



SIMULAÇÃO E ANÁLISE ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE SEPARAÇÃO ETANOL-ÁGUA APLICADO À INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE SEPARACIÓN DE ETANOL Y AGUA APLICADO A LA INDUSTRIA AZUCARERA Y DE BEBIDAS ALCOHÓLICAS

ENERGY SIMULATION AND ANALYSIS OF AN ETHANOL-WATER SEPARATION SYSTEM APPLIED TO THE SUGAR AND ALCOHOL INDUSTRY

Apresentação: Comunicação Oral

Augusto Vinícius da Silva Araújo¹; Jara Nicácio de Araújo Gomes²; Adamirely Bezerra de Melo³; Krause Gonçalves Silveira Albuquerque⁴; Alberto Einstein Pereira de Araujo⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/2526-7701.VCOINTERPDVAgro.0012>

RESUMO

A simulação computacional é uma ferramenta amplamente utilizada na engenharia de processos para representar, analisar e prever o comportamento de sistemas industriais por meio de modelos matemáticos e termodinâmicos. Sua aplicação permite estudar diferentes condições operacionais sem a necessidade de realizar testes em escala real, o que contribui para a redução de custos, economia de tempo e maior segurança no planejamento de processos. Na indústria sucroalcooleira, essa ferramenta apresenta grande importância, uma vez que os processos de produção, recuperação e purificação de etanol envolvem elevado consumo energético, especialmente em etapas de aquecimento, mistura e separação. A separação de misturas etanol-água é uma operação relevante nesse setor, pois está diretamente relacionada à obtenção de produtos com maior grau de pureza e ao aproveitamento eficiente do etanol produzido por fermentação. Nesse contexto, compreender a influência das variáveis operacionais sobre a demanda energética dos equipamentos é essencial para melhorar o desempenho do processo e auxiliar no dimensionamento adequado das unidades industriais. Assim, a simulação computacional torna-se uma estratégia útil para avaliar cenários, identificar tendências e propor melhorias operacionais. O objetivo deste trabalho foi analisar, por meio de simulação computacional, a influência da vazão de etanol sobre a potência requerida por um trocador de calor em um sistema de mistura e separação etanol-água. Para isso, utilizou-se o software COCO, associado ao pacote termodinâmico COFE, que permite a simulação de processos químicos em regime estacionário. O sistema simulado foi composto por duas correntes principais, uma contendo água e outra rica em etanol, as quais foram inicialmente definidas com condições específicas de vazão, temperatura e pressão. Em seguida, essas correntes foram direcionadas para uma etapa de mistura, submetidas ao aquecimento em um trocador de calor e posteriormente encaminhadas para uma unidade de separação. Após a construção e convergência do modelo, realizou-se um estudo paramétrico, variando-se a vazão da corrente rica em etanol e mantendo-se constantes os demais parâmetros operacionais. Os resultados demonstraram que o aumento da vazão de etanol promoveu elevação progressiva da potência requerida pelo trocador de calor, apresentando comportamento aproximadamente linear. Esse resultado indica que maiores quantidades de fluido exigem maior fornecimento de energia térmica para atingir as condições estabelecidas. Conclui-se que a simulação computacional foi eficiente para avaliar o

¹ Graduando em Engenharia de Alimentos, UFAP, augustovinicius720@gmail.com

¹ Graduanda em Engenharia de Alimentos, UFAP, jaranicacio04@gmail.com

¹ Graduanda em Engenharia de Alimentos, UFAP, adamirelybezerra@gmail.com

¹ Doutorando em Biotecnologia, UFPE, albuquerque.k.g.s@gmail.com

¹ Doutor em Física, UFAP, alberto.araujo@ufape.edu.br

comportamento energético do sistema, evidenciando a importância do controle da vazão, do correto dimensionamento de equipamentos e da otimização operacional para reduzir custos e aumentar a eficiência energética na indústria sucroalcooleira.

Palavras-Chave: Balanço de energia, Processos industriais, Modelagem computacional.

