

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

INSTITUTO DE QUÍMICA

ENGENHARIA QUÍMICA

**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO
DE ETANOL HIDRATADO: DIMINUIÇÃO DO TEOR
ALCÓOLICO DA FLEGMAÇA**

Matheus Meneguel Neves

Campo Grande – MS

2024

Matheus Meneguel Neves

**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO
DE ETANOL HIDRATADO: DIMINUIÇÃO DO TEOR
ALCÓOLICO DA FLEGMAÇA**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química da Universidade
Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).

Orientador: Prof. Dr. Celso Murilo dos
Santos.

Campo Grande – MS

2024

Matheus Meneguel Neves

**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL
HIDRATADO: DIMINUIÇÃO DO TEOR ALCÓOLICO DA FLEGMAÇA**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química da Universidade
Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).

Data de aprovação: 19/07/2024

Prof. Dr. Celso Murilo dos Santos
Doutor em Engenharia Química
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Prof. Dra. Janaína dos Santos Ferreira
Doutora em Engenharia Química
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Prof. Laurha Prates Roma Timoteo
Bacharel em Engenharia Química
Supervisora da Qualidade Integrada- Raizen

Campo Grande - MS

2024

RESUMO

Hodiernamente, com o aumento crescente da preocupação com aspectos ambientais do planeta, o etanol se apresenta cada vez mais como uma excelente alternativa para a inevitável substituição dos combustíveis fósseis. Nesta perspectiva, se faz necessário a análise e otimização dos processos de destilação deste biocombustível, que pode ser realizada via simulação computacional. Dessa forma, este trabalho teve o objetivo de validar a utilização do Aspen Plus[®] no processo de produção de etanol hidratado da Usina Sonora, tal como utilizá-lo para otimizar as condições operacionais e estruturais das colunas de destilação. O Aspen Plus[®] apresentou dados confiáveis e condizentes quando comparados aos obtidos via análises laboratoriais, o que comprova sua eficiência na interpretação do processo produtivo da Usina Sonora. O *software* também foi utilizado para otimizar as condições estruturais do sistema de destilação, como o estágio de alimentação da flegma líquida na coluna B e de saída de flegma vapor na coluna A. Os estágios ideais definidos foram o 36 e o 6, respectivamente. Além disso, foram realizadas análises para otimização das razões de refluxo utilizadas nas colunas D e B. Neste caso, os valores ótimos desta variável foram de 3 e 4, respectivamente. Com isso, para o cenário otimizado, o sistema apresentou uma diminuição percentual na fração mássica de etanol na flegmaça de 3,95% quando comparado a simulação da planta atual da Usina Sonora, o que representa um ganho de capacidade de 1435,26 L/h de etanol hidratado. Além disso, o cenário otimizado apresentou uma baixa perda de etanol na vinhaça e um produto dentro das especificações técnicas exigidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (94,5 %m).

Palavras chave: Etanol hidratado, Simulação, Otimização, Usina Sonora, Aspen Plus[®].

ABSTRACT

Nowadays, with the increasing concern about the planet's environmental aspects, ethanol is increasingly presented as an excellent alternative to replacing fossil fuels. From this perspective, it is necessary to analyze and optimize the distillation processes of this biofuel, which can be carried out by computer simulation. Therefore, this work aimed to validate the use of Aspen Plus® in the hydrated ethanol production process at Usina Sonora, as well as using it to improve the operational and structural conditions of the distillation columns. Aspen Plus® presented reliable and consistent data when compared to those obtained from laboratory analyses, which proves its efficiency in interpreting the production process at Usina Sonora. The software was also used to improve the structural conditions of the distillation system, such as the liquid phlegm feeding stage in column B and the vapor phlegm exiting stage in column A. The ideal stages defined were 36 and 6, respectively. Furthermore, analyzes were carried out to optimize the reflux ratios used in columns D and B. In this case, the optimal values of this variable were 3 and 4, respectively. Therefore, for the optimized scenario, the system presented a percentage reduction in the maximum fraction of ethanol in the phlegmace of 3.95% when compared to the simulation of the current plant at Usina Sonora, which represents a capacity gain of 1435.26 L/ h of hydrated ethanol. Furthermore, the optimized scenario presented a low loss of ethanol in the vinasse and a product within the technical specifications applicable by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (94.5%_m).

Keywords: Hydrated ethanol, Simulation, Optimization, Usina Sonora, Aspen Plus®.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela oportunidade de desfrutar a vida com plenitude e saúde.

Agradeço à minha família por todo amor, apoio e carinho durante essa jornada acadêmica. Serei eternamente grato pela oportunidade de poder ter estudado com dedicação exclusiva, privilégio este que nem todos podem ter.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Química, que me apoiaram e compartilharam comigo momentos de ansiedade, aflição, mas também de muita alegria e felicidade.

Ao meu orientador de TCC, professor Dr. Celso Murilo dos Santos, o qual possuo profunda admiração e carinho, pelas orientações e conselhos ao longo deste trabalho e de minha trajetória acadêmica.

Ao meu orientador de Iniciação Científica, professor Dr. Bruno Gabriel Lucca, que me proporcionou a ímpar oportunidade de poder conhecer e aprender sobre o vasto mundo da Química Analítica, tanto na teoria como na prática.

A todos os meus professores, Patrícia, Janaína, Rebeca, Carlos, Emanuele, João Renato e Thaísa, pelos valiosos ensinamentos e pela dedicação incansável de proporcionar excelência ao curso de Engenharia Química da UFMS.

A UFMS e ao INQUI, por me fornecerem as oportunidades e estruturas necessárias durante a graduação.

Aos técnicos de laboratório e funcionários de limpeza, por disporem das condições e materiais necessários para que o aprendizado em sala de aula pudesse acontecer da melhor forma possível.

A Usina Sonora S/A, por ter me proporcionado uma excelente experiência de estágio, além de fornecer todas as informações técnicas e o suporte necessário para a execução deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram na minha trajetória.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS.....	15
2.1.	Geral	15
2.2.	Específicos	15
3.	ASPECTOS TEÓRICOS	16
3.1.	Cana-de-açúcar.....	16
3.2.	Etanol.....	17
3.3.	Moagem da cana	18
3.4.	Tratamento do caldo	19
3.5.	Preparo e resfriamento do mosto.....	20
3.6.	Fermentação	21
3.7.	Reciclo de leveduras	23
3.8.	Destilação	24
3.8.1.	Volatilidade relativa.....	26
3.8.2.	Diagrama de equilíbrio	27
3.8.3.	Balanco de massa e energia	28
3.8.4.	Processo de produção do etanol hidratado	29
3.8.5.	Sistema “Flegstil”	32
3.8.6	Simuladores de Processo	33
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1.	Simulação do processo produtivo de etanol hidratado da Usina Sonora	34
4.2.	Simulação do processo com injeção de vapor direto nas colunas A e B	36
4.3.	Estudo de sensibilidade	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1.	Análise da simulação do processo produtivo de etanol hidratado da Usina Sonora	39
5.1.1.	Coluna A/A1	41
5.1.2.	Coluna D	42
5.1.3.	Coluna B.....	44
5.2.	Análise da simulação do processo produtivo de etanol hidratado utilizando injeção direta de vapor na coluna A e B.....	46

5.3.	Estudos de sensibilidade para otimização do processo produtivo de etanol hidratado da Usina Sonora.....	48
5.3.1.	Razão de refluxo na coluna B	48
5.3.2.	Razão de refluxo na coluna D	51
5.3.3.	Estágio de alimentação da flegma líquida na coluna B	53
5.3.4.	Estágio de saída da flegma vapor na coluna A	55
5.3.5.	Comparação entre o cenário vigente e otimizado	57
6.	CONCLUSÃO	59
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Planta de produção de etanol hidratado da Usina Sonora.....	13
Figura 2: Sistema de embebição composta	18
Figura 3: Tratamento do caldo direcionado à produção de etanol hidratado combustível.....	20
Figura 4: Resfriamento do mosto	21
Figura 5: Método “Melle-Boinot”	23
Figura 6: Coluna de destilação fracionada	25
Figura 7: Curva de equilíbrio líquido-vapor etanol-água.....	28
Figura 8: Configuração usual para produção de etanol hidratado.....	30
Figura 9: Configuração do sistema “Flegstil” para produção de etanol hidratado	32
Figura 10: Fluxograma do processo produtivo de etanol hidratado da Usina Sonora S/A no Aspen Plus®.....	35
Figura 11: Fluxograma do processo produtivo de etanol hidratado com injeção de vapor na coluna A e B no Aspen Plus®.....	36
Figura 12: Box Plot dos dados referentes ao teor alcóolico da flegmaça.....	40
Figura 13: Perfil de temperatura da coluna A/A1	42
Figura 14: Perfil de composição da água e etanol na coluna A.....	42
Figura 15: Perfil de temperatura da coluna D	43
Figura 16: Perfil de composição de água e etanol na coluna D.....	43
Figura 17: Perfil de temperatura da coluna B.....	44
Figura 18: Perfil de composição de água e etanol na coluna B.....	44
Figura 19: Perfil de composição do óleo fúsel na coluna B.....	45
Figura 20: Perfil da volatilidade relativa do óleo fúsel na coluna B	46
Figura 21: Perfil de composição do óleo fúsel na coluna B.....	47
Figura 22: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna B com relação ao etanol hidratado	49
Figura 23: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna B com relação a flegmaça.....	49
Figura 24: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna B com relação a vinhaça.....	50
Figura 25: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna D com relação ao etanol hidratado	51
Figura 26: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna D com relação a flegmaça	51
Figura 27: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna D com relação a vinhaça	52
Figura 28: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna D com relação a o álcool de 2ª ...	52
Figura 29: Estudo da variação do estágio de alimentação de flegma líquida coluna B com relação ao etanol hidratado.....	53
Figura 30: Estudo da variação do estágio de alimentação de flegma líquida coluna B com	

relação a flegmaça.....	54
Figura 31: Estudo da variação do estágio de alimentação de flegma líquida coluna B com relação a vinhaça	54
Figura 32: Estudo da variação do estágio de saída da flegma vapor na coluna A com relação ao etanol hidratado	55
Figura 33: Estudo da variação do estágio de saída da flegma vapor na coluna A com relação a flegmaça	56
Figura 34: Estudo da variação do estágio de saída da flegma vapor na coluna A com relação a vinhaça	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química da cana-de-açúcar.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 2: Padrões de qualidade do Etanol Anidro Combustível e do Etanol Hidratado Combustível.....	17
Tabela 3: Condições de alimentação do vinho fermentado.	34
Tabela 4: Condições de alimentação do vinho fermentado.	34
Tabela 5: Condições de operação das colunas de destilação.	35
Tabela 6: Vazão mássica e pressão de vapor injetado na coluna A.	36
Tabela 7: Estudos acerca das vazões mássicas de vapor nas Colunas A e B.	37
Tabela 8: Variáveis analisadas pelo estudo de sensibilidade.	38
Tabela 9: Dados referentes a simulação do processo de produção do etanol hidratado da Usina Sonora.	39
Tabela 10: Análises do teor mássico de etanol na flegmaça.	40
Tabela 11: Comparação entre dados da simulação e do boletim industrial.....	41
Tabela 12: Resultados da simulação do processo produtivo de etanol hidratado utilizando injeção de vapor direto na coluna A e B.....	46
Tabela 13: Comparação entre dados da simulação do processo vigente e do melhor cenário com injeção de vapor direto na coluna A e B.	47
Tabela 14: Comparação entre cenário atual e otimizado.....	57
Tabela 15: Comparação entre as simulações dos cenários atual e otimizado.	58

NOMENCLATURAS

ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
IUPAC	União Internacional da Química Pura e Aplicada
E1G	Etanol 1º geração
E2G	Etanol 2º geração
AEAC	Álcool Etílico Anidro Combustível
AEHC	Álcool Etílico Hidratado Combustível
°GL	Grau Gay Lussac (graduação em volume)
°INPM	Grau Instituto Nacional de Pesos e Medidas (graduação mássica)
%v	Porcentagem em volume de um determinado composto
%m	Porcentagem em massa de um determinado composto
°Brix	Teor de sólidos em uma determinada solução
pH	Potencial Hidrogeniônico
NRTL	Modelo não aleatório de dois líquidos
V1	Vapor vegetal oriundo do processo de evaporação do caldo

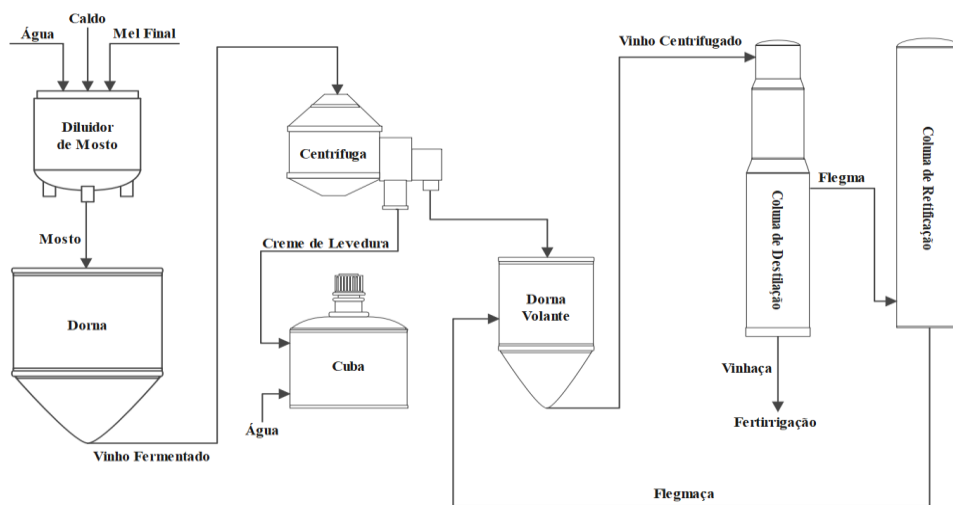
1. INTRODUÇÃO

A intensificação da instabilidade climática e o consequente aumento das emissões de dióxido de carbono a partir de combustíveis fósseis, como o petróleo, aliado ao fato destes recursos serem finitos, criou a necessidade de busca por fontes alternativas de energia. Neste cenário, os biocombustíveis surgem como excelente alternativa, visto que são advindos de fontes renováveis. O etanol, por exemplo, é um biocombustível que pode ser produzido a partir de vegetais ou cereais, como o trigo, milho, beterraba, cana-de-açúcar e etc. (SILVEIRA, 2021).

