UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO REGIONAL

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA SUCROALCOOLEIRA

RHANGEL PEREIRA DOS SANTOS

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA E OTIMIZAÇÃO DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO DE VINHO VIA MODELAGEM E SIMULAÇÃO

João Pessoa
Junho/2026

RHANGEL PEREIRA DOS SANTOS

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA E OTIMIZAÇÃO DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO DE VINHO VIA MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Produção Sucroalcooleira

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Angela Lucínia Urtiga Vasconcelos

João Pessoa

2026

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237a Santos, Rhangel Pereira Dos.
Análise de sensibilidade paramétrica e otimização de uma coluna de destilação de vinho via modelagem e simulação / Rhangel Pereira Dos Santos. - João Pessoa, 2026.
51 f. : il.

Orientação: Angela Lucínia Urtiga Vasconcelos.
TCC (Graduação) - UFPB/CTDR.

1. Etanol. 2. Vinhaça. 3. Destilação. 4. Perdas de etanol. 5. Simulação computacional. I. Vasconcelos, Angela Lucínia Urtiga. II. Título.

UFPB/CTDR CDU 663.2:663.5

Elaborado por Rodrigo Araújo de Sá Pereira - CRB-755/O

RHANGEL PEREIRA DOS SANTOS

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA E OTIMIZAÇÃO DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO DE VINHO VIA MODELAGEM E SIMULAÇÃO

TCC aprovado em 12/08/2026 como requisito para a conclusão do curso de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA:

gov.br Documento assinado digitalmente
ANGELA LUCINIA URTIGA VASCONCELOS
Data: 13/08/2026 10:50:44-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª Drª. Angela Lucínia Urtiga Vasconcelos - (UFPB – Orientador)

gov.br Documento assinado digitalmente
SOLANGE MARIA DE VASCONCELOS
Data: 13/08/2026 16:11:26-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª Drª. Solange Maria de Vasconcelos - (UFPB – Membro interno)

gov.br Documento assinado digitalmente
ERIKA ADRIANA DE SANTANA
Data: 13/08/2026 16:21:23-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.ª Drª. Érika Adriana de Santana - (UFPB – Membro interno)

Dedico este trabalho aos meus familiares, pelo amor, apoio e incentivo incondicional em cada etapa do caminho. Aos professores e orientadores, cuja dedicação e conhecimento foram fundamentais para minha formação. Aos colegas, que compartilharam desafios, aprendizados e momentos inesquecíveis. A todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha jornada acadêmica e profissional. A todos que acreditaram em mim e me motivaram a seguir em frente, minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo desta caminhada, permitindo-me superar os desafios e alcançar mais esta importante etapa da minha vida.

À minha esposa, Nayanne, pelo amor, companheirismo, compreensão e apoio incondicional durante toda essa trajetória, e aos meus filhos, Arthur e Ana Cecília, por serem minha maior inspiração e motivação para continuar buscando crescimento pessoal e profissional. Esta conquista também é de vocês.

Aos meus pais, Cristiane e Severino, por todo amor, apoio, incentivo e pelos ensinamentos que contribuíram para formar a pessoa que sou, e aos meus irmãos, Rafaele, Vinícius e Maria Cecília, pelo carinho, companheirismo e por estarem presentes ao longo da minha caminhada.

À minha orientadora, Prof.ª Dr.ª Angela Lucínia Urtiga Vasconcelos, por toda ajuda, paciência e pela orientação, disponibilidade, conhecimento compartilhado e pelas importantes contribuições para o desenvolvimento deste trabalho. Aos demais professores do curso de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba, agradeço pelos ensinamentos e pela contribuição para minha formação acadêmica e profissional.

Aos meus sogros, amigos e colegas de curso, pelo apoio, incentivo, amizade e pelos momentos compartilhados durante essa trajetória, tornando os desafios mais leves e as conquistas ainda mais significativas.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta etapa tão importante da minha vida.

A todos, minha sincera gratidão.

RESUMO

A produção de etanol combustível constitui uma atividade de grande relevância para o setor sucroenergético brasileiro, tanto do ponto de vista econômico e energético quanto ambiental. Durante o processo de produção do etanol hidratado, a etapa de destilação é responsável pela recuperação do etanol presente no vinho fermentado, gerando simultaneamente a vinhaça como principal corrente residual. Embora esse efluente seja amplamente utilizado na fertirrigação devido à presença de nutrientes, a ocorrência de etanol residual na vinhaça representa perda de produto e pode indicar condições operacionais inadequadas na destilação. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as perdas de etanol na vinhaça durante a produção de etanol hidratado, analisando a influência das condições operacionais da coluna de destilação A1A sobre a recuperação do etanol e o consumo de vapor. Para isso, foi desenvolvido um modelo computacional do processo no simulador Aspen Plus®, utilizando a coluna RadFrac e o modelo termodinâmico NRTL, seguido de análises de sensibilidade envolvendo principalmente a temperatura de alimentação do vinho e a vazão de vapor de aquecimento. Os resultados demonstraram que essas variáveis exercem influência direta sobre a concentração de etanol na vinhaça, a concentração do flegma e o consumo energético do processo. Na condição-base, com alimentação do vinho a 94 °C e vazão de vapor de 40.000 kg/h, a concentração de etanol na vinhaça foi de aproximadamente 0,000004% em massa. Entretanto, verificou-se que essa condição utilizava quantidade de vapor superior à necessária para manter baixos níveis de perda. A análise permitiu identificar uma condição operacional mais eficiente a 94 °C e aproximadamente 35.455 kg/h de vapor, apresentando cerca de 0,0198% de etanol na vinhaça e concentração de etanol no flegma de 45,26%, com redução aproximada de 11,4% no consumo de vapor em relação à condição-base. Conclui-se que o controle adequado da temperatura de alimentação e da vazão de vapor permite manter reduzidas as perdas de etanol na vinhaça e, simultaneamente, diminuir o consumo energético da destilação, evidenciando a importância da otimização das condições operacionais para aumentar a eficiência do processo de produção de etanol hidratado.

Palavras-chave: Etanol; Vinhaça; Destilação; Perdas de etanol; Simulação computacional.

ABSTRACT

Fuel ethanol production is one of the most relevant activities in the Brazilian sugar-energy sector due to its economic, energy, and environmental importance. During hydrous ethanol production, the distillation stage is responsible for recovering the ethanol present in the fermented wine, while simultaneously generating vinasse as the main residual stream. Although this effluent is widely used for fertigation because of its nutrient content, the presence of residual ethanol in vinasse represents product loss and may indicate inadequate operating conditions in the distillation process. In this context, this study aimed to evaluate ethanol losses in vinasse during hydrous ethanol production by analyzing the influence of the operating conditions of the A1A distillation column on ethanol recovery and steam consumption. For this purpose, a computational model of the process was developed using Aspen Plus® software, employing the RadFrac column model and the NRTL thermodynamic model, followed by sensitivity analyses mainly involving the fermented wine feed temperature and heating steam flow rate. The results demonstrated that these variables directly influence the ethanol concentration in vinasse, the ethanol concentration in phlegm, and the energy consumption of the process. Under the baseline condition, with a fermented wine feed temperature of 94 °C and a steam flow rate of 40,000 kg/h, the ethanol concentration in vinasse was approximately 0.000004% by mass. However, this condition required a higher steam flow rate than necessary to maintain low ethanol losses. The analysis identified a more efficient operating condition at 94 °C and approximately 35,455 kg/h of steam, resulting in approximately 0.0198% ethanol in vinasse and an ethanol concentration of 45.26% in the phlegm, with an approximate 11.4% reduction in steam consumption compared with the baseline condition. It was concluded that proper control of the feed temperature and steam flow rate can maintain low ethanol losses in vinasse while simultaneously reducing the energy consumption of the distillation process, highlighting the importance of optimizing operating conditions to improve the efficiency of hydrous ethanol production.

Keywords: Ethanol; Vinasse; Distillation; Ethanol losses; Computational simulation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
1.1 Contextualização 13
1.2 O Problema de Pesquisa 15
1.3 Justificativa 16
1.4 Objetivos 17
1.4.1 Objetivo Geral 17
1.4.2 Objetivos Específicos 17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
2.1 O setor sucroenergético e o etanol no Brasil 19
2.2 O vinho fermentado 20
2.3 Fundamentos da destilação e do equilíbrio líquido-vapor 21
2.4 Sistema industrial de destilação e a coluna A1A 23
2.5 A vinhaça: subproduto, impacto ambiental e perdas de etanol 25
2.6 Eficiência energética e integração térmica na destilação 26
2.7 Modelagem e simulação de processos 29
3. METODOLOGIA 32
3.1 Abordagem do Estudo 32
3.2 Pesquisa Bibliográfica 32
3.3 Definição dos Componentes do Processo 33
3.4 Escolha dos Modelos Termodinâmicos Adequados 33
3.5 Construção do Fluxograma do Processo 34
3.6 Definição das Condições Operacionais dos Equipamentos e Especificação das Correntes de Alimentação 35
3.6.1 Condições operacionais 35
3.6.2 Especificação das correntes de alimentação 35
3.7 Análises de Sensibilidade Paramétricas 36
3.8 Formulação Matemática e Avaliação Energética 37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 38
4.1 Resultados da simulação do caso base 38
4.2 Análise da influência da vazão de vapor de aquecimento sobre a fração mássica de etanol nas correntes FLEGMA e VINHACA (1ª análise de sensibilidade) 39
4.3 Análise da influência da temperatura do vinho sobre a fração mássica de etanol nas

correntes FLEGMA e VINHACA 42
4.4 Otimização Energética por Pré-aquecimento do Vinho 44
4.5 Avaliação da Economia de Vapor e Viabilidade Industrial 46
4.5.1 Economia de Vapor: 46
4.5.2 Viabilidade Industrial 46
5. CONCLUSÃO 48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Todos os componentes químicos especificados no simulador.....30
Tabela 2 – Condições e especificações da simulação 32
Tabela 3 – Caracterização das correntes de alimentação 32
Tabela 4 – Cenários das análises de sensibilidade 33
Tabela 5 – Resultados das correntes flegma, A1-D e vinhaça para o caso base.....35
Tabela 6 - Comparativo técnico-econômico entre os cenários operacionais da Coluna A1A.....46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema simplificado da configuração do processo de destilaçao empregado na indústria para produção de AEHC.....14

Figura 2 – Fluxograma da metodologia.....19

Figura 3 – Fluxograma do processo.....34

Figura 4 – Vazão de vapor vs teor de etanol na vinhaça.....39

Figura 5 – Vazão de vapor vs. teor de etanol no flegma.....39

Figura 6 – Temperatura do vinho vs. Teor na vinhaça com vapor fixo.....42

Figura 7 – Temperatura do vinho vs. Teor no Flegma com vapor fixo.....42

Figura 8 - Temperatura do Vinho vs. Demanda Mínima de Vapor para Vinhaça em 0,02% 44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GL	Graus Gay-Lussac
UFPB	Universidade Federal da Paraíba

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A busca por fontes renováveis de energia intensificou-se nas últimas décadas em decorrência da crescente preocupação mundial com as mudanças climáticas, a segurança energética e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, os biocombustíveis assumem papel estratégico na substituição parcial dos combustíveis fósseis, destacando-se o etanol produzido a partir da biomassa da cana-de-açúcar, devido à sua elevada eficiência energética, ao menor impacto ambiental e à sua contribuição para a diversificação da matriz energética (Cortez, 2010; Macedo; Seabra; Silva, 2008; IPCC, 2023).

Atualmente, o Brasil figura entre os maiores produtores mundiais de etanol, utilizando predominantemente a cana-de-açúcar como matéria-prima. O país apresenta vantagens competitivas relacionadas às condições climáticas favoráveis, à elevada produtividade agrícola e ao desenvolvimento tecnológico alcançado pelo setor sucroenergético. Além da produção de combustível renovável, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar contribui para a geração de bioeletricidade, produção de açúcar e aproveitamento de subprodutos industriais, fortalecendo sua importância econômica e ambiental (Conab, 2024; EPE, 2024; UNICA, 2024).