RESUMEN

La simulación computacional es una herramienta ampliamente utilizada en la ingeniería de procesos para representar, analizar y predecir el comportamiento de sistemas industriales mediante modelos matemáticos y termodinámicos. Su aplicación permite estudiar diferentes condiciones operativas sin necesidad de realizar pruebas a escala real, contribuyendo a la reducción de costos, al ahorro de tiempo y a una mayor seguridad en la planificación de procesos. En la industria sucroenergética, esta herramienta adquiere especial importancia, ya que los procesos de producción, recuperación y purificación de etanol implican un elevado consumo de energía, especialmente en las etapas de calentamiento, mezcla y separación. La separación de mezclas etanol-agua constituye una operación relevante en este sector, debido a que está directamente relacionada con la obtención de productos de mayor pureza y con el aprovechamiento eficiente del etanol producido por fermentación. En este contexto, comprender la influencia de las variables operativas sobre la demanda energética de los equipos resulta fundamental para mejorar el desempeño del proceso y contribuir al adecuado dimensionamiento de las unidades industriales. Por ello, la simulación computacional se convierte en una estrategia útil para evaluar escenarios, identificar tendencias y proponer mejoras operativas. El objetivo de este trabajo fue analizar, mediante simulación computacional, la influencia del caudal de etanol sobre la potencia requerida por un intercambiador de calor en un sistema de mezcla y separación etanol-agua. Para ello, se utilizó el software COCO junto con el paquete termodinámico COFE, que permite la simulación de procesos químicos en estado estacionario. El sistema simulado estuvo compuesto por dos corrientes principales, una de agua y otra rica en etanol, definidas inicialmente con condiciones específicas de caudal, temperatura y presión. Posteriormente, estas corrientes fueron dirigidas a una etapa de mezcla, sometidas a calentamiento en un intercambiador de calor y finalmente enviadas a una unidad de separación. Tras la construcción y convergencia del modelo, se realizó un estudio paramétrico variando el caudal de la corriente rica en etanol y manteniendo constantes los demás parámetros operativos. Los resultados demostraron que el aumento del caudal de etanol provocó un incremento progresivo de la potencia requerida por el intercambiador de calor, presentando un comportamiento aproximadamente lineal. Este resultado indica que mayores cantidades de fluido requieren un mayor aporte de energía térmica para alcanzar las condiciones operativas establecidas. Se concluye que la simulación computacional fue una herramienta eficaz para evaluar el comportamiento energético del sistema, evidenciando la importancia del control del caudal, el adecuado dimensionamiento de los equipos y la optimización operativa para reducir costos e incrementar la eficiencia energética en la industria sucroenergética.

Palabras Clave: Balance de energía, Procesos industriales, Modelado computacional.

ABSTRACT

Computational simulation is a widely used tool in process engineering to represent, analyze, and predict the behavior of industrial systems through mathematical and thermodynamic models. Its application allows the study of different operating conditions without the need for full-scale experiments, contributing to cost reduction, time savings, and improved safety in process planning. In the sugar-energy industry, this tool is particularly important since ethanol production, recovery, and purification processes involve high energy consumption, especially during heating, mixing, and separation operations. The separation of ethanol-water mixtures is a relevant operation in this sector because it is directly related to obtaining products with higher purity and improving the efficient use of ethanol produced by fermentation. In this context, understanding the influence of operational variables on the energy demand of process equipment is essential for improving process performance and supporting the proper design of industrial units. Therefore, computational simulation becomes a useful strategy for evaluating scenarios, identifying trends, and proposing operational improvements. The objective of this study was to analyze, through computational simulation, the influence of ethanol flow rate on the power required by a heat exchanger in an ethanol-water mixing and separation system. For this purpose, the COCO software associated with the COFE thermodynamic package was used, allowing the simulation of chemical processes under steady-state conditions. The simulated system consisted of two main streams, one containing water and the other rich in ethanol, which were initially defined with specific flow rate, temperature, and pressure conditions. These streams were then directed to a mixing stage, subjected

to heating in a heat exchanger, and subsequently sent to a separation unit. After model construction and convergence, a parametric study was performed by varying the flow rate of the ethanol-rich stream while maintaining all other operational parameters constant. The results showed that increasing the ethanol flow rate promoted a progressive increase in the power required by the heat exchanger, exhibiting an approximately linear behavior. This result indicates that larger fluid quantities require greater thermal energy input to achieve the established operating conditions. It can be concluded that computational simulation was effective in evaluating the energy behavior of the system, highlighting the importance of flow rate control, proper equipment sizing, and operational optimization to reduce costs and increase energy efficiency in the sugar-energy industry.

Keywords: Energy balance, Industrial processes, Computational modeling.

INTRODUÇÃO

A separação de misturas etanol-água possui grande relevância na indústria de alimentos, sendo encontrada em processos de produção de bebidas alcoólicas, álcool alimentício e recuperação de compostos provenientes de fermentações. Nesse contexto, a simulação computacional constitui uma ferramenta importante para a análise do comportamento e otimização de processos, sobretudo no que diz respeito ao consumo energético.

Dessa forma, enfatiza-se o etanol, um composto amplamente utilizado em aplicações industriais, sendo produzido principalmente por via fermentativa devido à sua viabilidade econômica e elevada disponibilidade de matérias-primas. Durante seu processamento, operações térmicas desempenham papel fundamental, especialmente em etapas de concentração e recuperação do produto, nas quais a demanda energética representa um fator relevante para os custos operacionais do processo.

Nesse contexto, os trocadores de calor assumem papel essencial, pois são responsáveis pela transferência de energia térmica entre correntes de processo, sendo amplamente utilizados na indústria de alimentos em operações de aquecimento e resfriamento de fluidos, com aplicações nas etapas de pasteurização e esterilização. O desempenho desses equipamentos está diretamente relacionado às condições operacionais das correntes processadas, tornando importante a avaliação da influência de variáveis como vazão, temperatura e composição sobre a demanda energética do sistema.

Diante disso, o uso de simulações computacional como ferramentas de controle, permite a compreensão das operações unitárias antes mesmo da implementação na planta, podendo assim colaborar com o estudo e planejamento da dinâmica industrial da unidade. Tais ferramentas podem colaborar na análise de cenários, em busca de elevação da eficiência operacional, sem a necessidade de experimentação em escala real. Assim, o presente trabalho teve como objetivo analisar, por meio de simulação computacional, a influência da vazão de etanol sobre a potência requerida por um trocador

de calor em um sistema de mistura e separação etanol-água, visando compreender o comportamento energético do processo e sua relevância para aplicações na indústria.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Cana-de-açúcar

A produção e o processamento da cana-de-açúcar constituem um pilar fundamental do agronegócio brasileiro. A produção de açúcar e etanol, tanto para consumo interno quanto para exportação, contribui diretamente para o resultado da balança comercial e, em geral, para o desenvolvimento do país (Amorim, Patino & Marcomini, 2018; CONAB, 2024).