No Brasil, o etanol vem sendo produzido em larga escala desde a década de 70, como consequência do programa de incentivo governamental “Proálcool”, que tinha como objetivo substituir a gasolina pelo etanol produzido através da fermentação do caldo de cana. Nas usinas sucroenergéticas brasileiras, a produção de etanol se concentra em dois fluxos principais: etanol hidratado, utilizado diretamente como combustível, e etanol anidro, adicionado a gasolina na proporção de 27% em volume. (SANTOS et al., 2020) Atualmente, a Usina Sonora S/A, localizada no município de Sonora (Mato Grosso do Sul), produz açúcar cristal, energia e etanol hidratado, sendo o último o foco principal deste trabalho.

A produção de etanol hidratado pode ser resumida em 4 principais etapas: preparo do mosto, fermentação, tratamento de leveduras e destilação. O fluxograma observado na Figura 1 representa a planta de produção de etanol hidratado da Usina Sonora.

Figura 1: Planta de produção de etanol hidratado da Usina Sonora.



Fonte: (AUTOR, 2024)

A destilação, processo final do fluxo de produção do etanol hidratado, é responsável por separar compostos químicos baseados nas suas respectivas volatilidades. Durante este processo, os compostos mais voláteis, em forma de vapor, tendem a se concentrar no topo da coluna, enquanto os menos voláteis, no estado líquido, se acumulam na base.

Segundo o Anexo da Resolução ANP N° 907, de 18 de novembro de 2022, o etanol hidratado combustível deve possuir teor de etanol na faixa de 92,5 a 94,6% em massa e entre 94,5 e 96,3% em volume. O teor de metanol é outro parâmetro físico-químico importante, e deve ser de, no máximo, 0,5% em volume.

O simulador de processos Aspen Plus® vem sendo amplamente empregado para análise e otimização de processos. Este *software* permite que o usuário realize estudos de sensibilidade e de viabilidade econômica, utilizando para tal uma extensa gama de operações unitárias e de pacotes termodinâmicos compatíveis para cada processo industrial específico.

Dessa forma, este trabalho visa simular o processo de produção do etanol hidratado na Usina Sonora S/A, além de propor otimizações estruturais que visem o ganho de capacidade de produção e menores teores de etanol nas correntes de vinhaça e flegmaça. O comportamento do processo será estudado em função dos gráficos de temperatura, concentrações mássicas e das diversas análises de sensibilidade realizadas, que por sua vez são fundamentais na obtenção de valores otimizados para as variáveis estudadas.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Dada a importância do processo de produção do etanol hidratado, o presente trabalho tem como objetivo propor a validação do *software* Aspen Plus® , com o intuito de utilizá-lo como ferramenta para análise e otimização do processo de produção de etanol hidratado da Usina Sonora. Com isso, espera-se determinar as condições ótimas de operação do sistema visando a maximização da capacidade de produção e minimização dos teores de etanol na vinhaça e flegmaça.

2.2. Específicos

- Simular o processo de produção de etanol hidratado e verificar se os resultados são congruentes com os obtidos via boletim industrial da Usina Sonora;
- Analisar o perfil de temperatura e de composição nas colunas de destilação;
- Avaliar a influência da razão de refluxo sobre o produto e subprodutos do processo;
- Estudar a influência do estágio de alimentação e saída de correntes do processo sobre o produto e subprodutos;
- Analisar o consumo de vapor do processo;

3. ASPECTOS TEÓRICOS

3.1. Cana-de-açúcar

A cana (*saccharum officinarum*) está vinculada às atividades humanas desde milênios, sendo originária do sudoeste asiático e das Índias Ocidentais. Espanha e Portugal, na época das grandes navegações, disseminaram o cultivo da cana por diversas regiões tropicais e subtropicais. Da Ilha da Madeira, a cana-de-açúcar foi introduzida nas Américas, passando então a ser cultivada em alguns países da América do Sul e Central (LOPES, 2011).

A cultura de cana na Região Centro-Sul do país teve início nas vizinhanças da cidade de Santos no litoral paulista. Na Região Norte-Nordeste, o primeiro engenho foi instaurado em 1535, onde hoje se localiza a cidade de Olinda, no Estado de Pernambuco (LOPES, 2011).

Os açúcares são compostos químicos encontrados em quantidade variável em todos os vegetais. Parte deste açúcar é consumido em detrimento do metabolismo da planta, enquanto o restante é armazenado em raízes, folhas, colmos e etc. Dos açúcares presentes na cana, os principais são a glicose, a frutose e a sacarose.

Geralmente, os colmos de cana são compostos por uma parte sólida, a qual denomina-se fibra, e por uma parte líquida, conhecido como caldo da cana, constituído por água e alguns compostos dissolvidos nela, sendo que a sacarose se apresenta em maior abundância, seguido pelos açúcares redutores (glicose e frutose). A composição da cana pode ser analisada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química da cana-de-açúcar.

Compostos	Composição química da cana (%)
Água	74,5
Açúcares (Sacarose, glicose e frutose)	14,4
Fibras	10
Cinzas	0,5
Materiais nitrogenados	0,4
Gorduras e ceras	0,2

Fonte: (Adaptado de LOPES, 2021)

3.2. Etanol

O álcool etílico, também denominado etanol pela nomenclatura IUPAC, é um composto de fórmula molecular C_2H_5OH que pode ser produzido por duas vias principais: hidratação do etileno e fermentação de açúcares por leveduras, sendo a última a rota utilizada no setor sucroalcooleiro. É um composto orgânico que, por apresentar um grupo funcional hidroxila (-OH), pertence a função dos álcoois. Além disso, o etanol é um líquido límpido incolor, com ponto de fusão que varia entre -117,3 a -114,4 °C e ponto de ebulição entre 78 e 78,4 °C (QUIMESP, 2021).

O etanol oriundo da fermentação de açúcares por leveduras pode ainda ser classificado como de primeira (1G) ou segunda geração (2G). O etanol 1G é produzido através dos açúcares redutores obtidos diretamente de biomassas açucaradas ou amiláceas, já o 2G é produzido dos mesmos açúcares, porém é obtido através do processo de hidrólise de materiais lignocelulósicos (FONSECA, 2014).

No Brasil, o etanol é comumente utilizado como combustível automotivo. As produções de álcool neutro para as indústrias químicas, farmacêuticas e de bebidas ocorrem em menores proporções. O álcool combustível pode ser comercializado de duas formas: como Álcool Etílico Anidro combustível (AEAC), que é adicionado à gasolina na proporção de 27%, e o Álcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC), utilizado em carros a combustão exclusivos a álcool. (BATISTA, 2008)

A resolução ANP N° 907, de 18/11/2022, apresenta os padrões de qualidade que o etanol hidratado e anidro devem atender. Dentre estas especificações, alguns aspectos físico-químicos que devem ser atendidos são: acidez total, teor de aldeídos, condutividade elétrica e etc. A Tabela 2 apresenta todas as especificações exigidas para o etanol hidratado combustível, que é o foco deste trabalho.

Tabela 1: Padrões de qualidade do Etanol Anidro Combustível e do Etanol Hidratado Combustível

Característica	Unidade	Limite	
		Etanol Anidro Combustível	Etanol Hidratado Combustível
Acidez total, máx	mg/L	30	
Condutividade elétrica, máx	µS/m	300	
Massa específica a 20 °C	kg/m ³	791,5 máx	805,2 a 811,2
Teor alcoólico	% massa	99,3 mín	92,5 a 94,6
Teor de etanol, mín	% volume	98,0	94,5
Teor de água, máx	% massa	0,7	7,5

Fonte: (ANP, 2022)

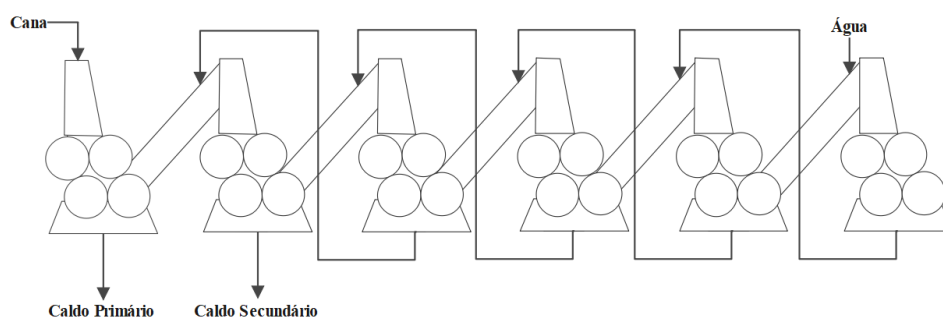
A concentração alcoólica é um dos parâmetros fundamentais de qualidade do etanol, e pode ser expressa em diversas unidades. Nas usinas sucroalcooleiras, é muito comum utilizar a nomenclatura °GL (Gay-Lussac). No entanto, os próprios franceses que inventaram a sigla a deixaram de utilizar em 1979, pois o °GL representava a graduação alcoólica a 15 °C, e como o padrão passou a ser 20 °C, a notação foi substituída por %v. Outra nomenclatura comum de se encontrar em usinas brasileiras é o °INPM (Instituto Nacional de Pesos e Medidas), que indica a porcentagem de etanol em massa do produto. Esta foi eliminada das especificações brasileiras em 2011. Dessa forma, a sigla correta para representar o percentual mássico é %m (ZARPELON, 2020).

3.3. Moagem da cana

Após a recepção, a cana-de-açúcar, que já vem picada pela colhedora, passa por um desfibrador, cuja principal função é abrir as células da cana para que o processo de extração do caldo possa ser eficiente. Em seguida, a matéria-prima passa por uma sequência de ternos, que pode variar entre 4 a 6, onde o caldo é extraído ao máximo, atingindo valores de extração que podem ultrapassar 97%.

O aumento da eficiência no sistema de extração é amplificado devido ao uso do sistema de embebição composta, que pode ser observada na Figura 2. A água é adicionada no último terno, sendo direcionada aos ternos anteriores até atingir o segundo, onde se obtém o caldo secundário, com °Brix entre 8-12. Além de não receber embebição, o primeiro terno é responsável por 70% da extração do caldo e apresenta um °Brix entre 18-21.

Figura 2: Sistema de embebição composta



Fonte: (AUTOR, 2024)

Posteriormente, o caldo é direcionado a um sistema de peneira rotativa, onde ocorre a retirada de impurezas sólidas. Na planta da Usina Sonora, após o peneiramento do caldo primário e secundário, ambos se misturam e dão origem ao caldo misto, que apresenta °Brix entre 14-16. A maior parte deste caldo é direcionado à fabricação de açúcar, sendo que o excedente não processado é somado às correntes de reprocesso do sistema e é direcionado para a produção de etanol hidratado.

