicação de ciclos de refrigeração por absorção, que utilizam uma fonte de calor como principal insumo energético do processo, em substituição à energia elétrica consumida pelos compressores dos sistemas convencionais. Entre os pares refrigerante-absorvedor disponíveis, o sistema água–brometo de lítio (H_2O –LiBr) se destaca pela elevada eficiência em aplicações de climatização e resfriamento de médio e grande porte, pela ausência de fluidos halogenados nocivos ao meio ambiente e pela compatibilidade com fontes de calor em temperaturas moderadas, entre 80 °C e 200 °C — faixa típica dos gases de escape de caldeiras industriais (HEROLD; RADERMACHER; KLEIN, 2016).

Apesar do potencial identificado, a implantação de sistemas de refrigeração por absorção em plantas industriais reais exige uma etapa prévia de análise e otimização das condições operacionais, de modo a garantir o melhor desempenho possível dentro das restrições impostas pela disponibilidade de calor da fonte e pelas

características do sistema existente. Nesse sentido, a simulação computacional surge como ferramenta indispensável, permitindo avaliar o comportamento do ciclo em diferentes cenários operacionais sem a necessidade de intervenção direta na planta.

Neste trabalho, propõe-se o estudo e a otimização do processo de refrigeração por absorção pelo sistema H_2O –LiBr aplicado a uma planta sucroalcooleira real, utilizando o *software* DWSIM como plataforma de simulação. As condições operacionais investigadas foram definidas com base nas características do sistema pré-existente e na quantidade de calor disponível na caldeira da planta. A análise paramétrica foi conduzida por meio da ferramenta *Experiment Designer*, que permitiu avaliar múltiplas combinações de variáveis operacionais e identificar as condições de máximo desempenho do ciclo, quantificado pelo Coeficiente de Performance (COP).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Refrigeração

A refrigeração é o processo de transferência de calor contra um gradiente térmico (ÇENGEL ET AL., 2013). Dessa forma, configura-se como o ramo da ciência que tem como objetivo manter a temperatura de um espaço ou corpo inferior à temperatura ambiente (DOSSAT; HORAN, 2002).

A refrigeração representa um dos maiores consumos energéticos nos setores industrial, comercial e residencial. Estima-se que sistemas de refrigeração e condicionamento de ar respondam por aproximadamente 20% do consumo elétrico mundial, tendência que cresce com o aumento das temperaturas globais e a expansão do acesso a esses sistemas em países em desenvolvimento (IEA, 2018). Diante desse cenário, o desenvolvimento e a otimização de sistemas de refrigeração mais eficientes e com menor impacto ambiental tornam-se imperativos tanto do ponto de vista energético quanto sustentável.

Para que o processo de refrigeração ocorra, é necessário que o calor do corpo ou espaço a ser refrigerado seja transferido para outro corpo, que consequentemente

será aquecido. Sendo assim, é possível dizer que o processo de refrigeração e de aquecimento são os resultados de um mesmo processo (DOSSAT; HORAN, 2002).

Processos de refrigeração podem ser descritos como sensíveis ou latentes. O processo sensível ocorre quando o fluido refrigerante absorve calor, resultando na variação de temperatura sem a mudança de estado físico. Já no processo latente, a transferência de calor resulta na mudança de estado físico do fluido (DOSSAT; HORAN, 2002).

Os refrigeradores são dispositivos que operam por meio de um ciclo termodinâmico fechado, no qual o calor é removido constantemente do ambiente ou do objeto a ser resfriado. Dentre os ciclos mais utilizados, destacam-se o ciclo de compressão de vapor e o ciclo de refrigeração por absorção. Para quantificar a eficiência de um ciclo de refrigeração é utilizado o COP (Coeficiente de Performance), definido como a razão do efeito do evaporador e a energia fornecida no início do ciclo, como visto na Equação 1 (ÇENGEL ET AL., 2013).

$$COP = \frac{Q_{evaporador}}{W_{ciclo}} \quad (1)$$

2.2 Refrigeração por absorção

Os sistemas de refrigeração por absorção podem ser uma alternativa aos sistemas convencionais de compressão de vapor. Diferentemente dos sistemas de compressão, nos quais a elevação da pressão do fluido refrigerante é realizada mecanicamente por um compressor acionado por energia elétrica, os sistemas de absorção utilizam energia térmica como principal fonte de acionamento, substituindo o compressor por um conjunto formado por absorvedor, bomba, gerador e trocador de calor regenerativo (ÇENGEL ET AL., 2013).

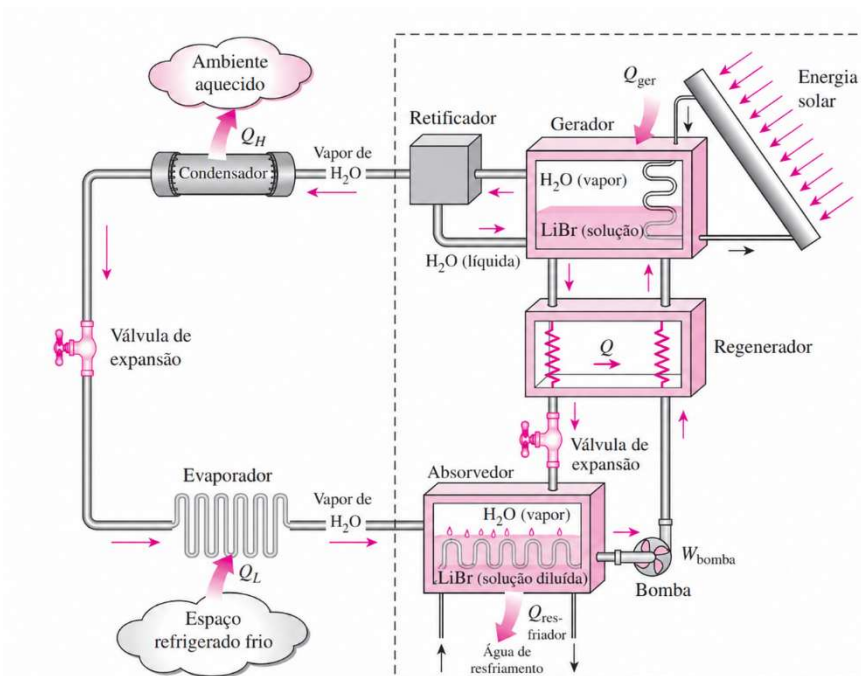
A viabilidade econômica desses sistemas está diretamente relacionada à disponibilidade de fontes térmicas acessíveis, geralmente em temperaturas entre 80 °C e 200 °C. Entre as principais fontes de calor utilizadas destacam-se o calor residual de processos industriais, sistemas de cogeração, energia solar e fontes geotérmicas (HEROLD; RADERMACHER; KLEIN, 2016).

