

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**Simulação de Colunas de Destilação para Produção de Etanol Hidratado:  
Avaliação do Impacto de Parâmetros de Processo nas Perdas de Etanol nas  
Correntes de Resíduos.**

**Francine Zanarotti**

**São Carlos – SP**

**2025**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**Simulação de Colunas de Destilação para Produção de Etanol Hidratado:  
Avaliação do Impacto de Parâmetros de Processo nas Perdas de Etanol nas  
Correntes de Resíduos.**

**Francine Zanarotti**

**Trabalho de Graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química  
da Universidade Federal de São Carlos  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Química. Orientador: Prof.  
Dr. João Paulo Silva Queiroz**

**São Carlos – SP**

**2025**

## BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 14 de fevereiro de 2025, perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Silva Queiroz, DEQ/UFSCar

Convidado: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rosineide Gomes da Silva Cruz, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Ernesto Antonio Urquieta-Gonzalez, DEQ/UFSCar

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, por me guiar com força e coragem ao longo desta jornada, permitindo que este sonho se tornasse realidade.

Aos meus pais, Edna e Sérgio, que sempre acreditaram nos meus sonhos e me ofereceram o apoio necessário para realizá-los. Ao meu irmão Frank, à minha tia Regina e à minha avó Alaíde, pelo amor incondicional e pelo suporte que recebi em todas as etapas da vida. Ao meu amor, Gabriel, por ser meu porto seguro, me dar forças para superar os desafios mais difíceis e por sempre acreditar no meu potencial.

Aos amigos que conquistei na faculdade e que pretendo levar para a vida, meu profundo agradecimento. Vocês foram um suporte essencial, oferecendo incentivo mútuo ao longo desses anos e compartilhando comigo inúmeros aprendizados e momentos inesquecíveis. Em especial, agradeço à minha amiga Maria Clara, por ser minha parceira fiel na faculdade e por compartilharmos tantas conquistas e desafios.

Ao professor João Paulo, expresso minha gratidão pela paciência, orientação e apoio durante este trabalho e ao longo de diversas disciplinas. Sua dedicação e ensinamentos foram indispensáveis para meu crescimento acadêmico. Estendo meus agradecimentos a todos os professores excepcionais com quem tive o privilégio de aprender, que reforçaram ainda mais minha admiração pela engenharia química.

Aos colegas de trabalho Peterson, Jonatas e Reginaldo, sou imensamente grata por despertarem meu interesse pelo tema deste projeto, por acreditarem em mim, pelo incentivo constante e por compartilharem seus conhecimentos com paciência e humildade. Aprender a produzir etanol ao lado de vocês foi uma experiência valiosa que levarei comigo.

## RESUMO

Em resposta às crescentes demandas pela mitigação de impactos ambientais, o etanol tem se afirmado como uma alternativa promissora na transição para uma matriz energética mais sustentável. No processo convencional adotado por destilarias brasileiras para a obtenção de etanol hidratado utilizam-se duas colunas de destilação, denominadas colunas A e B, nas quais o vinho resultante da fermentação, com teor alcoólico de 8 a 12% v/v, é processado para produzir etanol hidratado, com teor alcoólico de 92,5 a 94,6% m/m. As correntes de vinhaça e flegmaça são resíduos gerados na produção de etanol, sendo a vinhaça a corrente de fundo da coluna A e a flegmaça a corrente de fundo da coluna B. A eficiência do processo de destilação é avaliada pela relação entre a quantidade de etanol recuperado e a quantidade de etanol presente inicialmente no vinho alimentado. Para garantir eficiência adequada de recuperação do etanol, as perdas de álcool nas correntes de vinhaça e flegmaça devem ser mantidas abaixo de 0,02% v/v. O presente trabalho tem como objetivo simular um aparelho de destilação real para produção de etanol hidratado carburante, utilizando o software Aspen Plus®, comercializado pela Aspen Tech. A simulação permite a construção de um modelo a ser utilizado para futuras avaliações, além da análise de impacto de oscilações em parâmetros de processo, como a vazão de vapor, nas perdas de etanol nas correntes de vinhaça e flegmaça. O consumo de vapor obtido na simulação foi de 2,28 kg/L de etanol e observou-se proporcionalidade inversa entre o consumo de vapor e as perdas de etanol nas correntes de resíduo. As temperaturas simuladas apresentaram boa correlação com as condições operacionais do equipamento real, reforçando a representatividade do modelo desenvolvido.

**Palavras-chave:** destilação; etanol hidratado; simulação; vinhaça; flegmaça; eficiência.

## ABSTRACT

In response to the growing demand for mitigating environmental impacts, ethanol has emerged as a promising alternative in the transition to a more sustainable energy matrix. In the conventional process adopted by Brazilian distilleries for obtaining hydrated ethanol, two distillation columns, referred to as columns A and B, are used. In these columns, the wine resulting from fermentation, with an alcohol content of 8 to 12% v/v, is processed to produce hydrated ethanol with an alcohol content of 92.5 to 94.6% w/w. Vinasse and phlegmace residues are by-products generated during ethanol production, with vinasse being the bottom stream of column A and phlegmace the bottom stream of column B. The efficiency of the distillation process is evaluated by the ratio between the amount of ethanol recovered and the amount of ethanol initially present in the wine feed. To ensure adequate ethanol recovery efficiency, alcohol losses in the vinasse and phlegmace streams must be maintained below 0.02% v/v. This study aims to simulate a real distillation apparatus to produce hydrated ethanol fuel using Aspen Plus® software, developed by Aspen Tech. The simulation enables the construction of a model to be used for future evaluations, as well as the analysis of the impact of fluctuations in process parameters, such as steam flow rate, on ethanol losses in the vinasse and phlegmace streams. The steam consumption obtained in the simulation was 2.28 kg/L of ethanol, and an inverse proportionality was observed between steam consumption and ethanol losses in the residue streams. The simulated temperatures showed a good correlation with the operational conditions of the real equipment, reinforcing the representativeness of the developed model.

**Keywords:** distillation; hydrated ethanol; simulation; vinasse; phlegmace; efficiency.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	11
2. OBJETIVOS .....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	14
3.1. ETANOL .....	14
3.2. ETANOL NO BRASIL .....	14
3.3. FERMENTAÇÃO .....	15
3.4. DESTILAÇÃO .....	17
3.5. SIMULADORES DE PROCESSO .....	20
4. METODOLOGIA .....	22
4.1. COMPONENTES E MODELO TERMODINÂMICO .....	22
4.2. PARÂMETROS E ESPECIFICAÇÕES .....	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	28
5.1. INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA .....	28
5.2. CONSUMO DE VAPOR .....	28
5.3. VAZÕES E TEORES ALCOÓLICOS .....	31
5.3. COMPOSIÇÃO DOS ESTÁGIOS .....	33
5.4. COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS COLUNAS .....	35
6. CONCLUSÃO .....	38
7. REFERÊNCIAS .....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Colunas de destilação para a produção de etanol. ....	18
<b>Figura 2.</b> Fluxograma do processo de destilação construído no ambiente de simulação .....	22
<b>Figura 3.</b> Impacto da alimentação de vapor na coluna A nas perdas de etanol na vinhaça. ....	30
<b>Figura 4.</b> Impacto da alimentação de vapor na coluna B nas perdas de etanol na flegmaça. .....	31
<b>Figura 5.</b> Fração mássica por componente ao longo dos estágios da coluna A.....	34
<b>Figura 6.</b> Fração mássica por componente ao longo dos estágios da coluna B.....	35
<b>Figura 7.</b> Perfil de temperatura em função dos estágios da coluna A. ....	36
<b>Figura 8.</b> Perfil de temperatura em função dos estágios da coluna B. ....	37

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Principais componentes do vinho industrial.....	16
<b>Tabela 2.</b> Componentes utilizados na simulação. ....	23
<b>Tabela 3.</b> Parâmetros adotados na simulação de produção de etanol no Aspen Plus®. ....	23
<b>Tabela 4.</b> Composição do vinho aplicada na simulação.....	26

## NOMENCLATURA

**%v/v** – percentagem volumétrica

**AEHC** – álcool etílico hidratado carburante

**AEAC** – álcool etílico anidro carburante

**%m/m** – percentagem mássica

**Proálcool** – Programa Nacional do Álcool

**°Brix** – quantidade de sólidos solúveis em solução

**°GL** – percentual do volume alcoólico em uma solução

**COL-A1** – coluna de epuração do vinho A1

**COL-A** – coluna de esgotamento do vinho A

**COL-D** – coluna de concentração de cabeças D

**COL-B** – coluna retificadora B

**COL-B1** – coluna de esgotamento de flegma B1

**COND-R** – condensador R

**COND-R1** – condensador R1

**COND-E** – condensador E

**COND-E1** – condensador E1

**COND-E2** – condensador E2

**TROC-K** – trocador de calor K

**DEGASAG** – módulo de degasagem

**UNIQUAC** – *Universal Quasi-Chemical Model*

**NRTL** – *Nonrandom Two-liquid Model*

**HOC** – Hayden-O'Connell

**Psig** – unidade de medida de pressão manométrica

**ANP** – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

**kg** – quilograma

**L** – litro

**h** – hora

**°C** – grau Celsius

**A01** – 1º estágio da coluna A

**A16** – 16º estágio da coluna A

**B01** – 1º estágio da coluna B1

**B04** – 4º estágio da coluna B

## 1. INTRODUÇÃO

O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil iniciou-se no século XVI e antes do fim desse século, o país já se destacava como o maior produtor e fornecedor de açúcar do mundo (Silva Filho, 2024). A indústria alcooleira emergiu como um desdobramento natural da produção açucareira, sendo o etanol um produto secundário para o setor canavieiro.

O uso de etanol como combustível no Brasil remonta aos anos 1920. Contudo, somente com o advento do Proálcool, em novembro de 1975, o papel estratégico do biocombustível foi estabelecido, estimulando investimentos significativos do setor privado na expansão da produção (Leite e Leal, 2007).

Desde o fim da década de 1970, o Brasil é pioneiro na utilização em larga escala de etanol combustível, sendo hoje um dos maiores consumidores e o segundo maior produtor mundial. O etanol é utilizado de duas formas principais: como etanol anidro, como componente de mistura na formação da gasolina C; ou como etanol hidratado, comercializado em todo o país como um combustível acabado (ANP, 2024).

No contexto atual, em um cenário global de busca por fontes alternativas de energia, devido à crescente preocupação com a poluição ambiental e emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, o setor de bioenergia e biocombustíveis, em especial o de produção de etanol a partir de cana de açúcar, tem se destacado como protagonista na transição para uma matriz energética mais sustentável.