3.4. Tratamento do caldo

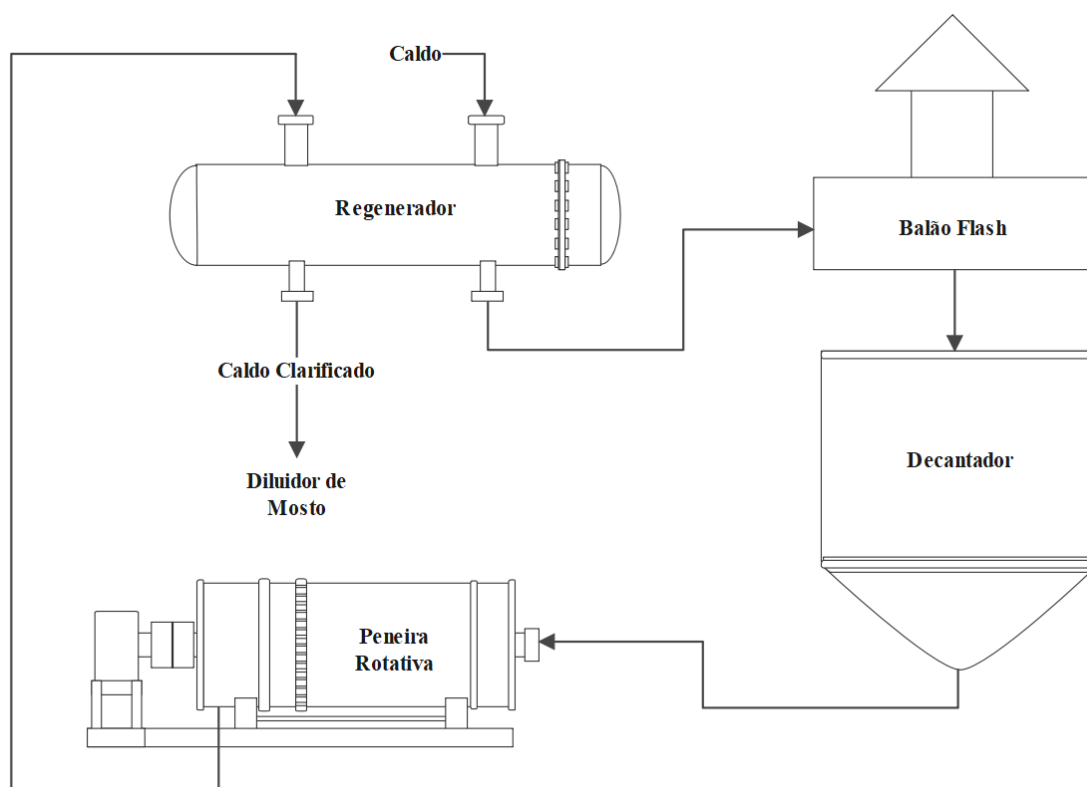
Para a produção de etanol em específico, foco deste trabalho, o caldo destinado a destilaria passa por um processo de aquecimento em um regenerador, onde o caldo saindo do decantador, a aproximadamente 95 °C, aquece o caldo que entra no regenerador, em uma faixa de 40-60 °C, até um valor próximo de 75 °C. Geralmente, o que é direcionado para a produção de álcool é uma mistura de caldo misto, filtrado, borra do flotador, água doce do lavador de pó e outras correntes de reprocesso.

O caldo, a 75 °C, passa por um aquecimento utilizando vapor vegetal “V1”, a aproximadamente 115 °C, oriundo da sangria do processo de evaporação do caldo primário, geralmente direcionado ao processo de fabricação de açúcar. Dessa forma, o caldo entra no balão flash com temperatura de 103-105 °C, e nele ocorre um brusco processo de expansão, eliminando alguns gases contidos nele, que interferem diretamente em uma decantação efetiva. Dessa forma, a temperatura no balão flash tende a cair para 97-99 °C.

Do balão flash, o caldo é direcionado ao decantador, onde grande parte das partículas sólidas sofrem sedimentação e se depositam no fundo do decantador. Esse aglomerado de sólidos é chamado de lodo.

O caldo que sai do decantador é direcionado a uma peneira, geralmente rotativa, onde o restante das partículas sólidas são removidas. O caldo, agora denominado de clarificado, é então utilizado no regenerador citado anteriormente. Neste processo, sua temperatura decai de 95 °C para 75 °C e o caldo é então enviado para a fábrica de etanol. O fluxograma do processo descrito pode ser observado na Figura 3.

Figura 3: Tratamento do caldo direcionado à produção de etanol hidratado combustível



Fonte: (AUTOR, 2024)

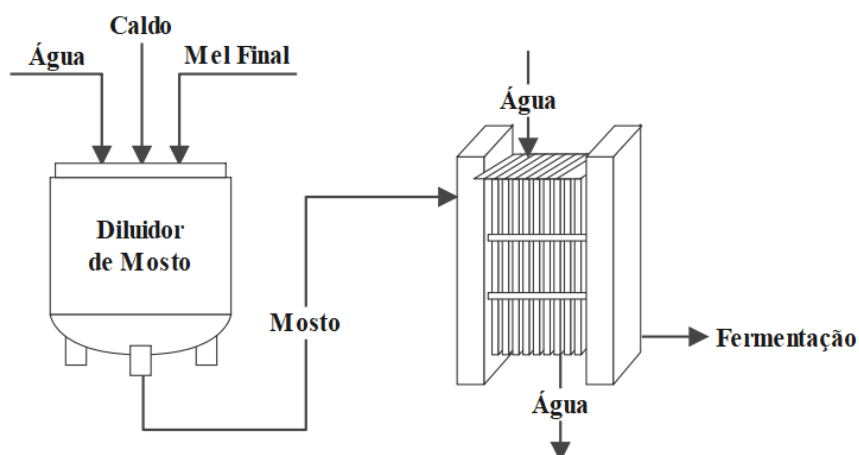
3.5. Preparo e resfriamento do mosto

Ao chegar na fábrica de etanol, o caldo clarificado é direcionado a um diluidor, onde se mistura com mel final (subproduto do processo de fabricação do açúcar) e água para formar o mosto, que é um líquido açucarado fermentável. A quantidade de sólidos solúveis em uma solução pode ser medida em uma escala numérica conhecida como °Brix (°Bx). Para o mosto, a graduação ideal deve estar em torno de 18-22 °Bx.

O caldo clarificado, usualmente, possui um baixo teor de sólidos, sendo este em torno de 8-12°Bx. Para se atingir o valor desejado no mosto, utiliza-se mel final para corrigir o Brix, que apresenta valor médio em torno de 80° Bx. Em alguns casos particulares, onde nenhum caldo é enviado a fábrica de etanol, o °Brix do mel final é corrigido utilizando água, que apresenta um teor de sólidos quase desprezível.

O mosto, a uma temperatura próxima de 70 °C, é então resfriado até 30-34°C em trocadores de calor (geralmente do tipo placas), que é a faixa de temperatura ideal para que o processo de fermentação possa ocorrer de forma adequada. O fluxograma da Figura 4 retrata os procedimentos descritos neste tópico.

Figura 4: Resfriamento do mosto



Fonte: (AUTOR, 2024)

3.6. Fermentação

A fermentação alcoólica é um processo anaeróbio que ocorre pela transformação de açúcares redutores em etanol (C_2H_5OH) e gás carbônico (CO_2), processo este catalisado por enzimas e executado por leveduras, geralmente da espécie *Saccharomyces cerevisiae*, que são organismos unicelulares, eucariotas, heterotróficos e pertencem ao reino Fungi.

O rendimento fermentativo pode ser afetado por uma série de fatores, sejam eles físicos, químicos ou biológicos. Alguns exemplos destes são: pressão osmótica, temperatura, pH, concentração de levedura, contaminação bacteriana e etc. Durante o processo, a levedura está exposta a esses fatores que, em muitos casos, podem ocasionar uma situação de estresse celular, como temperaturas elevadas, alto teor alcoólico, acidez do meio, presença de sulfito, contaminação bacteriana e etc. (BASSO, 2004).

Consoante Lima *et.al.* (2001), a fermentação alcoólica pode ser segmentada em três etapas: preliminar, tumultuosa e complementar. A fase preliminar tem início quando o substrato é adicionado junto as células. Nesta etapa, a multiplicação das leveduras ocorre de forma intensa e o açúcar consumido é utilizado para reprodução das células. Além disso, observa-se uma pequena elevação de temperatura e um baixo desprendimento de CO_2 .

A fase tumultuosa, ao contrário da preliminar, se caracteriza por um desprendimento intenso de CO_2 , o que gera uma agitação do mosto e consequentemente a formação de espuma. Nesta etapa, observa-se um aumento de temperatura, que deve

ser corrigido por trocadores de calor.

Já na fase complementar, observa-se que o desprendimento de CO_2 diminui sensivelmente e o conteúdo na dorna tende a ascender. Além disso, constata-se uma diminuição de temperatura e uma brusca redução do teor de açúcares do meio, que deve ser confirmada pela análise do °Brix de uma amostra da dorna. O processo completo de fermentação alcoólica dura, em média, 8 horas (PASCHOALINI et al., 2009).

A produção de etanol em usinas sucroalcooleiras pode ocorrer de três maneiras diferentes: processo em batelada, contínuo ou batelada alimentada com reciclo de células (método Melle-Boinot), sendo este último o mais utilizado nas destilarias brasileiras.

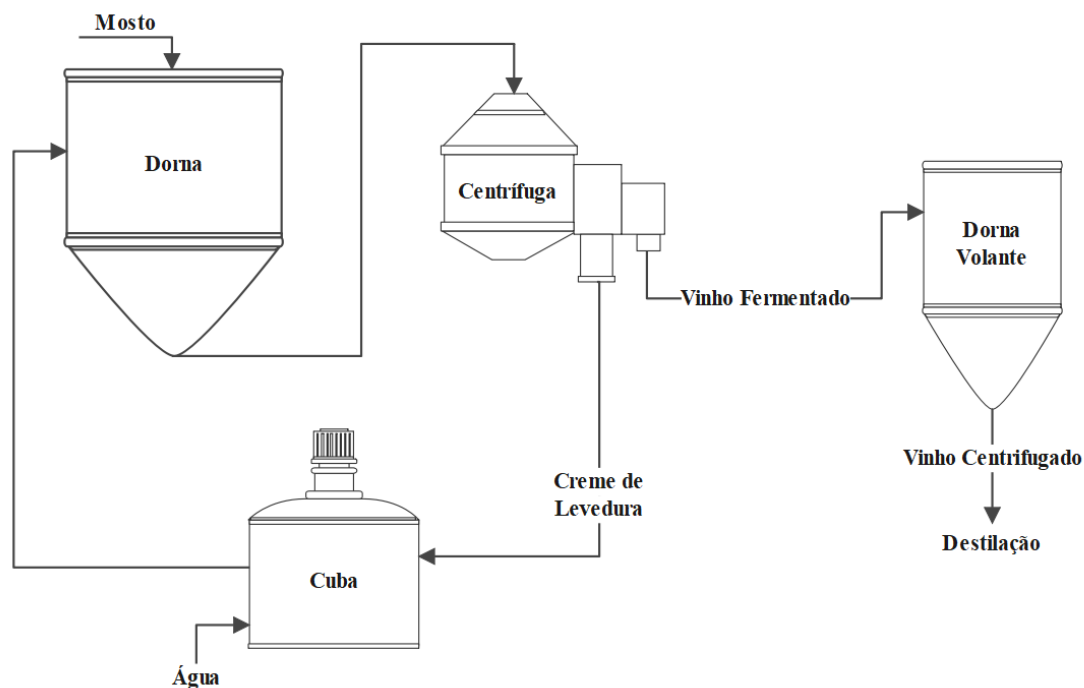
O processo de fermentação alcoólica em batelada, conhecido também como descontínuo, pode ser descrito da seguinte forma: primeiramente, prepara-se um meio de cultura adequado, tanto ao desenvolvimento quanto a nutrição da levedura. Depois, coloca-se este meio de cultura em uma dorna, adiciona-se a levedura responsável pelo processo de fermentação e se aguarda o término do processo, que pode ser evidenciado verificando o °Brix final do caldo fermentado, que idealmente deve estar próximo de zero. Por fim, o caldo é retirado das dornas e realizam-se as operações unitárias necessárias para a recuperação do produto. Em termos de manutenção e assepsia, o processo em batelada apresenta uma maior segurança, visto que as dornas podem ser esterilizadas ao término de cada processo produtivo. Porém, este tipo de processo também pode levar a baixos rendimentos e produtividade, o que pode ocorrer quando o substrato é adicionado todo de uma vez. A baixa eficiência observada estimulou o surgimento de formas mais eficientes de se realizar a fermentação alcoólica (SCHIMIDELL; FACCIOITTI, 2001).

O processo contínuo, como o próprio nome sugere, se trata de uma alimentação contínua de um meio de cultura a uma determinada vazão, sendo que o volume de reação se mantém constante através da retirada contínua de caldo fermentado das dornas (SCHIMIDELL; FACCIOITTI, 2001). Consoante Ghose e Thyagi (1979), duas dornas em série necessitam de um volume total 58% menor comparado a uma dorna individual. A fermentação alcoólica contínua apresenta o maior rendimento e uniformidade do produto quando comparado a batelada ou batelada alimentada. A grande desvantagem é que o processo está sujeito a contaminação bacteriana devido a seu longo tempo de exposição (CYZEWSKI; WILKIE, 1978).

Já o processo de batelada alimentada, também conhecido como “Melle-Boinot”,

é descrito pela alimentação controlada do substrato até que o volume desejado da dorna seja atingido. Este processo permite o controle da concentração do açúcar, minimizando os efeitos de inibição pelo substrato, o que permite sua adição em momentos oportunos durante a fermentação (PACHECO, 2010). Este método apresenta altos rendimentos fermentativos, menor consumo de insumos, maior estabilidade do processo, menor tempo de fermentação e etc. Sua principal desvantagem é que seu custo de instalação é elevado comparado aos outros processos descritos. O fluxograma do método “Melle-Boinot”, utilizado na fábrica de etanol da Usina Sonora S/A, pode ser observado na Figura 5.