O ciclo de absorção baseia-se na capacidade de um fluido absorvedor absorver o fluido refrigerante em sua estrutura, permitindo que o processo de compressão seja realizado termicamente. Entre os pares refrigerante-absorvedor mais utilizados destacam-se amônia-água ($\text{NH}_3\text{--H}_2\text{O}$) e água-brometo de lítio ($\text{H}_2\text{O--LiBr}$) (ÇENGEL ET AL., 2013).

No sistema $\text{H}_2\text{O--LiBr}$, a água atua como fluido refrigerante, enquanto o brometo de lítio atua como absorvente. Por isso, o ciclo opera sob baixas pressões ou à vácuo e em temperaturas maiores que o ponto de fusão da água, para evitar seu congelamento. Apesar dessa limitação, o ciclo apresenta elevada eficiência em sistemas de climatização de médio e grande porte, sendo amplamente utilizado em edifícios comerciais, hospitais e aplicações industriais (HEROLD; RADERMACHER; KLEIN, 2016).

O ciclo de refrigeração por absorção é observado na Figura 1.

Figura 1 - Ciclo de refrigeração por absorção a energia solar



Fonte: Adaptado de Çengel, 2013

Utilizando $\text{H}_2\text{O--LiBr}$, é composto, basicamente, pelos seguintes equipamentos: gerador, condensador, válvula de expansão, evaporador, absorvedor, bomba e

trocador de calor regenerativo. O ciclo inicia-se com o aquecimento da solução rica em água no gerador, onde a energia térmica fornecida por uma fonte externa promove a separação parcial do refrigerante, gerando vapor de água e uma solução pobre em refrigerante. O vapor segue para o condensador, onde libera calor para o ambiente e se condensa. A água líquida passa então por uma válvula de expansão, sofrendo redução de pressão e temperatura antes de entrar no evaporador, onde evapora absorvendo calor do espaço a ser refrigerado e produzindo o efeito de resfriamento desejado. O vapor gerado no evaporador é direcionado ao absorvedor, onde entra em contato com a solução concentrada de brometo de lítio; devido à elevada afinidade química entre os componentes, o vapor é absorvido, reconstituindo a solução rica em refrigerante e mantendo o funcionamento contínuo do ciclo (DOSSAT; HORAN, 2002).

O trocador de calor regenerativo, também denominado recuperador de solução, desempenha papel relevante na eficiência do ciclo. Posicionado entre o absorvedor e o gerador, promove a troca de calor entre a solução pobre quente que retorna do gerador e a solução rica fria proveniente do absorvedor. Esse pré-aquecimento reduz a carga térmica exigida do gerador e, conseqüentemente, melhora o COP do sistema (HEROLD; RADERMACHER; KLEIN, 2016).

No ciclo de absorção, a energia fornecida corresponde ao calor no gerador (Q_{gerador}) e ao trabalho da bomba de solução (W_{bomba}), sendo este último geralmente desprezível em comparação ao calor do gerador. Assim, o COP do ciclo de absorção é expresso conforme a Equação 2 (HEROLD; RADERMACHER; KLEIN, 2016):

$$COP = \frac{Q_{\text{evaporador}}}{Q_{\text{gerador}} + W_{\text{bomba}}} \quad (2)$$

Embora os sistemas de absorção apresentem valores de COP inferiores aos sistemas de compressão de vapor, sua principal vantagem está na possibilidade de utilização de calor residual ou fontes térmicas renováveis, reduzindo significativamente o consumo de energia elétrica (ÇENGEL ET AL., 2013).

Entretanto, sistemas $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ também apresentam limitações operacionais relevantes. Entre as principais, destacam-se o risco de cristalização do brometo de lítio, a necessidade de operação a baixas pressões e a impossibilidade de aplicação

em temperaturas abaixo do ponto de congelamento da água. Essas características tornam fundamental o controle adequado das condições operacionais do sistema, especialmente temperatura, pressão e concentração da solução absorvente (HEROLD; RADERMACHER; KLEIN, 2016).

A integração de sistemas de absorção com fontes de calor residual e energias renováveis apresenta elevado potencial para aplicações industriais sustentáveis. Além disso, pesquisas indicam que ajustes em variáveis operacionais, como temperatura do gerador, vazão da solução e concentração do absorvente, podem resultar em melhorias significativas no desempenho térmico do sistema. Estudos de simulação também demonstram que o par $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ apresenta desempenho satisfatório em aplicações de alta densidade de calor, como o resfriamento de chips eletrônicos, com valores de COP variando entre 0,71 e 0,84 (MANU; CHANDRASHEKAR, 2016).

2.3 Simulação de processos

A simulação de processos é uma técnica que surgiu para auxiliar a engenharia a partir da década de 1970, quando modelos matemáticos começaram a ser implementados em *softwares* para representar plantas industriais. O projeto ASPEN, desenvolvido no MIT com apoio do Departamento de Energia dos Estados Unidos, foi um marco inicial, dando origem ao *Aspen Technology* em 1981. Desde então, simuladores se consolidaram como ferramentas indispensáveis para prever o comportamento de sistemas complexos, reduzir custos de projeto e otimizar operações industriais (ASPENTECH, 1981).

Esses simuladores funcionam a partir da formulação de balanços de massa e energia, equações de estado termodinâmicas e correlações de transferência de calor e massa. Os modelos são resolvidos numericamente, permitindo analisar diferentes cenários operacionais e identificar variáveis críticas sem a necessidade de procedimentos experimentais (ASPENTECH, 2002).