Destilarias autônomas utilizam caldo de cana de açúcar como substrato para a fermentação, enquanto destilarias integradas à fábricas de açúcar utilizam uma mistura de caldo com o melaço, ou mel final. Durante a fermentação, as leveduras metabolizam os açúcares do mosto, obtendo-se como produto da etapa o vinho, com teor alcoólico de 8 a 12%v/v.

Para extrair o etanol presente no vinho, utiliza-se industrialmente o processo de destilação, operação unitária baseada na diferença de volatilidade entre os componentes de uma mistura. As destilarias brasileiras apresentam como configuração convencional duas colunas de destilação, coluna A e coluna B, para a produção de etanol hidratado.

A eficiência do processo de destilação pode ser avaliada pela recuperação de etanol em relação à quantidade disponível no vinho. Para maximizar a recuperação de etanol e elevar a eficiência do processo, é fundamental garantir que as perdas de etanol nas correntes residuais, como a vinhaça e a flegmaça, sejam reduzidas ao mínimo possível.

A corrente de vinhaça, proveniente do fundo da coluna A, possui coloração escura e é composta pelos componentes menos voláteis do vinho. Esse resíduo é amplamente utilizado como insumo na fertirrigação, promovendo o reaproveitamento de nutrientes e contribuindo para a melhoria da qualidade do solo. Já a corrente de flegmaça, proveniente do fundo da coluna B, é um líquido incolor constituído predominantemente por água, sendo destinada principalmente à realização de procedimentos de assepsia no processo industrial.

As perdas de etanol nas correntes de vinhaça e flegmaça podem ser influenciadas por variações nos parâmetros do processo, em especial, a pressão e vazão de vapor, retirada de óleo fúsel e temperaturas das bandejas. Nesse contexto, softwares de simulação se destacam como ferramentas eficazes para a modelagem de processos e equipamentos reais, permitindo a avaliação do impacto das oscilações desses parâmetros na performance do processo. Além disso, representam uma alternativa prática e economicamente viável, que oferece elevada flexibilidade e dinamismo na análise.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral simular um aparelho de destilação destinado à produção de etanol hidratado carburante utilizando o software Aspen Plus®, representando um aparelho de destilação real que opera em uma destilaria do interior do estado de São Paulo.

Ademais, tem-se como objetivos específicos:

- a) A simulação do processo produtivo de etanol hidratado com componentes minoritários;
- b) Construção de um modelo a ser utilizado para futuras avaliações;
- c) Avaliar o impacto da variação no consumo de vapor nas perdas de etanol nas correntes residuais, vinhaça e flegmaça, através da ferramenta design spec;
- d) Analisar o comportamento térmico da coluna, comparando com os pontos de controle do aparelho real.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. ETANOL**

O etanol, ou álcool etílico, de fórmula  $C_2H_5OH$ , é um líquido incolor, miscível em água, volátil e inflamável que apresenta diversas aplicações, com destaque para seu uso como biocombustível em automóveis, em substituição à gasolina e outros combustíveis fósseis.

O termo biocombustível refere-se a um combustível sólido, líquido ou gasoso predominantemente produzido a partir de biomassa. As principais razões para o investimento neste tipo de combustível são a redução da dependência do petróleo, diminuição da emissão de poluentes por veículos e maior controle da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera (Leite e Leal, 2007).

Para ser utilizado como combustível na forma de álcool etílico hidratado carburante (AEHC), ou etanol hidratado, deve apresentar concentração entre 92,5% e 94,6%*m/m*, enquanto que para ser utilizado como aditivo à gasolina, na forma de álcool etílico anidro carburante (AEAC), ou etanol anidro, deve ser concentrado acima de 99,3%*m/m* (ANP, 2024).

A produção de etanol pode ser realizada a partir de diferentes matérias-primas, tais como cana-de-açúcar, milho, beterraba, trigo, mandioca, entre outras. Os Estados Unidos é o maior produtor de álcool a partir do milho, seguido do Brasil que utiliza a cana-de-açúcar, já a União Europeia produz álcool a partir de batatas e beterrabas, mas esse processo é pouco produtivo (Carvalho et al., 2013).

#### **3.2. ETANOL NO BRASIL**

Introduzida no Brasil em 1532 pelos portugueses, a cana-de-açúcar foi fundamental para a formação econômica e a inserção do País no mercado internacional via exportações de açúcar. Por aproximadamente 400 anos, o principal produto extraído da cana-de-açúcar no Brasil foi o açúcar (Moraes e Bacchi, 2014).

A indústria alcooleira surgiu no Brasil como consequência natural da produção açucareira, pelo fato de o álcool constituir um subproduto que pode ser obtido a partir do mel residual da fabricação de açúcar (Pamplona, 1984). O álcool era um produto secundário para o setor canavieiro, mas um fator externo alterou sua posição na indústria e a maneira de o Estado atuar no impulso à produção e consumo: os dois choques do petróleo da década de 1970. O Brasil dependia do petróleo importado. Portanto, as altas do preço do petróleo e seus derivados resultaram em um ambiente favorável ao uso do etanol como substituto energético (Moraes e Bacchi, 2014).

Em 1975, foi lançado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), inicialmente, proporcionando incentivos à produção de álcool etílico anidro a ser utilizado como aditivo à

gasolina. Em 1978, começaram a circular os primeiros carros movidos, exclusivamente, a álcool etílico hidratado, após modificações técnicas nos motores (Andrade et al., 2009). A partir de então os incentivos passaram a ser destinados também à produção de etanol hidratado.

Em 2003, o programa ganha força novamente, graças ao lançamento do carro bicomcombustível, também chamado flex fuel, que permite tanto o uso da gasolina quanto o de álcool, ou de um mix de ambos os combustíveis, acompanhado de uma nova alta do preço do petróleo e do aumento da demanda externa oriunda da conscientização ambiental, especialmente do Protocolo de Kyoto (Michellon et al., 2008).

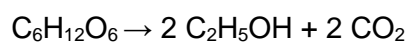
A partir do cenário apresentado, o etanol tornou-se um relevante contribuinte na matriz energética brasileira e, desde então, a crescente preocupação ambiental, em função da necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, e a volatilidade dos preços do petróleo nos últimos anos são fatores que podem ser mencionados para explicar o sucesso recente do etanol no Brasil.

Seu poder calorífico é inferior ao de combustíveis de origem fóssil, todavia, sua combustão é mais limpa, produzindo menos poluentes atmosféricos, incluindo gases de efeito estufa, contribuindo significativamente para a mitigação de mudanças climáticas. Essa característica torna o etanol uma opção viável para a substituição total e/ou parcial de combustíveis fósseis em várias aplicações, especialmente no setor de transporte (Gnansounou & Dauriat, 2005).

Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol, produzindo aproximadamente 35,5 bilhões de litros de etanol no ano de 2023, sendo 21,5 bilhões de litros de etanol hidratado e 14 bilhões de litros de etanol anidro. As regiões sudeste e centro-oeste, destacam-se na produção de etanol no país, representando, respectivamente, 48,6% e 41,4% da produção no ano de 2023 (ANP, 2023).

### 3.3. FERMENTAÇÃO

O etanol é produzido predominantemente pelo processo de fermentação, que ocorre através da metabolização de açúcares pela ação de leveduras. Neste processo, leveduras do gênero *Saccharomyces*, empregadas também na produção de pão e cerveja, convertem a sacarose presente no mosto em glicose e frutose que, posteriormente, são transformadas em etanol e dióxido de carbono conforme reação abaixo:



O mosto pode ser descrito como toda mistura açucarada destinada à fermentação alcoólica. Destilarias autônomas, isto é, dedicadas exclusivamente à produção de etanol, utilizam o caldo de cana-de-açúcar como fonte de açúcares para o mosto, enquanto destilarias

acopladas à fábricas de açúcar utilizam uma mistura do caldo com o melaço ou mel final, um resíduo da produção de açúcar, como substrato para a fermentação. No mundo todo se usam também matérias-primas amiláceas, como o amido presente no milho, trigo, cevada, mandioca, arroz etc. (Finguerut et al., 2014). Comumente, o mosto apresenta concentração entre 18 e 25 °Brix, podendo ser necessária a adição de água (tratada ou condensada) para atingir este objetivo (Souza, 2021).

Após sua diluição e preparo, o mosto é direcionado para dornas, nas quais ocorre a adição de fermento. Então, os açúcares presentes começam a ser metabolizados pelas leveduras, transformando-os em etanol. Ao final do processo, o produto obtido é denominado vinho bruto, que passa por centrífugas para separar o meio fermentado das leveduras. Assim, obtém-se o vinho centrifugado, ou delevedurado, que é direcionado ao tanque pulmão que alimenta a destilaria, denominado dorna volante.

O vinho é composto basicamente por dois componentes majoritários, etanol em concentração de 8 a 12% v/v e água, contendo uma série de outros componentes minoritários em baixas concentrações. Esses componentes minoritários são conhecidos como “congêneres”, sendo em sua maioria álcoois que, exceto o metanol, possuem volatilidade menor do que a do etanol. Alguns componentes não alcoólicos, como acetaldeído, ácido acético, acetato de etila e crotonaldeído, também fazem parte dessa mistura, apresentando, exceto o crotonaldeído, uma volatilidade maior que a do etanol (Batista, 2008).

Na Tabela 1, são apresentados os principais componentes do vinho industrial e suas respectivas concentrações.