Figura 5: Método “Melle-Boinot”



Fonte: (AUTOR, 2024)

3.7. Reciclo de leveduras

Ao final do processo fermentativo, as leveduras devem ser separadas do produto, pois são reutilizadas no processo, gerando economia na reposição de microrganismos e garantindo melhores condições de operação, visto que as leveduras recicladas não precisam consumir substrato para a fase de crescimento, além de já estarem adaptadas ao meio (LIMA, 2004).

No processo de reciclo, o mosto fermentado passa geralmente por uma centrífuga, onde o vinho delevurado se direciona ao sistema de destilação enquanto que

as leveduras são enviadas para as cubas de tratamento químico. Outros sistemas de separação podem ser usados nesta etapa, como filtros e decantadores, porém o equipamento mais utilizado nas destilarias é a centrífuga.

As leveduras passam então por um processo de tratamento químico severo, que consiste na diluição em água e adição de ácido sulfúrico até que o pH atinja um valor próximo de 2,5, podendo até atingir valores inferiores caso haja acentuada infecção bacteriana. Esse fermento diluído e acidificado é usualmente chamado de “pé de cuba”, e deve permanecer em agitação por três horas antes de retornar as dornas de fermentação (FURTADO; SCANDIFFIO, 2006).

O tratamento com ácido é fundamental no controle de bactérias do creme de levedura, visto que se observa uma redução de 44,3% dos microrganismos contaminantes (SOUZA; MUTTON, 2004). A concentração de leveduras pós tratamento químico é maior do que ao sair do bioreator devido ao brotamento (reprodução das células) que ocorre na cuba, o que permite uma maior capacidade de processamento de mosto, caso haja nutrientes o suficiente para atender as necessidades biológicas das leveduras. O processo de recirculação de leveduras é utilizado no método “Melle-Boinot” e pode ser observado na Figura 5.

3.8. Destilação

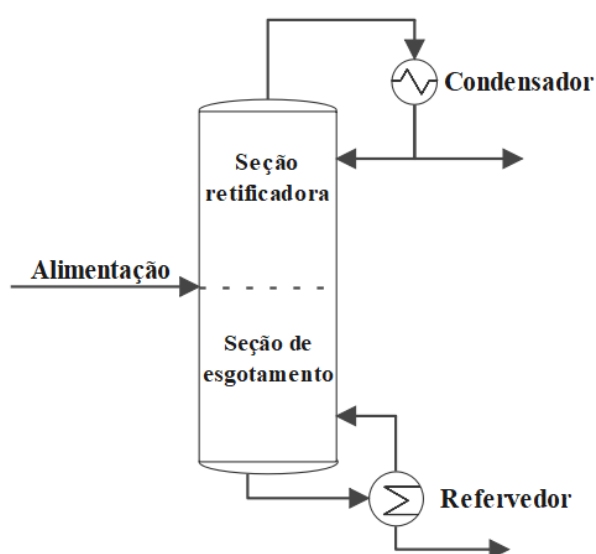
Destilação é a operação unitária aplicada com o intuito de separar componentes de uma mistura de líquidos. Neste processo, os produtos mais voláteis são os primeiros a serem destilados, seguidos sucessivamente pelos demais através de suas respectivas volatilidades. Os resíduos que tendem a sair pelo segmento inferior da coluna são os produtos menos voláteis (ZARPELON, 2020).

O processo de destilação pode ser utilizado para uma mistura de dois ou mais componentes. Caso a mistura seja composta por três ou mais componentes, como é o caso do vinho fermentado, pode ser necessária a utilização de colunas em sequência, já que em uma única operação não é suficiente para que se possa obter os compostos separadamente. (SILVEIRA, 2021).

Na Figura 6, observa-se uma coluna com alimentação única e com sistema de refluxo. Estruturalmente, a coluna pode ser dividida em duas seções: a de esgotamento, localizada abaixo do prato de alimentação, e a de retificação, situada acima do prato de alimentação. A utilização de refeedores, também conhecido como aquecimento

indireto, é uma prática comum nos sistemas de destilação. Porém, no setor sucroalcooleiro, geralmente se utiliza o método de aquecimento por “borbotagem”, conhecido como aquecimento direto, onde vapor vegetal a uma pressão de 0,7 kgf/cm², oriundo do vapor de escape utilizado para evaporar a água contida no caldo de cana, é injetado no interior da coluna, entrando em contato direto com o vinho fermentado, promovendo uma troca de calor mais eficiente entre o vapor e os produtos no interior da coluna.

Figura 6: Coluna de destilação fracionada



Fonte: (AUTOR, 2024)

Na seção retificadora, a vazão de vapor ascendente é maior que o líquido descendente, acarretando em um enriquecimento dos componentes mais voláteis na corrente de vapor. Na seção de esgotamento, a vazão do líquido descendente é maior que a do vapor ascendente, gerando uma concentração dos compostos menos voláteis no líquido descendente (SILVEIRA, 2021).

A parte interna da coluna contém diversos estágios, que por sua vez podem ser descritos como uma série de andares em equilíbrio que vão efetuando, progressivamente, o enriquecimento dos compostos mais voláteis na fase vapor conforme esta sobe na coluna. O contato entre as fases em cada um destes estágios é promovido através dos denominados “pratos” ou “bandejas”, que podem ser calotadas, perfuradas ou valvuladas, dependendo das características do processo de destilação em questão.

As bandejas calotadas são as mais antigas, sendo introduzidas na Inglaterra em

1822, e continuam sendo relevantes para a indústria sucroalcooleira, pois proporcionam mais estabilidade e são mais simples de controlar. Seu uso é mais comum nas colunas de destilação do álcool neutro devido a melhor estratificação das separações realizadas na coluna, o que aumenta a qualidade do álcool, parâmetro essencial na qualificação do álcool neutro (ZARPELON, 2020).

As bandejas perfuradas são mais utilizadas na produção de álcool combustível, onde os parâmetros de qualidade do produto são menos rigorosos. Entre suas principais vantagens estão: proporcionam uma baixa perda de carga, produzem menos arrastes, são de construção simples e de baixo custo (ZARPELON, 2020).

Por último, as bandejas valvuladas são muito utilizadas na indústria química/petroquímica, mas também são empregadas, em alguns casos, na destilação de álcool combustível. O constante movimento vertical das válvulas faz com que estas sofram fadiga nas pernas de retenção, resultando em um deslocamento de alguma válvula na bandeja, o que alteraria consideravelmente o desempenho da coluna (ZARPELON, 2020).

Por simplificação, considera-se, para a destilação do etanol, o vinho como sendo uma mistura binária, composto apenas por álcool etílico e água, muito embora a presença de outros congêneres e produtos gerados na destilação criem anomalias no sistema, como a modificação da volatilidade e a formação de azeótropos. Porém, como estes compostos se apresentam em baixas quantidades, seu efeito no equilíbrio etanol-água é quase desprezível.

Quando um líquido é aquecido, sua tensão de vapor começa a subir até que seu valor se iguale a pressão do ambiente. Neste ponto, o líquido começa a entrar no processo de ebulição. Em uma mistura binária, o líquido mais volátil produzirá mais vapores, porém uma pequena parcela do menos volátil também se vaporiza. Com o processo de vaporização estabelecido, o volume de vapores gerados, obtém-se um equilíbrio líquido-vapor, cujas composições molares são dadas através de uma curva de equilíbrio (ZARPELON, 2020).

3.8.1. Volatilidade relativa

Quando dois compostos apresentam pontos de ebulição muito próximos, ou seja, sua volatilidade relativa é muito próxima de 1, a separação por destilação se torna complexa, somente atingida em alguns casos utilizando colunas de altas eficiências e

com muitos pratos (estágios). Isto pode ser evidenciado na própria indústria do álcool, no processo de retirada do metanol quando se deseja um etanol de extrema qualidade, geralmente sendo este de uso na fabricação de bebidas (ZARPELON, 2020). A volatilidade relativa de um componente 1 em relação a outro composto 2 é descrita consoante a Equação 1.

$$\alpha_{12} = \frac{\frac{y_1}{x_1}}{\frac{y_2}{x_2}} = \frac{y_1 P_1^{vap}}{y_2 P_2^{vap}} \quad (1)$$

onde α_{12} é a volatilidade relativa do componente 1 em relação ao componente 2, y e x são as frações molares da fase vapor e líquida do componente respectivamente, γ é o coeficiente de atividade do composto na mistura e P_{vp} é sua pressão de vapor respectiva (SILVEIRA, 2021).

Em geral, quando a volatilidade relativa do composto é maior do que 1, o mesmo tende a ser separado na parte superior da coluna, enquanto que uma volatilidade relativa inferior a 1 indica a separação do composto na seção inferior da coluna.

A equação de equilíbrio, para um sistema binário, pode ser expresso em função da volatilidade relativa, representada pela Equação 2.

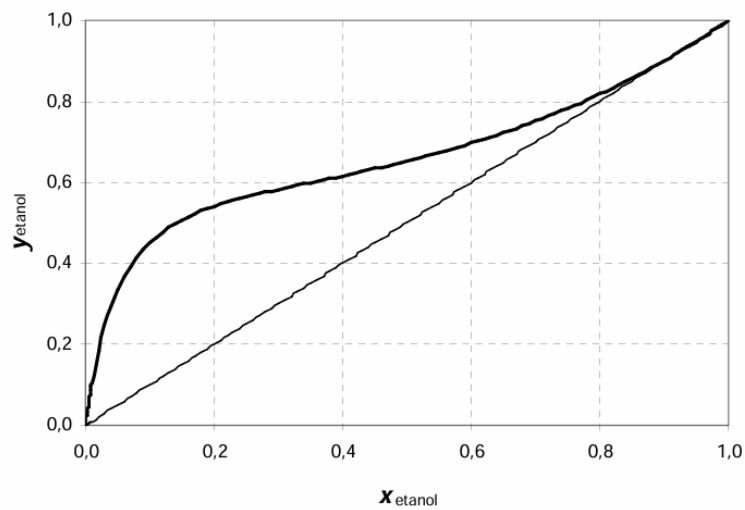
$$Y_1 = \frac{\alpha_{1,2} X_1}{1 + (\alpha_{1,2} - 1)X_1} \quad (2)$$

onde Y_1 é a fração molar do componente mais volátil na fase vapor, α_{12} é a volatilidade relativa do componente 1 em relação ao componente 2 e X_1 como sendo a fração molar do componente mais volátil na fase líquida (ZARPELON, 2020).

3.8.2. Diagrama de equilíbrio

O diagrama de equilíbrio se trata de um gráfico da composição molar do vapor pela composição molar do líquido. Como o processo de destilação ocorre em condições quase isobáricas, o diagrama de equilíbrio é projetado considerando pressão constante. Potanto, os diagramas variam entre si de acordo com a pressão de trabalho. Na Figura 7, pode-se observar uma representação gráfica do diagrama de equilíbrio líquido-vapor para o sistema etanol-água a pressão atmosférica.

Figura 7: Curva de equilíbrio líquido-vapor etanol-água



Fonte: (BATISTA, 2008)

A falta de idealidade do sistema etanol-água faz com que as volatilidades relativas dos compostos variem conforme as proporções de seus componentes e, para altos valores de concentrações e de desvio da idealidade, pode-se formar um azeótropo, que entra em ebulição em uma temperatura inferior a dos componentes puros.

Para o sistema binário em questão, o azeótropo entra em ebulição a 78,15 °C na pressão de 760 mmHg com graduação alcóolica de 95,6 %m (97,2 %v). Dessa forma, quando a concentração alcóolica do líquido gerador está abaixo de 95,6 %m, a concentração alcóolica do vapor gerado é maior do que a do líquido. No ponto de azeótropo, tanto o vapor gerado como o líquido possuem a mesma concentração. Já para valores de graduação alcóolica no líquido superiores a 95,6 %m, o vapor gerado tem concentração menor do que de seu líquido gerador (ZARPELON, 2020).

3.8.3. Balanço de massa e energia

Para prever o comportamento de um processo de destilação, utiliza-se um conjunto de equações oriundas do balanço de massa, de energia e de relações de equilíbrio de fases. Para tal, deve-se utilizar as ferramentas de cálculo adequadas para que se possa encontrar as soluções das equações do sistema em questão.

O balanço global de massa para um sistema de destilação utiliza, em geral, de uma corrente de alimentação, uma saída no topo e uma saída na parte inferior da coluna. Para uma coluna sem corrente de saída lateral, o balanço de massa global pode ser observado na Equação 3.

$$F = D + B \quad (3)$$

onde F representa a vazão mássica da corrente de alimentação, D representa a vazão mássica do destilado e B indica a vazão mássica do produto de fundo da coluna.

O balanço de massa pode ser descrito em função de um componente de interesse, que será indicado por i . Neste caso, o balanço é descrito pela Equação 4.

$$F_i = D_i + B_i \quad (4)$$

onde F_i representa a vazão mássica do componente i na corrente de alimentação, D_i representa a vazão mássica do componente i no destilado e B_i indica a vazão mássica do componente i no produto de fundo da coluna.