É possível encontrar também simuladores que funcionam em um ambiente de cálculo numérico e programação científica que permite desenvolver modelos customizados. A flexibilidade desses modelos possibilita resolver sistemas de

equações diferenciais, análises paramétricas e otimizações avançadas (MATHWORKS, 2026). Em aplicações de refrigeração por absorção, esses sistemas têm sido utilizados para simular ciclos LiBr–H₂O e avaliar o desempenho de uma bomba de calor aplicada ao resfriamento de chips eletrônicos, obtendo valores de COP entre 0,71 e 0,84 (MANU; CHANDRASHEKAR, 2016).

As simulações podem ser classificadas em dois regimes principais: estado estacionário e estado dinâmico. No regime de estado estacionário, as variáveis do processo não variam com o tempo, sendo as equações de balanço resolvidas para condições fixas de operação. Esse regime é amplamente utilizado no projeto e otimização de processos industriais, pois permite avaliar o desempenho do sistema em sua condição nominal de operação com menor custo computacional (FELDER; ROUSSEAU, 2005). Para o presente trabalho, adota-se a simulação em estado estacionário, uma vez que o objetivo é avaliar e otimizar o desempenho do ciclo de refrigeração por absorção em condições operacionais definidas.

A simulação de processos tem se mostrado eficaz na análise de sistemas de refrigeração por absorção, permitindo avaliar a influência de variáveis operacionais sobre o desempenho do ciclo. Joudi e Lafta (2001) desenvolveram um modelo em estado estacionário para analisar a influência da temperatura do gerador e da concentração da solução sobre o desempenho do sistema H₂O–LiBr, demonstrando que pequenas variações nessas condições produzem impacto significativo sobre o COP. Atmaca e Yigit (2003) aplicaram a simulação em sistemas acionados por energia solar, destacando o potencial da integração com fontes renováveis. Mais recentemente, Manu e Chandrashekar (2016) avaliaram o par H₂O–LiBr em aplicações de alta densidade de calor, obtendo valores de COP entre 0,71 e 0,84, o que reforça a relevância da simulação como ferramenta de análise e otimização desses sistemas.

2.3.1 Escolha do pacote termodinâmico

A seleção do pacote termodinâmico é uma etapa decisiva em qualquer simulação de processos, pois determina como as propriedades físico-químicas dos fluidos serão calculadas ao longo do ciclo. A escolha deve ser orientada por critérios técnicos

relacionados ao tipo de sistema, às condições operacionais e ao objetivo da análise (ASPENTECH, 2002).

Em sistemas ideais ou próximos da idealidade, modelos simplificados podem ser suficientes. Já em misturas não ideais com forte interação molecular, como soluções eletrolíticas ou aquosas concentradas, é necessário recorrer a modelos que representem adequadamente os desvios de comportamento e as propriedades termodinâmicas reais dos componentes (ASPENTECH, 1981).

Outro fator relevante é a faixa de pressão e temperatura. Equações de estado cúbicas, como Peng-Robinson e Soave-Redlich-Kwong, são amplamente utilizadas em processos de alta pressão, como refino de petróleo e gás natural, por sua capacidade de representar o equilíbrio vapor-líquido em condições extremas. Em contrapartida, sistemas líquidos polares ou aquosos, como os ciclos de absorção H_2O –LiBr, demandam modelos que considerem a forte associação entre moléculas, o que torna essencial a escolha de pacotes que ofereçam correlações específicas ou dados experimentais ajustados (ASPENTECH, 2002).

O sistema H_2O –LiBr apresenta características que tornam a escolha do pacote termodinâmico especialmente relevante: opera em baixas pressões, envolve uma solução salina concentrada com comportamento altamente não ideal e requer o cálculo preciso de propriedades como entalpia, entropia e temperatura de ebulição ao longo de todo o ciclo (HEROLD; RADERMACHER; KLEIN, 2016).

Neste trabalho, utiliza-se a biblioteca CoolProp, uma biblioteca de código aberto que fornece propriedades termodinâmicas e de transporte de fluidos puros e misturas com base em equações de estado de alta precisão e dados experimentais validados (BELL ET AL., 2014). O CoolProp é compatível com diversas plataformas de simulação, incluindo o DWSIM, e oferece suporte ao cálculo de propriedades da água em amplas faixas de temperatura e pressão.

2.4 DWSIM

O DWSIM é um simulador de processos químicos de código aberto criado em 2008 inicialmente como projeto acadêmico voltado a estudantes e engenheiros. Com

o tempo, evoluiu para uma plataforma multissistemas, disponível para Windows, Linux, macOS, Android e iOS. Seu desenvolvimento teve como objetivo democratizar o acesso à simulação de processos, antes restrita a softwares comerciais de alto custo como Aspen Plus e Aspen HYSYS (DWSIM, 2026).

O funcionamento do DWSIM baseia-se na construção de fluxogramas de processos, nos quais o usuário pode inserir operações unitárias como colunas de destilação, trocadores de calor, bombas, compressores e reatores. O simulador suporta tanto simulações em estado estacionário quanto dinâmicas, utilizando integradores numéricos para representar transientes. Para o cálculo de propriedades termodinâmicas, o DWSIM oferece uma ampla gama de modelos, incluindo equações de estado cúbicas e modelos de coeficientes de atividade (NRTL, UNIQUAC, UNIFAC) (DWSIM, 2026).

2.4.1 Estudos realizados com auxílio do DWSIM

O DWSIM tem sido cada vez mais explorado em pesquisas acadêmicas como alternativa *open-source* aos simuladores comerciais. Sreemahadevan, Sivakumar e Palanisamy (2024) avaliaram sua aplicação em bioprocessos, simulando a produção de bioetanol desenvolvida pelo NREL e comparando os resultados com o Aspen Plus. O estudo mostrou boa concordância entre os softwares, indicando que o DWSIM pode ser utilizado com confiabilidade em análises técnico-econômicas de processos biotecnológicos.