**Tabela 1.** Principais componentes do vinho industrial.

<b>Componente</b>	<b>Faixa de Concentração (m/m)</b>
Água	0,92-0,95
Etanol	0,05-0,08
Metanol	0,0-3,0.10 <sup>-8</sup>
Isopropanol	1,020.10 <sup>-6</sup>
Propanol	(2,1-6,8).10 <sup>-5</sup>
Isobutanol	(1,3-4,9).10 <sup>-5</sup>
Álcool Isoamílico	(2,7-18,8).10 <sup>-5</sup>
Acetato de Etila	(5,5-11,9).10 <sup>-6</sup>
Acetaldeído	(1,0-8,3).10 <sup>-5</sup>
Ácido acético	(3,3-99,3).10 <sup>-4</sup>

Fonte: adaptado, Batista (2008)

### 3.4. DESTILAÇÃO

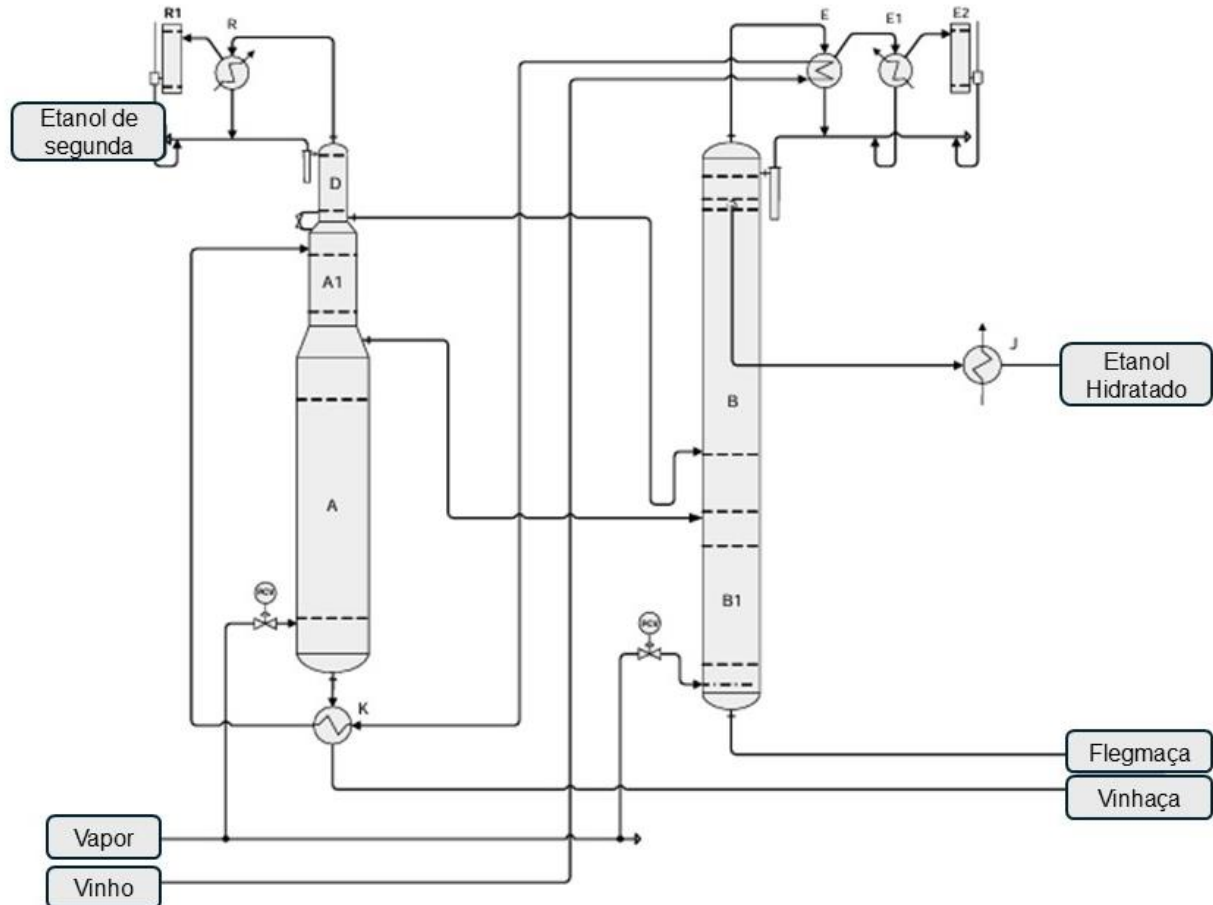
Destilação é a operação unitária aplicada para separar componentes de misturas de líquidos, a partir da diferença de volatilidade entre eles. O conceito de volatilidade pode ser descrito como a facilidade com o qual um componente de uma mistura se vaporiza, enquanto a volatilidade relativa é a facilidade de evaporação de um líquido em relação a outro.

Na destilação a fase vapor entra em contato com uma fase líquida, e há transferência de massa. O líquido e o vapor contêm, em geral, os mesmos componentes, mas em quantidades relativas diferentes. A transferência de massa, ocorre do líquido pela vaporização, e do vapor pela condensação. Dessa forma, o vapor vai se enriquecendo do material mais volátil e o líquido vai se constituindo majoritariamente dos componentes menos voláteis (McCabe et al., 1993). Assim, ao longo dos pratos, sobem primeiramente os produtos mais voláteis, seguido sucessivamente os demais na sua ordem de volatilidade e, finalmente o resíduo que permanece é um produto menos volátil ou de matéria mineral que estava solúvel na mistura (Zarpelon, 2020).

Existem dois tipos de destilação que podem ser utilizadas para a obtenção do etanol: a simples e a fracionada. A destilação simples é realizada utilizando aparelhos menos sofisticados como, por exemplo, os alambiques, empregados na produção de cachaça artesanal. Nesse processo, é obtida uma mistura aquosa contendo principalmente etanol e outras substâncias em quantidades minoritárias. Esse tipo de destilação é utilizado desde a época do Brasil Colônia nas propriedades açucareiras. Já a destilação fracionada, aspe é realizada com aparelhos mais sofisticados para a obtenção de compostos com alto grau de pureza como, por exemplo, na produção de etanol em escala industrial (Braibante et al., 2013).

O processo de destilação convencional adotado em destilarias brasileiras para a produção de álcool etílico hidratado utiliza duas colunas de destilação, colunas A e B. A coluna A é composta pelas seções A, A1 e D, enquanto a coluna B apresenta as seções B e B1, conforme diagrama representado na Figura 1.

**Figura 1.** Colunas de destilação para a produção de etanol.



Fonte: Adaptado, Batista (2008)

O vinho proveniente da fermentação é alimentado no topo da coluna A1, também chamada de coluna de epuração do vinho. Nesta seção, ocorre o aquecimento complementar do vinho e a separação de substâncias de maior volatilidade e dos gases contaminantes, que serão destinados à coluna D.

A coluna D, conhecida como coluna de concentração de cabeças, é localizada no topo da coluna A e apresenta diâmetro reduzido em relação às demais seções. Esta seção tem como finalidade a retirada de álcool de segunda, a partir da concentração dos constituintes mais voláteis do vinho. Como produto de fundo da coluna D, é obtida a corrente de flegma líquida, que será direcionada para a coluna B.

Para a condensação dos vapores do topo da coluna D, são utilizados trocadores de calor do tipo casco e tubo, chamados de condensador R e condensador auxiliar R1. Ocorre ainda uma etapa de degasagem para retirada de impurezas mais voláteis, denominadas “produtos

de cabeça”. A partir da corrente condensada, uma fração é retirada como álcool de segunda, que consiste em uma mistura de etanol e água com cerca de 90% de pureza, e o restante é realimentado no topo da coluna D como refluxo.

Na coluna A, ou coluna de esgotamento do vinho, ocorre a concentração dos líquidos menos voláteis que constituem o vinho, como água, sais, ácidos orgânicos, células de levedo, açúcares, infermentescíveis e outros subprodutos da fermentação, que irão compor o produto de fundo da coluna A, denominado vinhaça. A vinhaça, conhecida como restilo ou garapão, pode ser utilizada em processos de fertirrigação no cultivo da cana de açúcar.

O produto de topo da coluna A, denominado flegma vapor, ou somente flegma, apresenta concentração de etanol de aproximadamente 50 °GL (44,16 %m/m), e é destinado à coluna B, ou retificadora, onde os vapores alcoólicos serão concentrados até que se obtenha pureza requerida para o etanol hidratado. Já a seção B1, ou coluna de esgotamento de flegma, apresenta como produto de fundo a flegmaça que, por ser uma corrente composta majoritariamente por água e apresentar bom grau de pureza, pode ser utilizada para fins de limpeza e assepsia no processo.

Para a coluna B, há a presença de três condensadores: E, E1 e E2, utilizados para promover a condensação e retorno dos vapores alcoólicos à coluna B. Antes de ser alimentado no processo, o vinho é preaquecido no condensador E, a partir da troca térmica com os vapores que saem do topo da coluna B e, após sua passagem pelo trocador K, onde troca calor com a corrente de vinhaça, atinge temperatura próxima a 90 °C.

O aquecimento das colunas é comumente realizado através da alimentação direta de vapor vegetal gerado no processo de pré-evaporação do caldo, na base das seções A e B1, procedimento também conhecido como borbotagem. Entretanto, o aquecimento também pode ser realizado de maneira indireta, a partir da utilização de serpentinas ou trocadores de calor, o que implica em um maior consumo de vapor. Já para a primeira opção, obtém-se uma troca de calor mais eficiente e maior volume gerado para as correntes de vinhaça e flegmaça. Nas usinas, para a produção de etanol hidratado, o consumo de vapor oscila na faixa de 1,8 a 2,6 kg vapor/l de etanol produzido, variando com o teor alcoólico do vinho alimentado ao processo e com o número de bandejas das colunas de destilação empregadas (Finguerut et al., 2014)

A eficiência do processo de destilação é avaliada pela relação entre a quantidade de etanol recuperado e a quantidade de etanol presente inicialmente no vinho alimentado. O etanol não recuperado pode ser perdido na corrente de álcool de segunda, nos módulos de degasagem e nas correntes de vinhaça e flegmaça, sendo que o etanol presente na corrente de álcool de segunda pode ser recuperado, dependendo da configuração de operação das colunas, através do seu retorno para a coluna B ou para a dorna volante.

As perdas de etanol nas correntes de vinhaça e flegmaça são parâmetros determináveis e indicadores relevantes acerca da eficiência do processo de destilação. Para garantir eficiência adequada de recuperação do etanol, isto é, acima de 99,5%, as perdas de etanol nas correntes de vinhaça e flegmaça devem ser mantidas abaixo de 0,02% v/v (Zarpelon, 2020).

As perdas de etanol nas correntes de vinhaça e flegmaça podem ser influenciadas por variações nos parâmetros do processo, em especial, a pressão e vazão de vapor, retirada de óleo fúsel e as temperaturas das bandejas durante a operação.

### **3.5. SIMULADORES DE PROCESSO**

Softwares de simulação são ferramentas úteis para a avaliação e melhoria de processos e equipamentos reais, pois permitem realizar comparações entre o cenário simulado e a realidade de uma planta industrial. Através da realização de análises de sensibilidade, é possível avaliar o impacto de oscilações dos parâmetros de operação na performance de processo.

Além disso, os simuladores têm desempenhado papel fundamental no avanço de novas tecnologias e projetos. A partir da simulação, é possível realizar avaliações da viabilidade técnica e econômica de projetos de maneira rápida e simplificada, em comparação à avaliação via teste em escala piloto, permitindo que ajustes e o aprimoramento dos projetos sejam realizados de maneira acelerada.

Sendo assim, os softwares de simulação representam atualmente uma alternativa prática, assertiva e econômica para a avaliação de novos projetos e processos, bem como para o aprimoramento e análise de processos e equipamentos reais, que proporciona grande dinamismo de avaliação.