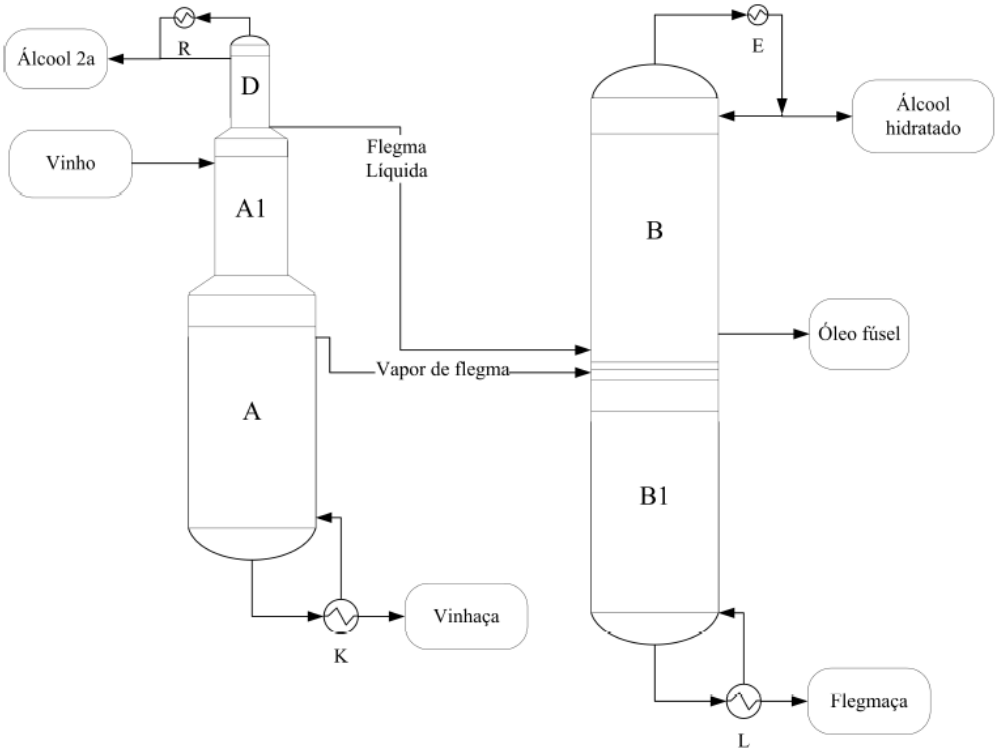
A produção de etanol hidratado compreende, de maneira geral, as etapas de preparo da matéria-prima, obtenção do mosto fermentescível, fermentação e destilação. Entre essas etapas, a destilação desempenha papel fundamental por ser responsável pela recuperação do etanol presente no vinho fermentado, concentrando-o até os níveis exigidos para comercialização. A eficiência dessa operação influencia diretamente o rendimento industrial, o consumo de energia e a quantidade de etanol perdida na vinhaça, sendo considerada uma das operações unitárias de maior importância nas destilarias (Foust et al., 1982; Seader; Henley; Roper, 2016).

A etapa de destilação é considerada o núcleo da recuperação do etanol nas usinas sucroenergéticas. Seu desempenho depende diretamente das condições operacionais adotadas, como vazão de vapor, temperatura da alimentação, pressão de operação e eficiência dos estágios da coluna. Pequenas alterações nesses parâmetros podem modificar significativamente a recuperação de etanol, a composição da flegma, o consumo energético e as perdas observadas na vinhaça, justificando o emprego de ferramentas de modelagem e simulação para análise e otimização do processo (Kister, 1992; Turton et al., 2018).

A Figura 1 apresenta, de forma simplificada, as principais etapas do processo industrial de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. Inicialmente ocorre a preparação da matéria-prima e a obtenção do mosto fermentescível. Em seguida, realiza-se a fermentação alcoólica,

na qual os açúcares são convertidos em etanol pela ação de leveduras do gênero *Saccharomyces*. O vinho fermentado obtido nessa etapa é então encaminhado à destilação, onde ocorre a recuperação e concentração do etanol até as especificações exigidas para comercialização (Amorim, 2005; Payne, 1989).

Figura 1 - Esquema simplificado da configuração do processo de destilaçao empregado na indústria para produção de AEHC.



Fonte: Dias (2008)

O primeiro conjunto, denominado coluna de destilação, integra as colunas A1 (epuração), A (esgotamento) e D (concentração de álcool de segunda), sendo responsável por tratar o vinho fermentado e transformá-lo em uma mistura hidroalcoólica intermediária chamada flegma (Alves, 2014; Batista, 2008; Dias, 2008; Marquini *et al*., 2007; Silveira, 2021)

O vinho é alimentado na coluna A1 para a purificação de substâncias voláteis e gases, seguindo para a coluna A, onde o álcool é extraído na forma de vapor de flegma, enquanto a coluna D atua na concentração dos produtos de cabeça para a obtenção do álcool de segunda (Batista, 2008; Dias, 2008; Silveira, 2021)

Posteriormente, essa flegma alimenta o conjunto de retificação, formado pelas colunas

B (enriquecimento) e B1 (esgotamento). Nesta etapa, a coluna B promove a purificação e o enriquecimento da mistura para a obtenção do etanol hidratado no topo ou etanol anidro via etapas integradas de desidratação, enquanto a coluna B1 realiza a exaustão final da flegma vinda da coluna B, gerando a flegmaça como resíduo de fundo (Alves, 2014; Batista, 2008; Dias, 2008; Marquini et al., 2007; Silveira, 2021).

1.2 O Problema de Pesquisa

A etapa de destilação é fundamental para a recuperação do etanol, sendo a seção de esgotamento, frequentemente representada pela coluna A (ou conjunto A1A), responsável por extrair o álcool contido no vinho fermentado e transferi-lo para a fase vapor na forma de flegma (Batista, 2008; Marquini et al., 2007; Silveira, 2021). O principal desafio técnico desta operação reside na necessidade de garantir o esgotamento total do vinho, uma vez que a indústria tolera uma concentração máxima de apenas 0,02% em massa de etanol na vinhaça, o resíduo de fundo do processo (Batista, 2008; Dias, 2008; Marquini et al., 2007; Silveira, 2021).

Para atingir níveis tão baixos de perda, o processo demanda um elevado consumo de energia (vapor), seja via injeção direta ou através de refervedores, o que representa um dos maiores custos operacionais das usinas sucroalcooleiras (Batista, 2008; Marquini et al., 2007; Silveira, 2021). O consumo de vapor é influenciado diretamente pelo teor alcoólico do vinho e pelas condições de alimentação; vinhos com menor graduação alcoólica ou alimentados em temperaturas abaixo do ideal exigem um aporte térmico significativamente maior para garantir a separação eficiente (Dias, 2008; Silveira, 2021).

O conflito, ou gargalo técnico, surge quando há insuficiência no fornecimento de vapor ou falta de controle nas variáveis de operação: a falta de energia térmica impede a vaporização completa do álcool, fazendo com que o etanol seja "arrastado" junto com a vinhaça (Alves, 2014; Batista, 2008). Essa perda resulta em um prejuízo financeiro direto, pela redução do volume de produto final, e em um grave impacto ambiental, pois o etanol remanescente aumenta a carga orgânica e o potencial poluente da vinhaça, além de elevar o volume total de efluente gerado, dificultando seu manejo e fertirrigação (Batista, 2008; Dias, 2008; Silveira, 2021).

Diante disso, a pesquisa é motivada pela seguinte pergunta norteadora: De que maneira o ajuste integrado da vazão de vapor de aquecimento e da temperatura de alimentação do vinho pode otimizar a operação da coluna A1A, garantindo que as perdas de etanol na vinhaça permaneçam dentro dos limites aceitáveis com o menor consumo energético possível?

1.3 Justificativa

A realização desta pesquisa justifica-se pela necessidade de aumentar a eficiência dos processos industriais do setor sucroenergético, considerando que a competitividade das destilarias exige elevados níveis de controle operacional, produtividade e aproveitamento das matérias-primas. Em um mercado cada vez mais dinâmico e competitivo, a redução das perdas industriais constitui um fator fundamental para a maximização da rentabilidade das empresas e para o uso mais eficiente dos recursos disponíveis (Conab, 2024; EPE, 2024).

Nesse contexto, a vinhaça, embora seja tradicionalmente analisada principalmente sob as perspectivas ambiental e agronômica, também pode ser considerada um importante indicador da eficiência do processo de destilação, especialmente quando apresenta concentrações de etanol residual que evidenciam perdas do produto ao longo da operação industrial. A presença de álcool residual na vinhaça representa redução da recuperação global de etanol e aumento das perdas econômicas do processo, sendo, portanto, um importante parâmetro de controle operacional das destilarias (Christofoletti et al., 2013; Batista, 2008; Payne, 1989).

Além disso, a redução do consumo de vapor no processo de destilação é uma estratégia fundamental para aumentar a rentabilidade das usinas, pois permite liberar bagaço e vapor que seriam consumidos internamente para a cogeração de energia elétrica (Alves, 2014; Dias, 2008). O uso ineficiente de energia térmica resulta no consumo desnecessário de bagaço como combustível nas caldeiras, enquanto a otimização dessa demanda gera um excedente que pode ser comercializado junto à rede elétrica, criando uma receita adicional significativa para a unidade produtora (Alves, 2014; Dias, 2008; Silveira, 2021).

A pesquisa também se justifica pela necessidade de compreender de forma mais aprofundada os impactos técnicos, energéticos e econômicos associados às perdas de etanol presentes na vinhaça, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de controle operacional, otimização das condições de destilação e redução do desperdício de álcool. A melhoria da eficiência da etapa de destilação proporciona aumento do rendimento industrial, redução do consumo específico de vapor e melhor aproveitamento da matéria-prima processada (Kister, 1992; Seader; Henley; Roper, 2016).

A utilização da simulação computacional por meio do Aspen Plus® possibilita avaliar diferentes cenários operacionais sem a necessidade de intervenções diretas no processo industrial, permitindo analisar a influência de variáveis importantes e identificar condições que favoreçam maior recuperação de etanol e menor consumo energético. Além de reduzir custos experimentais, a simulação constitui uma importante ferramenta para representar, analisar e

otimizar processos químicos complexos, sendo amplamente empregada em estudos de engenharia química e no desenvolvimento de projetos industriais (Aspen Technology, 2023; Turton et al., 2018).

Dessa maneira, os resultados obtidos poderão contribuir para o aprimoramento da eficiência energética e operacional das destilarias, bem como para a redução das perdas econômicas associadas ao etanol não recuperado. A aplicação de ferramentas de modelagem e simulação fornece subsídios técnicos para tomada de decisão, otimização de processos e avaliação de alternativas operacionais com menor custo e maior segurança (Turton et al., 2018; Seader; Henley; Roper, 2016).

Por fim, o estudo apresenta relevância científica e prática para o setor sucroenergético, uma vez que busca relacionar os aspectos técnicos da operação de destilação com os impactos econômicos decorrentes das perdas de etanol na vinhaça. Os resultados poderão fornecer informações úteis para profissionais, pesquisadores e estudantes da área de Produção Sucroalcooleira, além de contribuir para uma melhor compreensão dos fatores que influenciam a eficiência da recuperação do etanol em processos industriais contínuos. Assim, a análise das perdas de etanol na vinhaça, associada à utilização de ferramentas de simulação de processos, representa uma abordagem relevante para o desenvolvimento de estratégias voltadas à melhoria da eficiência produtiva, à redução de desperdícios, ao aumento da eficiência energética e ao fortalecimento da competitividade do setor sucroenergético brasileiro (Conab, 2024; EPE, 2024; Cortez, 2010).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Avaliar e otimizar o desempenho operacional e energético de uma coluna de destilação de vinho para a produção de flegma por modelagem e simulação

1.4.2 Objetivos Específicos

- Fazer o levantamento, na literatura, dos dados necessários para desenvolver o modelo do processo no simulador
- Desenvolver o modelo da coluna de destilação de vinho A1A no simulador de processos

químicos

- Analisar a influência da vazão de vapor de aquecimento sobre a concentração de etanol na flegma e as perdas de etanol na vinhaça
- Determinar a vazão mínima de vapor necessária para garantir perdas de etanol na vinhaça dentro dos limites operacionais aceitáveis de 0,02% em massa.
- Analisar a influência da temperatura do vinho sobre a concentração de etanol na flegma e as perdas de etanol na vinhaça
- Determinar a demanda de vapor necessária para manter a perda de etanol na vinhaça dentro dos limites operacionais aceitáveis de 0,02% em massa e sob diferentes temperaturas de alimentação do vinho
- Calcular o índice de economia marginal de vapor (em vazão mássica de vapor por °C de pré-aquecimento) e a redução percentual total no consumo de utilidades quentes da coluna

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O setor sucroenergético e o etanol no Brasil

O setor sucroenergético ocupa posição estratégica na economia brasileira, sendo responsável pela produção de açúcar, etanol e bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar. Além da sua importância econômica, o setor contribui para a geração de empregos, desenvolvimento regional e diversificação da matriz energética nacional, consolidando o Brasil como um dos principais produtores mundiais de biocombustíveis (Conab, 2024; EPE, 2024).

Nas últimas décadas, a crescente preocupação com as mudanças climáticas e a redução das emissões de gases de efeito estufa impulsionou o uso de combustíveis renováveis. Nesse contexto, o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar destaca-se por apresentar elevada eficiência energética e menor intensidade de carbono quando comparado aos combustíveis fósseis, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados ao setor de transportes (Macedo; Seabra; Silva, 2008; IPCC, 2023).

A expansão do setor sucroenergético brasileiro foi impulsionada pelo Programa Nacional do Álcool (Proálcool), criado em 1975 com o objetivo de estimular a produção e o consumo de etanol combustível. Desde então, avanços tecnológicos na agricultura, na fermentação e na destilação proporcionaram aumento significativo da produtividade e da competitividade da indústria nacional (Rosillo-Calle; Cortez, 1998; Cortez, 2010).