A cana-de-açúcar, utilizada como matéria-prima no processamento industrial, é composta por Açúcares Totais Recuperáveis (ART) e fibras, estas últimas constituídas principalmente por lignina, celulose e hemicelulose. Os ART são responsáveis pela produção de açúcar, etanol e também rum, enquanto as fibras podem ser empregadas tanto na cogeração de energia elétrica quanto na fabricação de etanol de segunda geração (2G), maximizando o aproveitamento energético da biomassa (Ajala *et al.*, 2021). Além disso, o processo produtivo do etanol gera grandes volumes de vinhaça, considerado o efluente industrial mais significativo do setor sucroenergético (Lemos *et al.*, 2019). Estudos recentes têm demonstrado que a vinhaça, quando submetida a processos de concentração e separação, pode ser recuperada como biofertilizante, reduzindo o impacto ambiental e agregando valor ao resíduo (Barbosa *et al.*, 2023; Carrilho, Labuto & Kamogawa, 2016).

É importante ressaltar que o fluxo de produção nas diferentes cadeias de suprimentos ainda é influenciado pela decisão estratégica entre produzir mais açúcar ou mais etanol (Palacios-Bereche *et al.*, 2022). Nesse contexto, a eficiência dos sistemas de separação etanol-água torna-se um fator crítico, pois impacta diretamente o balanço energético e a viabilidade econômica da planta sucroalcooleira, especialmente considerando a crescente demanda por processos mais sustentáveis e com menor geração de efluentes (Cherubin *et al.*, 2021).

Mistura etanol-água

O etanol (C_2H_5OH), também conhecido como álcool etílico, é um dos álcoois mais comuns, estando presente em bebidas alcoólicas, perfumes, produtos de limpeza, fitoterápicos e combustíveis. As misturas etanol-água mais conhecidas são o álcool anidro, com teor alcoólico máximo de 99,3 °INPM, e o álcool hidratado, cujo teor alcoólico varia entre 92,6 e 93,8 °INPM. A unidade grau INPM,

adotada pelo Instituto Nacional de Pesos e Medidas, expressa a porcentagem em massa de álcool na mistura. Dessa forma, um álcool hidratado com 93 °INPM contém 93% em massa de etanol e 7% em massa de água (Cancian, 2013).

As misturas etanol-água apresentam comportamento termodinâmico complexo devido às interações intermoleculares existentes entre seus componentes, o que resulta em desvios da idealidade e influencia diretamente propriedades como entalpia, entropia, capacidade calorífica e equilíbrio líquido-vapor. Essas propriedades são fundamentais para o desenvolvimento de balanços de massa e energia, bem como para a modelagem e simulação de processos industriais envolvendo aquecimento, evaporação e separação. Segundo Pérez *et al.*, (2010), a correta determinação das propriedades termodinâmicas da mistura etanol-água é indispensável para a representação adequada do comportamento do sistema em diferentes condições operacionais, permitindo estimativas mais confiáveis da demanda energética e do desempenho de equipamentos utilizados em plantas de produção e recuperação de etanol.

Além disso, a mistura etanol-água apresenta um comportamento característico de formação de azeótropo, fenômeno que dificulta a separação completa dos componentes por métodos convencionais de destilação. Em função dessa característica, o conhecimento das propriedades termodinâmicas da mistura torna-se essencial para o dimensionamento de equipamentos e para a avaliação de alternativas de separação. Pérez *et al.*, (2010) destacam que propriedades como entalpia e entropia são variáveis fundamentais em estudos de eficiência energética e análises exergéticas, uma vez que permitem quantificar a energia envolvida nas correntes de processo e identificar oportunidades de otimização operacional. Dessa forma, a compreensão do comportamento termodinâmico das misturas etanol-água contribui para o desenvolvimento de processos mais eficientes e economicamente viáveis na indústria sucroalcooleira.

Trocadores de calor

Os trocadores de calor foram introduzidos em 1923, inicialmente para processos de pasteurização de leite, e atualmente são amplamente utilizados em operações de troca térmica entre líquidos, especialmente os viscosos. Esses equipamentos destacam-se pela facilidade de desmontagem para limpeza e pela eficiência no controle térmico, sendo ideais para esterilização e pasteurização (Shah & Sekulic, 2003).

Na indústria de alimentos, o uso de trocadores de calor é fundamental nos procedimentos de fabricação, uma vez que seus recursos abrangem diversas etapas que envolvem o aquecimento ou resfriamento do produto. Vale ressaltar que o Brasil, conforme dados da Associação Brasileira da

Indústria de Alimentos, figura entre os maiores exportadores mundiais de alimentos (Ferreira, 2023).