Dentre as opções de simuladores disponíveis, o software Aspen Plus (Advanced System for Process ENgineering), desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts e comercializado pela Aspen Tech, tem sido amplamente utilizado para a realização de análises projetos e processos reais (Souza, 2021). O simulador apresenta diversos recursos integrados, que permitem a modelagem rigorosa de uma ampla gama de processos químicos, para operações contínuas ou em batelada, incluindo processamento de sólidos e biomassa, captura de carbono, eletrólise de hidrogênio, biorreatores e polímeros (AspenTech, 2024).

O Aspen Plus é capaz de simular e de modelar processos químicos através da especificação das correntes em termos de matéria e de energia e das operações unitárias envolvidas. O software apresenta blocos programados com operações unitárias que podem ser integradas em fluxogramas, dentre eles: colunas de destilação, bombas, reatores, trocadores de calor, separadores, divisores de correntes etc. Em conjunto com os blocos,

existe uma base de dados com propriedades físicas de diversos componentes e modelos termodinâmicos implementados que também são utilizados para estimar essas propriedades. Ao implementar o processo no ambiente de simulação e escolher o modelo termodinâmico mais adequado, os algoritmos de convergência resolverão equações de balanço de massa e energia (Al-Malah, 2017).

O simulador Aspen Plus emprega como padrão na resolução do fluxograma abordagem sequencial modular, isto é, um processo é composto por diversos blocos que são resolvidos sequencialmente e individualmente, até que uma malha de convergência externa e global seja atingida (Schefflan, 2011).

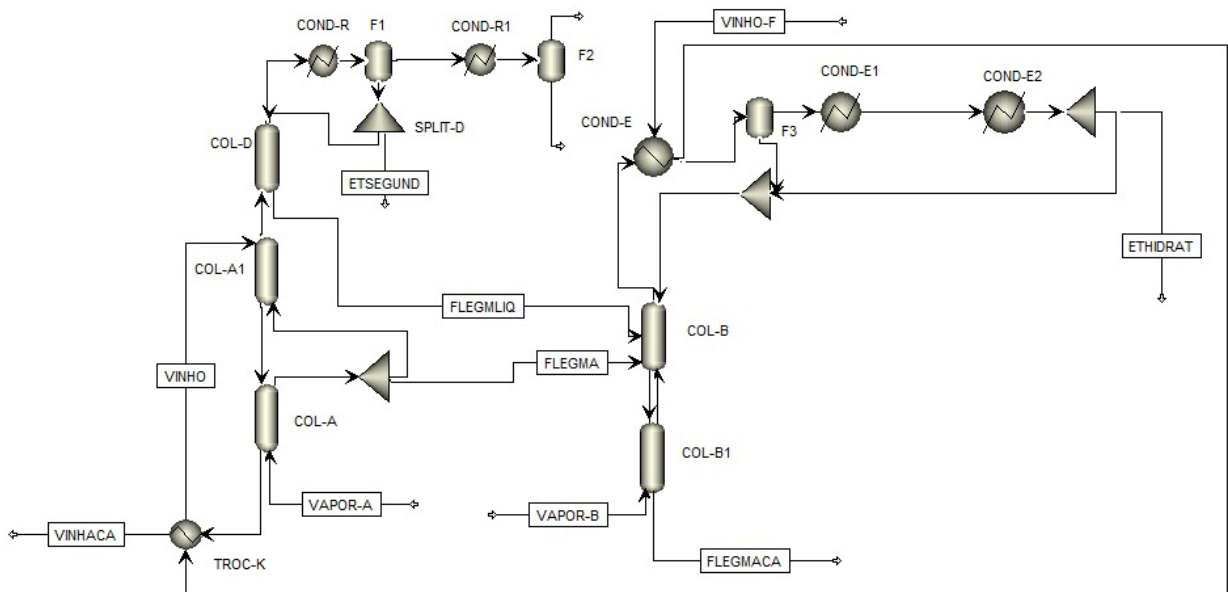
#### 4. METODOLOGIA

Utilizando-se o software Aspen Plus®, foi simulado um aparelho de destilação destinado à produção de etanol hidratado, com parâmetros de operação baseados em um aparelho real de uma destilaria localizada no interior de São Paulo.

O aparelho de destilação foi representado a partir dos blocos coluna de epuração do vinho A1 (COL-A1), coluna de esgotamento do vinho A (COL-A) e coluna de concentração de cabeças D (COL-D), compondo a conjunto referente à Coluna A, enquanto o conjunto referente à coluna B foi representado a partir dos blocos de coluna retificadora B (COL-B) e coluna de esgotamento de flegma B1 (COL-B1). Foram incluídos também na simulação os condensadores R (COND-R), R1 (COND-R1), E (COND-E), E1 (COND-E1), E2 (COND-E2) e o trocador de calor K (TROC-K).

O fluxograma obtido para a simulação do processo está representado a seguir, na Figura 2.

**Figura 2.** Fluxograma do processo de destilação construído no ambiente de simulação



Fonte: Autoria própria.

##### 4.1. COMPONENTES E MODELO TERMODINÂMICO

Utilizando o banco de dados do próprio software, foram selecionadas as substâncias utilizadas na simulação, que consistem nos componentes típicos presentes no vinho alimentado, proveniente da fermentação. Os componentes utilizados são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Componentes utilizados na simulação.

<b>Componente</b>	<b>Tipo</b>	<b>Nome do Componente</b>	<b>Alias</b>
<b>ETANOL</b>	Convencional	Etanol	C2H6O-2
<b>AGUA</b>	Convencional	Água	H2O
<b>METANOL</b>	Convencional	Metanol	CH4O
<b>PROPANOL</b>	Convencional	Propanol	C3H8O-1
<b>ISOPROP</b>	Convencional	Isopropanol	C3H8O-2
<b>ISOBUT</b>	Convencional	Isobutanol	C4H10-O3
<b>ETILACET</b>	Convencional	Acetato de Etila	C4H8O2-3
<b>ACETALD</b>	Convencional	Acetaldeído	C2H4O-1
<b>ACACET</b>	Convencional	Ácido acético	C2H4O2-1
<b>ISOAMIL</b>	Convencional	Álcool Isoamílico	C5H12O-3

Fonte: Autoria própria.

Quanto ao modelo termodinâmico adotado na simulação, os modelos UNIQUAC (*Universal Quasi-Chemical Model*) e NRTL (*Nonrandom Two-liquid Model*) predizem satisfatoriamente o equilíbrio no sistema de destilação convencional para a produção de etanol hidratado, sendo que o NRTL apresenta resultados ligeiramente superiores ao UNIQUAC. Observa-se ainda a necessidade de se considerar a não-idealidade da fase vapor sendo empregada a correlação de Hayden-O'Connell (HOC) para a predição da dimerização do ácido acético nesta fase (Junqueira, 2010). Sendo assim, optou-se por adotar o modelo termodinâmico NRTL-HOC neste trabalho.

#### 4.2. PARÂMETROS E ESPECIFICAÇÕES

As especificações e parâmetros aplicados na simulação são baseados nos parâmetros de operação de um aparelho de destilação real para a produção de etanol hidratado e estão descritos a seguir, na Tabela 3.

**Tabela 3.** Parâmetros adotados na simulação de produção de etanol no Aspen Plus®.

<b>Equipamento</b>	<b>Módulo do Aspen</b>	<b>Especificações</b>
COL-A	RADFRAC	Apresenta 16 estágios. Não possui condensador ou refeedor. Pressão de 1,5 bar. Alimentação de vapor na base (estágio 16) e do líquido proveniente da COL-A1 no topo (estágio 1).

DIV-FLEG	FSPLIT	Recebe a corrente de vapor do topo da COL-A e a divide entre as colunas A1 e B. Ajuste da fração de divisão por design spec com objetivo de manter fração mássica de etanol na corrente de flegma igual a 44,16%.
COL-A1	RADFRAC	Apresenta 6 estágios. Não possui condensador ou refeedor. Pressão de 1,5 bar. Alimentação de vinho no topo da coluna (estágio 1) e do vapor proveniente da COL-A na base (estágio 6).
COL-D	RADFRAC	Apresenta 6 estágios. Não possui condensador ou refeedor. Pressão de 1,5 bar. Alimentação do vapor proveniente da COL-A1 na base (estágio 16) e do refluxo proveniente dos condensadores R e R1 no topo (estágio 1).
TROC-K	HEATER	Aquece o vinho até 90°C através da troca térmica com a vinhaça proveniente da COL-A e não apresenta perda de carga.
COND-R	HEATER	Resfria a corrente de topo da COL-D até 45°C e não apresenta perda de carga.
F1	FLASH2	Recebe a corrente proveniente do COND-R e a separa direcionando o vapor para o COND-R1 e o líquido é direcionado para o divisor SPLIT-D.
SPLIT-D	FSPLIT	Recebe a corrente líquida de B1 e a divide entre o refluxo da coluna COL-D e o álcool de segunda.

		Especificada a vazão de 0,002 kg/h para o álcool de segunda.
COND-R1	HEATER	Resfria a corrente proveniente do COND-R até 40°C e não apresenta perda de carga.
F2	FLASH2	Flash adiabático e sem perda de carga.
COL-B1	RADFRAC	Apresenta 13 estágios. Não possui condensador ou refeedor. Pressão de 1,44 bar. Alimentação do vapor na base (estágio 13) e do líquido proveniente da COL-B no topo (estágio 1).
COL-B	RADFRAC	Apresenta 42 estágios. Não possui condensador ou refeedor. Pressão de 1,44 bar. Alimentação do vapor proveniente da COL-B1 e de flegma na base (estágio 42), flegma líquida no estágio 37 e do refluxo dos condensadores no topo (estágio 1).
COND-E	HEATER	Aquece o vinho até 70°C através da troca térmica com os vapores alcoólicos provenientes da COL-B e não apresenta perda de carga.
COND-E1	HEATER	Resfria os vapores alcoólicos provenientes da COL-B até 45°C e não apresenta perda de carga.
COND-E2	HEATER	Condensa o remanescente de vapor alcoólico proveniente da COL-B e resfria até 40°C e não apresenta perda de carga.
F3	FLASH2	Separa a corrente proveniente do COND-E, direcionando o vapor para o COND-E1 e o líquido como refluxo para COL-B.

DIV-E2	FSPLIT	Recebe a corrente proveniente do COND-E2 e a divide retirando parte como etanol hidratado e o restante é direcionado de volta a COL-B como refluxo.
MIXREF-E	MIXER	Faz a união das correntes de refluxo proveniente dos condensadores E e E2.

Fonte: Autoria própria.

Além da modelagem apresentada, foram especificados no simulador dados de entrada como a vazão de vinho, seus componentes e a concentração de cada um deles na corrente, além da vazão de alimentação de vapor nas colunas A e B1, baseando-se em dados do aparelho real a ser simulado, obtidos a partir de trabalhos anteriores.