Atualmente, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar caracteriza-se pelo aproveitamento integral da biomassa. O caldo é destinado à produção de açúcar e etanol, enquanto o bagaço é utilizado para geração de vapor e energia elétrica. Outros subprodutos, como a torta de filtro e a vinhaça, são empregados como insumos agrícolas, promovendo maior sustentabilidade e reduzindo o desperdício de recursos (Hugot, 1986; Payne, 1989; Conab, 2024).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2024), a produção brasileira de etanol mantém trajetória de crescimento, impulsionada pela expansão das áreas cultivadas, pelo aumento da eficiência industrial e pela maior demanda por combustíveis renováveis. Esse cenário reforça a necessidade de estudos voltados à otimização dos processos industriais, especialmente da etapa de destilação, responsável por parcela significativa do consumo energético das destilarias.

A busca por maior eficiência operacional tornou-se um dos principais desafios da indústria sucroenergética. Reduções no consumo específico de vapor, aumento da recuperação alcoólica e minimização das perdas de etanol representam fatores diretamente relacionados à

competitividade econômica das usinas. Dessa forma, a aplicação de técnicas de modelagem computacional e otimização de processos tem recebido crescente atenção tanto no meio acadêmico quanto na indústria (Turton et al., 2018; Seader; Henley; Roper, 2016).

2.2 O vinho fermentado

O vinho fermentado constitui a corrente de alimentação da etapa de destilação na produção de etanol. É o produto obtido ao final da fermentação alcoólica, processo no qual os açúcares fermentescíveis presentes no mosto são convertidos em etanol e dióxido de carbono pela ação de leveduras, principalmente da espécie *Saccharomyces cerevisiae*. Sua composição influencia diretamente a eficiência da destilação, uma vez que determina a quantidade de etanol disponível para recuperação e afeta o consumo energético do processo (Amorim, 2005; Stanbury; Whitaker; Hall, 2017).

Na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar ou do melaço, o vinho fermentado é constituído predominantemente por água e etanol, contendo ainda pequenas quantidades de açúcares residuais, leveduras, sais minerais, ácidos orgânicos, glicerol e outros metabólitos provenientes da fermentação. A proporção desses componentes depende das características da matéria-prima, da eficiência fermentativa, das condições operacionais e da qualidade microbiológica do processo (Walker, 2011; Amorim, 2005).

O teor alcoólico do vinho fermentado normalmente situa-se entre 7 e 12% (v/v), podendo variar em função da concentração inicial de açúcares, da eficiência da fermentação e das condições operacionais da unidade industrial. Vinhos com maior graduação alcoólica tendem a reduzir o consumo específico de vapor durante a destilação, pois uma menor quantidade de água precisa ser aquecida para recuperar o mesmo volume de etanol. Em contrapartida, vinhos mais diluídos aumentam a demanda energética da coluna e elevam a geração de vinhaça (Batista, 2008; Payne, 1989).

Além do teor alcoólico, propriedades como temperatura, densidade, viscosidade e pH exercem influência significativa sobre o desempenho da destilação. A temperatura de alimentação, por exemplo, interfere diretamente na carga térmica do refervedor, motivo pelo qual diversas destilarias utilizam sistemas de recuperação de calor para pré-aquecer o vinho utilizando a energia da vinhaça quente. Essa estratégia reduz o consumo específico de vapor e melhora a eficiência energética do processo (Kemp, 2016).

Outro aspecto relevante refere-se à composição química do vinho. Compostos como álcoois superiores, aldeídos, ésteres e ácidos orgânicos podem influenciar o comportamento do

equilíbrio líquido-vapor e afetar a qualidade do etanol produzido. Embora presentes em concentrações relativamente baixas, esses componentes devem ser considerados na análise do processo de destilação, especialmente em estudos de modelagem e simulação computacional (Perry; Green, 2008; Seader; Henley; Roper, 2016).

Nas destilarias brasileiras, o controle da qualidade do vinho fermentado é realizado continuamente por meio do monitoramento de parâmetros como teor alcoólico, pH, temperatura, acidez, concentração de açúcares residuais e viabilidade celular das leveduras. Esses indicadores permitem avaliar o desempenho da fermentação e fornecer informações importantes para o ajuste das condições operacionais da destilação, contribuindo para maior recuperação de etanol e redução das perdas industriais (Basso et al., 2008; Amorim, 2005).

No contexto deste trabalho, o vinho fermentado representa a principal corrente de alimentação da coluna de destilação A1A. Dessa forma, a correta caracterização de suas propriedades físicas e químicas é fundamental para a construção do modelo computacional e para a realização das análises de sensibilidade propostas, permitindo avaliar a influência das variáveis operacionais sobre a recuperação de etanol, o consumo energético e as perdas observadas na vinhaça.

2.3 Fundamentos da destilação e do equilíbrio líquido-vapor

O equilíbrio líquido-vapor (ELV) constitui o princípio fundamental da destilação e representa a condição em que as fases líquida e vapor coexistem sem alteração de suas composições ao longo do tempo. Nessa condição, a taxa de evaporação de cada componente é igual à taxa de condensação, estabelecendo um equilíbrio termodinâmico entre as fases. O conhecimento desse fenômeno é indispensável para o projeto, dimensionamento e operação de colunas de destilação, uma vez que determina a distribuição dos componentes entre as correntes de topo e de fundo (Smith; Van Ness; Abbott, 2018; Seader; Henley; Roper, 2016).

Na produção de etanol, o sistema água–etanol apresenta comportamento fortemente não ideal devido às interações intermoleculares entre seus componentes, principalmente às ligações de hidrogênio. Como consequência, a simples aplicação da Lei de Raoult não é suficiente para representar adequadamente o comportamento do sistema, sendo necessária a utilização de modelos termodinâmicos que considerem os desvios da idealidade (Prausnitz; Lichtenthaler; Azevedo, 1999).

Em sistemas ideais, a composição do vapor pode ser estimada a partir da Lei de Raoult associada à Lei de Dalton. Entretanto, para misturas hidroalcoólicas, a presença de fortes

interações moleculares provoca desvios positivos da idealidade, modificando significativamente o comportamento do equilíbrio líquido-vapor. Esses desvios influenciam diretamente a eficiência da separação e justificam a utilização de modelos termodinâmicos específicos em estudos de simulação computacional (Perry; Green, 2008).

Outro conceito importante é a volatilidade relativa, parâmetro que expressa a facilidade de separação entre dois componentes. Quanto maior a volatilidade relativa, maior a facilidade de separação por destilação. No sistema etanol–água, esse parâmetro varia conforme a temperatura, a pressão e a composição da mistura, tornando a separação progressivamente mais difícil à medida que a concentração de etanol aumenta (Seader; Henley; Roper, 2016).

Uma característica marcante da mistura água–etanol é a formação de um azeótropo, condição na qual líquido e vapor apresentam praticamente a mesma composição. Em pressão atmosférica, esse fenômeno ocorre em torno de 95,6% (m/m) de etanol, impedindo que a destilação convencional produza etanol com pureza superior a esse valor. Por essa razão, a produção de etanol anidro requer processos complementares de desidratação, como destilação extrativa, destilação azeotrópica ou peneiras moleculares (Kister, 1992; Perry; Green, 2008).

Além da composição da mistura, fatores operacionais como temperatura, pressão e composição da alimentação influenciam diretamente o equilíbrio líquido-vapor. Alterações nessas variáveis modificam as pressões de vapor dos componentes e, consequentemente, a distribuição entre as fases líquida e vapor. Dessa forma, pequenas variações operacionais podem provocar mudanças significativas na eficiência da coluna de destilação (McCabe; Smith; Harriott, 2005).

Na indústria sucroenergética, a compreensão do equilíbrio líquido-vapor é essencial para otimizar a recuperação de etanol e reduzir perdas na vinhaça. O correto conhecimento do comportamento termodinâmico da mistura permite selecionar modelos matemáticos adequados para simulação, prever perfis de temperatura ao longo da coluna e avaliar o efeito de diferentes condições operacionais sobre o desempenho da destilação (Prausnitz; Lichtenthaler; Azevedo, 1999).

No presente trabalho, os fundamentos do equilíbrio líquido-vapor fornecem a base teórica para a modelagem computacional da coluna A1A desenvolvida no Aspen Plus®. A representação adequada das propriedades termodinâmicas da mistura água–etanol é indispensável para obtenção de resultados confiáveis nas análises de sensibilidade realizadas, permitindo avaliar a influência da temperatura de alimentação do vinho e da vazão de vapor sobre a recuperação de etanol e o consumo energético da coluna.

2.4 Sistema industrial de destilação e a coluna A1A

A coluna de destilação de vinho, normalmente denominada coluna A1A ilustrada pela Figura 1, constitui a primeira etapa do sistema de recuperação do etanol proveniente da fermentação alcoólica. Sua principal função é promover o esgotamento do vinho fermentado, concentrando o etanol na corrente de topo, denominada flegma, enquanto a corrente de fundo, conhecida como vinhaça, deve apresentar a menor concentração possível de álcool residual. A eficiência dessa operação influencia diretamente o rendimento industrial da destilaria, o consumo específico de vapor e o volume de perdas de etanol ao longo do processo (Batista, 2008; Payne, 1989).

O vinho fermentado alimentado à coluna contém predominantemente água e etanol, além de diversos compostos secundários provenientes da fermentação, como álcoois superiores, aldeídos, ésteres, ácidos orgânicos, sais minerais e pequenas quantidades de sólidos em suspensão. Durante a operação da coluna, essa mistura é submetida ao aquecimento por vapor de baixa pressão no refervedor, promovendo a vaporização preferencial dos componentes mais voláteis. O vapor ascendente estabelece contato contínuo com o líquido descendente em cada prato da coluna, permitindo o enriquecimento gradual da fase vapor em etanol (Foust et al., 1982; Mccabe; Smith; Harriott, 2005).

O funcionamento da coluna baseia-se na transferência simultânea de calor e massa. À medida que o vapor sobe pelos pratos, ocorre condensação parcial e evaporação do líquido presente em cada estágio, estabelecendo sucessivos equilíbrios líquido-vapor. Esse mecanismo aumenta progressivamente a concentração de etanol na corrente de topo e reduz sua concentração na corrente de fundo. Quanto maior a eficiência de cada estágio, menor será a quantidade de etanol arrastada para a vinhaça (Seader; Henley; Roper, 2016).

A alimentação do vinho ocorre em um prato intermediário da coluna, cuja posição é definida durante o projeto do equipamento visando maximizar a eficiência da separação. Acima do ponto de alimentação localiza-se a seção de retificação, responsável pelo enriquecimento da corrente de vapor. Abaixo desse ponto encontra-se a seção de esgotamento, cuja finalidade é remover o máximo possível de etanol do líquido antes de sua descarga como vinhaça. O correto dimensionamento dessas regiões é essencial para garantir elevada recuperação alcoólica e baixo consumo energético (Kister, 1992).

A flegma produzida na corrente de topo apresenta concentração alcoólica significativamente superior à do vinho fermentado, sendo posteriormente encaminhada às colunas de retificação, onde será produzida a graduação especificada para o etanol hidratado ou

para a alimentação da unidade de desidratação destinada à produção de etanol anidro. Assim, a qualidade da flegma obtida na coluna A1A influencia diretamente o desempenho das etapas subsequentes do processo (Payne, 1989).

A vinhaça, por sua vez, constitui a corrente de fundo da coluna e representa o principal efluente líquido da produção de etanol. Para cada litro de etanol produzido são gerados aproximadamente 10 a 15 litros de vinhaça, dependendo da concentração alcoólica do vinho e das condições operacionais da destilaria. Embora esse efluente seja amplamente utilizado na fertirrigação devido ao seu elevado teor de potássio e matéria orgânica, a presença de etanol residual representa perda econômica e indica redução da eficiência da recuperação alcoólica (Christofoletti et al., 2013; Fuess, 2013).

Do ponto de vista operacional, diversos parâmetros influenciam diretamente o desempenho da coluna A1A. Entre os mais importantes destacam-se:

- vazão de alimentação do vinho;
- graduação alcoólica do vinho fermentado;
- temperatura de alimentação;
- pressão interna da coluna;
- vazão de vapor no refervedor;
- eficiência dos pratos;
- perdas térmicas;
- composição da alimentação.

Alterações em qualquer uma dessas variáveis modificam simultaneamente os perfis de temperatura, a composição das correntes de topo e fundo e o consumo energético da unidade (Seader; Henley; Roper, 2016).

Entre essas variáveis, a vazão de vapor de aquecimento merece destaque por representar o principal insumo energético da destilação. O aumento da vazão de vapor favorece a evaporação do etanol e reduz sua concentração na vinhaça. Entretanto, fornecimentos excessivos podem elevar significativamente o consumo energético da planta, aumentando os custos operacionais sem proporcionar ganhos proporcionais na eficiência de separação. Dessa forma, torna-se necessário determinar condições ótimas de operação que conciliem máxima recuperação de etanol e mínimo consumo de vapor (Kister, 1992).

Outro parâmetro relevante é a temperatura do vinho alimentado. Correntes alimentadas em temperaturas mais elevadas requerem menor quantidade de calor para atingir as condições de operação da coluna, reduzindo a carga térmica do refervedor. Em razão disso, muitas destilarias utilizam sistemas de integração energética, empregando trocadores de calor entre a vinhaça

quente e o vinho frio, reduzindo significativamente o consumo específico de vapor (Kemp, 2016).