Além de promoverem a troca de calor, os trocadores de calor são amplamente estudados nas Engenharias e aplicados em áreas como condicionamento de ar, aquecimento de ambientes, manufatura, tratamentos químicos e até mesmo em processos de troca de energia (Gardenal & Sguario, 2016). Nesse contexto, esses equipamentos são empregados em ambientes industriais sob diferentes formatos, processos de execução e modos de funcionamento, com o objetivo de viabilizar a troca térmica entre fluidos que se encontram em faixas de temperatura distintas (Ferreira, 2023).

Simulação computacional

A simulação computacional tem se consolidado como uma importante ferramenta para o estudo e a otimização de processos industriais, permitindo representar sistemas reais por meio de modelos matemáticos e computacionais. Segundo Kovaleski *et al.*, (2020), a simulação consiste na representação de um sistema real ou hipotético com o objetivo de analisar cenários complexos, avaliar diferentes condições operacionais e prever o comportamento do sistema em situações específicas. Dessa forma, torna-se possível desenvolver e aperfeiçoar processos e produtos simultaneamente, contribuindo para a redução de custos operacionais, melhoria da qualidade e aumento da eficiência produtiva.

Nos últimos anos, o avanço das tecnologias digitais tem ampliado a aplicação da simulação computacional em diferentes setores industriais. De acordo com Souza e Guimarães (2021), diversas indústrias já incorporam ferramentas de simulação associadas a conceitos de Big Data para auxiliar na tomada de decisões e no monitoramento de processos. Nesse contexto, Schwab (2016) destaca que a integração dessas tecnologias tem proporcionado benefícios significativos, incluindo maior competitividade, aumento da segurança operacional, tomada de decisões em tempo real e redução de custos associados à produção.

Entre os softwares disponíveis para modelagem e simulação de processos químicos, destaca-se o Cape Open to Cape Open (COCO), uma plataforma gratuita amplamente utilizada para o desenvolvimento de fluxogramas e análise de processos industriais. O COCO foi desenvolvido com base na tecnologia CAPE-OPEN, permitindo a integração entre diferentes simuladores e bibliotecas de cálculo, além da comunicação com ferramentas desenvolvidas por terceiros (Schubert, 2021).

A plataforma é composta por diferentes módulos que desempenham funções específicas durante a simulação. O COFE (CAPE-OPEN Flowsheet Environment) constitui o ambiente gráfico utilizado para a construção de fluxogramas de processos, possibilitando a inserção de equipamentos, correntes de processo e condições operacionais. Além disso, o módulo disponibiliza ferramentas para

análise de propriedades das correntes, conversão de unidades e visualização dos resultados obtidos.

Os cálculos termodinâmicos são realizados por meio do módulo TEA (Thermodynamic Engine for Applications), que possui uma extensa base de dados contendo centenas de compostos químicos e diversos modelos para estimativa de propriedades físico-químicas. Já o módulo COUSCOUS disponibiliza bibliotecas de operações unitárias, incluindo misturadores, divisores de corrente, trocadores de calor, bombas, compressores e reatores. Complementarmente, o módulo CORN é responsável pela modelagem de reações químicas, permitindo a simulação de sistemas envolvendo equilíbrio químico e diferentes configurações de reatores, como CSTR e PFR (Schubert, 2021).

Em conjunto, essas ferramentas tornam o COCO uma alternativa eficiente para estudos de simulação, avaliação energética e otimização de processos industriais, possibilitando análises detalhadas com baixo custo e elevada flexibilidade operacional.

METODOLOGIA

O estudo foi conduzido por meio de simulação computacional em regime permanente, utilizando um computador portátil da marca Samsung, modelo E-30. As simulações foram realizadas no software COCO (Cape-Open to Cape-Open), empregando o ambiente COFE (Cape-Open Flowsheet Environment) para construção do fluxograma do processo e o módulo TEA (Thermodynamic Engine for Applications) para os cálculos termodinâmicos. No TEA foi selecionado o modelo termodinâmico UNIFAC VLE (Vapor-Liquid Equilibrium), por apresentar boa capacidade de representar o equilíbrio líquido-vapor de misturas não ideais, como o sistema etanol-água, possibilitando a estimativa das propriedades termodinâmicas necessárias aos balanços de massa e energia.

Inicialmente, foi construída a configuração do fluxograma do processo no ambiente de simulação. O sistema foi composto por duas correntes de alimentação independentes. A corrente 1 foi definida como água pura, com vazão mássica de 1 kg min^{-1} e temperatura de $323,15 \text{ °K}$, enquanto a corrente 2 foi composta por etanol puro, com temperatura inicial de $298,15 \text{ °K}$ e vazão mássica inicial de 1 kg min^{-1} . Ambas as correntes foram consideradas à pressão de 1 atm, sendo suas composições estabelecidas a partir de um único componente em cada corrente, permitindo avaliar exclusivamente a influência da mistura entre água e etanol sobre o comportamento energético do sistema. Essas correntes foram direcionadas para uma unidade de mistura, onde ocorreu a homogeneização dos fluidos, seguida de aquecimento em um trocador de calor e posterior envio para a unidade de separação.

As condições operacionais adotadas para os equipamentos utilizados na simulação estão

apresentadas na Tabela 1. Para cada operação unitária foram realizados os balanços de massa e energia necessários à convergência do modelo, permitindo a obtenção das variáveis de processo, como vazão, temperatura, composição e demanda energética.