A alimentação de vinho especificada a uma vazão de 134500 kg/h, temperatura de 35°C e com os componentes e respectivas concentrações apresentadas a seguir, na Tabela 4. O vinho produzido a partir da fermentação em usinas de cana de açúcar apresenta concentração de álcool entre 7 e 12% v/v, sendo adotado na simulação concentração de 12% v/v, resultando em 9,5% m/m. A fração dos outros componentes foi definida como valores intermediários considerando a faixa de concentração dos componentes apresentada anteriormente, na Tabela 1.

**Tabela 4.** Composição do vinho aplicada na simulação.

Componente	Concentração (m/m)
Água	0,904
Etanol	0,095
Metanol	$1,5 \cdot 10^{-8}$
Isopropanol	$1,02 \cdot 10^{-6}$
Propanol	$4,45 \cdot 10^{-5}$
Isobutanol	$3,1 \cdot 10^{-5}$
Álcool Isoamílico	$1,075 \cdot 10^{-4}$
Acetato de Etila	$8,7 \cdot 10^{-6}$
Acetaldeído	$4,65 \cdot 10^{-5}$
Ácido acético	$5,13 \cdot 10^{-3}$

Fonte: adaptado, Batista (2008)

O vapor vegetal utilizado como fonte de calor nas colunas A e B é um vapor saturado na pressão de 9,2 psig e temperatura de 115°C, contendo somente água em sua composição. Para especificar as vazões de alimentação de vapor nas colunas A e B, partiu-se de valores estimados por balanços de massa a partir dos dados performados pelo aparelho real. Entretanto, os valores foram alterados, por tentativa e erro, até chegar a valores que convergissem na simulação que correspondem a 25000 e 27844 kg/h, respectivamente, nas colunas A e B.

Por fim, ainda no ambiente de simulação, fez-se uso da ferramenta design spec para determinar as vazões de alimentação de vapor nas colunas A e B necessárias para manter as perdas de etanol nas correntes de vinhaça e flegmaça abaixo de 0,02%*m/m*, mantendo os teores alcoólicos nas correntes de flegma e de etanol hidratado conforme especificado.

Para fins de simplificação, não foram simuladas as retiradas de óleo fúsel.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

A partir da alimentação de vinho a uma vazão de 134500 kg/h e temperatura de 35°C, esta corrente é direcionada para o condensador E (COND-E), em que realiza troca térmica com os vapores alcoólicos que saem no topo da coluna B (COL-B) a temperatura 87°C. Após a integração energética realizada no condensador, parte dos vapores alcoólicos condensa, retornando ao topo da coluna B e o restante é direcionado ao condensador E1 (COND-E1), enquanto o vinho é aquecido à temperatura de 70°C.

O vinho aquecido é direcionado ao trocador de calor K (TROC-K), no qual realiza troca térmica adicional com a corrente de vinhaça, obtida como produto de fundo da coluna A (COL-A) a uma temperatura de 111°C. Na saída do trocador, o vinho atinge temperatura de 90°C, atendendo à especificação de temperatura adequada para ser alimentado na coluna A1 (COL-A1), enquanto a vinhaça é resfriada a 92°C.

### 5.2. CONSUMO DE VAPOR

Buscando analisar e otimizar o consumo de vapor inicialmente simulado, foi realizada uma análise para identificar quais as vazões de alimentação de vapor necessárias para as colunas A e B, para manter as perdas de etanol nas correntes de resíduo, vinhaça e flegmaça, abaixo do parâmetro especificado de 0,02% m/m, garantindo pureza adequada no produto e mantendo a pressão do vapor constante em 9,2 psig.

A análise foi realizada utilizando a ferramenta design spec, variando a vazão de alimentação de vapor nas colunas e analisando as perdas de etanol no produto de fundo, obtidas via simulação.

Como resultado, a vazão de alimentação de vapor na coluna A necessária calculada pelo simulador foi de 21183 kg/h, mantendo o teor alcoólico da corrente de vinhaça em 0,02% m/m. Já para a coluna B, a vazão de alimentação de vapor calculada via simulação foi de 17465 kg/h, gerando um teor alcoólico da corrente de flegmaça de 0,018% m/m.

A partir dos resultados obtidos via simulação, para o consumo de vapor na coluna A, observa-se uma otimização no consumo de vapor simulado, tendo em vista a redução de 15,3% em relação à alimentação de vapor inicial, que correspondia a 25000 kg/h, mantendo-se as perdas na corrente residual em 0,02%, conforme especificação.

Além da economia energética observada para a alimentação de vapor na coluna A, vale destacar que o ajuste também traz melhorias em relação a aspectos ambientais. A redução no consumo de vapor implica na redução do volume de resíduo gerado na coluna, tendo em vista que o conteúdo alimentado na corrente de vapor, composto por água, é majoritariamente

condensado no processo, e sai da coluna como produto de fundo, compondo a corrente de vinhaça e aumentando seu volume. Sendo assim, reduzindo a alimentação de vapor, o volume de resíduo gerado também é reduzido.

A vinhaça é produzida em volume considerável, tendo em vista que a cada litro de etanol produzido, são gerados em média cerca de 12 a 13 L de vinhaça. Exemplificando, levando em consideração apenas o aparelho simulado, que apresenta produção de etanol de 16884 L/h, seriam gerados cerca de 202608 L/h de vinhaça, totalizando cerca de 4863 m<sup>3</sup> do resíduo por dia. Por este motivo, ganhos na redução do volume gerado, mesmo que pequenos, já são bastante significativos em relação aos aspectos ambientais. Com o ajuste no consumo de vapor, a proporcionalidade obtida na simulação foi de 7,74 L de vinhaça/L de etanol.

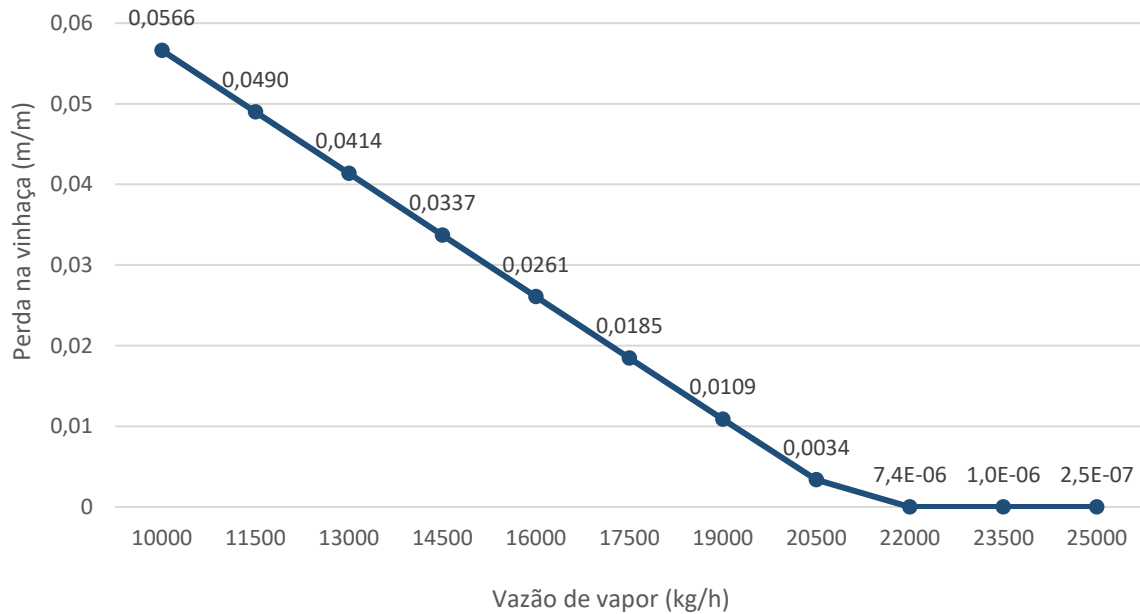
Já em relação aos resultados obtidos para o consumo de vapor na coluna B, também se observa otimização no consumo de vapor simulado, tendo em vista a redução de 37,3% em relação à alimentação de vapor inicial, que correspondia a 27844 kg/h, mantendo-se as perdas na corrente residual em 0,018%, conforme especificação.

Analisando o consumo de vapor para as colunas A e B no aparelho de destilação simulado, é totalizada uma vazão de 38648 kg/h. Tendo em vista a produção de etanol obtida via simulação que consiste em 16884 L/h, o consumo de vapor específico fica em 2,28 kg de vapor/L de etanol produzido, sendo que os valores usuais ficam na faixa de 1,8 a 2,6 kg/L.

Visando analisar de maneira mais detalhada o impacto da oscilação do consumo de vapor das colunas A e B no teor alcoólico obtido para as correntes de resíduo, foi realizada uma análise de sensibilidade, variando a alimentação de vapor nas colunas e observando os valores de perdas residuais obtidas via simulação.

Primeiramente, analisando para a o conjunto de colunas que compõem a coluna A, foi analisado o impacto da oscilação do consumo de vapor no teor alcoólico obtido para a corrente de vinhaça. Os resultados estão apresentados a seguir, na Figura 3.

**Figura 3.** Impacto da alimentação de vapor na coluna A nas perdas de etanol na vinhaça.

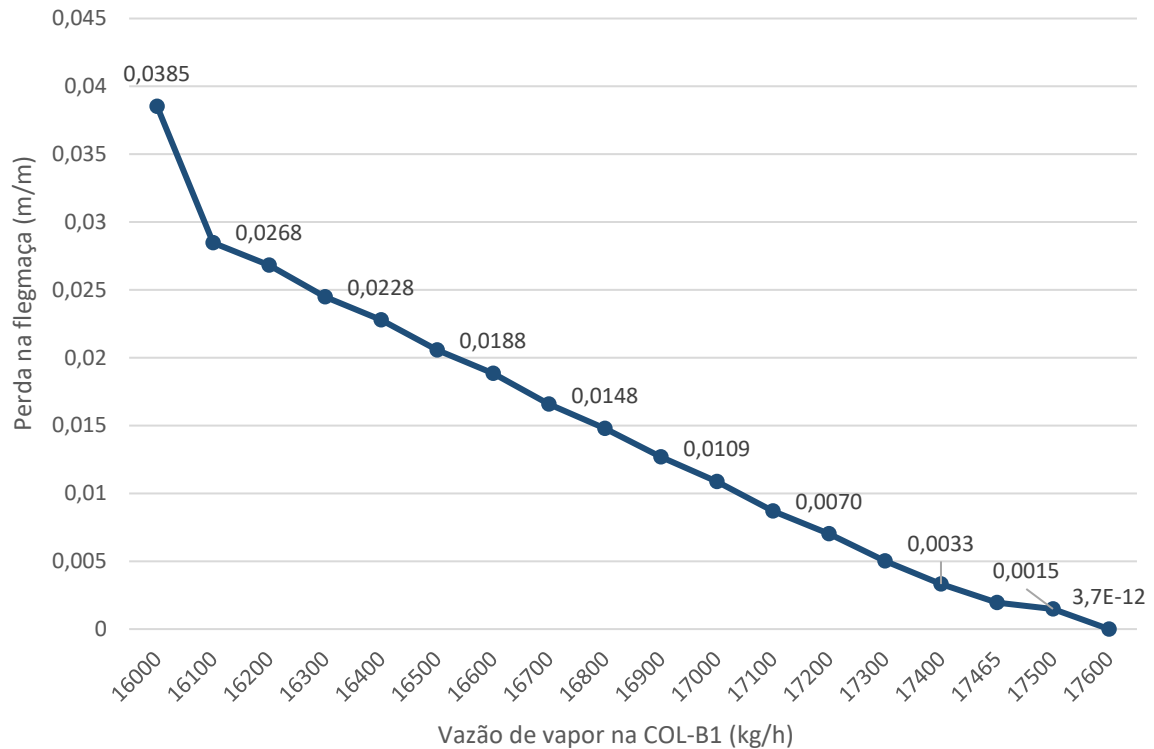


Fonte: Autoria própria.