Caso haja uma corrente de saída lateral, o qual pode ser observada no processo de obtenção do etanol, o balanço de massa por componente é descrito pela Equação 5.

$$F_i = D_i + B_i + L_i \quad (5)$$

onde L_i representa a vazão mássica do componente i na corrente de saída lateral.

Além disso, pode-se avaliar o balanço de massa em um determinado estágio da coluna em termos de sua corrente de vapor e líquido, como na Equação 6. Caso o estágio a ser estudado seja o de alimentação, deve-se adicionar sua respectiva corrente na equação do balanço de massa (SILVEIRA, 2021).

$$V_{ij-1} + L_{ij+1} - V_{ij} + L_{ij} = 0 \quad (6)$$

onde V_{ij-1} é a vazão mássica do componente i na fase vapor no estágio $j-1$, L_{ij+1} é a vazão mássica do componente i na fase líquida no estágio $j+1$, V_{ij} é a vazão mássica do componente i na fase vapor no estágio j e L_{ij} é a vazão mássica do componente i na fase líquida no estágio j .

O balanço de energia global em uma coluna de destilação pode ser descrito pela Equação 7.

$$FH_F - DH_D - BH_B - \sum WH_W + Q_R - H_C \quad (7)$$

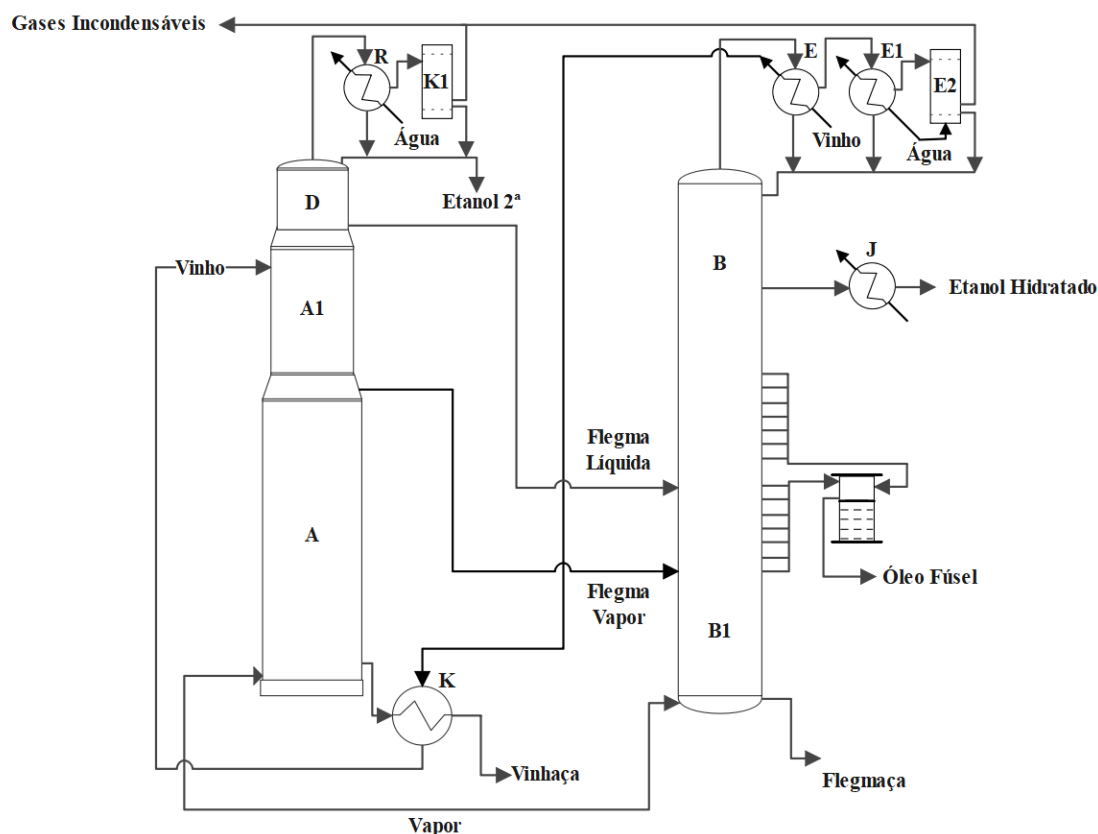
onde F representa a vazão de alimentação e H_F sua respectiva entalpia, D indica a vazão da corrente de topo e H_D a entalpia do destilado, B a vazão de produto de fundo e H_B sua entalpia, W a vazão de saídas laterais e H_W sua entalpia, Q_R representa o calor fornecido pelo refeedor e Q_C o calor retirado no condensador (SILVEIRA, 2021).

3.8.4. Processo de produção do etanol hidratado

Os sistemas utilizados para destilação do etanol hidratado podem ser diversos, dependendo da realidade e das condições das usinas em questão. A configuração mais

utilizada nas usinas sucroalcooleiras pode ser descrita na Figura 8, porém outras configurações também podem ser empregadas para se adequar as condições e limitações específicas de cada usina.

Figura 8: Configuração usual para produção de etanol hidratado



Fonte: (AUTOR, 2008)

Na configuração da Figura 8, observa-se 2 grandes colunas que se subdividem, respectivamente, em 3 e 2 subseções. A coluna A se segmenta em A, A1 e D, incluindo os condensadores R e R1. Já a coluna B se subdivide em B e B1 e inclui os condensadores E, E1 e E2. Além disso, constata-se a presença de outros equipamentos fundamentais no processo de destilação, como o trocador de calor K e o resfriador J.

O vinho alcoólico, oriundo do processo de fermentação, passa pelo condensador E para trocar energia com o vapor destilado da Coluna B, elevando sua temperatura até aproximadamente 62 °C. Após isto, o vinho passa pelo trocador de calor K, onde é aquecido a temperaturas entre 90-94 °C, que é a temperatura do estágio onde o vinho é alimentado.

A destilação tem início com a alimentação do vinho no topo da seção A1, que,

geralmente, possui 8 bandejas e tem a função de separar os compostos mais voláteis do vinho. Na seção A, que opera usualmente com 16 bandejas, a energia necessária para evaporar os voláteis do interior da coluna é fornecida, geralmente, por uma fonte de aquecimento direto, conhecido como “borbotagem” de vapor vegetal. Neste método, injeta-se vapor na base da coluna com pressão manométrica que varia entre 0,7 kgf/cm² e 1,7 kgf/cm² (FURLAN, 2012). No topo da seção A observa-se a saída de uma corrente, denominada de flegma vapor, que é direcionada para os estágios intermediários da coluna B. A corrente de fundo da seção A, conhecida como vinhaça, deve possuir um baixo teor alcóolico, próximo de 0,03% em concentração mássica. Esse produto é largamente utilizado pelos setores agrícolas das usinas sucroalcooleiras na área de fertirrigação por ser um resíduo rico em potássio, mineral indispensável no processo de fotossíntese, absorção de nutrientes e em inúmeras reações enzimáticas no interior da planta, o que torna a vinhaça uma boa opção de fertilizante.

A seção D contém 8 bandejas e recebe o produto de topo de A1. O destilado obtido nesta coluna é condensado nos trocadores R e R1, sendo denominado álcool de 2º, conhecido por possuir um alto teor alcóolico (próximo de 90 °GL), porém não o suficiente para ser comercializado como etanol hidratado. Esse álcool é destinado, geralmente, a dorna volante, onde posteriormente retornará ao sistema de destilação incorporado ao vinho deleiturado. A corrente de fundo da seção D, conhecida como flegma líquida, é direcionada à coluna B.

A coluna de retificação, subdividida em B e B1, representam a etapa de purificação do etanol hidratado. A seção B1 possui aproximadamente 12 bandejas e é responsável pelo esgotamento do flegma. A seção B, contendo 43 bandejas, é responsável pelo aumento da concentração do produto no sentido ascendente da seção (SILVEIRA, 2021). A coluna de retificação é geralmente aquecida pelo mesmo sistema de “borbotagem” de vapor vegetal citado na coluna A.

O óleo fúsel, composto por álcoois de cadeia longa, sendo o álcool isoamílico o composto predominante, é retirado em vários estágios da coluna B. Sua remoção é fundamental para uma boa operação do sistema de destilação e na obtenção de um etanol com alto padrão de qualidade. Porém, a retirada deste subproduto é complexa devido a volatilidade relativa de seus compostos, que faz com que o óleo fúsel se acumule em diversas bandejas, dependendo das condições de destilação.

A flegmaça é a corrente de fundo da seção B1 e é, geralmente, utilizada em limpezas industriais, visto que seu composto predominante é a água. Apesar disso,

baixos teores de etanol também são observados nessa corrente (cerca de 0,03% em massa), além de outros compostos, como os álcoois superiores que compõem o óleo fúsel.

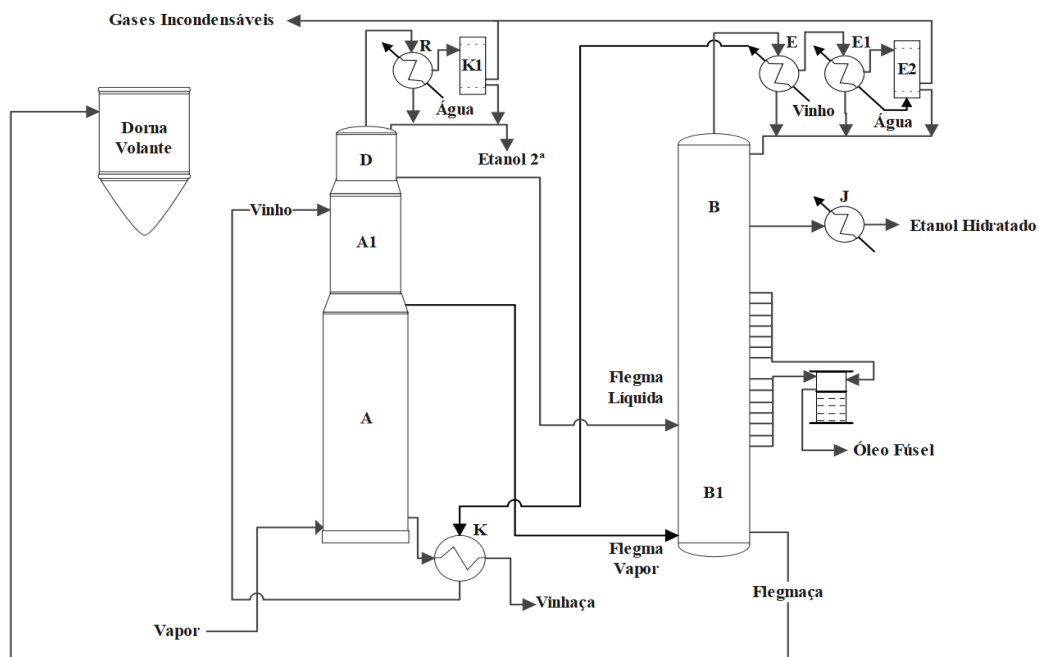
Os vapores alcóolicos ascendentes da seção B passam pelos condensadores E, E1 e E2 e retornam para a coluna, a variar pela razão de refluxo utilizada na coluna B. O etanol hidratado é retirado na parte superior da seção B, onde é resfriado no trocador de calor J, apresentando um teor alcóolico entre 92,5 e 94,6 %m.

3.8.5. Sistema “Flegstil”

No Brasil, no início da década de 80, foram instalados aparelhos de destilação projetados sem a seção de esgotamento B1, o que faz com que a flegmaça seja uma corrente de retorno. O argumento inicial era reduzir o consumo de vapor do aparelho. Neste projeto, o flegma vapor se direciona da coluna A para a base da Coluna B e não há sistema de borbotagem na B. Dessa forma, todo o vapor vegetal injetado no sistema é direcionado à coluna A (ZARPELON, 2020).

Neste caso, a flegmaça apresenta um grau alcóolico que varia entre 8 e 15%v, que geralmente retorna ao topo da coluna A ou para a dorna volante. Dessa forma, não há corrente de saída na coluna B. No Brasil, esse sistema de destilação é conhecido como “Flegstil”, e é descrito como observado na Figura 9 (ZARPELON, 2020).

Figura 9: Configuração do sistema “Flegstil” para produção de etanol hidratado



Fonte: (AUTOR, 2024)

O aparelho “Flegstil” possui um custo mais baixo em relação aos aparelhos convencionais de destilação, devido ao fato de eliminar a necessidade de injeção de vapor na coluna B. A grande vantagem deste sistema é a eliminação das perdas de etanol na flegmaça, visto que a mesma retorna para o sistema para ser reprocessada.

Porém, ao longo do tempo, o sistema apresentou algumas desvantagens, como o aumento de produção de vinhaça, visto que a água contida na flegmaça se incorpora na vinhaça. Além disso, grande parte do vapor que era para ser economizado na coluna B, acaba tendo que ser adicionado na coluna A para redestilar novamente o etanol presente na flegmaça que retornou para o sistema.

O sistema “Flegstil”, quando bem operado, pode ser viável em casos onde não se dispõe de vapor vegetal o suficiente para esgotar a flegmaça e onde não haja preocupação com a elevada produção de vinhaça. A Usina Sonora utiliza esse sistema de destilação e, por isso, será o foco deste trabalho.