Além da eficiência energética, a operação adequada da coluna influencia diretamente a qualidade da flegma produzida. Concentrações inadequadas de etanol ou excesso de impurezas podem comprometer o desempenho das colunas subsequentes de retificação e aumentar o consumo energético global da destilaria. Portanto, a estabilidade operacional da coluna A1A é indispensável para assegurar elevado rendimento industrial e qualidade do produto final (Batista, 2008).

Nas últimas décadas, estudos envolvendo modelagem matemática e simulação computacional têm contribuído significativamente para o entendimento do comportamento das colunas de destilação. A utilização de simuladores permite representar rigorosamente o equilíbrio líquido-vapor, calcular perfis de temperatura e composição, estimar cargas térmicas e avaliar diferentes cenários operacionais sem necessidade de intervenções na planta industrial. Essa abordagem reduz custos experimentais e oferece suporte técnico para otimização das condições de operação (Marquini et al., 2007; Aspen Technology, 2023).

No presente trabalho, a coluna A1A foi modelada computacionalmente com o objetivo de avaliar a influência da temperatura de alimentação do vinho e da vazão de vapor de aquecimento sobre a recuperação de etanol, a composição da flegma, as perdas observadas na vinhaça e o consumo energético do processo. A análise desses parâmetros permite identificar condições operacionais que aumentem a eficiência da destilação e contribuam para maior competitividade da indústria sucroenergética.

2.5 A vinhaça: subproduto, impacto ambiental e perdas de etanol

A vinhaça é o principal efluente líquido gerado durante a produção de etanol, sendo obtida na corrente de fundo das colunas de destilação após a separação do etanol presente no vinho fermentado. Caracteriza-se por apresentar elevada carga orgânica, baixo pH, alta temperatura na saída da coluna e concentrações significativas de potássio, cálcio, magnésio e matéria orgânica dissolvida. Em razão dessas características, sua gestão representa um dos principais desafios ambientais e operacionais da indústria sucroenergética (Christofoletti et al., 2013; Fuess; Garcia, 2014).

O volume de vinhaça produzido está diretamente relacionado à concentração alcoólica do vinho fermentado e à eficiência do processo de destilação. Em condições industriais, estima-se que sejam gerados aproximadamente 10 a 15 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido, embora esse valor possa variar conforme a matéria-prima utilizada, o tipo de destilaria e as

condições operacionais da unidade (Conab, 2024; Elia Neto; Nakahodo, 1995).

Do ponto de vista agronômico, a vinhaça é amplamente utilizada na fertirrigação dos canaviais devido ao seu elevado teor de potássio e matéria orgânica, contribuindo para a reposição de nutrientes no solo e reduzindo parcialmente a necessidade de fertilizantes minerais. Entretanto, sua aplicação deve ser realizada de forma criteriosa, respeitando critérios técnicos e ambientais, uma vez que aplicações excessivas podem provocar lixiviação de nutrientes, salinização do solo e contaminação de águas superficiais e subterrâneas (Cetesb, 2015; Christofoletti et al., 2013).

Além da sua importância ambiental, a vinhaça representa um importante indicador do desempenho operacional da destilaria. A presença de etanol residual nessa corrente evidencia perdas de produto durante a destilação e redução da eficiência da recuperação alcoólica. Dessa forma, o monitoramento da concentração de etanol na vinhaça constitui uma ferramenta de controle operacional utilizada para avaliar o desempenho das colunas de destilação e identificar oportunidades de melhoria no processo (Batista, 2008; Payne, 1989).

Diversos fatores influenciam a concentração de etanol residual na vinhaça, entre eles a vazão de vapor de aquecimento, a temperatura de alimentação do vinho, a eficiência dos pratos da coluna, a composição do vinho fermentado e as condições de operação do sistema de destilação. Alterações nesses parâmetros modificam o equilíbrio líquido-vapor e podem aumentar ou reduzir a eficiência da separação, afetando diretamente o rendimento industrial (Seader; Henley; Roper, 2016).

Nos últimos anos, estudos têm buscado alternativas para agregar valor à vinhaça, reduzindo seu impacto ambiental e ampliando seu aproveitamento industrial. Entre as principais aplicações destacam-se a produção de biogás por digestão anaeróbia, a concentração para redução do volume transportado, o reaproveitamento de nutrientes e a utilização em processos integrados de biorrefinaria. Essas estratégias contribuem para aumentar a sustentabilidade do setor sucroenergético e reduzir os custos associados ao manejo desse efluente (Fuess; Garcia, 2014; Moraes et al., 2015).

No contexto deste trabalho, a concentração de etanol na vinhaça foi utilizada como um dos principais indicadores de desempenho da coluna A1A. A análise dessa variável permitiu avaliar a influência das condições operacionais estudadas sobre a eficiência da recuperação alcoólica, contribuindo para identificar cenários de operação que conciliem menor perda de etanol e maior eficiência energética.

2.6 Eficiência energética e integração térmica na destilação

A etapa de destilação representa uma das operações de maior consumo energético na produção de etanol. A energia necessária para promover a vaporização da mistura hidroalcoólica é fornecida, predominantemente, por vapor de baixa pressão gerado nas caldeiras da usina. Dessa forma, a eficiência energética das colunas de destilação exerce influência direta sobre os custos operacionais, o aproveitamento do bagaço de cana e a competitividade da unidade industrial (Kister, 1992; Seader; Henley; Roper, 2016; Kemp, 2016).

Nas destilarias modernas, o vapor utilizado no processo é produzido a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar em caldeiras de alta eficiência. Além de suprir as necessidades térmicas da planta, esse vapor também é empregado na geração de energia elétrica por meio de turbinas de contrapressão ou de condensação. Assim, qualquer redução no consumo de vapor das colunas de destilação representa uma oportunidade para aumentar a disponibilidade de energia destinada à cogeração ou reduzir o consumo de biomassa nas caldeiras (Dias et al., 2012; EPE, 2024; Alves, 2014).

O consumo específico de vapor depende de diversos fatores, entre eles a concentração alcoólica do vinho fermentado, a eficiência das colunas de destilação, a vazão de alimentação, a pressão de operação e a temperatura da corrente alimentada à coluna de esgotamento. Pequenas alterações nessas variáveis podem provocar diferenças significativas na demanda energética do processo (McCabe; Smith; Harriott, 2005; Seader; Henley; Roper, 2016).

Entre as estratégias empregadas para reduzir o consumo de vapor destaca-se a integração térmica entre as correntes do processo. Esse conceito baseia-se no aproveitamento da energia contida em correntes quentes para aquecer correntes frias, reduzindo a necessidade de fornecimento externo de calor. Na produção de etanol, a principal aplicação dessa técnica consiste no pré-aquecimento do vinho fermentado utilizando a energia térmica presente na vinhaça que deixa a coluna de destilação em temperaturas elevadas (Kemp, 2016; Turton et al., 2018).

Durante a operação da coluna A1A, a vinhaça é descarregada normalmente em temperaturas superiores a 90 °C. Caso essa corrente seja encaminhada diretamente ao sistema de resfriamento, grande parte dessa energia térmica será desperdiçada. A utilização de trocadores de calor permite recuperar parte desse calor sensível, transferindo-o para o vinho frio antes de sua alimentação na coluna (Kemp, 2016; Perry; Green, 2008).

O pré-aquecimento do vinho reduz a quantidade de energia necessária para elevar sua temperatura até as condições de ebulição no interior da coluna. Consequentemente, a demanda de vapor vivo diminui, proporcionando economia de combustível nas caldeiras e aumento da eficiência energética do processo. Além da redução dos custos operacionais, essa estratégia

contribui para diminuir as emissões associadas à geração de vapor e melhorar o aproveitamento global da energia disponível na usina (Kemp, 2016; Turton et al., 2018).

Outro benefício importante da integração térmica está relacionado à estabilidade operacional da destilação. Alimentações com temperatura mais elevada reduzem oscilações térmicas no interior da coluna, favorecendo o estabelecimento do equilíbrio líquido-vapor e proporcionando maior uniformidade nos perfis de temperatura ao longo dos estágios de separação. Como consequência, observa-se maior estabilidade na composição das correntes de topo e de fundo (Seader; Henley; Roper, 2016; Kister, 1992).

Entretanto, o aumento da temperatura de alimentação não pode ser realizado indiscriminadamente. Temperaturas excessivamente elevadas podem alterar o comportamento hidráulico da coluna, modificar as condições de equilíbrio líquido-vapor e reduzir a eficiência global da separação. Assim, torna-se necessário determinar uma faixa ótima de pré-aquecimento que proporcione redução do consumo energético sem comprometer a recuperação do etanol (Kister, 1992; McCabe; Smith; Harriott, 2005).

Além da temperatura da alimentação, a vazão de vapor injetada na base da coluna constitui uma das principais variáveis operacionais da destilação. O vapor fornece a energia necessária para promover a vaporização parcial do vinho e estabelecer o fluxo ascendente responsável pelo contato com o líquido descendente. A quantidade de vapor empregada deve ser cuidadosamente ajustada para garantir elevada recuperação de etanol com o menor consumo energético possível (Seader; Henley; Roper, 2016; Kister, 1992).

Quando a vazão de vapor é inferior à necessária, a vaporização do etanol torna-se insuficiente, aumentando sua concentração na vinhaça e reduzindo a eficiência da recuperação alcoólica. Por outro lado, o fornecimento excessivo de vapor promove pequeno ganho adicional na recuperação do etanol, porém com aumento significativo do consumo energético. Dessa forma, existe uma condição ótima de operação que concilia eficiência de separação e economia de utilidades (Kister, 1992; McCabe; Smith; Harriott, 2005).

Outro aspecto relevante refere-se à cogeração de energia elétrica. Nas usinas sucroenergéticas, o vapor economizado na destilação pode ser direcionado às turbinas de geração de energia, aumentando a produção de eletricidade destinada ao consumo interno ou à comercialização do excedente. Dessa forma, a redução do consumo de vapor produz benefícios que ultrapassam a própria etapa de destilação, contribuindo para o aumento da rentabilidade global da unidade industrial (Dias et al., 2012; EPE, 2024; Alves, 2014).

No contexto deste trabalho, a avaliação da temperatura de alimentação do vinho e da vazão de vapor de aquecimento constitui o eixo central das análises de sensibilidade realizadas

na coluna A1A. A investigação dessas variáveis permite determinar condições operacionais que reduzam simultaneamente as perdas de etanol na vinhaça e o consumo específico de vapor, fornecendo subsídios técnicos para a otimização energética da destilaria. Assim, a integração térmica e o uso racional das utilidades representam estratégias fundamentais para elevar a eficiência operacional, reduzir custos de produção e aumentar a competitividade do setor sucroenergético brasileiro (Turton et al., 2018; Seader; Henley; Roper, 2016; EPE, 2024).

2.7 Modelagem e simulação de processos

O avanço da capacidade computacional e o desenvolvimento de softwares especializados transformaram a modelagem e a simulação em ferramentas fundamentais para o projeto, a análise e a otimização de processos industriais. Na indústria sucroenergética, essas ferramentas permitem representar matematicamente operações complexas, prever o comportamento de equipamentos em diferentes condições operacionais e avaliar alternativas de melhoria sem a necessidade de intervenções diretas na planta industrial (Turton et al., 2018; Aspen Technology, 2023).

A modelagem de processos consiste na construção de uma representação matemática capaz de descrever o comportamento físico, químico e termodinâmico de um sistema real. Essa representação é desenvolvida a partir dos princípios de conservação da massa e da energia, associados às relações de equilíbrio termodinâmico e aos fenômenos de transferência de calor e massa. Após sua validação, o modelo pode ser empregado para reproduzir o desempenho do processo e prever seu comportamento diante de alterações operacionais (Smith; Van Ness; Abbott, 2018; Seader; Henley; Roper, 2016).

A simulação computacional utiliza esses modelos matemáticos para calcular o comportamento do sistema em diferentes condições de operação. Alterações em variáveis como vazão de alimentação, temperatura, pressão, composição das correntes e fornecimento de vapor podem ser avaliadas de maneira sistemática, permitindo identificar tendências, limitações operacionais e oportunidades de otimização. Essa abordagem reduz a necessidade de testes industriais, diminui riscos operacionais e fornece suporte técnico à tomada de decisões de engenharia (Turton et al., 2018; Kemp, 2016).

Entre os softwares utilizados para a simulação de processos químicos destaca-se o Aspen Plus®, empregado em universidades, centros de pesquisa, empresas de engenharia e unidades industriais. O programa permite modelar processos envolvendo separações, reações químicas, trocas térmicas, bombeamento, compressão e integração energética, utilizando uma ampla base de dados de propriedades físico-químicas e diferentes modelos termodinâmicos (Aspen

Technology, 2023).

Uma das principais vantagens do Aspen Plus® é a capacidade de representar sistemas multicomponentes complexos, como aqueles encontrados na produção de etanol. O software realiza cálculos de balanços de massa e energia, perfis de temperatura, composição das correntes, cargas térmicas e consumo de utilidades, fornecendo informações relevantes para a avaliação do desempenho de equipamentos e processos industriais (Aspen Technology, 2023; Turton et al., 2018).

No caso específico da destilação, o Aspen Plus® dispõe do modelo RadFrac, destinado à simulação rigorosa de colunas de separação em múltiplos estágios. Esse modelo permite representar operações de destilação, absorção, stripping e outras separações, resolvendo simultaneamente os balanços de massa e energia e as relações de equilíbrio em cada estágio da coluna (Aspen Technology, 2023; Seader; Henley; Roper, 2016).