A partir dos valores obtidos via simulação e análise gráfica, observa-se proporcionalidade inversa entre o consumo de vapor e as perdas de etanol na vinhaça, isto é, quanto maior a vazão de vapor alimentada, menor o teor alcoólico da corrente de resíduo. Ademais, observa-se que a partir de um consumo de vapor de 22000 kg/h são obtidas perdas desprezíveis de etanol na corrente residual.

Em seguida, a mesma análise foi realizada para a o conjunto de colunas que compõem a coluna B, variando a alimentação de vapor na coluna B e avaliando o teor alcoólico obtido para a corrente de flegmaça. Os resultados estão apresentados a seguir, na Figura 4.

**Figura 4.** Impacto da alimentação de vapor na coluna B nas perdas de etanol na flegmaça.



Fonte: Autoria própria.

Analogamente aos resultados obtidos para a coluna A, a partir da análise gráfica é possível observar proporcionalidade inversa entre o consumo de vapor e as perdas de etanol na flegmaça, isto é, conforme a alimentação de vapor aumenta, as perdas residuais são reduzidas. Observa-se ainda, que com alimentação de vapor de 17600 kg/h já se obtém perdas desprezíveis de etanol na corrente residual.

### 5.3. VAZÕES E TEORES ALCOÓLICOS

Na base da COL-A, ocorre alimentação de vapor a uma vazão de 21183 kg/h e temperatura de 115°C, promovendo o seu aquecimento. Além da vinhaça, obtida como produto de fundo, obtém-se o produto de topo da coluna a uma vazão de 28151 kg/h, sendo parte direcionada à COL-B e o restante alimentado na base da COL-A1.

A fração de divisão da corrente de topo da COL-A foi ajustada a partir de um divisor (DIV-FLEG), com auxílio da ferramenta design spec, tendo como premissa garantir que o teor alcoólico da corrente direcionada à COL-B, denominada flegma vapor, tenha teor alcoólico mínimo de 44,16% m/m, equivalente a aproximadamente 50°GL. A fração de divisão obtida pela simulação foi de 0,4 do conteúdo da corrente sendo direcionado para a base da COL-A1, sendo o restante direcionado à COL-B, apresentando teor alcoólico de 41,9% m/m.

A partir da fração de divisão obtida pelo design spec para o bloco DIV-FLEG, parte do produto de topo da COL-A alimenta a base da COL-A1. Nesta seção, ocorre a separação de substâncias de maior volatilidade e dos gases contaminantes na corrente de topo da coluna, que são destinadas à coluna D a uma vazão de 6970 kg/h, enquanto o restante, a partir da condensação, é retirado como produto de fundo da coluna e destinado à COL-A a uma vazão de 138791 kg/h.

Na coluna D (COL-D), após a concentração dos constituintes mais voláteis do vinho, o produto de topo da coluna é direcionado aos condensadores a uma vazão de 14722 kg/h. Os condensadores anexos ao conjunto de colunas que compõem a coluna A, são os condensadores R (COND-R) e R1 (COND-R1), cuja atuação, na prática, garante taxa de refluxo adequada à COL-D, visando obter máxima recuperação de etanol.

Nos condensadores mencionados, o produto de topo da coluna D realiza troca térmica, tendo como utilidade a água fria. Usualmente, o primeiro condensador atua como um condensador parcial, e o segundo como um condensador total. Contudo, a taxa de condensação nos equipamentos é dada pela temperatura da água de resfriamento e pela vazão de água nos condensadores, controlada pela abertura de uma válvula. Sendo assim, a depender das condições de operação das variáveis mencionadas, o COND-R pode atuar como um condensador total, e o COND-R1 apenas como um condensador auxiliar. Levando em consideração este contexto e as temperaturas usuais de saída do último condensador, adotou-se na simulação que o primeiro condensador resfria a corrente de topo da coluna D até 45°C, e o segundo completa o resfriamento até 40°C.

Após a passagem do conteúdo pelos condensadores, é usual que ocorra uma etapa de degasagem para a separação de impurezas mais voláteis, denominadas “produtos de cabeça”. Esta etapa foi representada na simulação pelo bloco F2, entretanto, para os resultados obtidos, não houve saída de conteúdo gasoso neste equipamento, tendo em vista que todo conteúdo foi condensado no COND-R.

O produto de fundo da COL-D, denominado flegma líquida, é obtido a vazão de 6960 kg/h, apresentando na simulação teor alcoólico de 52,5%*m/m*. O conteúdo desta corrente é direcionado para a coluna B.

Na COL-B1, é alimentado vapor a uma vazão de 17465 kg/h e temperatura de 115°C. Nesta seção, ocorre o esgotamento da flegma, obtendo-se como produto de fundo a corrente de flegmaça a uma vazão de 28020 kg/h e como produto de topo, corrente com vazão de 33708 kg/h, a ser direcionada para a COL-B.

Na COL-B, como mencionado anteriormente, são alimentadas as correntes de flegma vapor e flegma líquida. O conteúdo ascendente é enriquecido em teor alcoólico, enquanto a corrente descendente é desalcoholizada. Sendo assim, o produto de fundo da coluna é direcionado à COL-B1, a uma vazão de 44261 kg/h, enquanto os vapores alcoólicos obtidos como produto de topo, deixam a coluna com vazão de 65107 kg/h e teor alcoólico de 94,1% e são direcionados aos condensadores. Os condensadores anexos ao conjunto de colunas que compõem a coluna B, são os condensadores E (COND-E), E1 (COND-E1) e E2 (COND-E2), visando garantir taxa de refluxo adequada à COL-B de modo a obter máxima recuperação de etanol.

Nos condensadores mencionados, os vapores alcoólicos provenientes da COL-B realizam inicialmente troca térmica no COND-E com o vinho frio (a 35°C), conforme discutido na seção 4.1. Em seguida, o conteúdo é direcionado ao COND-E1 e posteriormente ao COND-E2, que utilizam água fria como fluido de resfriamento. Analogamente aos condensadores do conjunto de colunas que compõem a coluna A, o primeiro condensador atua como um condensador parcial, e o segundo como um condensador total, com taxa de condensação definida por variáveis como a temperatura da água de resfriamento e pela vazão de água nos condensadores. Sendo assim, do mesmo modo, a depender das condições de operação das variáveis mencionadas, o COND-E1 pode atuar como um condensador total, e o COND-E2 apenas como um condensador auxiliar. Levando em consideração este contexto e as temperaturas usuais de saída do último condensador, adotou-se na simulação que o primeiro condensador resfria a corrente até 45°C, e o segundo completa o resfriamento até 40°C.

A razão de refluxo de operação usual para a coluna B do aparelho real está entre 5 e 7. Entretanto, na simulação, com uma razão de refluxo de 3,9 já se obtém pureza e vazão de produto conforme performado pelo aparelho real. Este resultado pode ser justificado pelo fato de que os estágios do aparelho real estão sendo simulados como estágios de equilíbrio e, na prática, como a planta precisa de 5 a 7, pode-se inferir que os estágios reais correspondem a um número inferior de estágios teóricos.

Por fim, na saída dos condensadores obtém-se o produto final, na forma de etanol hidratado carburante, a uma vazão de 13298 kg/h e teor alcoólico de 94,18%*m/m*, atendendo requisitos de pureza especificados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

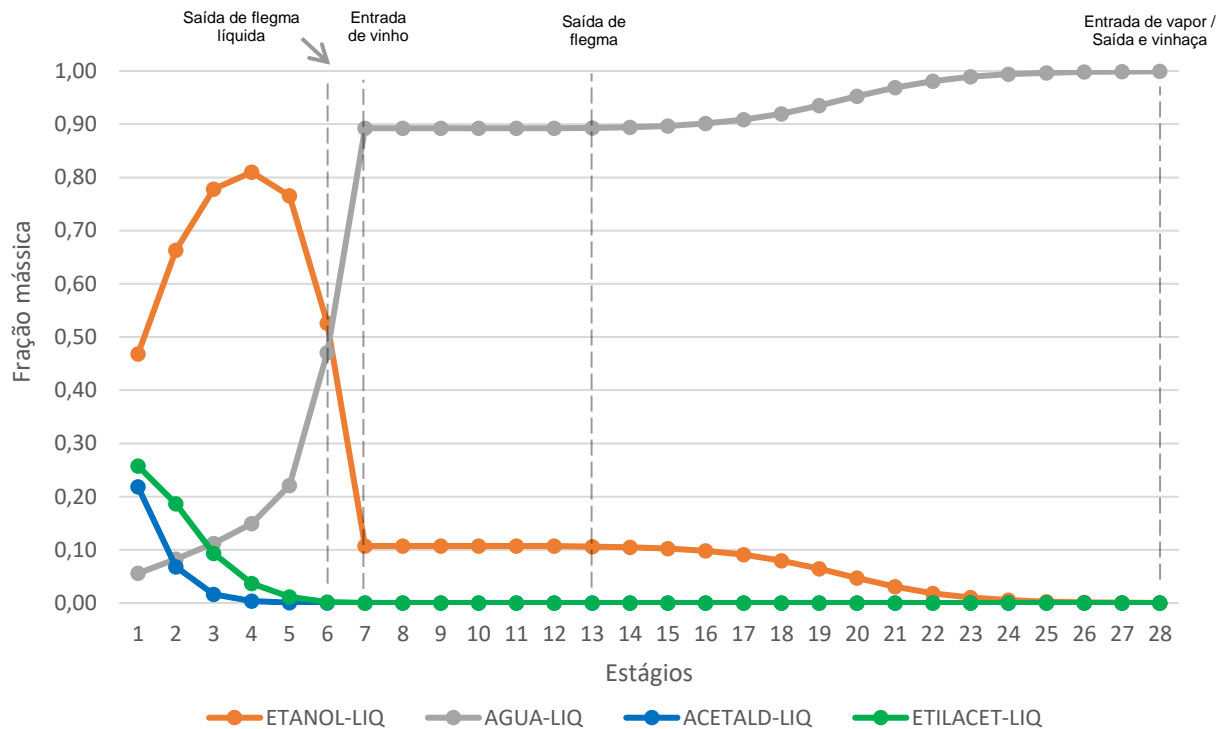
### **5.3. COMPOSIÇÃO DOS ESTÁGIOS**

A partir da simulação, também foi possível analisar a fração mássica dos componentes ao longo dos estágios da coluna A e da coluna B. Para a coluna A, a contagem dos estágios adotada se inicia no primeiro estágio (topo) da COL-D, descendo sucessivamente pelos

estágios da COL-A1 e finalizando a contagem no último estágio da COL-A (fundo). Analogamente, a contagem dos estágios para a coluna B se inicia no estágio de topo da COL-B e termina no estágio de fundo da COL-B1.