Tabela 01: Condições de processo utilizadas para a simulação da separação da mistura etanol-água desenvolvido no simulador COCO

Parâmetros	Misturador	Trocador de calor	Separador	Unidade
Pressão	1	1	1	atm
Temperatura	300.43723	358.15	358.15	K°
Vazão	6	6	6	kg/min

Fonte: Autor (2026).

Após a convergência do modelo, realizou-se um estudo paramétrico para avaliar a influência da vazão da corrente de etanol sobre o consumo energético do sistema. A vazão mássica de alimentação do etanol foi variada de 1,45 a 10,00 kg min⁻¹, mantendo-se constantes as demais condições operacionais, incluindo a vazão da corrente de água, temperatura de alimentação, pressão e configuração do processo. Para cada condição simulada foram registradas as necessidades energéticas das operações unitárias, com ênfase na potência requerida pelo trocador de calor.

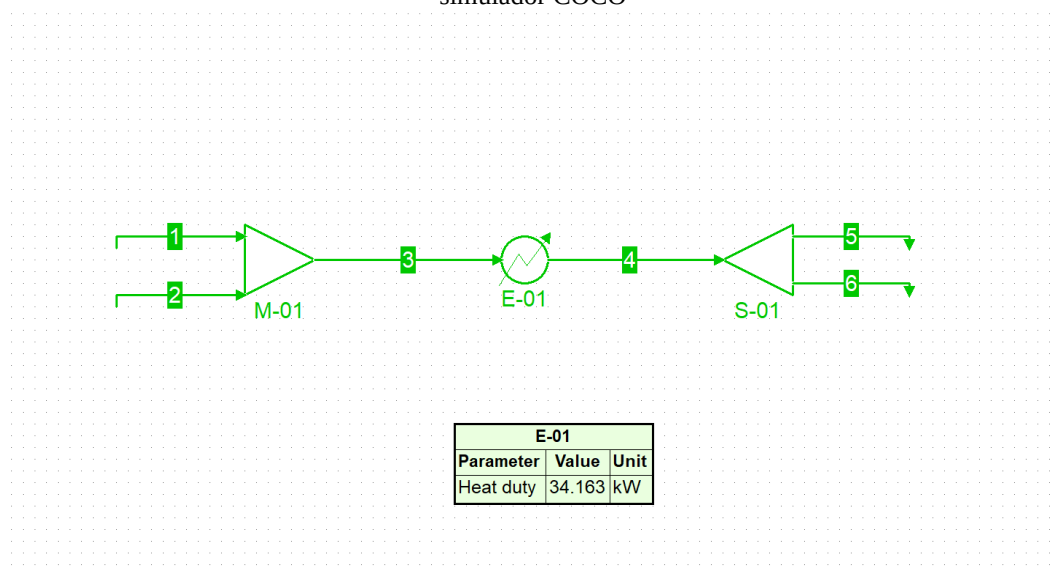
Os dados obtidos foram organizados em planilhas eletrônicas e posteriormente analisados por meio de gráficos e análises comparativas. A relação entre a vazão de etanol e a demanda energética do processo foi avaliada com o objetivo de identificar tendências operacionais e verificar o impacto dessa variável sobre o desempenho energético do sistema, fornecendo informações relevantes para futuras etapas de otimização e dimensionamento de processos industriais envolvendo a recuperação e purificação de etanol.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo desenvolvido no simulador COCO para representar o sistema de mistura, aquecimento e separação da mistura etanol-água. Inicialmente, duas correntes de alimentação independentes, uma contendo água e outra contendo etanol, são direcionadas ao misturador (M-01), onde ocorre a homogeneização dos fluidos. A corrente resultante é encaminhada ao trocador de calor (E-01), responsável por fornecer a energia térmica necessária para elevar a temperatura da mistura até a condição operacional estabelecida para o processo. Em seguida, a corrente aquecida é enviada ao separador (S-01), no qual ocorre a divisão da mistura em correntes de saída com diferentes composições. Essa configuração permitiu avaliar o comportamento energético do sistema frente à variação da vazão de etanol, possibilitando analisar a influência dessa variável sobre a demanda térmica do processo e sobre as propriedades termodinâmicas das correntes.

Além disso, a construção do fluxograma possibilitou representar de forma simplificada uma operação frequentemente encontrada na indústria sucroalcooleira, permitindo a realização de estudos paramétricos sem a necessidade de experimentação em escala industrial.

Figura 01: Fluxograma do processo de mistura, aquecimento e separação da mistura etanol-água desenvolvido no simulador COCO



Legenda: M-01: Misturados; E-01: Trocador de calor; S-01: Separador.

Fonte: Autor (2026).

Os resultados obtidos para o estudo paramétrico são apresentados na Tabela 2, na qual são relacionados os valores de vazão mássica da corrente de etanol e a respectiva potência requerida pelo trocador de calor. Verifica-se que o aumento da vazão promove um incremento contínuo da carga térmica necessária para manter a mistura na temperatura de operação estabelecida durante a simulação. Esse comportamento está associado ao aumento da quantidade de massa processada por unidade de tempo, fazendo com que o equipamento necessite fornecer maior quantidade de energia para elevar a temperatura da corrente até o valor especificado.