3.8.6 Simuladores de Processo

Os simuladores computacionais são ferramentas poderosas que permitem ao usuário manipular e estudar variáveis de um sistema e analisar seus respectivos impactos. No geral, são frequentemente utilizados para análise e otimização de processos através do aumento da produtividade e da redução de custos.

Os simuladores comerciais, como o Aspen Plus[®], possuem um extenso banco de dados, fornecendo uma enorme gama de métodos para estimar as diversas propriedades das misturas, garantindo uma alta confiabilidade dos resultados apresentados pelo *software*. Além disso, o Aspen Plus[®] permite a realização de análises de sensibilidade, dispondo de tabelas e gráficos para descrever o comportamento do processo a partir de modificações feitas nas especificações dos equipamentos e das condições operacionais.

Porém, além dos simuladores comerciais, existem excelentes *softwares* disponíveis de forma gratuita e que apresentam resultados satisfatórios e similares aos comerciais. O DWSIM, criado pelo brasileiro Daniel Medeiros, vem sendo amplamente utilizado no Brasil por profissionais e estudantes da área de engenharia química, permitindo o aprendizado e acesso gratuito às inúmeras ferramentas disponíveis pelo programa.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Simulação do processo produtivo de etanol hidratado da Usina Sonora

O primeiro foco deste trabalho foi simular o processo produtivo de etanol hidratado da Usina Sonora S/A no *software* Aspen Plus®. Para isso, primeiramente, se faz necessário preencher as opções iniciais de configuração da simulação, como realizar a seleção dos componentes envolvidos no processo (na aba *Components*) e dos pacotes termodinâmicos (na aba *Fluid Packages*) que mais se adequem ao processo em questão.

Na aba *Components*, adicionou-se os compostos que compõem o vinho fermentado através da ferramenta de pesquisa *Find*. Os compostos selecionados foram: água, etanol, propanol, metanol, álcool isoamílico, isobutanol e ácido acético. Na pasta *Methods*, o modelo termodinâmico escolhido para o cálculo do coeficiente de atividade foi o NRTL. Esta escolha é justificada devido à alta empregabilidade do modelo em questão para processos de destilação em múltiplos estágios e sua precisão na previsão do equilíbrio líquido-líquido em sistemas binários e ternários.

Depois, seguindo para a simulação (na aba *Simulation*), foi-se inserido as correntes materiais do processo, selecionando a opção *Material*. Para o vinho fermentado, adicionou-se o valor de vazão mássica, temperatura, pressão e frações mássicas, como observado nas Tabela 3 e 4.

Tabela 2: Condições de alimentação do vinho fermentado.

Vazão Mássica (Kg/h)	Temperatura (°C)	Pressão (bar)
220000	94	2,2

Fonte: (AUTOR, 2024)

Tabela 3: Condições de alimentação do vinho fermentado.

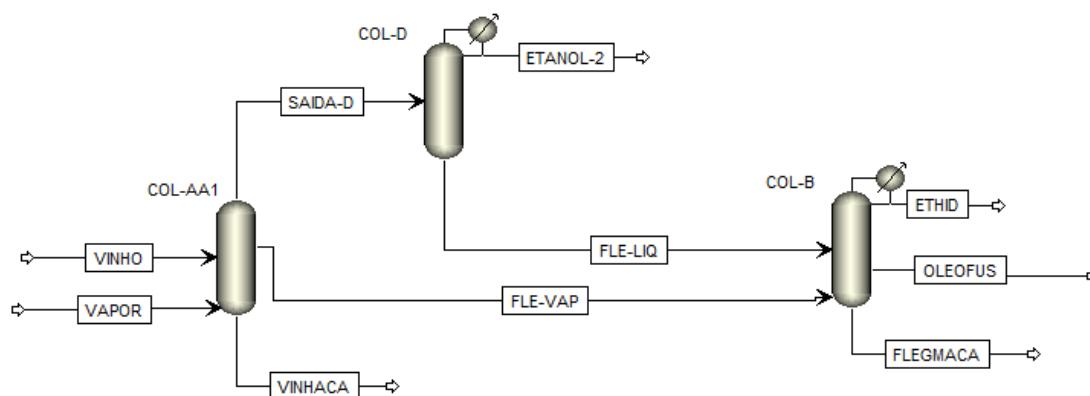
Composto	Fração mássica (%)	Vazão mássica (Kg/h)
Água	0,9271	203974
Etanol	0,0724	15928
Propanol	$2,6 \cdot 10^{-5}$	5,72
Metanol	$3 \cdot 10^{-8}$	0,066
Álcool isoamílico	$4,4 \cdot 10^{-5}$	9,68
Isobutanol	$3,1 \cdot 10^{-5}$	6,82
Ácido acético	$3,4 \cdot 10^{-4}$	74,8

Fonte: (Adaptado de SILVEIRA, 2021)

Posteriormente, adicionou-se os equipamentos referentes ao processo de destilação. Para as colunas, utilizou-se a opção *RadFrac*, que representa um modelo rigoroso para processos de destilação e de absorção.

O número de estágios da coluna A é a soma das subseções que a compõem (A e A1). Dessa forma, esta coluna possui um total de 24 estágios teóricos (16 da A e 8 da A1). A coluna D, por sua vez, possui 8 estágios (7 da D e 1 do condensador). Por fim, a coluna B dispõe de 57 estágios (13 da B1, 43 da B e 1 do condensador). O fluxograma do processo produtivo de etanol hidratado da Usina Sonora S/A no Aspen Plus® pode ser observado na Figura 10.

Figura 10: Fluxograma do processo produtivo de etanol hidratado da Usina Sonora S/A no Aspen Plus®



Fonte: (AUTOR, 2024)

Dessa forma, foram adicionadas as informações referentes aos estágios de cada coluna, além de suas respectivas razões de refluxo e a vazão de destilado da coluna A, como observado na Tabela 5.

Tabela 4: Condições de operação das colunas de destilação.

Equipamento	Vazão de destilado (Kg/h)	Razão de Refluxo
Coluna A	3600	-
Coluna D	-	5
Coluna B	-	4,5

Fonte: (AUTOR, 2024)

Os valores de vazão mássica de vapor injetado na coluna A e pressão inseridos no Aspen Plus® foram oriundos do balanço mássico e energético da Usina Sonora, como mostra a Tabela 6. Além disso, como já mencionado anteriormente, não há injeção de vapor direto na coluna B no sistema de destilação da Usina Sonora.

Tabela 5: Vazão mássica e pressão de vapor injetado na coluna A.

Equipamento	Vazão de vapor (Kg/h)	Pressão do vapor (kgf/cm ²)
Coluna A	36000	0,7

Fonte: (AUTOR, 2024)

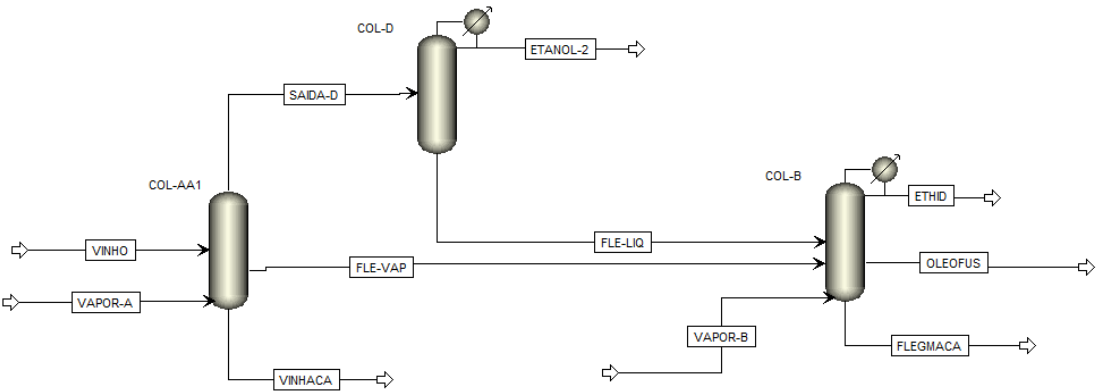
Os valores de vazão mássica de vapor injetado na coluna A e pressão inseridos no Aspen Plus® foram oriundos do balanço mássico e energético da Usina Sonora, como mostra a Tabela 6. Além disso, como já mencionado anteriormente, não há injeção de vapor direto na coluna B no sistema de destilação da Usina Sonora.

No Brasil, a proporção de produção do óleo fúsel é de 2,5 L a cada 1000 L de etanol hidratado produzido (PERES, 2001). Com base nisto, a vazão selecionada para a retirada de óleo fúsel na coluna B foi de 35 ton/h.

4.2. Simulação do processo com injeção de vapor direto nas colunas A e B

Para a simulação com injeção de vapor direto nas colunas A e B, o processo de inserção dos dados é similar ao citado no tópico anterior, com a adição da corrente material de injeção de vapor vegetal na coluna B. O fluxograma do processo descrito anteriormente pode ser observado na Figura 11.

Figura 11: Fluxograma do processo produtivo de etanol hidratado com injeção de vapor na coluna A e B no Aspen Plus®



Fonte: (AUTOR, 2024)

Além disso, o modelo termodinâmico utilizado foi o mesmo da simulação anterior (NRTL). A vazão mássica da corrente de destilado da coluna A foi alterada para 10% do valor de sua injeção de vapor, fator este que também foi utilizado como base na simulação do tópico anterior. A vazão mássica de flegma vapor também foi considerada como a mesma vazão de injeção de vapor direto na coluna A. Dessa forma, a proporção dos dados inseridos não se alterou em nenhum dos cenários analisados. Ademais, não houveram outras alterações nas correntes materiais do processo e nem nas configurações estruturais e de operação das colunas de destilação.

Foi-se realizado um estudo aprofundado acerca de quais seriam as vazões mássicas ideais de injeção de vapor na coluna A e B, sem alterar o montante total de vapor disponível no processo (36000 Kg/h). Os cenários estudados podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 6: Estudos acerca das vazões mássicas de vapor nas Colunas A e B.

Cenário	Vazão de vapor na Coluna A (Kg/h)	Vazão de vapor na Coluna B (Kg/h)	Vazão de destilado na coluna A (Kg/h)	Vazão de flegma vapor (Kg/h)
1	28000	8000	2800	28000
2	29000	7000	2900	29000
3	30000	6000	3000	30000
4	31000	5000	3100	31000
5	32000	4000	3200	32000
6	33000	3000	3300	33000
7	34000	2000	3400	34000

Fonte: (AUTOR, 2024)

4.3. Estudo de sensibilidade

Além disso, realizou-se um estudo de sensibilidade para otimização das condições estruturais e operacionais do sistema de destilação da Usina Sonora. Na aba *Model Analysis Tools*, selecionou-se a opção *Sensitivity* e, posteriormente, em *New* para criar uma nova análise. Na aba *Vary*, realizou-se a seleção da variável desejada a se estudar. No caso deste trabalho, uma destas variáveis foi a razão de refluxo mássico na coluna B.

No *software*, selecionou-se a faixa desejada de trabalho (2 a 8), com incremento de 0,5 para cada uma das análises. Por fim, na aba *Define*, definiu-se a fração mássica de etanol na corrente “ETHID” como a variável cujo comportamento seria analisado. Na opção *Tabulate*, selecionou-se que os valores da variável de saída em questão seriam apresentados com os valores correspondentes da variável de entrada. O processo descrito acima foi repetido para as demais variáveis a serem estudadas, que podem ser observadas na Tabela 8.

Tabela 7: Variáveis analisadas pelo estudo de sensibilidade.

Variável	Faixa de estudo	Incremento
Razão de refluxo na coluna B	2-8	0,5
Razão de refluxo na coluna D	2-8	0,5
Estágio de alimentação da flegma líquida na coluna B	2-56	1
Estágio de saída da flegma vapor na coluna A	6-12	1

Fonte: (AUTOR, 2024)

Por fim, com todas as informações das análises de sensibilidade fornecidas, realizou-se a simulação através da opção *Run*. Os resultados foram constatados através da pasta *Results*. Na aba *Sensitivity*, selecionou-se as análises desejadas e, através da opção *Results Curve*, obteve-se os gráficos necessários para que as conclusões dos estudos pudessem ser obtidas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise da simulação do processo produtivo de etanol hidratado da Usina Sonora

Os dados obtidos da simulação do processo produtivo de etanol hidratado da Usina Sonora no Aspen Plus® podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 8: Dados referentes a simulação do processo de produção do etanol hidratado da Usina Sonora.