O resultado obtido para a composição ao longo dos estágios da coluna A, está apresentado a seguir, na Figura 5.

**Figura 5.** Fração mássica por componente ao longo dos estágios da coluna A.



Fonte: Autoria própria.

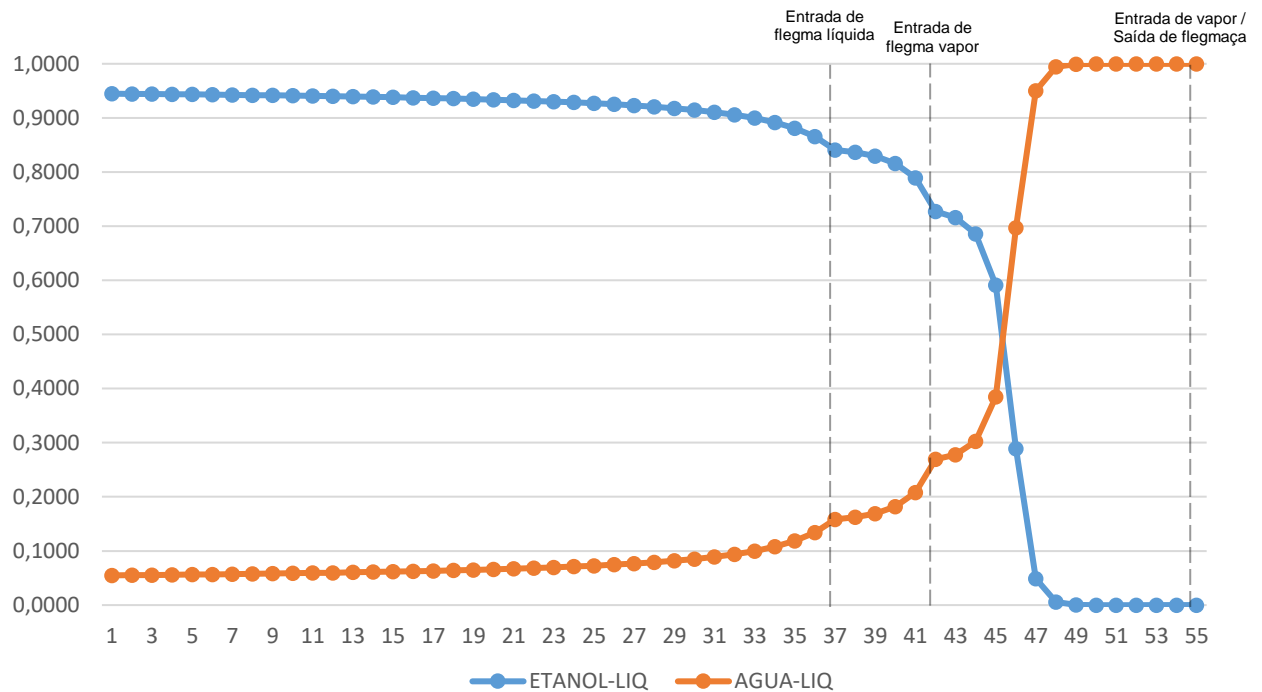
A partir da análise gráfica, pode-se observar a influência da volatilidade relativa nos primeiros estágios da coluna, tendo em vista a redução da fração de etanol na fase líquida em relação aos estágios inferiores. Isto pode ser explicado pela influência de algumas substâncias como o acetaldeído, acetato de etila e o metanol, que apresentam volatilidades relativas superiores à apresentada pelo etanol.

No estágio 6, ocorre a retirada da flegma líquida da coluna D, em que a fração mássica de etanol na fase líquida corresponde a aproximadamente 0,53. Já no estágio 7, é possível observar o impacto da alimentação de vinho, com concentração de etanol mais baixa.

Ao longo dos estágios da COL-A, do 13 ao 28, observa-se redução da fração mássica de etanol na fase líquida, atingindo no último estágio, em que é retirada a vinhaça, a fração mássica de etanol desejada na fase líquida, a fim de evitar perdas de etanol.

Já para a coluna B, os resultados obtidos para a composição ao longo dos estágios, está apresentado a seguir, na Figura 6.

**Figura 6.** Fração mássica por componente ao longo dos estágios da coluna B.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise gráfica, pode-se observar a influência da alimentação de flegmas líquida e vapor no equilíbrio, nos estágios 37 e 42, respectivamente. Pode-se também observar o aumento da fração mássica de etanol na fase líquida ao longo dos estágios, sendo concentrado e atingindo 94,1% no topo da coluna. Observa-se ainda a influência da alimentação de vapor na base da coluna, tendo fração mássica de água próxima a 100% e a saída de flegmaça com a fração de etanol desprezível.

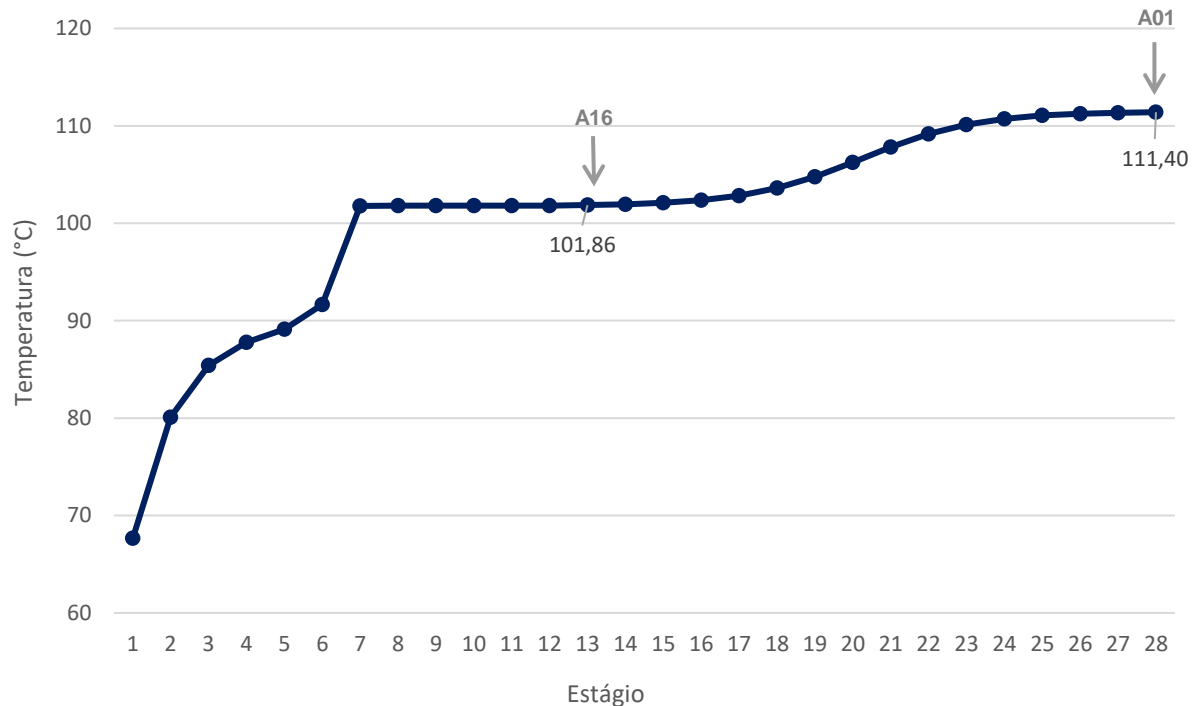
Ademais, observa-se que a composição da fase líquida e vapor permanece constante ao longo dos estágios centrais, entretanto, não se pode afirmar que a coluna está superdimensionada, tendo em vista que os estágios reais foram simulados como estágios de equilíbrio. Além disso, não foram simuladas as retiradas de óleo fúsel na coluna, que certamente impactariam o equilíbrio de fases.

#### 5.4. COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS COLUNAS

A partir da simulação, ainda é possível avaliar o perfil térmico das colunas ao longo dos estágios, comparando com as temperaturas usuais nos pontos de controle de temperatura do aparelho real.

Os resultados obtidos ao analisar o conjunto de colunas que compõem a coluna A estão apresentados abaixo, na Figura 7.