O funcionamento do modelo RadFrac baseia-se na resolução das equações conhecidas como MESH, sigla formada pelas expressões em inglês *Material balance*, *Equilibrium relations*, *Summation equations* e *Heat balance*. Essas equações representam, respectivamente, os balanços de massa, as relações de equilíbrio entre as fases, os somatórios das frações molares e os balanços de energia. Sua resolução simultânea permite determinar temperaturas, vazões, composições e cargas térmicas ao longo dos estágios da coluna (Seader; Henley; Roper, 2016; Smith; Van Ness; Abbott, 2018).

Os balanços de massa asseguram a conservação da matéria em cada estágio, enquanto as relações de equilíbrio determinam a distribuição dos componentes entre as fases líquida e vapor. As equações de somatório garantem que a soma das frações molares seja igual à unidade em cada fase, e os balanços de energia representam os efeitos térmicos associados à vaporização, à condensação e às trocas de calor no equipamento (Seader; Henley; Roper, 2016).

A precisão dos resultados obtidos por simulação depende significativamente da escolha do modelo termodinâmico utilizado para representar o equilíbrio líquido-vapor. Como a mistura água–etanol apresenta comportamento não ideal devido às interações intermoleculares entre seus componentes, torna-se necessária a utilização de modelos capazes de representar os desvios em relação à idealidade (Prausnitz; Lichtenthaler; Azevedo, 1999; Perry; Green, 2008).

Entre os modelos termodinâmicos empregados para sistemas hidroalcoólicos destacam-se o NRTL — Non-Random Two-Liquid, o Wilson e o UNIQUAC. Esses modelos utilizam coeficientes de atividade para representar a não idealidade da fase líquida e ajustar o comportamento calculado aos dados experimentais de equilíbrio. A escolha do modelo influencia diretamente os perfis de temperatura, as composições calculadas e as estimativas de recuperação

de etanol (Renon; Prausnitz, 1968; Prausnitz; Lichtenthaler; Azevedo, 1999).

Para sistemas formados por água e etanol, o modelo NRTL é frequentemente utilizado por apresentar capacidade de representar misturas líquidas fortemente não ideais e componentes polares. Desenvolvido por Renon e Prausnitz (1968), o modelo considera a composição local das moléculas na fase líquida e as diferenças de energia de interação entre os componentes, constituindo uma alternativa adequada para estudos de equilíbrio líquido-vapor de misturas hidroalcoólicas.

Além da escolha do modelo termodinâmico, a qualidade da simulação depende da correta definição das condições operacionais e das características da alimentação. Informações como composição do vinho fermentado, temperatura, pressão, vazão mássica, número de estágios, posição da alimentação, vazão de vapor e especificações das correntes de saída devem representar adequadamente o sistema estudado para que os resultados sejam compatíveis com o comportamento esperado do processo (Turton et al., 2018; Aspen Technology, 2023).

Após a construção e a convergência do modelo, podem ser realizadas análises de sensibilidade para investigar a influência de diferentes variáveis sobre o desempenho do processo. Nesse tipo de análise, uma variável operacional é modificada dentro de uma faixa definida, enquanto os efeitos sobre parâmetros de interesse são calculados pelo simulador. Entre as respostas avaliadas podem ser incluídos o consumo de vapor, a recuperação de etanol, a concentração das correntes e a carga térmica dos equipamentos (Aspen Technology, 2023; Turton et al., 2018).

A análise de sensibilidade constitui uma ferramenta importante para a otimização de processos, pois permite identificar regiões operacionais que conciliem maior eficiência de separação e menor consumo energético. Em vez de depender exclusivamente de testes industriais, que podem envolver custos elevados e riscos operacionais, diferentes cenários podem ser avaliados previamente em ambiente computacional (Kister, 1992; Turton et al., 2018).

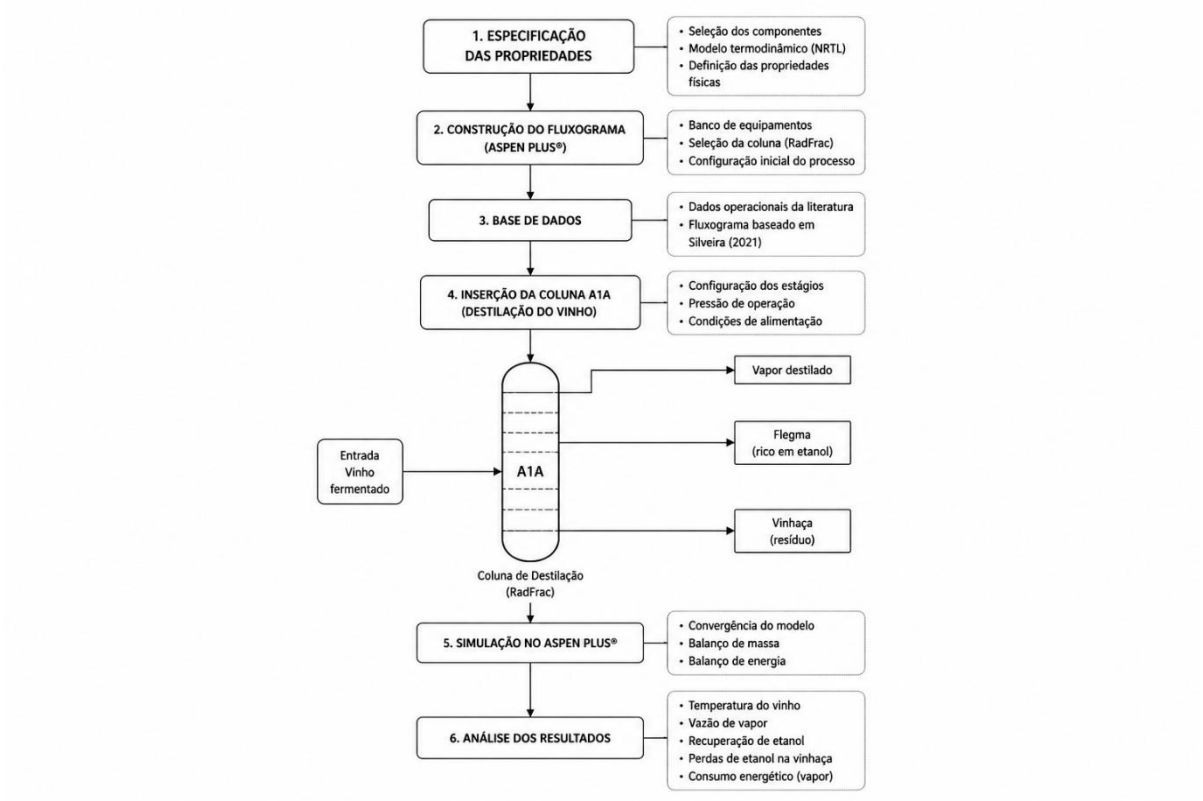
No presente trabalho, a coluna A1A foi modelada no Aspen Plus® utilizando o bloco RadFrac para representar o processo de destilação em múltiplos estágios. A partir do modelo desenvolvido, foram realizadas análises de sensibilidade envolvendo a temperatura de alimentação do vinho fermentado e a vazão de vapor de aquecimento, buscando identificar condições capazes de reduzir simultaneamente as perdas de etanol na vinhaça e o consumo energético da unidade. Dessa forma, a simulação computacional foi utilizada como ferramenta para interpretar o comportamento da coluna e avaliar alternativas de otimização do processo. A metodologia descrita está alinhada aos objetivos do trabalho, que incluem avaliar essas duas variáveis e determinar condições de menor demanda de vapor.

3. METODOLOGIA

3.1 Abordagem do Estudo

O presente trabalho foi desenvolvido por meio de simulação computacional da operação de destilação do vinho na coluna A1A do processo de produção de etanol hidratado. A simulação permitiu avaliar o comportamento do processo diante de variações na vazão do vapor de aquecimento e na temperatura do vinho analisando o impacto dessas variações sobre a fração mássica de etanol nas correntes de flegma vapor e vinhaça. A sequência de etapas de desenvolvimento da metodologia seguiu o fluxograma exposto na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia



3.2 Pesquisa Bibliográfica

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica, em livros, teses de doutorado, dissertações de mestrado e artigos científicos, para compreensão do tema estudado e para o levantamento dos dados necessários à simulação. A pesquisa por artigos científicos foi realizada em plataformas confiáveis como a Periódicos Capes, Web of Science^{TM}, (Thomson Reuters,

New York, USA), ScienceDirect® (Elsevier Inc, Waltham, MA, USA) e Scopus® (Elsevier Inc, Waltham, MA, USA) e Google Acadêmico.

3.3 Definição dos Componentes do Processo

Nesta etapa, foi necessário especificar, no ambiente de propriedades do simulador, todos os componentes químicos que foram utilizados no processo de destilação do vinho na coluna A1A do processo de produção do etanol hidratado. Portanto, foram especificados todos os componentes químicos que fazem parte da composição do vinho produzido a partir da fermentação do mosto de cana-de-açúcar.

A Tabela 1 a seguir mostra todos os componentes químicos especificados no simulador.

Tabela 1 – Componentes químicos especificados no simulador

Componente químico	Nomenclatura em inglês	Molécula
Etanol	ETHANOL	C_2H_6O
Água	WATER	H_2O
Ácido acético	ACETIC-ACID	$C_2H_4O_2$
álcool isoamílico	3-METHYL-1-BUTANOL	$C_5H_{12}O$
propanol	1-PROPANOL	C_3H_8O
metanol	METHANOL	CH_4O
Isobutanol	ISOBUTANOL	$C_4H_{10}O$

3.4 Escolha dos Modelos Termodinâmicos Adequados

Pesquisou-se na literatura o modelo termodinâmico mais adequado ao processo estudado e especificou-se, no ambiente de propriedades do simulador, o modelo adotado para calcular o coeficiente de atividade da mistura azeotróprica etanol-água.

A seleção adequada de modelos termodinâmicos para realizar a simulação do processo é extremamente importante para que os resultados obtidos na simulação sejam confiáveis e, portanto, representem a realidade.

O pacote termodinâmico selecionado para o cálculo do coeficiente de atividade foi o modelo NRTL (Non-Random Two-Liquid), amplamente empregado na simulação de sistemas líquidos não ideais e frequentemente utilizado em processos envolvendo misturas orgânicas, álcoois e compostos graxos.

3.5 Construção do Fluxograma do Processo

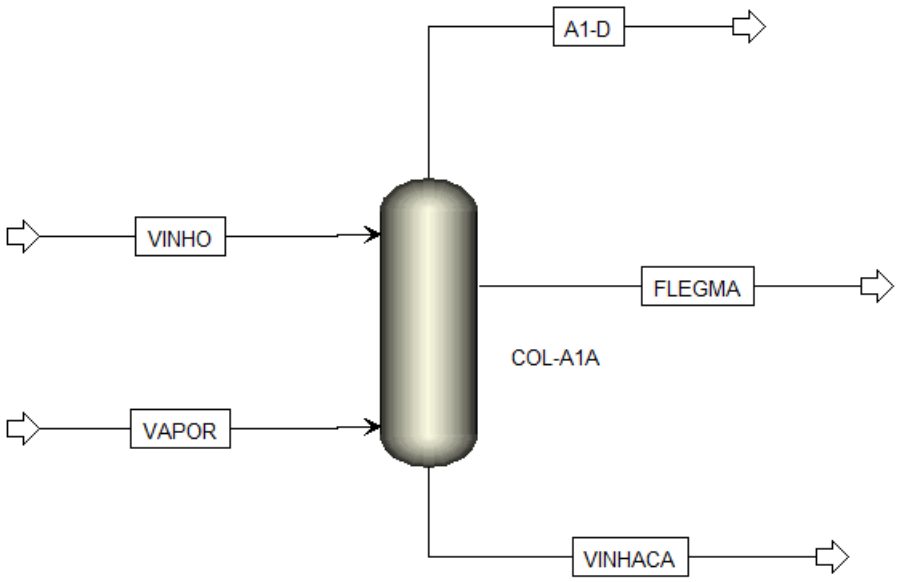
Após as etapas de especificação das propriedades, deu-se início a construção do fluxograma da operação de destilação do vinho através da coluna A1A do processo de produção do etanol hidratado. O simulador apresenta um banco com diversos modelos de equipamentos que são utilizados nas indústrias.

Baseado em dados disponíveis na literatura e nos modelos de equipamentos disponíveis no banco do simulador, construiu-se o fluxograma do processo. Neste trabalho, o fluxograma do processo foi construído baseando-se nos dados disponíveis trabalho de Silveira (2021).

Além de adicionar a coluna de destilação que faz parte do fluxograma do processo estudado, foi necessário adicionar as correntes de material que indicam o fluxo de matéria. Nesse caso, foram adicionadas as correntes de entrada de vinho e as correntes de saída de vapor destilado, de flegma e de vinhaça.

A Figura 3 mostra o fluxograma do processo desenvolvido no simulador.

Figura 3 – Fluxograma do processo



Fonte: Autor, (2026).

3.6 Definição das Condições Operacionais dos Equipamentos e Especificação das Correntes de Alimentação

A etapa seguinte da metodologia consistiu em especificar as condições operacionais exigidas para a coluna de destilação A1A que compõe o fluxograma do processo.