Sob o ponto de vista dos fenômenos de transporte, essa tendência é coerente, pois a potência térmica requerida por um trocador de calor depende diretamente da vazão mássica da corrente, da capacidade calorífica da mistura e da diferença de temperatura imposta ao sistema. Segundo Shah e Sekulic (2003), alterações nas condições operacionais das correntes processadas influenciam diretamente a carga térmica dos trocadores de calor, tornando a vazão uma das principais variáveis consideradas no dimensionamento desses equipamentos. Dessa forma, os resultados apresentados evidenciam que o controle da vazão de alimentação possui influência significativa sobre o consumo energético do processo, sendo um parâmetro importante para o planejamento operacional de sistemas industriais de separação etanol-água.

Além da influência da vazão sobre a carga térmica do processo, deve-se considerar que a mistura etanol-água apresenta comportamento termodinâmico não ideal devido às interações

intermoleculares existentes entre seus componentes.

À medida que a vazão de etanol é aumentada, ocorre também uma alteração na composição global da corrente alimentada ao sistema, modificando propriedades como densidade, capacidade calorífica, entalpia e equilíbrio líquido-vapor. Essas alterações refletem diretamente na energia necessária para promover o aquecimento da mistura e justificam a utilização de modelos termodinâmicos capazes de representar adequadamente esse comportamento.

De acordo com Pérez *et al.*, (2010), a correta estimativa das propriedades termodinâmicas de misturas etanol-água é indispensável para a realização de balanços de massa e energia confiáveis, permitindo maior precisão na previsão do desempenho de equipamentos envolvidos em operações de aquecimento e separação. Assim, a utilização do modelo UNIFAC VLE durante a simulação contribuiu para representar de forma mais realista as características físico-químicas do sistema estudado.

Tabela 2: Relação entre fluxo de etanol e potência requerida

Nº de Intervalos Analisados	Fluxo de massa (kg / min)	Temperatura do trocador de calor (K°)	Taxa de transferência de calor (kW)
1	1.45	358.15	24,262
2	1.9	358.15	27,997
3	2.35	358.15	45,109
4	2.8	358.15	62,221
5	3.25	358.15	79,333
6	3.7	358.15	96,445
7	4.15	358.15	113,557
8	4.6	358.15	130,669
9	05.05	358.15	147,781
10	5.5	358.15	164,893
11	5.95	358.15	182,006
12	6.4	358.15	199,113
13	6.85	358.15	216,230
14	7.3	358.15	233,342
15	7.75	358.15	250,454
16	8.2	358.15	267,566
17	8.65	358.15	284,678
18	9.1	358.15	301,790
19	9.55	358.15	318,902
20	10	358.15	336,014

Fonte: Autores (2026).

De acordo com a literatura, processos que operam com maiores concentrações de etanol podem proporcionar vantagens econômicas e operacionais, reduzindo custos associados às etapas subsequentes de processamento e destilação.

Entretanto, o aumento da quantidade de etanol processado também pode elevar a demanda energética dos equipamentos envolvidos, especialmente daqueles responsáveis pelas operações

térmicas. Nesse contexto, a relação observada entre a vazão de etanol e a potência requerida pelo trocador de calor evidencia a importância do correto dimensionamento e da otimização das condições operacionais, visando conciliar produtividade e eficiência energética.

Assim, o conhecimento do comportamento térmico do sistema torna-se uma ferramenta importante para o desenvolvimento de processos mais eficientes e economicamente viáveis na cadeia produtiva do etanol (Barbosa *et al.*, 2016; Yamakawa, 2016; Arshad *et al.*, 2017).

A relação entre a vazão da corrente de etanol e a potência requerida pelo trocador de calor é apresentada de forma gráfica na Figura 2. Observa-se uma tendência aproximadamente linear em toda a faixa operacional analisada, indicando que o aumento da vazão resulta em acréscimos praticamente proporcionais na demanda energética do equipamento.

Segundo Geankoplis (2003), em operações envolvendo aquecimento de fluidos, a quantidade de energia requerida tende a aumentar proporcionalmente com a quantidade de material processado, desde que as demais variáveis permaneçam constantes. Dessa forma, a tendência observada confirma os fundamentos da transferência de calor e demonstra que o comportamento previsto pelo simulador apresenta consistência física e termodinâmica.