Outros trabalhos também destacam sua versatilidade. Ullah, Haq e Arshad (2026) realizaram uma análise comparativa entre o DWSIM e simuladores comerciais como Aspen HYSYS, aplicando-o em processos de produção de biodiesel e em operações unitárias clássicas, como colunas de destilação e trocadores de calor. Os resultados mostraram que o DWSIM é capaz de representar adequadamente os balanços de massa e energia, além de permitir análises de viabilidade econômica, reforçando sua aplicabilidade em contextos acadêmicos e industriais.

3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo estudar e otimizar um sistema de refrigeração por absorção utilizando o par H_2O – LiBr , por meio da simulação de processos, identificando a melhor combinação de vazão da solução, fração molar e pressão da bomba para maximizar o coeficiente de Performance (COP) do ciclo, tendo como fonte energética o calor disponível nas caldeiras de uma indústria sucroalcooleira.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido com base nos dados de gases descartados de uma caldeira de uma indústria sucroalcooleira localizada na região de Araraquara (SP). A Tabela 1 apresenta as características desses gases, que serviram de base para a definição das condições operacionais do ciclo simulado.

Tabela 1 - Características dos gases descartados pela caldeira da indústria sucroalcooleira

Parâmetro	Valor
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	160
Fração mássica de nitrogênio (N_2)	0,793
Fração mássica de oxigênio (O_2)	0,064
Fração mássica de dióxido de carbono (CO_2)	0,144

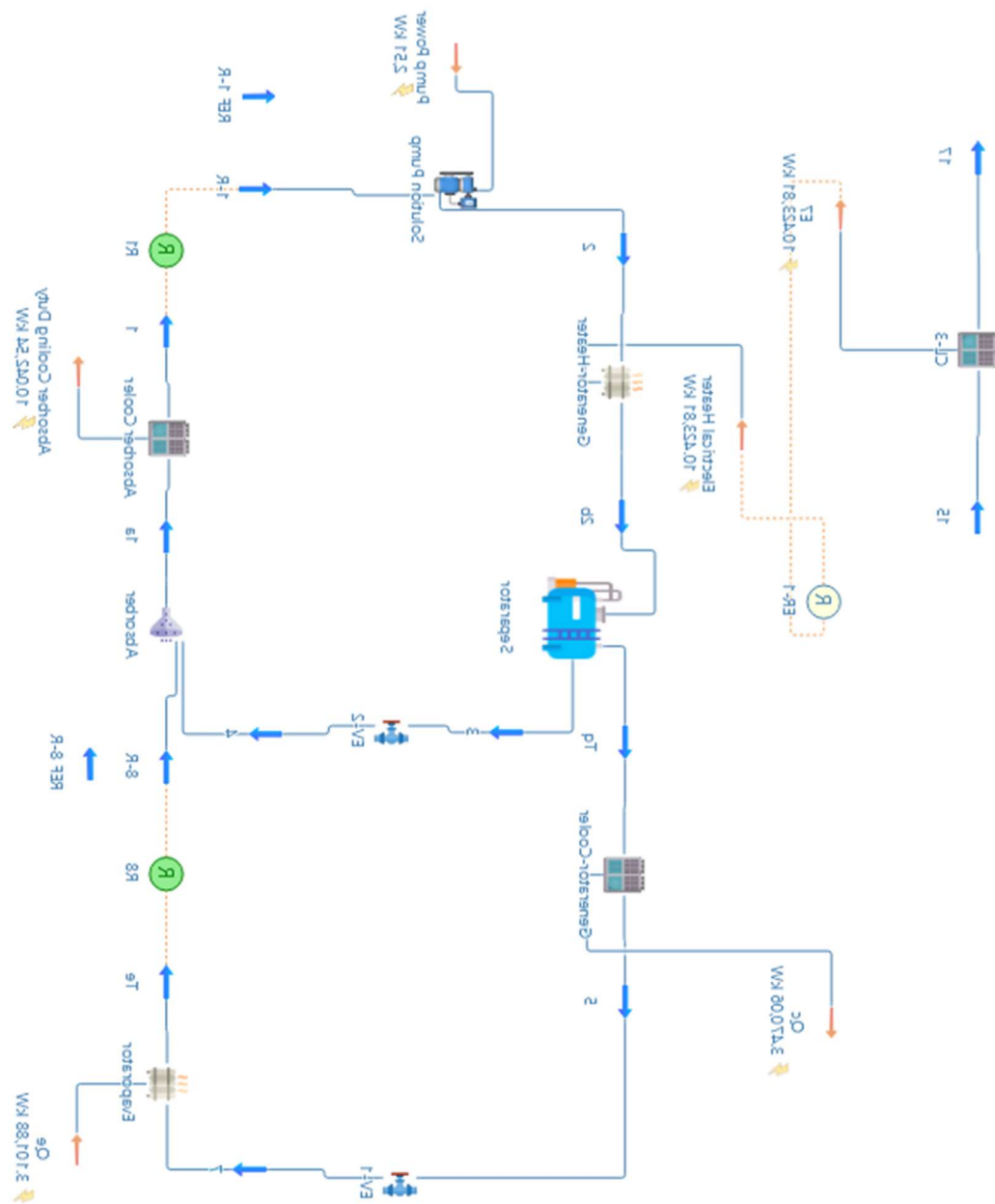
Fonte: Indústria de açúcar e álcool de Araraquara (SP), 2022.

A disponibilidade térmica, calculada pelo DWSIM, a partir do resfriamento desses gases até $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ corresponde a 10.423,81 kW, valor adotado como restrição máxima de calor fornecido ao gerador durante toda a análise, a partir desse valor, é possível iniciar a construção da simulação.