As especificações da corrente de alimentação de vinho e vapor também foram definidas. Neste caso, especificou-se a temperatura, a pressão, a vazão e a composição dessas correntes de alimentação. Todas as condições operacionais e especificações adotadas na simulação foram baseadas em valores reportados no trabalho de Silveira (2021).

3.6.1 Condições operacionais

As condições operacionais da coluna de destilação A1A que foram especificadas no simulador estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições e especificações da simulação

	Equipamento
	COLUNA A1A
Número de estágios	23
Estágio de alimentação da corrente VINHO	1
Estágio de alimentação da corrente VAPOR	23
Vazão da corrente FLEGMA (kg/h)	34000
Pressão do estágio 1 (bar)	1,2364
Perda de carga na coluna (bar)	0,0364

3.6.2 Especificação das correntes de alimentação

As correntes de alimentação do processo foram especificadas com os valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização das correntes de alimentação

	VINHO	**VAPOR**
Temperatura (°C)	94	125
Pressão (bar)	1,5	1,5
Vazão mássica (kg/h)	250000	40000
Fração mássica		

Etanol	0,0684	0
Água	0,93116	1
Ácido acético	0,00034	0
Álcool isoamílico	2,6e-5	0
Propanol	4,4e-5	0
Metanol	3e-8	0
Isobutanol	3,1e-5	0

3.7 Análises de Sensibilidade Paramétricas

Após a execução e simulação do caso base, com os dados disponibilizados no trabalho de Silveira (2021), foram realizadas três análises de sensibilidade paramétricas para avaliar o efeito das variações da vazão de vapor de aquecimento e da temperatura do vinho sobre a fração mássica de etanol nas correntes FLEGMA e VINHACA. Os cenários das análises de sensibilidade estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Cenários das análises de sensibilidade

Análise	Variável Manipulada	Variáveis Resposta
1ª Análise (Temperatura do vinho fixa)	Vazão de Vapor (35.000 a 45.000 kg/h)	Fração mássica de etanol na Vinhaça e na Flegma
2ª Análise (Vazão do Vapor fixa)	Temperatura do vinho (88°C a 100°C)	Fração mássica de etanol na Vinhaça e na Flegma
3ª Análise (com Design Spec)	Temperatura do vinho (88°C a 100°C)	Vazão de vapor requerida, Fração mássica de etanol na Vinhaça e na Flegma

Na primeira análise de sensibilidade paramétrica, foi analisado o efeito da variação da vazão do vapor de aquecimento injetado na coluna sobre a fração mássica de etanol que sai nas correntes FLEGMA e VINHACA. Também foi possível descobrir qual é a vazão de vapor mínima necessária para manter a perda de etanol na vinhaça dentro da meta da usina (no máximo 0,02% (fração mássica = 0,0002)). Dessa forma, a vazão mássica da corrente VAPOR foi variada de 35.000 kg/h até 45.000 kg/hr com um incremento de variação de 500 kg/hr.

Na segunda análise de sensibilidade paramétrica, foi analisado o efeito da variação da temperatura do vinho (mantendo a vazão do vapor de aquecimento contante = 40.000 kg/h) sobre a fração mássica de etanol que sai nas correntes FLEGMA e VINHACA. Também foi

possível descobrir qual é a temperatura mínima do vinho necessária para manter a perda de etanol na vinhaça dentro da meta da usina (no máximo 0,02% (fração mássica = 0,0002)). Dessa forma, a temperatura do vinho foi variada de 88°C até 100°C com um incremento de variação de 1°C.

Na terceira análise de sensibilidade foi inserido um bloco de especificação de projeto (*Design Spec*) para manter a perda de etanol na vinhaça fixa em 0,02% em massa. A partir da variação da temperatura de alimentação do vinho entre 88°C e 100°C com um incremento de variação de 1°C, esse bloco calculou automaticamente a demanda mínima de vapor necessária para alcançar especificação máxima da perda de etanol na vinhaça. Observou-se também as frações mássicas de etanol nas correntes de FLEGMA e VINHACA para cada temperatura analisada.

3.8 Formulação Matemática e Avaliação Energética

Nesta etapa, utilizou-se equações matemáticas para realizar as avalições energéticas a partir dos resultados gerados pelo simulador.

Para quantificar o ganho de eficiência energética decorrente do pré-aquecimento da carga, definiu-se o Índice de Economia Marginal de Vapor (EMV), que expressa a taxa de variação no consumo de vapor por grau Celsius incremental de temperatura do vinho alimentado, conforme a Equação (1):

$$\text{EMV} = \frac{\dot{m}_{\text{vapor, } T_1} - \dot{m}_{\text{vapor, } T_2}}{T_{\text{vinho, } T_2} - T_{\text{vinho, } T_1}} \quad \left[\frac{\text{kg/h}}{^{\circ}\text{C}}\right] \qquad (1)$$

Onde $\dot{m}_{\text{vapor, } T_1}$ é a vazão de vapor inicial no cenário de referência (kg/h), $\dot{m}_{\text{vapor, } T_2}$ é a vazão de vapor final no cenário pré-aquecido (kg/h), $T_{\text{vinho, } T_1}$ é a temperatura de alimentação inicial do vinho no cenário de referência (˚C) e $T_{\text{vinho, } T_2}$ é a temperatura de alimentação final do vinho no cenário pré-aquecido (˚C).

A redução percentual no consumo de utilidades quentes (ΔQ), decorrente da integração térmica no pré-aquecimento do vinho, foi calculada com base na variação do consumo de vapor, conforme expressa a Equação (2):

$$\Delta Q_{utilidades} = \left(1 - \frac{\dot{m}_{Vapor,T_2}}{\dot{m}_{Vapor,T_1}}\right) \times 100\% \qquad (2)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados da simulação do caso base

A simulação do caso base foi realizada conforme os dados informados na Tabela 3 presente no item 3.6.2 da matodologia.

A Tabela 5 abaixo apresenta os resultados da simulação do caso base, onde é possível observar os dados de fase, temperatura, pressão, vazão mássica total e fração mássica dos componentes das correntes de saída FLEGMA, A1-D e VINHACA.

Tabela 5 – Resultados das correntes FLEGMA, A1-D e VINHACA para o caso base.

	FLEGMA	**A1-D**	**VINHACA**
Fase	Vapor	Vapor	Líquido
Temperatura (°C)	99,2854	97,9388	111,407
Pressão (bar)	1,21364	1,20	1,50008
Vazão mássica total (kg/h)	34.000	8.272,14	247.728
Fração mássica			
Etanol	0,395509	0,441564	$4{,}17165 \times 10^{-8}$
Água	0,603872	0,557358	0,999676
Ácido acético	0,000113992	0,000104082	0,000323997
Álcool isoamílico	0,000118811	0,000297435	$3{,}72447 \times 10^{-22}$
Propanol	0,000230699	0,000381549	$5{,}10105 \times 10^{-16}$
Metanol	$1{,}84625 \times 10^{-7}$	$1{,}41551 \times 10^{-7}$	$2{,}09134 \times 10^{-10}$
Isobutanol	0,000156087	0,000295333	$1{,}94512 \times 10^{-17}$

Como é possível observar na Tabela 5, na condição estabelecida para o caso base, com vazão de vapor de aquecimento de 40.000 kg/h, a coluna de destilação apresentou elevado grau de recuperação do etanol. A fração mássica de etanol na corrente de vinhaça foi de $4{,}17165 \times 10^{-8}$, equivalente a aproximadamente 0,00000417% m/m, indicando uma perda extremamente baixa de etanol pela corrente de fundo. Em contrapartida, a corrente de flegma apresentou fração mássica de etanol de 0,395509, correspondente a aproximadamente 39,55% m/m, enquanto a corrente A1-D apresentou concentração de aproximadamente 44,16% m/m de etanol.

A vazão mássica obtida para o flegma foi de 34.000 kg/h, enquanto a corrente A1-D apresentou vazão de 8.272,14 kg/h e a vinhaça atingiu 247.728 kg/h. A composição da vinhaça foi predominantemente constituída por água, com fração mássica de 0,999676, enquanto os

demais componentes apresentaram concentrações reduzidas. Esses resultados demonstram que, nas condições do caso base, praticamente todo o etanol presente na alimentação foi transferido para as correntes de topo, resultando em elevado esgotamento da vinhaça.

Entretanto, apesar da elevada eficiência na recuperação do etanol, a utilização de 40.000 kg/h de vapor caracteriza uma condição de superesgotamento da coluna. A quantidade elevada de vapor direto introduz água adicional no sistema e contribui para a diluição da corrente de flegma, que apresentou aproximadamente 39,55% de etanol em massa. Dessa forma, embora o aumento do vapor favoreça a remoção do etanol residual da vinhaça, sua utilização acima da quantidade necessária não proporciona um ganho significativo de recuperação, uma vez que a concentração de etanol na vinhaça já se encontra em níveis praticamente desprezíveis.

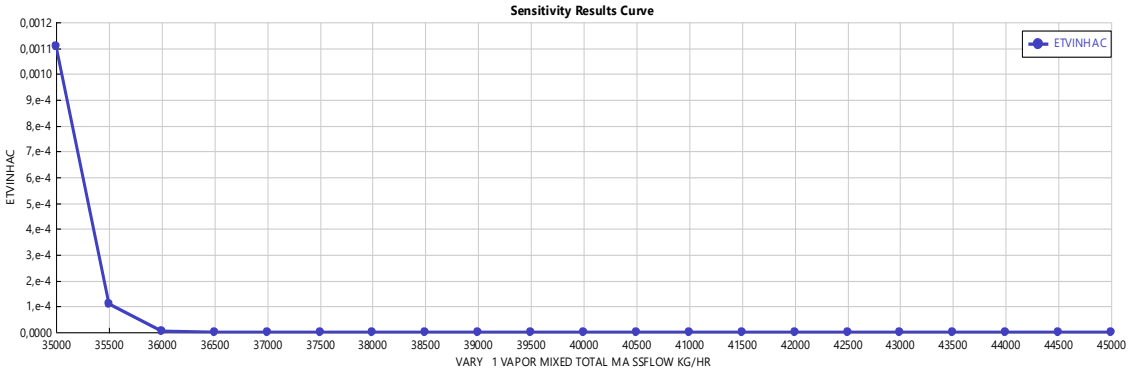
Além disso, a produção de um flegma mais diluído pode aumentar a demanda energética das etapas subsequentes do processo, especialmente na coluna de retificação B/B1, uma vez que será necessária maior quantidade de energia para promover a separação da água e elevar a concentração alcoólica. Assim, os resultados do caso base evidenciam que a busca pelo menor teor possível de etanol na vinhaça não deve ser realizada apenas por meio do aumento da vazão de vapor, pois isso pode resultar em maior consumo de utilidades térmicas sem benefício proporcional na recuperação do produto.

Dessa maneira, embora a condição base garanta a recuperação de praticamente todo o etanol presente no vinho e apresente perda de apenas aproximadamente 0,00000417% m/m na vinhaça, os resultados indicam a possibilidade de redução da vazão de vapor sem comprometer significativamente a eficiência de recuperação. Essa constatação fundamenta a realização das análises de sensibilidade posteriores, cujo objetivo é determinar uma condição operacional capaz de conciliar baixa perda de etanol na vinhaça, maior concentração do flegma e menor consumo energético do sistema de destilação.

4.2 Análise da influência da vazão de vapor de aquecimento sobre a fração mássica de etanol nas correntes FLEGMA e VINHACA (1ª análise de sensibilidade)

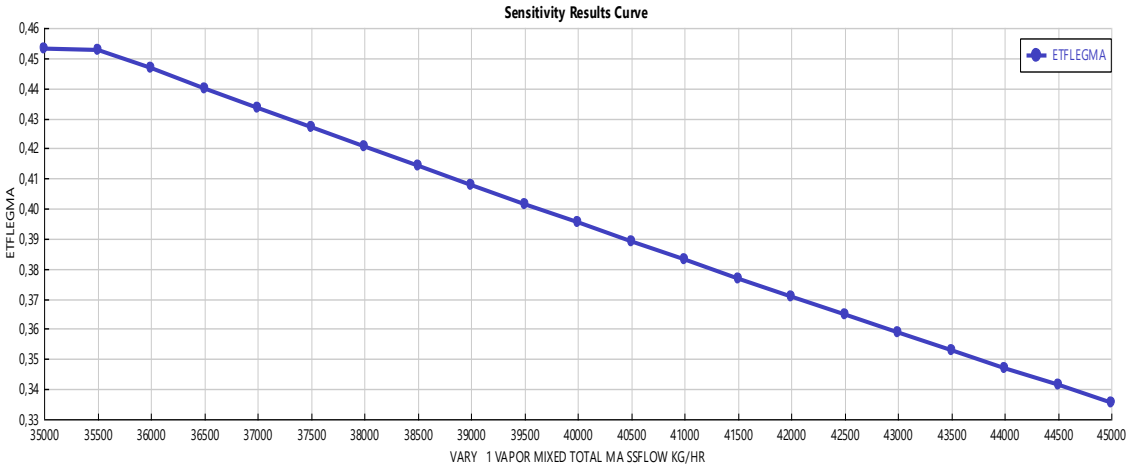
Na primeira análise de sensibilidade paramétrica, foi analisado o efeito da variação da vazão do vapor de aquecimento injetado na coluna sobre a fração mássica de etanol que sai nas correntes FLEGMA e VINHACA. Dessa forma, a Figura 4 apresenta o perfil de variação da fração mássica de etanol na corrente VINHACA em função da variação da vazão mássica da corrente VAPOR e a Figura 5 apresenta o perfil de variação da fração mássica de etanol na corrente FLEGMA em função da variação da vazão mássica da corrente VAPOR .