**Figura 7.** Perfil de temperatura em função dos estágios da coluna A.



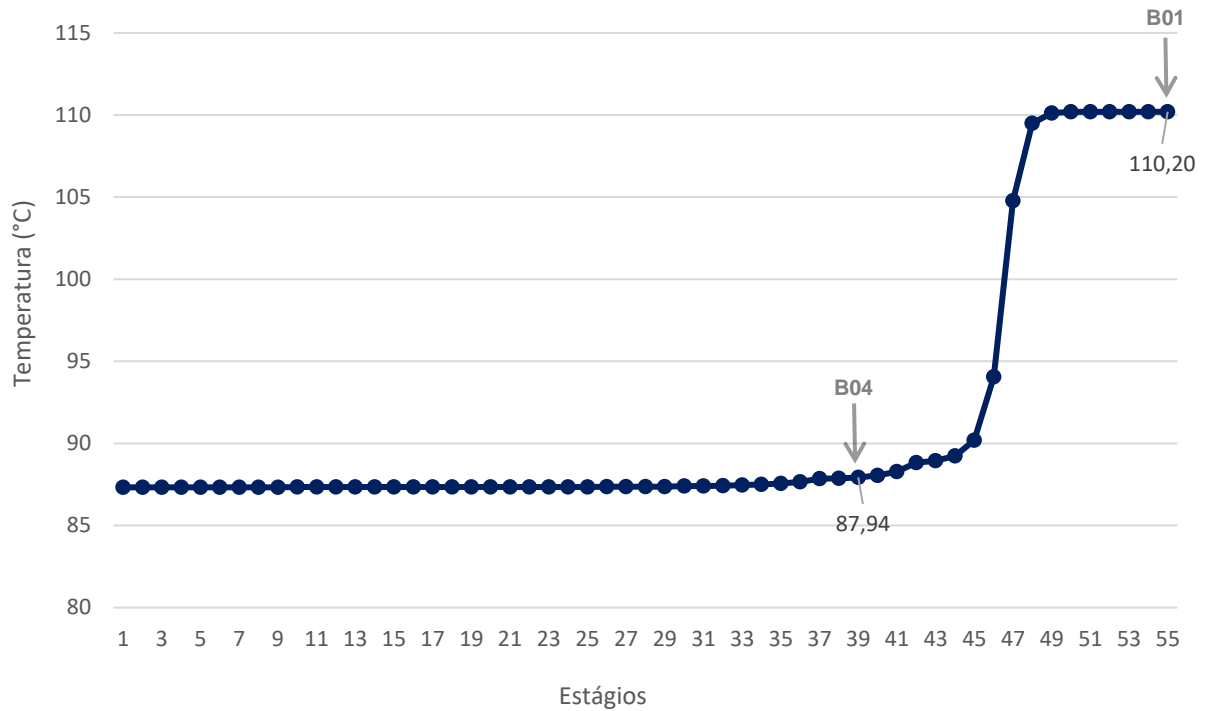
Fonte: Autoria própria.

Para a coluna A, existem dois pontos de controle no aparelho real: A01, que mede o primeiro estágio de baixo para cima (Estágio 28 na simulação) e A16, que mede o 16º estágio também de baixo para cima (Estágio 13 na simulação). Na operação real do aparelho de destilação, as temperaturas usuais no ponto A01 ficam na faixa de 108 a 110 °C e no ponto A16, na faixa de 99 a 102°C.

A partir dos resultados obtidos e análise gráfica, observa-se que no estágio 28 (A01) a temperatura simulada corresponde a 111,4°C, pouco acima da faixa ideal de operação. Já no estágio 13 (A16), a temperatura simulada foi de 101,86°C, conforme a faixa de ideal de operação do aparelho real.

Ao analisar o conjunto de colunas que compõem a coluna B, foram obtidos os resultados apresentados a seguir, na Figura 8.

**Figura 8.** Perfil de temperatura em função dos estágios da coluna B.



Fonte: Autoria própria.

Para a coluna B, existem também dois pontos de controle no aparelho real: B01, que mede o primeiro estágio de baixo para cima da COL-B1 (Estágio 55 na simulação) e B04, que mede o quarto estágio também de baixo para cima da COL-B (Estágio 39 na simulação). Na operação real do aparelho de destilação, as temperaturas usuais no ponto B01 ficam na faixa de 108 a 110 °C e no ponto B04, na faixa de 88 a 92°C.

A partir dos resultados obtidos e análise gráfica, observa-se que no estágio 55 (B01) a temperatura simulada corresponde a 110,2°C, ficando pouco acima das temperaturas usuais. Já no estágio 39 (B04), a temperatura simulada foi de 87,9°C, próxima à faixa de temperatura performada pelo aparelho real.

## 6. CONCLUSÃO

O aparelho simulado utilizando o software Aspen Plus®, demonstrou representar de forma satisfatória o comportamento do sistema real, tendo em vista que as vazões e teores alcoólicos das correntes envolvidas no processo obtidos por meio da modelagem computacional estão em conformidade com os valores operacionais observados na planta industrial. Sendo assim, o modelo desenvolvido se mostra uma ferramenta útil para futuras análises e otimizações acerca do processo de destilação para produção de etanol hidratado.

O modelo termodinâmico NRTL-HOC ajustou-se adequadamente aos dados simulados, prevendo de maneira satisfatória o equilíbrio no sistema de destilação convencional para a produção de etanol hidratado. Além disso, a inclusão de componentes minoritários na modelagem permitiu uma avaliação mais abrangente do impacto dessas substâncias no equilíbrio ao longo dos estágios da coluna, contribuindo para uma representação mais fiel do sistema real.

A simulação possibilitou ainda a análise do efeito da volatilidade relativa dos componentes sobre a composição das fases em equilíbrio, bem como a influência da alimentação de correntes ao longo dos estágios da coluna. Esses resultados são de grande valor para estudos futuros que envolvam a distribuição de composição ao longo da coluna.

Além disso, a análise do perfil térmico da coluna reforça a representatividade do modelo desenvolvido, visto que as temperaturas simuladas apresentaram boa correlação com as condições operacionais do equipamento real.

O consumo de vapor obtido na simulação foi de 2,28 kg/L de etanol, valor compatível com os parâmetros operacionais usuais, e observou-se proporcionalidade inversa entre o consumo de vapor e as perdas de etanol nas correntes de resíduo, conforme esperado. Com auxílio da ferramenta design spec, foi possível estimar o consumo mínimo de vapor necessário para manter as perdas de etanol nas correntes de resíduo abaixo do parâmetro especificado. Assim, foi possível otimizar o consumo energético, resultando em uma redução de 15% e 37% para as colunas A e B, respectivamente, em relação aos valores inicialmente simulados.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se que seja realizado um estudo da eficiência real dos estágios das colunas e do impacto da oscilação da pressão do vapor nas perdas residuais. Ademais, sugere-se que sejam incluídas no escopo da simulação as retiradas de óleo fúsel, que certamente influenciam no equilíbrio dos estágios.

Com base nas considerações apresentadas, conclui-se que o modelo desenvolvido pode servir como uma ferramenta confiável para a análise, compreensão e aprimoramento do processo de destilação para a produção de etanol hidratado. Sua aplicação em estudos

futuros tem o potencial de contribuir para a otimização operacional, redução de perdas e o aumento da eficiência energética, promovendo melhorias no desempenho do sistema.

## 7. REFERÊNCIAS

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2023. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2023>>. Acesso em: 11 nov. 2024.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Etanol. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/etanol>>. Acesso em: 11 nov. 2024.

AL-MALAH, K. M. Aspen Plus: Chemical Engineering Applications. 2. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2017.

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

ANDRADE, E. T.; CARVALHO, S. R. G.; SOUZA, L. F. Programa do Proálcool e o etanol no Brasil. Engevista, v. 11, n. 2, p. 127-134, 2009.

ASPENTECH. Aspen Plus®. 2024. Disponível em: <<https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus>>. Acesso em: 14 nov. 2024.

BATISTA, F. R. M. Estudo do processo de destilação alcoólica contínua: Simulação de Plantas Industriais de Produção de Álcool Hidratado, Álcool Neutro e Cachaça. Álcool Neutro e Cachaça, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2008.

BRAIBANTE, M. E. F.; PAZINATO, M. S.; ROCHA, T. R.; FRIEDRICH; L. S; NARDY, F. C. A cana-de-açúcar no Brasil sob um olhar químico e histórico: uma abordagem interdisciplinar. Química nova na escola, v. 35, n. 1, p. 3-10, 2013.

CARVALHO, L.; BUENO, R. C. O. F.; CARVALHO, M. M.; FAVORETO, A. L.; GODOY, A. F. Cana-de-açúcar e álcool combustível: histórico, sustentabilidade e segurança energética. Enciclopédia Biosfera, v. 9, n. 16, p. 530-543, 2013.

FINGUERUT, J.; MEIRELLES, A. J. A.; GUIRARDELLO, R.; COSTA, A. C. Fermentação, hidrólise e destilação. Biomassa para energia. Campinas: Editora da UNICAMP, cap. 13, p. 435-473, 2014.

GNANSOUNOU, E.; DAURIAT, A. Ethanol fuel from biomass: A review. Journal of Scientific & Industrial Research, v. 64, p. 809–821, 2005.

JUNQUEIRA, T. L. Simulação de colunas de destilação convencional, extrativa e azeotrópica no processo de produção de bioetanol através da modelagem de não equilíbrio e da modelagem de estágios de equilíbrio com eficiência, 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. *Novos Estudos CEBRAP*, São Paulo, n. 78, p. 15-21, 2007.

MASIERO, G.; LOPES, H. Etanol e biodiesel como recursos energéticos alternativos: perspectivas da América Latina e da Ásia. *Revista Brasileira de Política Internacional*, v. 51, n. 2, p. 60-79, 2008.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. *Unit operations of chemical engineering*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

MICHELLON, E.; SANTOS, A. A. L.; RODRIGUES, J. R. A. Breve descrição do Proálcool e perspectivas futuras para o etanol produzido no Brasil, 2008.

MORAES, M. L.; BACCHI, M. R. P. Etanol: do início às fases atuais de produção. *Revista de Política Agrícola*, v. 23, n. 4, p. 5-22, 2014.

PAMPLONA, C. Proálcool: Impacto em termos técnico-econômicos e sociais do programa no Brasil. Piracicaba : setor de comunicação Planalsucar, 1984.

REIN, P. *Engenharia do açúcar de cana*. Tradução de César Miranda e Ericson Mariano. Berlim, Alemanha: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2013.

ROCHA, C. T.; EXLER, R. B.; BRUCE, T. HISTÓRICO E PERSPECTIVAS SOBRE O ETANOL: O PANORAMA BRASILEIRO. Sistema de Bibliotecas da UFBA, 2013.

SCHEFFLAN, R. *Teach yourself the basics of Aspen Plus*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

SHIKIDA, P. F. A.; PEROSA, B. B. Álcool combustível no Brasil e path dependence. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 50, p. 243-262, 2012.

SILVA FILHO, E. G. A contribuição econômica dos escravizados, a partir da segunda metade do século XVI em Pernambuco, tendo como base a cana-de-açúcar e seus subprodutos. *Revista Tópicos*, v. 2, n. 5, p. 1-16, 2024.

SOUZA, F. M. de. Análise da viabilidade técnica e econômica da integração do processo de recuperação de etanol por arraste (stripping) com CO<sub>2</sub> na indústria sucroenergética. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

VASCONCELOS, J. N. Ethanol Fermentation. Sugarcane, p. 311–340, 2015.

ZARPELON, F. Destilação do etanol. Piracicaba: Stab - Sociedade dos Técnicos Açucareiros, 2020.