O ciclo de refrigeração por absorção H_2O – LiBr foi implementado no DWSIM a partir do modelo de exemplo disponibilizado pelo próprio simulador, denominado "LiBr- H_2O Heat Pump for Chip Cooling", elaborado por Daniel Wagner e baseado no estudo de Manu e Chandrashekar (2016), que apresenta análise termodinâmica detalhada

de um ciclo de absorção de estágio único com o par H_2O –LiBr, previamente validado com dados da literatura. O fluxograma do ciclo implementado no DWSIM é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Ciclo de refrigeração por absorção no DWSIM



Fonte: Adaptado de Manu e Chandrashekar, 2016

Para adequar o modelo às condições da planta sucroalcooleira, foram adaptadas as condições operacionais fixas do ciclo, apresentadas na Tabela 2. Essas condições foram definidas de modo que o sistema opere em ambientes quentes, com rejeição de calor máxima de 40 °C no condensador, para que resfrie um ambiente com temperatura igual a 40 °C, considerando uma temperatura média de 35 °C, para a cidade de Araraquara/SP e seja capaz de promover resfriamento até 25 °C no evaporador, para que o ambiente esteja em uma temperatura dentro da NBR 16401-2. Para que essas temperaturas fossem atendidas, foi necessário estabelecer uma pressão de operação de 30 mbar na região do evaporador e do absorvedor, valor condizente com a pressão de saturação da água nessa faixa de temperatura (ÇENGEL ET AL., 2013). Já a pressão de saída da bomba foi adaptada por meio de tentativa e erro, para que o ciclo conseguisse ser efetivamente, calculado. Além disso, a vazão do fluido refrigerante foi triplicada, em relação a vazão inicial do sistema de exemplo, pois o calor disponível para uso na caldeira, é em torno de três vezes maior que o calor do exemplo.

Tabela 2 - Condições de processo

Variáveis	Condições
Temperatura de saída do condensador	40 °C
temperatura de saída do evaporador	25 °C
Vazão mássica	28,86 kg/s
Fração molar (H₂O)	0,82
Pressão da bomba	1317 mbar
Pressão - válvulas	30 mbar

Fonte: Autoral, 2026

Para o estudo e otimização do processo, foi utilizada a ferramenta *Experiment Designer* do DWSIM, que permite avaliar o efeito da variação de variáveis independentes sobre variáveis resposta por meio da execução automatizada de simulações. As variáveis independentes e dependentes do processo estão detalhadas na Tabela 3, e os intervalos de variação das variáveis independentes são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 - Variáveis dependentes e independentes

Variáveis independentes	Variáveis dependentes
Vazão mássica da solução (kg/s)	Calor absorvido no evaporador (kW)
Fração molar de água na solução	Calor descartado no condensador (kW)
Pressão de saída da bomba (mbar)	Potência da bomba (kW)
	Entalpia das correntes do ciclo (kW)
Fonte: Autoral, 2026	

Tabela 4 - Intervalo das variáveis independentes

Variável	Mínimo	Máximo	Unidade
Vazão da solução H ₂ O–LiBr	24	32	kg/s
Fração molar de água	0,70	0,90	—
Pressão de saída da bomba	1.000	1.800	mbar

Fonte: Autoral, 2026

Esses intervalos foram estabelecidos, baseando no valor da condição inicial, variando, partindo de valores 20% menores que a condição inicial até valores 20% maiores, de modo a respeitar a restrição de disponibilidade térmica da caldeira, ou seja, o calor fornecido ao gerador não poderia exceder os 10.423,81 kW disponíveis. Foram realizados 2.000 experimentos, dos quais 1.964 foram considerados válidos após a exclusão de combinações que violaram essa restrição ou apresentaram falha de convergência no simulador.

Com os valores obtidos pela ferramenta *Experiment Designer* calculou-se o coeficiente de performance de todos os experimentos válidos por meio da Equação 2.

$$COP = \frac{Q_{evaporador}}{Q_{gerador} + W_{bomba}} \quad (2)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ciclo de refrigeração por absorção, representado no DWSIM, após os ajustes manuais, com as condições apresentadas na Tabela 2, apresentava COP igual a 0,29. Com o objetivo de otimizar o valor desse COP e encontrar a melhor combinação de variáveis para esse ciclo, foi utilizado o *Experiment Designer*, que realizou 2000 experimentos, sendo válidos, 1964 experimentos. Após a realização desses experimentos, o COP foi calculado para determinar o ponto que melhor otimizou o ciclo.

O melhor ponto encontrado obteve um coeficiente de performance igual a 0,68, superior ao calculado no processo inicial, a condição para obtenção dessa eficiência no ciclo, pode ser vista na Tabela 5.

Tabela 5 - Ponto com maior COP

Variável	Valor
Fração molar (H ₂ O)	0,90
Vazão mássica (kg/s)	26,78
Pressão da bomba (mbar)	1197
COP	0,68

Fonte: Autoral, 2026

Com isso, nota-se um aumento de 134% em relação ao COP inicial, demonstrando que a realização dos experimentos foi essencial para otimizar o processo do ciclo. Ao aumentar o valor do COP, é possível aumentar a eficiência do ciclo, ou seja, aproveitar melhor o calor disponível na caldeira e por consequência, aumentar o efeito útil do sistema.

A Tabela 6 apresenta uma comparação entre as variáveis originais e as variáveis identificadas como o melhor ponto do ciclo.

Tabela 6 - Comparação entre a condição original e melhor condição

Variável	Condição original	Melhor condição	Variação (%)
Fração molar de água	0,820	0,900	+9,75
Vazão da solução (kg/s)	28,8	26,7	-7,36
Pressão da bomba (mbar)	1376	1197	-13
Q_{evap} (kW)	3101	7097	+128
COP	0,290	0,681	+134