Figura 4 - Vazão de Vapor vs. Teor de etanol na Vinhaça



Fonte: Autor, (2026)

Figura 5 - Vazão de Vapor vs. Teor de etanol no Flegma



Fonte: Autor, (2026)

Na primeira análise de sensibilidade, a temperatura de alimentação do vinho foi mantida em 94 °C, enquanto a vazão de vapor de aquecimento foi variada entre 35.000 e 45.000 kg/h. Os resultados mostraram que a elevação da vazão de vapor aumentou a quantidade de energia disponível na base da coluna, favorecendo a vaporização dos componentes mais voláteis e intensificando a transferência de etanol da fase líquida para a fase vapor.

Na condição de 35.000 kg/h, a concentração de etanol na vinhaça foi de aproximadamente 0,11% em massa, valor superior ao limite operacional de 0,02% em massa adotado neste trabalho. Esse resultado indica que a quantidade de vapor fornecida nessa condição não foi suficiente para promover o esgotamento adequado do vinho. Com o aumento

da vazão de vapor, observou-se uma redução acentuada do teor de etanol na corrente de fundo, que passou a apresentar valores muito baixos a partir de aproximadamente 36.000 kg/h. Esse comportamento confirma que o fornecimento de energia térmica exerce influência direta sobre a recuperação do etanol na coluna.

Entretanto, o aumento da vazão de vapor não produziu apenas efeitos positivos. Ao mesmo tempo em que favoreceu a retirada do etanol da vinhaça, também aumentou a quantidade de água vaporizada e transportada para o topo da coluna. Como consequência, a corrente de flegma tornou-se progressivamente mais diluída. O teor de etanol na flegma diminuiu de 45,31% em massa, para a vazão de 35.000 kg/h, para 33,57% em massa, quando a vazão de vapor atingiu 45.000 kg/h.

Esse resultado evidencia a existência de um compromisso operacional entre o esgotamento da vinhaça e a qualidade da flegma. Vazões de vapor muito baixas aumentam as perdas de etanol na corrente de fundo, enquanto vazões excessivas reduzem essas perdas, mas elevam o consumo energético e promovem maior arraste de água para o topo. A produção de uma flegma mais diluída também pode aumentar a carga térmica das colunas de retificação subsequentes, pois uma quantidade maior de água deverá ser novamente aquecida e separada.

A análise dos resultados permitiu determinar que a vazão mínima de vapor capaz de manter a concentração de etanol na vinhaça dentro do limite de 0,02% em massa foi de aproximadamente 35.455 kg/h. Abaixo desse valor, a perda de etanol ultrapassa a meta operacional estabelecida; acima dele, a recuperação alcoólica atende ao critério adotado, embora aumentos adicionais de vapor provoquem ganhos cada vez menores em relação ao esgotamento da vinhaça.

Quando comparada ao caso base, que utiliza 40.000 kg/h de vapor, a vazão de 35.455 kg/h representa uma redução aproximada de 4.545 kg/h, equivalente a cerca de 11,4%. Além da economia de utilidades, essa condição elevou o teor de etanol da flegma de aproximadamente 39,55% para 45,26% em massa, indicando que a redução controlada do vapor melhora simultaneamente a eficiência energética e a concentração da corrente de topo.

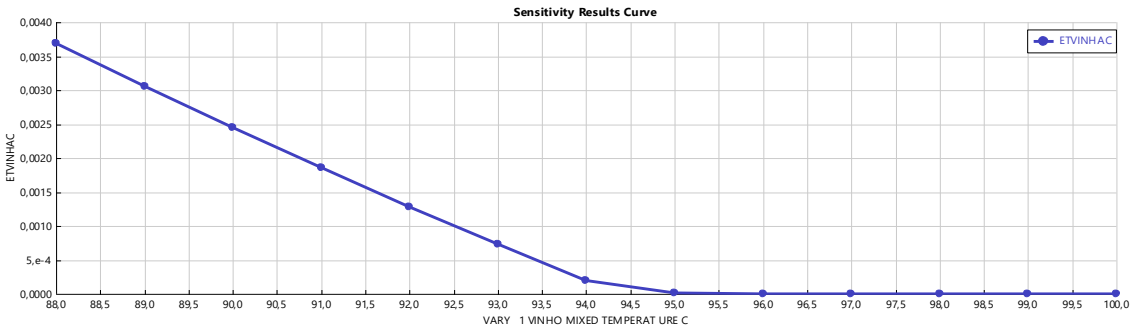
Dessa forma, os resultados mostram que a condição mais adequada não corresponde à maior vazão de vapor nem à menor perda absoluta de etanol, mas à menor vazão capaz de atender ao limite operacional da vinhaça. A operação próxima de 35.455 kg/h evita o desperdício de vapor, reduz a diluição da flegma e mantém a recuperação do etanol dentro da especificação estabelecida para a coluna A1A. Os valores utilizados nessa discussão correspondem aos gráficos e à análise de sensibilidade apresentados no próprio trabalho.

Ao variar a vazão de vapor de 35.000 a 45.000 kg/h mantendo a temperatura do vinho em 94°C, observou-se que vazões abaixo de 35.455 kg/h elevam as perdas de etanol na vinhaça para níveis superiores ao limite industrial de 0,02% m/m. Portanto, a vazão mínima de vapor necessária para atender estritamente ao critério regulatório a 94°C foi identificada em 35.455 kg/h. A redução da vazão de vapor de 40.000 kg/h (Caso Base) para 35.455 kg/h promoveu o enriquecimento do flegma de 39,55% para 45,26% de etanol. Isso demonstra que o excesso de vapor praticado na planta não apenas consome utilidades sem ganho de recuperação, mas também piora a qualidade do flegma produzido.

4.3 Análise da influência da temperatura do vinho sobre a fração mássica de etanol nas correntes FLEGMA e VINHACA

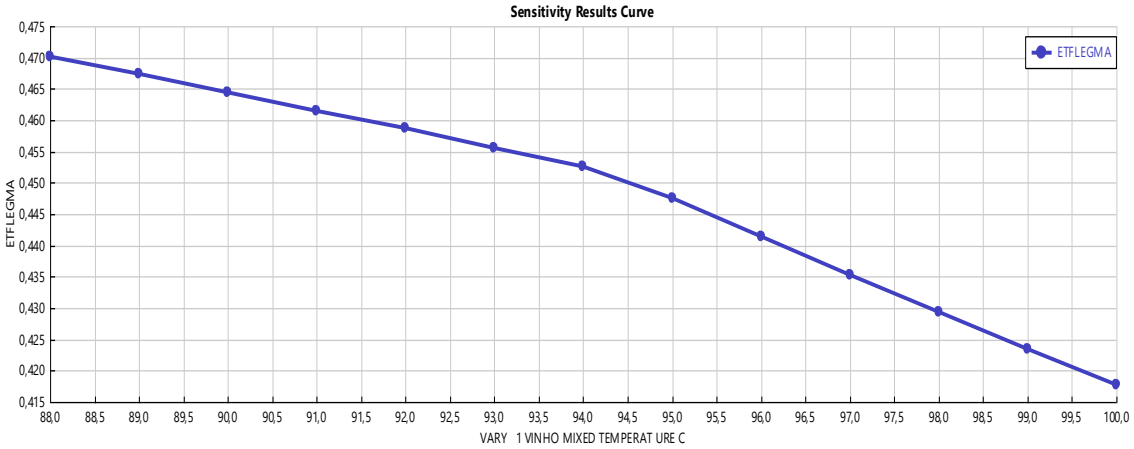
Na segunda análise de sensibilidade paramétrica, foi analisado o efeito da variação da temperatura do vinho (mantendo a vazão do vapor de aquecimento contante = 40.000 kg/h) sobre a fração mássica de etanol que sai nas correntes FLEGMA e VINHACA. Dessa forma, a Figura 6 apresenta o perfil de variação da fração mássica de etanol na corrente VINHACA em função da variação da temperatura da corrente VINHO e a Figura 7 apresenta o perfil de variação da fração mássica de etanol na corrente FLEGMA em função da variação da temperatura da corrente VINHO .

Figura 6 - Temperatura do Vinho vs. Teor na Vinhaça com vapor fixo



Fonte: Autor, (2026)

Figura 7 - Temperatura do Vinho vs. Teor na Flegma com vapor fixo



Fonte: Autor, (2026)

Na segunda análise de sensibilidade, a vazão de vapor foi mantida constante em 40.000 kg/h, enquanto a temperatura de alimentação do vinho foi variada entre 88 e 100 °C. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura da alimentação favoreceu o esgotamento da corrente de fundo, reduzindo progressivamente a concentração de etanol na vinhaça.

Quando o vinho foi alimentado a 88 °C, o teor de etanol na vinhaça foi de aproximadamente 0,37% em massa, valor significativamente superior ao limite operacional de 0,02% em massa adotado no estudo. Com a elevação da temperatura para 94 °C, a concentração residual foi reduzida para aproximadamente 0,02%, enquanto, a 100 °C, atingiu valor próximo de 0,000001% em massa. Esse comportamento indica que o aumento da temperatura da alimentação eleva a quantidade de energia introduzida na coluna, favorecendo a vaporização do etanol e sua transferência para a corrente de topo.

Entretanto, o aumento da temperatura do vinho também provocou maior vaporização de água na região de alimentação. Como consequência, a flegma tornou-se progressivamente mais diluída. O teor de etanol nessa corrente diminuiu de 47,02% em massa, a 88 °C, para 45,53%, a 94 °C, alcançando aproximadamente 41,77% em massa quando a temperatura do vinho atingiu 100 °C.

Os resultados evidenciam, portanto, que o aumento da temperatura de alimentação melhora a recuperação do etanol na corrente de fundo, mas não representa, isoladamente, uma condição de maior eficiência global. Como a vazão de vapor permaneceu fixa em 40.000 kg/h, o acréscimo de energia fornecido pelo pré-aquecimento somou-se à carga térmica já introduzida pelo vapor, produzindo uma condição de superesgotamento. Nessa situação, a perda de etanol na vinhaça torna-se extremamente baixa, porém ocorre aumento desnecessário da vaporização

de água e redução da concentração alcoólica da flegma.

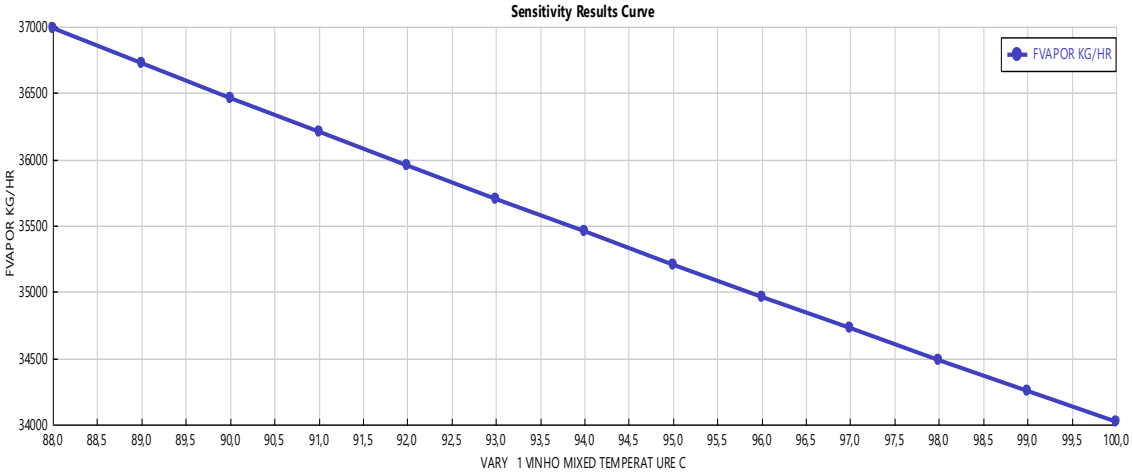
Esse comportamento demonstra que o pré-aquecimento do vinho deve ser acompanhado pela redução correspondente da vazão de vapor. Caso contrário, parte do potencial de economia energética é perdida, pois a coluna recebe mais energia do que a necessária para atender ao limite de etanol na vinhaça. Além disso, a produção de uma flegma mais diluída pode elevar a demanda térmica das etapas posteriores de retificação, transferindo parte do consumo energético para os equipamentos subsequentes.

Dessa forma, a segunda análise de sensibilidade confirma que a temperatura do vinho e a vazão de vapor devem ser controladas de maneira integrada. O aumento da temperatura da alimentação pode ser utilizado como estratégia de economia de vapor, desde que a vazão fornecida à base da coluna seja ajustada para manter a perda de etanol dentro do limite operacional, evitando simultaneamente o superesgotamento da vinhaça e a diluição excessiva da flegma. Os valores analisados correspondem aos gráficos apresentados nas Figuras da segunda análise de sensibilidade.