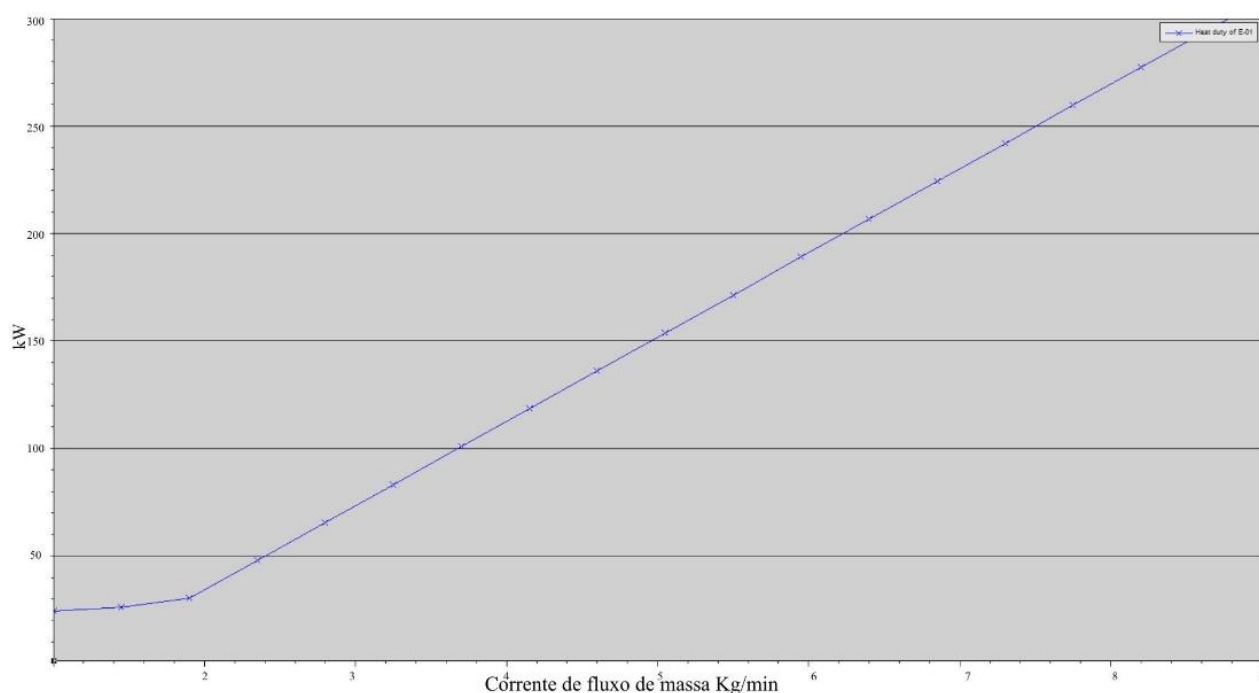
A análise das propriedades termodinâmicas das correntes também permitiu identificar que a principal transformação energética do processo ocorreu no trocador de calor. Nessa etapa, verificou-se o aumento da entalpia da mistura em decorrência da absorção de energia térmica necessária para elevar sua temperatura até 358,15 K. Após o aquecimento, os valores de entalpia e entropia permaneceram praticamente constantes durante a passagem pelo separador, indicando que essa unidade operacional atuou predominantemente na segregação física das fases, sem necessidade de fornecimento adicional de calor ao sistema.

Esse comportamento evidencia que a maior parcela do consumo energético do processo está concentrada na etapa de aquecimento, característica frequentemente observada em processos industriais de recuperação e purificação de etanol. Além disso, os resultados demonstram que a representação computacional foi capaz de reproduzir adequadamente a distribuição da energia ao longo das operações unitárias, reforçando a confiabilidade da simulação realizada.

Sob a perspectiva industrial, os resultados obtidos apresentam elevada relevância, uma vez que o consumo energético representa uma parcela significativa dos custos operacionais em processos que envolvem aquecimento de correntes líquidas e separação de misturas etanol-água. O conhecimento da relação entre vazão de alimentação e demanda energética permite estimar o impacto de alterações na capacidade produtiva sobre o desempenho térmico dos equipamentos, contribuindo para o correto dimensionamento de trocadores de calor e para a definição de estratégias de otimização energética. Nesse contexto, a simulação computacional mostrou-se uma ferramenta eficiente para a

análise de cenários operacionais, permitindo prever o comportamento do processo sem a necessidade de experimentação em escala industrial. Assim, os resultados obtidos fornecem informações relevantes para o desenvolvimento de processos mais eficientes, economicamente viáveis e energeticamente sustentáveis na indústria sucroalcooleira.

Figura 2: Relação entre potência requerida e vazão de etanol



Fonte: Autores (2026).

CONCLUSÕES

O presente estudo analisou, por meio de simulação computacional no ambiente COCO/COFE com o modelo termodinâmico UNIFAC VLE, a influência da vazão da corrente de etanol sobre a potência requerida por um trocador de calor em um sistema de mistura, aquecimento e separação etanol-água. A variação da vazão mássica de etanol entre 1,45 e 10,00 kg min⁻¹ revelou uma relação aproximadamente linear com a demanda energética do equipamento, indicando que o aumento da quantidade de fluido exige aporte térmico proporcional para atingir a temperatura operacional. Esse comportamento está em consonância com os princípios de transferência de calor e atesta a consistência física do modelo empregado.

A elevação da vazão também modifica a composição global da mistura, alterando propriedades termodinâmicas como capacidade calorífica, entalpia e equilíbrio líquido-vapor. Nesse contexto, a utilização do modelo UNIFAC VLE mostrou-se adequada para representar as não

idealidades do sistema, garantindo maior precisão nos balanços de massa e energia e na previsão do desempenho dos equipamentos.