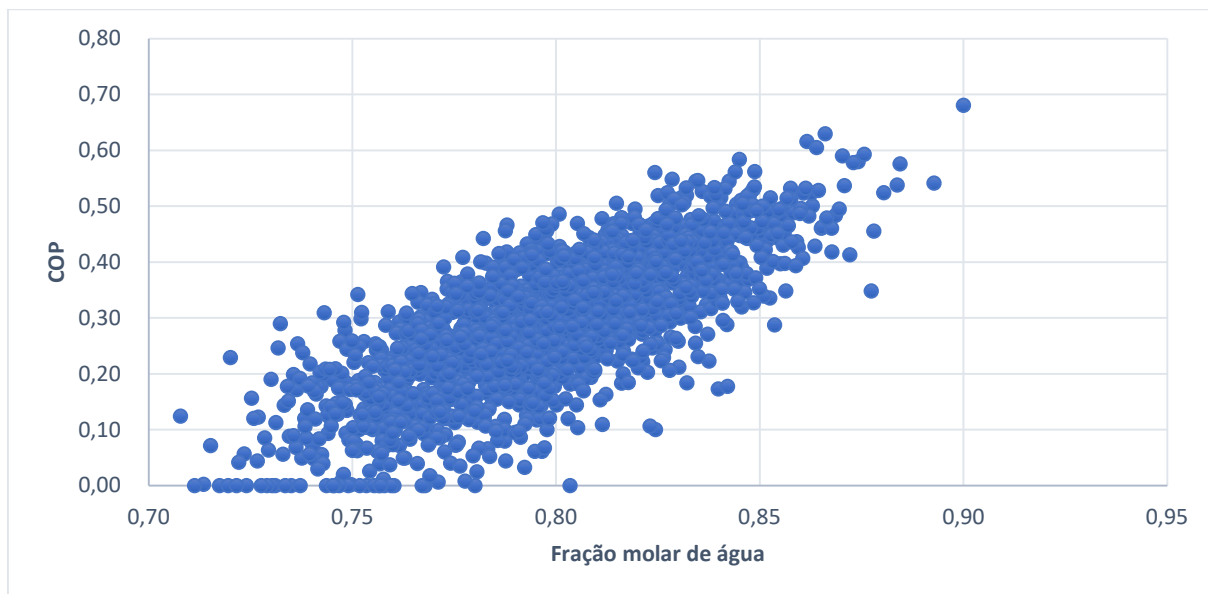
Fonte: Autoral, 2026

Os resultados obtidos permitem não apenas uma análise termodinâmica, mas também inferências sobre a viabilidade operacional do sistema. A redução da pressão na bomba implica menor demanda energética para o seu funcionamento, contribuindo para a eficiência global do ciclo. Da mesma forma, a diminuição da vazão da solução representa menor consumo de fluido, reduzindo custos associados ao transporte e reposição desse material. Além disso, o aumento da fração molar de água, componente de menor valor agregado na mistura, diminui os custos com a solução. Por fim, o incremento do COP evidencia uma maior capacidade de refrigeração para a mesma quantidade de energia fornecida, ou seja, um melhor aproveitamento da fonte térmica disponível e maior competitividade do sistema em aplicações industriais.

5.1 Influência das variáveis independentes

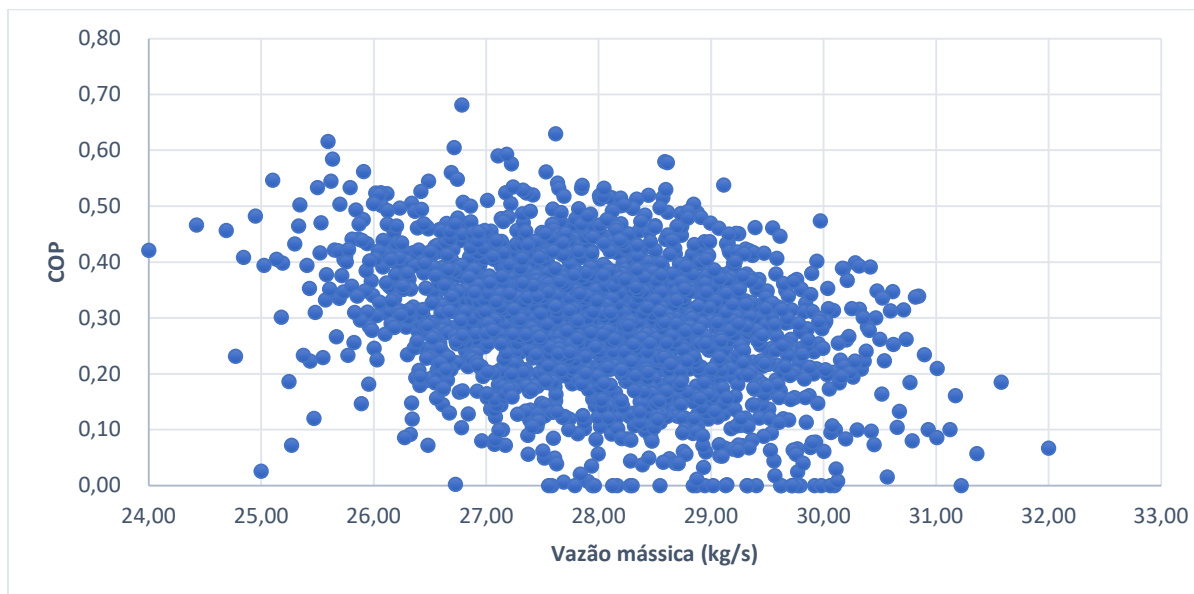
Na Figura 3, é possível observar o diagrama de dispersão do COP vs fração Molar, que representa a relação da variação com o coeficiente de performance, já na Figura 4, é possível observar o diagrama de COP vs vazão molar e por fim, na Figura 5, tem-se o gráfico de dispersão do COP vs pressão da bomba.