4.4 Otimização Energética por Pré-aquecimento do Vinho

Na terceira análise de sensibilidade foi inserido um bloco de especificação de projeto (*Design Spec*) para manter a perda de etanol na vinhaça fixa em 0,02% em massa. A partir da variação da temperatura de alimentação do vinho entre 88°C e 100°C com um incremento de variação de 1°C, esse bloco calculou automaticamente a demanda mínima de vapor necessária para alcançar especificação máxima da perda de etanol na vinhaça. Observou-se também as frações mássicas de etanol nas correntes de FLEGMA e VINHACA para cada temperatura analisada, representada pela Figura 8.

Figura 8 - Temperatura do Vinho vs. Demanda Mínima de Vapor para Vinhaça em 0,02%



Fonte: Autor, (2026)

Ao fixar a perda na vinhaça em 0,02% m/m por meio de especificação de projeto (*Design Spec*) e variando a temperatura de alimentação do vinho de 88°C a 100°C, determinou-se a demanda mínima de vapor para cada patamar térmico. A demanda de vapor reduziu de 36.988,17 kg/h (a 88°C) para 34.019,97 kg/h **(**a 100°C**)**. A partir desses dados, calculou-se o Índice de Economia Marginal de Vapor (EMV):

$$\text{EMV} = \frac{36.988{,}17 - 34.019{,}97}{100 - 88} = 247{,}35 \ \frac{\text{kg/h de vapor}}{^{\circ}\text{C}}$$

Ou seja, a cada 1°C adicional de pré-aquecimento no vinho de alimentação, economiza-se em média 247,35 kg/h de vapor de aquecimento direto.

E calculou-se também a Redução Percentual de Utilidades Quentes:

$$\Delta Q_{\text{utilidades}} = \left(1 - \frac{34.019{,}97}{36.988{,}17}\right) \times 100\% = 8{,}02\%$$

O teor de etanol na corrente flegma cai de 47,04% para 43,45% devido ao balanço de massa e à vaporização *flash* da água do vinho pré-aquecido no prato de alimentação. Contudo, a massa total de etanol recuperada por hora permanece rigorosamente a mesma, pois a perda na vinhaça está travada em 0,02%.

Do ponto de vista puramente termodinâmico, a condição de operação otimizada no simulador ocorre a 100°C com consumo de vapor de 34.020,00 kg/h, representando uma redução de 14,95% na demanda de utilidades quentes em relação ao Caso Base (40.000 kg/h).

$$\Delta Q_{\text{utilidades}} = \left(1 - \frac{34.019{,}97}{40.000{,}00}\right) \times 100\% = 14{,}95\%$$

4.5 Avaliação da Economia de Vapor e Viabilidade Industrial

4.5.1 Economia de Vapor:

O cálculo do vapor economizado em uma safra típica (em média 167 dias de operação contínua, 24 h/dia $= 4.008$ h/safra) é realizado da seguinte forma:

$$\text{Economia Anual de Vapor} = (36.988{,}17 - 34.019{,}97) \times 4.008 = 11.896.665{,}84 \text{ kg/safra}$$
$$\approx 11.896{,}67 \text{ t de vapor/safra}$$

Essa redução de 11.896,67 toneladas de vapor alivia a carga da caldeira e permite exportar o vapor excedente para as turbinas de cogeração, aumentando a venda de energia elétrica ou economizando bagaço de cana.

Em relação ao Caso Base (40.000 kg/h), a economia de vapor em uma safra de 167 dias de operação é de:

$$\text{Economia Anual de Vapor} = (40.000 - 34.019{,}97) \times 4.008 = 23.967.960{,}24 \text{ kg/safra}$$
$$\approx 23.967{,}96 \text{ t de vapor/safra}$$

4.5.2 Viabilidade Industrial

Apesar do cenário a 100°C apresentar a maior economia teórica (23.967,96 t de vapor/safra) em relação ao Caso Base, a operação contínua nessa temperatura não é recomendada na prática industrial devido ao risco de vaporização parcial do vinho nas tubulações de alimentação, o que pode gerar cavitação e instabilidade hidráulica na coluna.

Dessa forma, recomenda-se ajustar a temperatura de alimentação do vinho entre 96°C (vazão de vapor de 35.100 kg/h) e 98°C (vazão de vapor de 34.800 kg/h). Estas condições operacionais proporcionam uma economia anual substancial de aproximadamente de 19.639,2 toneladas de vapor (redução de 12,25% no consumo energético da destilação) para a temperatura do vinho de 96°C e de 20.841,6 toneladas de vapor (redução de 13% no consumo

energético da destilação) para a temperatura do vinho de 98°C, enquanto mantém o teor de etanol na vinhaça confortavelmente entre 0,010% e 0,015% m/m, assegurando uma margem de segurança contra variações de processo na fermentação.

A Tabela 6 sintetiza a comparação entre a condição atual (Caso Base), as condições otimizadas em simulador e a faixa operacional recomendada para a prática industrial.

Tabela 6 — Comparativo técnico-econômico entre os cenários operacionais da Coluna A1A.

Parâmetro Operacional	**Caso Base**	**Otimizado (94°C)**	**Otimizado Máximo (100°C)**	**Recomendado Prático**
Temperatura do Vinho (˚C)	94	94	100	96 a 98
Vazão de Vapor (kg/h)	40.000,0	35.455,4	34.020,0	34.800 a 35.100
Teor Etanol Vinhaça (% m/m)	0,000004%	0,0198%	0,0201%	0,010% a 0,015%
Teor Etanol Flegma (% m/m)	39,53%	45,26%	43,45%	44,0% a 44,5%
Economia de Vapor (kg/h)	—	4.544,6 (11,4%)	5.980,0 (15,0%)	≈ 5.000,0 ≈ 12,5%
Economia Anual (t de vapor/safra)	—	18.214,8	23.967,8	≈ 20.040

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo computacional da coluna de destilação de vinho (A1A) utilizando o software Aspen Plus®, realizando análises de sensibilidade para avaliar a influência da temperatura de alimentação do vinho e da vazão de vapor de aquecimento sobre a recuperação de etanol, as perdas de etanol na vinhaça e o desempenho energético do processo.

O modelo desenvolvido possibilitou representar o comportamento da coluna A1A e avaliar diferentes condições operacionais. No caso base, com o vinho alimentado a 94 °C e vazão de vapor de 40.000 kg/h, obteve-se uma fração mássica de etanol na vinhaça de aproximadamente $4{,}17 \times 10^{-8}$, correspondente a 0,00000417% m/m, enquanto o flegma apresentou aproximadamente 39,55% de etanol. Embora essa condição proporcione elevado esgotamento da vinhaça, os resultados demonstraram que a coluna opera com quantidade de vapor superior à necessária, ocasionando maior consumo energético e maior diluição do flegma.

A análise de sensibilidade da vazão de vapor demonstrou que sua redução favorece o aumento da concentração alcoólica do flegma, porém, quando reduzida excessivamente, provoca aumento das perdas de etanol na vinhaça. Considerando o limite de 0,02% m/m de etanol na vinhaça adotado neste estudo, determinou-se uma vazão mínima de aproximadamente 35.455 kg/h de vapor para o vinho alimentado a 94 °C. Nessa condição, a concentração de etanol no flegma aumentou de aproximadamente 39,55% para 45,26%, ao mesmo tempo em que o consumo de vapor foi reduzido em aproximadamente 11,4% em relação ao caso base. Dessa forma, recomenda-se, para as condições avaliadas neste trabalho, a operação da coluna A1A com temperatura de alimentação do vinho de 94 °C e vazão de vapor próxima de 35.455 kg/h, por representar um melhor compromisso entre recuperação de etanol, concentração do flegma e consumo energético.

A análise do pré-aquecimento também demonstrou potencial adicional de economia energética. Mantendo a perda de etanol na vinhaça em 0,02% m/m e aumentando a temperatura do vinho de 88 para 100 °C, a demanda mínima de vapor diminuiu de 36.988,17 para 34.019,97 kg/h, correspondendo, na condição de 100 °C, a uma redução de aproximadamente 14,95% em relação ao caso base. Entretanto, essa condição também promove maior diluição do flegma, demonstrando que a elevação da temperatura deve ser acompanhada pelo ajuste adequado da vazão de vapor e pela consideração dos efeitos sobre as etapas posteriores do processo.

Conclui-se, portanto, que os objetivos propostos foram alcançados e que a simulação computacional constitui uma ferramenta adequada para analisar e otimizar a operação da coluna A1A. Os resultados demonstram que a redução controlada da vazão de vapor pode manter as

perdas de etanol dentro do limite estabelecido e, simultaneamente, melhorar a concentração do flegma e reduzir o consumo de utilidades térmicas. A condição recomendada de 94 °C e aproximadamente 35.455 kg/h de vapor apresenta-se, entre as condições analisadas, como uma alternativa operacional mais equilibrada para a coluna estudada, podendo contribuir para maior eficiência energética e melhor aproveitamento do etanol no processo industrial.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP nº 907**, de 18 de novembro de 2022. Estabelece as especificações do etanol combustível. Brasília, DF, 2022.

ALVES, M. **Simulação do processo de destilação extrativa usando líquido iônico e modelo de não equilíbrio na desidratação do etanol**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

AMORIM, H. V. **Fermentação alcoólica: ciência e tecnologia**. Piracicaba: Fermentec, 2005.

ASPEN TECHNOLOGY. **Aspen Plus® User Guide. Bedford**: Aspen Technology Inc., 2023.

BASSO, L. C.; AMORIM, H. V.; LOPES, M. L.; OLIVEIRA, A. J. **Yeast selection for fuel ethanol production in Brazil**. *FEMS Yeast Research*, v. 8, n. 7, p. 1155-1163, 2008.

BATISTA, F. R. M. **Estudo do processo de destilação alcoólica contínua: simulação de plantas industriais de produção de álcool hidratado, álcool neutro e cachaça**. 2008. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. **Institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2017.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma Técnica P4.231: Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. São Paulo: CETESB, 2015.

CHRISTOFOLETTI, C. A. et al. **Sugarcane vinasse: environmental implications of its use**. *Waste Management*, v. 33, n. 12, p. 2752-2761, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar – Safra 2024/25**. Brasília: CONAB, 2024.

CORTEZ, L. A. B. (Org.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, 2010.

DIAS, M. O. S. **Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do**

bagaço, visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes do bagaço. 282 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DIAS, M. O. S. et al. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. ***Bioresource Technology***, v. 103, p. 152-161, 2012.

ELIA NETO, A.; NAKAHODO, T. **Caracterização físico-química da vinhaça: projeto nº 9500278**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1995.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2024.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

FUESS, L. T. Anaerobic digestion of sugarcane vinasse: challenges and perspectives toward biogas production. ***Journal of Chemical Technology and Biotechnology***, 2013.

FUESS, L. T.; GARCIA, M. L. Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation. ***Journal of Environmental Management***, v. 145, p. 210-229, 2014.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HUGOT, E. **Handbook of Cane Sugar Engineering**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 1986.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2023.

KEMP, I. C. **Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2016.

KISTER, H. Z. **Distillation Operation**. New York: McGraw-Hill, 1992.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. ***Biomass and Bioenergy***, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008.

MARQUINI, M. F.; MARIANI, D. C.; MEIRELLES, A. J. A.; SANTOS, O. A. A.; JORGE, L. M. M. Simulação e análise de um sistema industrial de colunas de destilação de etanol. ***Acta Scientiarum. Technology***, v. 29, n. 1, p. 23-28, 2007.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

MORAES, B. S. et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil: challenges and opportunities. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 2015.

PAYNE, J. H. **Operações Unitárias na Produção de Açúcar de Cana**. São Paulo: Nobel, 1989.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

PRAUSNITZ, J. M.; LICHTENTHALER, R. N.; AZEVEDO, E. G. **Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.

RENON, H.; PRAUSNITZ, J. M. Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures. ***AIChE Journal***, v. 14, n. 1, p. 135-144, 1968.

ROSILLO-CALLE, F.; CORTEZ, L. A. B. Towards Proalcool II: a review of the Brazilian bioethanol programme. ***Biomass and Bioenergy***, v. 14, n. 2, p. 115-124, 1998.

SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; ROPER, D. K. **Separation Process Principles**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

SILVEIRA, R. C. **Simulação computacional e otimização energética de colunas de destilação para produção de etanol hidratado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), 2021.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M.; SWIHART, M. T. **Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics**. 8. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

SOLOMONS, T. W. G.; FRYHLE, C. B.; SNYDER, S. A. **Química Orgânica**. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

STANBURY, P. F.; WHITAKER, A.; HALL, S. J. **Principles of Fermentation Technology**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

TURTON, R.; BAILIE, R. C.; WHITING, W. B.; SHAEIWITZ, J. A.; BHATTACHARYYA, D. **Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes**. 5. ed. Boston: Pearson, 2018.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA (UNICA). **Relatório Anual do Setor Sucroenergético 2024**. São Paulo: UNICA, 2024.

WALKER, G. M. **Bioethanol: Science and Technology of Fuel Alcohol. Frederiksberg:** Ventus Publishing ApS, 2011