Sob o ponto de vista industrial, os resultados evidenciam a vazão como variável operacional estratégica, pois impacta diretamente o consumo energético das etapas térmicas, reforçando a necessidade de dimensionamento adequado e otimização das condições de processo para conciliar produtividade e eficiência energética. A simulação computacional confirmou seu potencial como ferramenta preditiva, de baixo custo e isenta de experimentação em escala real, fornecendo subsídios valiosos para a tomada de decisão. Conclui-se que a metodologia adotada atendeu ao objetivo proposto, contribuindo para o entendimento do comportamento energético do sistema de separação. Para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação da análise considerando outras variáveis operacionais, como temperatura e pressão, bem como a avaliação de diferentes modelos termodinâmicos e configurações de processo, visando aprimorar ainda mais a eficiência da cadeia produtiva do etanol.

REFERÊNCIAS

AJALA, E. O. *et al.* Sugarcane bagasse: a biomass sufficiently applied for improving global energy, environment and economic sustainability. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 8, n. 1, p. 1-25, 2021.

AMORIM, H. V.; PATINO, M. T. O.; MARCOMINI, F. L. **Tecnologia e produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2018.

ANDRADE, E. T.; CARVALHO, S. R. G.; SOUZA, L. F. Programa do Proálcool e o etanol no Brasil. **Engvista**, v. 11, n. 2, p. 127-136, 2009.

BARBOSA, J. H. da S. *et al.* Uso de vinhaça concentrada e enriquecida como biofertilizante na cana-de-açúcar: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 16, n. 2, 2023.

CANCIAM, C. A. Efeito da concentração de etanol na dilatação volumétrica de misturas etanol-água. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 5, n. 2, p. 99-110, ago. 2013.

CARRILHO, E. N. V. M.; LABUTO, G.; KAMOGAWA, M. Y. Destination of vinasse, a residue from alcohol industry: resource recovery and prevention of pollution. In: PRASAD, M. N. V.; SHIH, K. (ed.). **Environmental materials and waste: resource recovery and pollution prevention**. London: Academic Press, 2016. p. 21-43.

CHERUBIN, M. R. *et al.* Land use and management effects on sustainable sugarcane-derived bioenergy. **Land**, v. 10, n. 1, p. 72, 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. Brasília, DF: CONAB, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: xx xxx. 2026.

COSTA, D. A. da; SOUZA, C. L. de; SALIBA, E. D. O. S.; CARNEIRO, J. D. By-products of sugar cane industry in ruminant nutrition. **International Journal of Advanced Agricultural Research**, v. 3, p. 1-95, 2015.

FERREIRA, M. P. **Avaliação teórica do desempenho de um trocador de calor a placas empregado em um processo de uma indústria alimentícia**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2023.

GARDENAL, A. L.; SGUARIO, M. K. **Avaliação do desempenho de trocadores de calor**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport processes and separation process principles: includes unit operations**. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

KOVALESKI, J. L. *et al.* Influências do conceito e das tecnologias da Indústria 4.0 no ambiente industrial. **Exacta**, v. 18, n. 2, p. 420-437, 2020.

LE MOS, S. V. *et al.* Vinhaça: características, impactos ambientais e alternativas de tratamento. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 3, p. 355-378, 2019.

LE MOS, S. V.; SALGADO JUNIOR, A. P.; DUARTE, A.; SOUZA JUNIOR, M. A. A.; ANTUNES, F. A. Agroindustrial best practices that contribute to technical efficiency in Brazilian sugar and ethanol production mills. **Energy**, v. 177, p. 397-411, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.053>.

LIMA, U. de A.; BASSO, L. C.; AMORIM, H. V. de. Produção de etanol. In: LIMA, U. de A.;

AQUARONE, E.; BORZANI, W.; SCHMIDELL, W. (ed.). **Biotecnologia industrial: processos fermentativos e enzimáticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2001. v. 3, p. 1-43.

MILANEZ, A. Y.; NYKO, D.; GARCIA, J. L. F.; REIS, B. L. S. F. S. O déficit de produção de etanol no Brasil entre 2012 e 2015: determinantes, consequências e sugestões de política. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, 2012.

PALACIOS-BERECHE, M. C.; PALACIOS-BERECHE, R.; ENSINAS, A. V.; GARRIDO GALLEGU, A.; MODESTO, M.; NEBRA, S. A. Brazilian sugar cane industry: a survey on future improvements in the process energy management. **Energy**, v. 259, art. 124903, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124903>.

PALACIOS-BERECHE, R. *et al.* Exergetic and economic analysis of sugarcane biorefineries: trade-offs between sugar and ethanol production. **Energy**, v. 239, p. 122-136, 2022.

PÉREZ ONES, O.; DÍAZ RODRÍGUEZ, J.; ZUMALACÁRREGUI, L.; GOZÁ LEÓN, O. Evaluación de propiedades termodinámicas de mezclas etanol-agua (I). **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 52, p. 47-61, 2010.

REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. Água de lavagem e palhagem. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, n. 3, p. 144-166.

SCHUBERT, K. B. **Estudo de validação termodinâmica do equilíbrio líquido-vapor (ELV) para sistema etanol-água usando o software livre COCO**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas, Palmas, 2021.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. Tradução de Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 2016.

SHAH, R. K.; SEKULIC, D. P. **Fundamentals of heat exchanger design**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

SOUZA, L. A. L.; GUIMARÃES, I. F. G. A Indústria 4.0 em empresas sediadas no Brasil: perspectivas e desafios. In: **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**,

PRINCIPAL, et al.

41., 2021