Figura 3 - Gráfico de dispersão COP vs fração molar



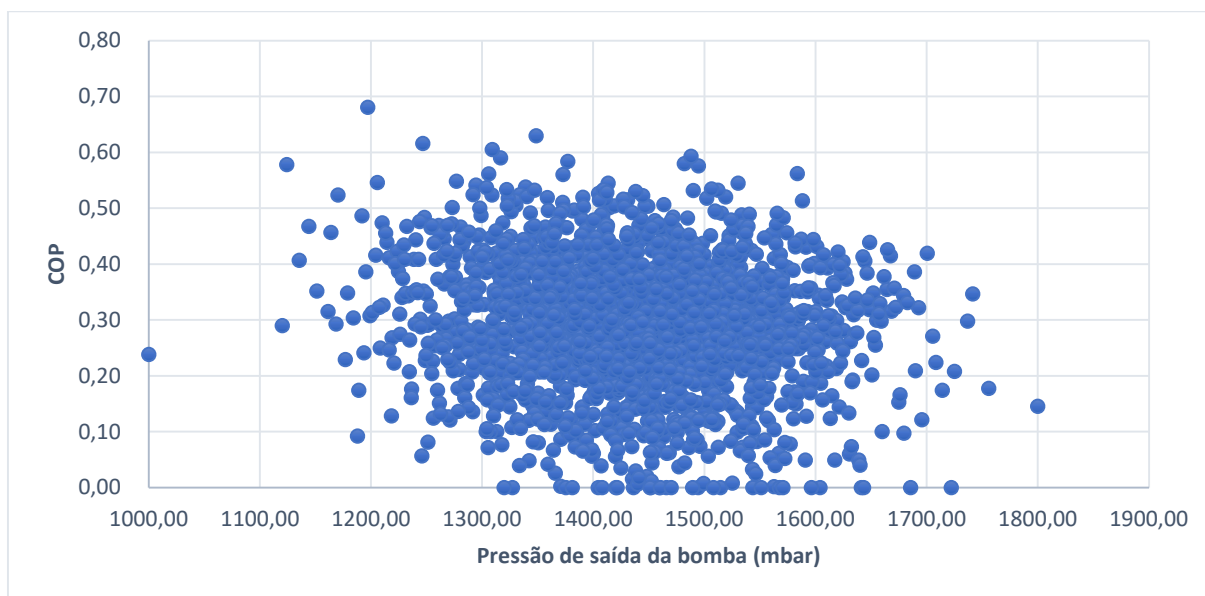
Fonte: Autoral, 2026

Figura 4 - Gráfico de dispersão COP vs vazão mássica



Fonte: Autoral, 2026

Figura 5 - Gráfico de dispersão COP vs pressão da bomba



Fonte: Autoral, 2026

As Figuras 3, 4 e 5 permitem analisar a influências das variáveis independentes sobre o coeficiente de performance. Nota-se que a fração molar é a variável com maior influência sobre o COP entre as variáveis analisadas, quanto maior a fração molar de H_2O na mistura, maior o coeficiente de performance, evidenciando uma relação direta entre esses parâmetros.

Na Figura 4, referente a vazão mássica da solução, observou-se que não há uma relação tão linear entre a vazão mássica da solução e o COP, entretanto, é possível identificar que os maiores valores de coeficiente de performance estão concentrados em vazões menores que 28 kg/s, sugerindo que menores vazões favorecem o desempenho do ciclo.

Por fim, a Figura 5 mostra a relação entre o COP e a pressão da bomba. Os resultados apresentam uma maior de dispersão, sem uma tendência clara, indicando que, dentro do intervalo estudado, a pressão da bomba não influencia de maneira direta o coeficiente de performance, logo, o desempenho do ciclo.

Para mostrar essa relação numericamente, foi calculado o coeficiente de correlação, r^2 , utilizando a função CORREL() no Excel, para entender a influência de cada uma das variáveis independentes no coeficiente de performance. Os valores de R^2 encontrados podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficiente de correlação R^2 das variáveis independentes em relação ao COP

Variável independente	R^2
Fração molar de H_2O	0,563
Vazão mássica (kg/s)	0,0965
Pressão da bomba (mbar)	0,0191

Fonte: Autoral, 2026

5.2 Comparação com sistema $NH_3 - H_2O$

Os resultados obtidos no estudo do processo de refrigeração por absorção utilizando o par $H_2O - LiBr$ podem ser comparados a um trabalho anterior de Santos, 2024, no qual foi simulado o ciclo utilizando como par $NH_3 - H_2O$ para o aproveitamento do mesmo calor residual de uma indústria sucroalcooleira.

A comparação entre os dois resultados pode ser vista na Tabela 8.

Tabela 8 - Comparação entre os sistemas $H_2O - LiBr$ e $NH_3 - H_2O$

Parâmetro	IC – NH_3-H_2O (2024)	TCC – $H_2O-LiBr$ (2026)
Par termodinâmico	$NH_3 - H_2O$	$H_2O - LiBr$
Refrigerante	Amônia (NH_3)	Água (H_2O)
Absorvente	Água (H_2O)	Brometo de lítio ($LiBr$)
Vazão ótima (kg/s)	27,30	26,78
Melhor fração molar	0,73 (H_2O)	0,90 (H_2O)
COP máximo obtido	0,32	0,68

Fonte: Autoral, 2026

Essa comparação permite avaliar o impacto do par de fluido de serviço sobre o desempenho do processo e avaliar se os impactos das variáveis independentes estão associados principalmente às características do ciclo de refrigeração por absorção ou ao par de fluido empregado.

Ambos os estudos foram conduzidos com os mesmos valores de o calor advindo da caldeira e das temperaturas de saída do condensador e do evaporador. Além disso, foram desenvolvidos no mesmo software, o DWSIM e otimizado a partir do

processamento feito pela ferramenta *Experiment Designer*, possibilitando uma comparação entre os resultados obtidos.

A principal diferença entre os ciclos está na escolha do par termodinâmico, no ciclo com $\text{H}_2\text{O} - \text{LiBr}$, a água atua como fluido refrigerante e o brometo de lítio como absorvedor, já no sistema com $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$, a amônia faz o papel do refrigerante, o que implica em diferenças nas condições operacionais do processo, como a pressão do ciclo.

A diferença mais expressiva entre os dois sistemas é o COP máximo alcançado, o sistema $\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$ atingiu 0,68, valor aproximadamente 113% superior ao obtido com o par $\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}$ (0,32). Esse resultado é consistente com a literatura, que indica que o sistema $\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$ apresenta maior eficiência em aplicações de climatização e resfriamento na faixa de temperatura disponível nas caldeiras sucroalcooleiras ($\sim 160^\circ\text{C}$), dado que a água é um refrigerante com entalpia de vaporização elevada e o brometo de lítio possui forte afinidade pelo vapor d'água, favorecendo a absorção (HEROLD; RADERMACHER; KLEIN, 2016).

6. CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que o aproveitamento do calor residual gerado nas caldeiras de uma indústria sucroalcooleira é viável por meio de um sistema de refrigeração por absorção com o par H_2O –LiBr.