Composto	Fração mássica de etanol				
	Vinhaça	Flegma vapor	Flegma Líquida	Etanol Hidratado	Flegmaça
Etanol	$1,44 \times 10^{-7}$	0,4026	0,150	0,940	0,128
Água	0,99967	0,5967	0,848	0,059	0,871
Álcool isoamílico	$6,52 \times 10^{-20}$	$2,11 \times 10^{-4}$	0,001	$2,35 \times 10^{-25}$	$1,7 \times 10^{-5}$
Propanol	$4,67 \times 10^{-15}$	$1,30 \times 10^{-4}$	$1,32 \times 10^{-4}$	$6,16 \times 10^{-10}$	$1,9 \times 10^{-4}$
Ácido Acético	$3,2 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-4}$	$1,87 \times 10^{-22}$	$1,7 \times 10^{-4}$
Metanol	$1,8 \times 10^{-10}$	$1,71 \times 10^{-7}$	$4,66 \times 10^{-8}$	$3,90 \times 10^{-7}$	$5,85 \times 10^{-8}$
Isobutanol	$4,5 \times 10^{-16}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$4,55 \times 10^{-4}$	$2,83 \times 10^{-16}$	$2,5 \times 10^{-4}$

Fonte: (AUTOR, 2024)

Para realizar a comparação dos dados obtidos na simulação com os oriundos das análises laboratoriais da Usina Sonora, utilizou-se como comparativo o boletim industrial médio da safra de 2023. Porém, o laboratório da empresa não realiza análise do grau alcóolico da flegmaça devido ao fato desta não ser uma corrente de saída do processo (principal característica do sistema “Flegstil”). Dessa forma, durante o mês de novembro de 2023, foram realizadas algumas coletas de amostras de flegmaça para que se pudesse realizar as comparações dos dados laboratoriais com os obtidos via simulação. As análises realizadas do teor mássico de etanol na flegmaça (%m) podem ser visualizados na Tabela 10.

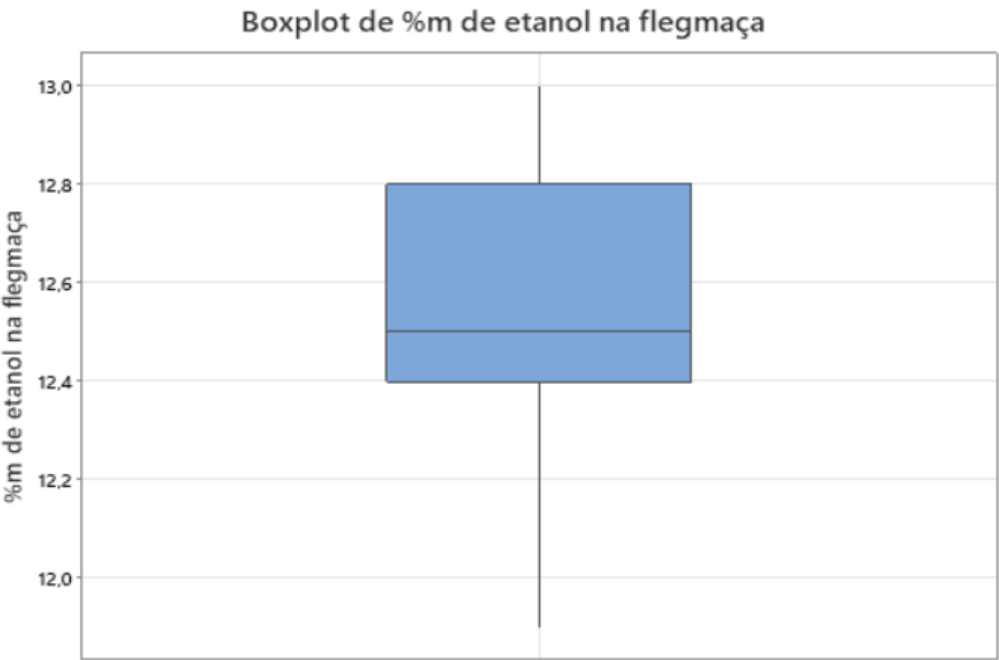
Tabela 9: Análises do teor mássico de etanol na flegmaça.

Dia da análise	%m de etanol na flegmaça
01/11/2023	13
02/11/2023	12,9
03/11/2023	12,5
04/11/2023	12,4
05/11/2023	12,1
06/11/2023	11,9
07/11/2023	12,6
08/11/2023	12,5
09/11/2023	12,5
10/11/2023	12,7
11/11/2023	12,6
12/11/2023	12,5
13/11/2023	12,8
14/11/2023	12,4
15/11/2023	12,8

Fonte: (AUTOR, 2024)

Com as informações referentes ao teor alcóolico da flegmaça, foi-se realizado uma análise do *Box Plot* para facilitar a visualização da distribuição dos dados, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12: *Box Plot* dos dados referentes ao teor alcóolico da flegmaça



Fonte: (AUTOR, 2024)

Visando sempre a otimização de lucros e redução de custos, as variáveis comparadas foram as frações mássicas de etanol hidratado, vinhaça e flegmaça, visto que estas representam a produção e as perdas processuais, respectivamente. A comparação citada anteriormente pode ser observada na Tabela 11. A mediana do *Box Plot* (12,5 %m) foi utilizado como sendo a fração mássica de etanol da flegmaça oriunda do boletim industrial.

Tabela 10: Comparação entre dados da simulação e do boletim industrial.

Corrente material	Fração mássica de etanol	
	Simulação	Boletim industrial
Etanol Hidratado	0,940	0,939
Vinhaça	$1,44 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-5}$
Flegmaça	0,128	0,125

Fonte: (AUTOR, 2024)

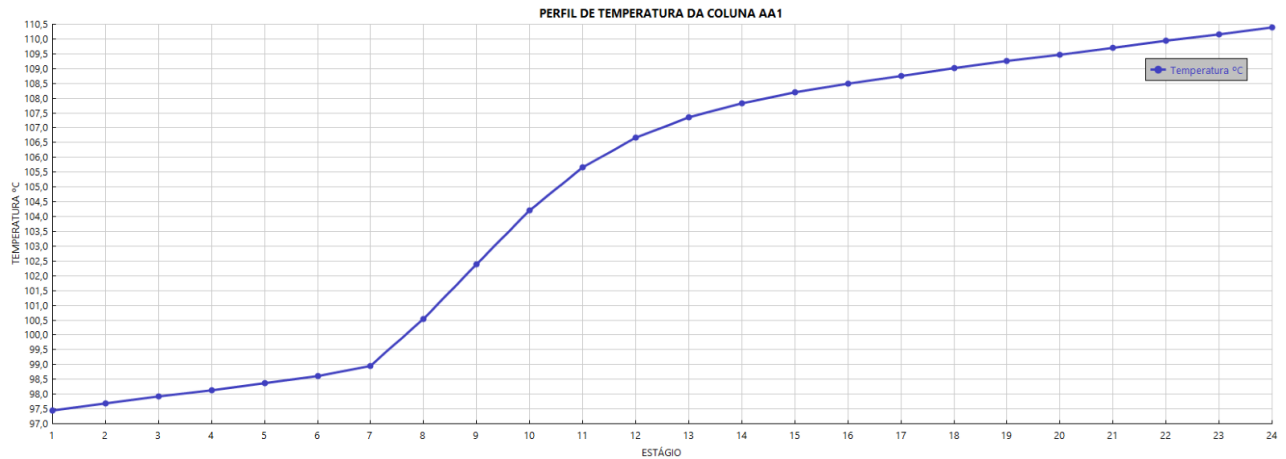
Os valores obtidos via simulação apresentaram uma satisfatória proximidade com os dados obtidos via boletim industrial. Dessa forma, comprova-se válida a utilização da simulação do processo de produção de etanol hidratado via Aspen Plus®, o que viabiliza o estudo de otimização do processo de produção de etanol hidratado da Usina Sonora.

Além disso, o Aspen Plus® possibilita a análise do perfil de temperatura e de composição para cada uma das colunas de destilação do sistema, que pode ser feita através da opção *Temperature* e *Composition*, localizada na seção superior esquerda do *software* ao se clicar na coluna de destilação que se deseja estudar. Estas análises citadas auxiliam na compreensão das condições de operação do processo de destilação em questão.

5.1.1. Coluna A/A1

A temperatura ao longo da coluna A/A1 varia de tal forma que as temperaturas mais baixas se localizam na parte superior da coluna (estágio 1). As temperaturas mais elevadas são observadas na base da coluna (estágio 24), visto que a injeção de vapor vegetal, fonte de calor do processo, ocorre no último estágio. O comportamento citado pode ser observado na Figura 13.

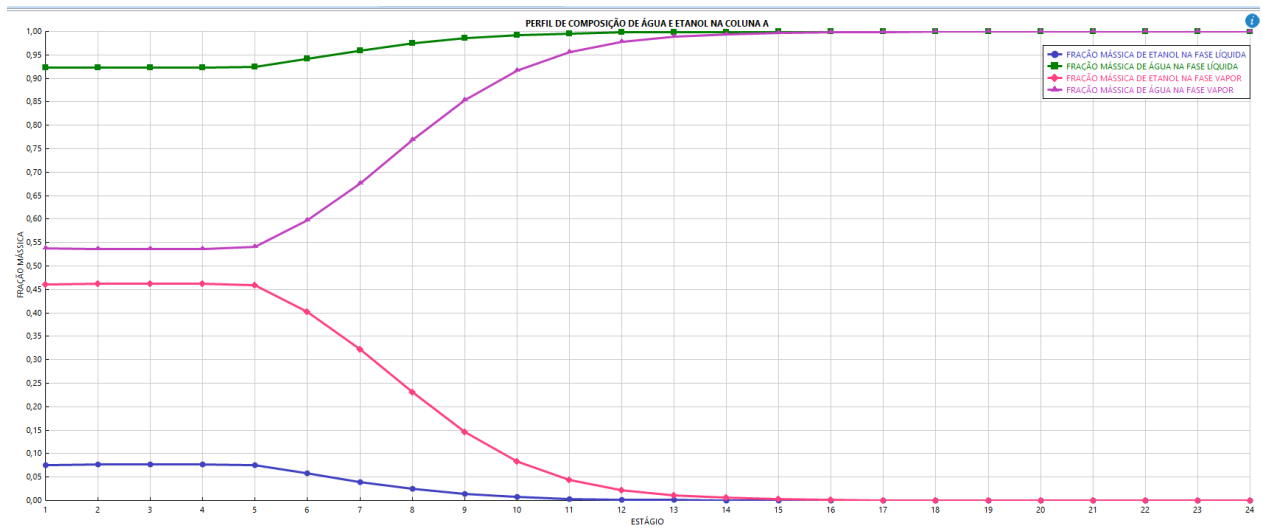
Figura 13: Perfil de temperatura da coluna A/A1



Fonte: (AUTOR, 2024)

Já na Figura 14, evidencia-se a concentração do etanol e da água, tanto na fase líquida como vapor, ao longo dos estágios da coluna A/A1. Na base da coluna, observa-se uma alta fração mássica de água, justificada pela composição da vinhaça descartada nesta seção. Além disso, a concentração de etanol não varia de forma significativa na coluna, atingindo valores de fração mássica na fase vapor entre 0,45 e 0,5.

Figura 14: Perfil de composição da água e etanol na coluna A



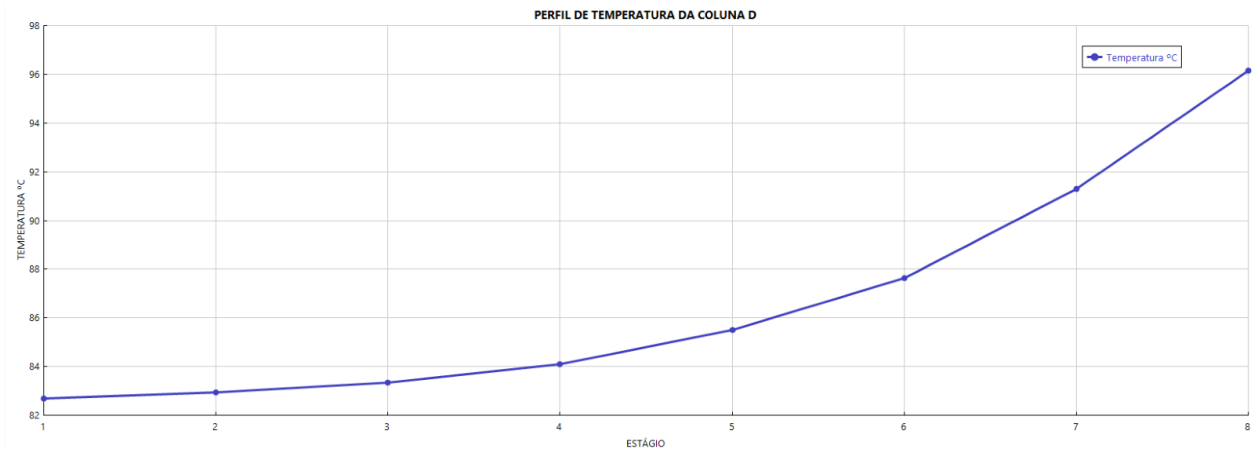
Fonte: (AUTOR, 2024)

5.1.2. Coluna D

No topo da coluna D, evidencia-se que os valores de temperatura são próximos do ponto de ebulição do etanol. Isto é justificado pelo fato da concentração de etanol

nessa região ser alta, o que pode ser comprovado através da análise do grau alcoólico do etanol de 2°. Na base da coluna, a temperatura pode chegar a atingir valores acima de 94 °C, como visto na Figura 15.