A partir da otimização, identificou-se um COP de 0,68, representando um aumento de 134% em relação ao valor inicial de 0,29, obtido antes da otimização. O melhor ponto foi alcançado com fração molar de água igual a 0,90, vazão da solução de 26,78 kg/s e pressão da bomba de 1.197 mbar. Em termos de capacidade de refrigeração, o calor absorvido no evaporador passou de 3.101 kW para 7.097 kW, representando um ganho de 128% no efeito útil do sistema para a mesma quantidade de energia disponível na fonte térmica.

A análise de correlação por R^2 indicou que a fração molar de água na solução é a variável com maior influência sobre o COP ($R^2 = 0,563$), evidenciando uma relação direta e expressiva entre esses parâmetros. A vazão mássica da solução apresentou influência moderada ($R^2 = 0,097$), com os maiores valores de COP concentrados em vazões abaixo de 28 kg/s. A pressão da bomba, por sua vez, mostrou baixa correlação com o desempenho do ciclo ($R^2 = 0,019$) dentro do intervalo estudado, indicando que essa variável não é determinante para a otimização do sistema H_2O –LiBr nas condições analisadas.

Do ponto de vista operacional, o melhor ponto identificado também apresenta vantagens práticas: a redução da pressão da bomba implica menor consumo energético no bombeamento, a diminuição da vazão reduz custos associados ao transporte e recirculação da solução, e o aumento da fração molar de água favorece o uso do componente de menor custo na mistura. Esses fatores, somados ao maior COP, conferem ao sistema otimizado maior competitividade em aplicações industriais.

Por fim, a comparação com o estudo prévio de iniciação científica, no qual o par NH_3 – H_2O foi simulado nas mesmas condições, reforça a superioridade do sistema H_2O –LiBr para o caso em estudo, devido às condições operacionais e a fonte de calor do processo, com COP aproximadamente 113% superior.

REFERÊNCIAS

ASPENTECH. **Aspen Plus User Guide**. Cambridge: Aspen Technology, 1981.

ASPENTECH. **Aspen Plus Reference Manual**. Cambridge: Aspen Technology, 2002.

ATMACA, Ibrahim; YIGIT, Abdulvahap. Simulation of solar-powered absorption cooling system. *Renewable Energy*, [S.L.], v. 28, n. 8, p. 1277-1293, jul. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0960-1481\(02\)00252-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0960-1481(02)00252-5). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148102002525>. Acesso em: 09 maio 2026.

BELL, Ian H.; WRONSKI, Jorrit; QUOILIN, Sylvain; LEMORT, Vincent. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S.L.], v. 53, n. 6, p. 2498-2508, 27 jan. 2014. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ie4033999>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/260761540_Pure_and_Pseudo-pure_Fluid_Thermophysical_Property_Evaluation_and_the_Open-Source_Thermophysical_Property_Library_CoolProp. Acesso em: 13 maio 2026.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. E-book. p.643. ISBN 9788580552010. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580552010/>. Acesso em: 09 jun. 2026.

DOSSAT, R. J.; HORAN, T. J. **Principles of Refrigeration**. 5. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

DWSIM. **DWSIM Chemical Process Simulator**. Versão 8.0. [S.l.], 2026. Disponível em: <https://dwsim.org>. Acesso em: 13 maio 2026.

EID, F. et al. Tecnologia e co-geração de energia na indústria sucroalcooleira paulista: uma análise da experiência e dificuldades de difusão. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 28, n. 5, p. 1–6, maio 1998. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/ftp/iea/ie/1998/tec1-0598.pdf>. Acesso em: 13 maio 2026.

FELDER, R. M.; ROUSSEAU, R. W. **Elementary Principles of Chemical Processes**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.

HEROLD, K. E.; RADERMACHER, R.; KLEIN, S. A. **Absorption Chillers and Heat Pumps**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Future of Cooling: Opportunities for Energy-Efficient Air Conditioning**. Paris: IEA, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>. Acesso em: 13 maio 2026.

JOUDI, Khalid; LAFTA, Ali H. Simulation of a simple absorption refrigeration system. *Energy Conversion And Management*, [S.L.], v. 42, n. 13, p. 1575-1605, set. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0196-8904\(00\)00155-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0196-8904(00)00155-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890400001552>. Acesso em: 15 maio 2026.

MANU, S.; CHANDRASHEKAR, T.K. A simulation study on performance evaluation of single-stage LiBr–H₂O vapor absorption heat pump for chip cooling. *International Journal Of Sustainable Built Environment*, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 370-386, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.08.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212609016300401?via%3Dihub>. Acesso em: 21 ago. 2025.

MATHWORKS. **MATLAB Documentation**. Natick, MA: MathWorks, 2026. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>. Acesso em: 13 maio 2026.

PELLEGRINI, L; DE OLIVEIRA JR, S. Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification. **Energy**, [S.L.], v. 32, n. 4, p. 314-327, abr. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2006.07.028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544206002064>. Acesso em: 13 maio 2026.

RIBEIRO, Kalielly Viama Rodrigues. **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A VIABILIDADE SOCIOECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DA COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO DO BRASIL**. 2023. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, Jataí, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/1565>. Acesso em: 18 maio 2026.

SANTOS, M. L. C. *Estudo e otimização do processo de refrigeração por absorção*. Relatório Final de Iniciação Científica. Araraquara: Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, 2024.

SMITH, J M.; NESS, H. C V.; ABBOTT, M.M; et al. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. *E-book*. p.i. ISBN 9788521636854. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521636854/>. Acesso em: 09 jun. 2026.

SREEMAHDEVAN, Siddhi; SIVAKUMAR, Krishnapriya Velusamy; PALANISAMY, Menjith. Evaluation of the Open Source Process Simulator DWSIM for Bioprocess Simulation. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, [S.L.], v. 68, n. 2, p. 195-202, 22 maio 2024. Periodica Polytechnica Budapest University of Technology and Economics. <http://dx.doi.org/10.3311/ppch.23166>. Disponível em: <https://pp.bme.hu/ch/article/view/23166>. Acesso em: 15 maio 2026.