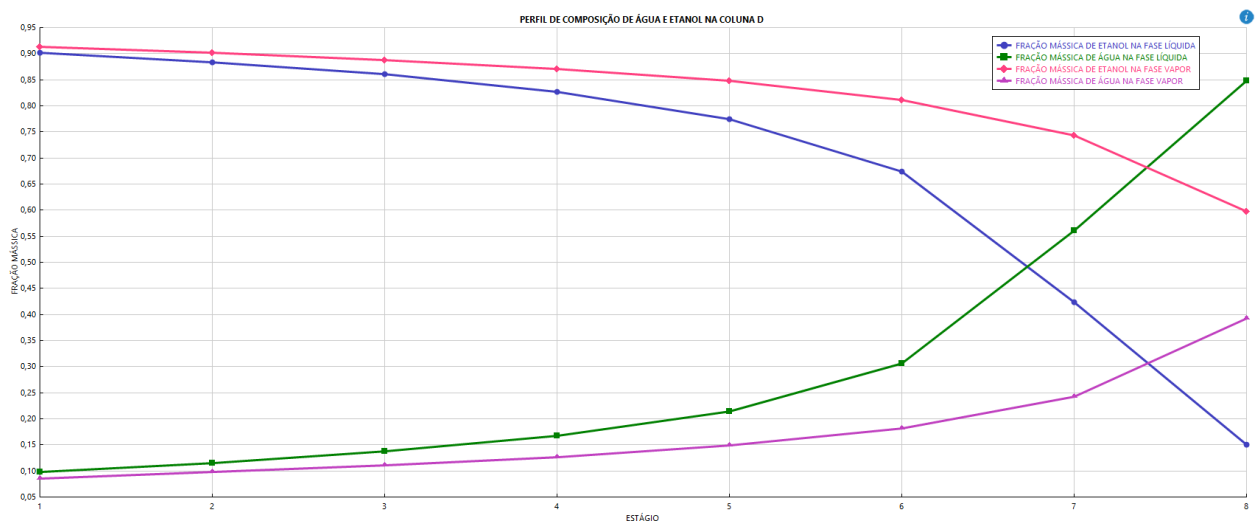
Figura 15: Perfil de temperatura da coluna D



Fonte: (AUTOR, 2024)

Com relação ao perfil de composição de água e etanol, na Figura 16, constata-se que, no topo da coluna, o álcool de 2° se concentra até valores próximos a 90 °GL. Porém, como esse valor é inferior a especificação técnica, essa corrente é direcionada para a dorna volante para que possa ser reprocessada.

Figura 16: Perfil de composição de água e etanol na coluna D

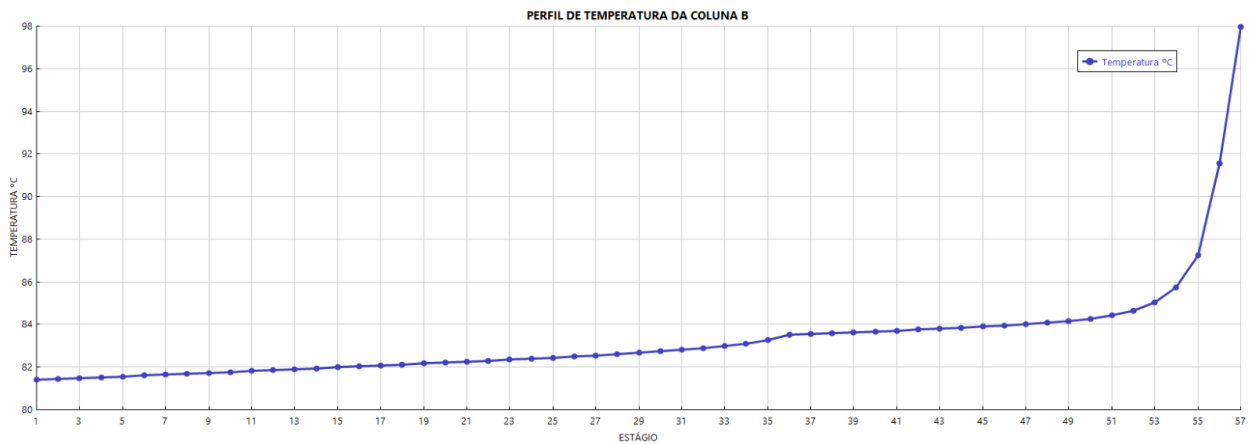


Fonte: (AUTOR, 2024)

5.1.3. Coluna B

Na coluna B, para a obtenção do etanol hidratado dentro dos parâmetros de qualidade exigidos, é necessário que as correntes de flegma líquida e vapor sejam submetidas a um processo de purificação, conhecido como retificação. As temperaturas mais elevadas são observadas na base da coluna, local onde ocorre a injeção de flegma vapor advindo da coluna A (sistema “Flegstil”). Isto pode ser constatado na Figura 17.

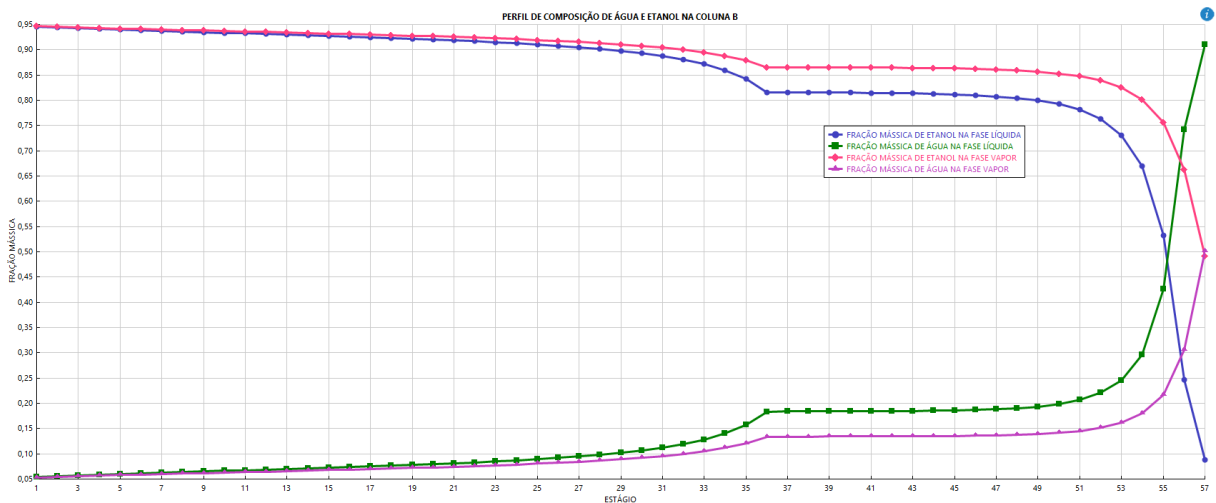
Figura 17: Perfil de temperatura da coluna B



Fonte: (AUTOR, 2024)

Na Figura 18, é evidente que a concentração de etanol na fase líquida vai aumentando conforme sobe-se na coluna. Nos estágios inferiores, onde o produto de fundo é a flegmaça, a água é o componente maioritário.

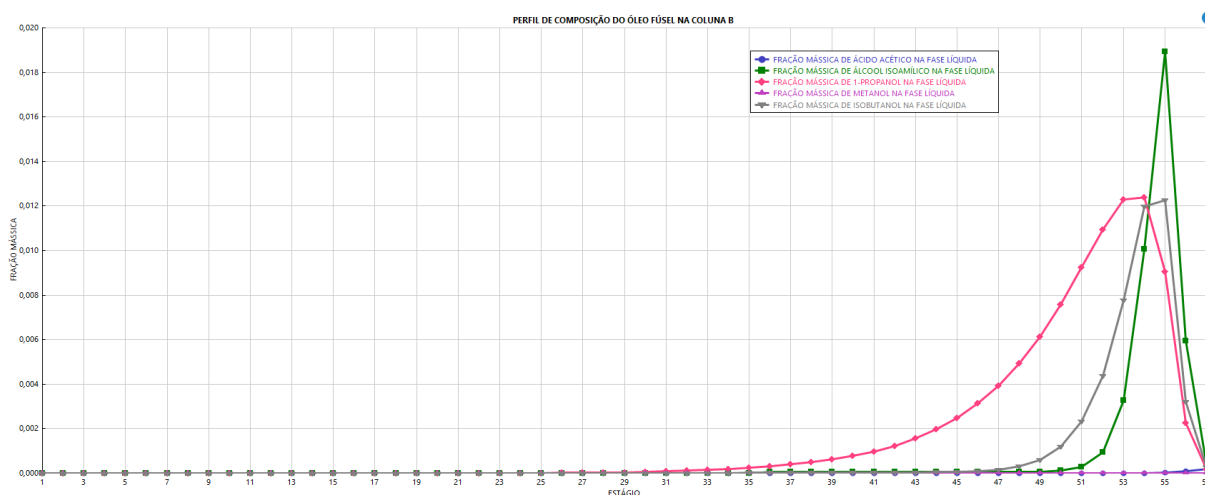
Figura 18: Perfil de composição de água e etanol na coluna B



Fonte: (AUTOR, 2024)

Porém, além de água e etanol, alguns componentes minoritários (principalmente álcool isoamílico) presentes no vinho, denominados álcoois superiores ou óleo fúsel, tendem a se acumular na coluna B. No sistema “Flegstil”, esses componentes tendem a se acumular no fundo da coluna, como evidenciado na Figura 19. Esse subproduto é muito utilizado em indústria de plástico, perfumaria, e etc. Porém, busca-se minimizar sua produção devido a seu baixo valor comercial e seus malefícios ao processo de destilação.

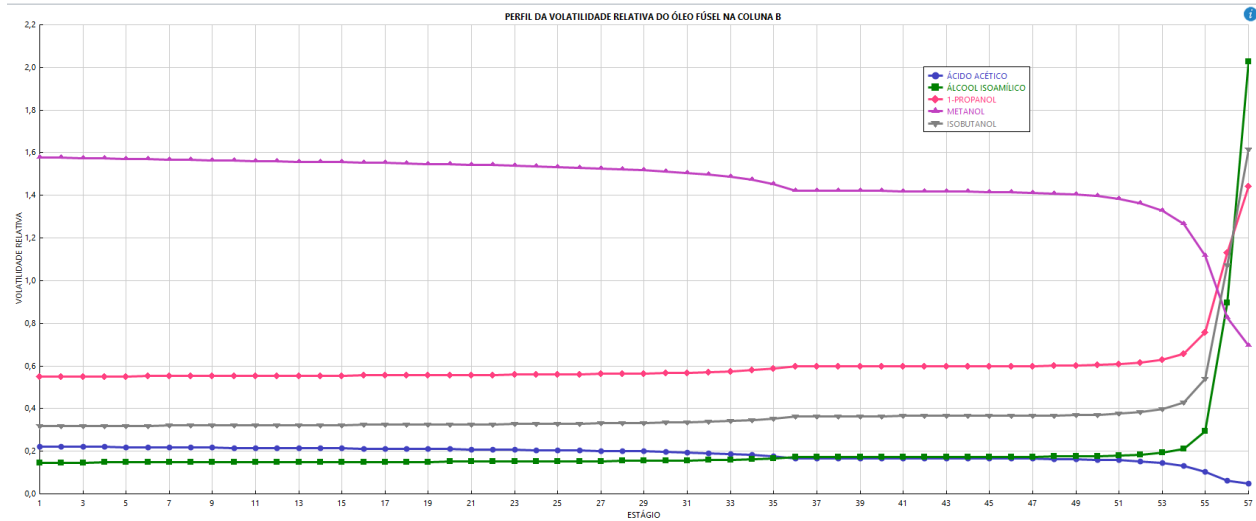
Figura 19: Perfil de composição do óleo fúsel na coluna B



Fonte: (AUTOR, 2024)

A tendência de acúmulo do óleo fúsel na coluna B ocorre devido a volatilidade relativa dos compostos que o compõem. As volatilidades relativas desses álcoois sofrem modificações consideráveis dependendo da concentração do etanol e de água na coluna B. Como pode-se notar na Figura 20, a volatilidade relativa dos compostos é diretamente proporcional ao teor de água, ou seja, nos estágios inferiores da coluna a volatilidade relativa desses compostos é alta, pois o teor de água na base da coluna é alto. Por isso, a tendência é que o composto suba ao longo da coluna. Porém, ao longo dessa subida, seu valor de volatilidade relativa decai rapidamente (devido a diminuição da concentração de água), o que faz com que o composto tenda a descer. Dessa forma, por conta desse acúmulo indesejado de óleo fúsel na coluna B, sua retirada é fundamental para se obter um processo de destilação satisfatório.

Figura 20: Perfil da volatilidade relativa do óleo fúsel na coluna B



Fonte: (AUTOR, 2024)

5.2. Análise da simulação do processo produtivo de etanol hidratado utilizando injeção direta de vapor na coluna A e B

Os dados obtidos da simulação do processo produtivo de etanol hidratado utilizando injeção direta de vapor na coluna A e B podem ser constatados na Tabela 12.

Tabela 11: Resultados da simulação do processo produtivo de etanol hidratado utilizando injeção de vapor direto na coluna A e B.

Cenário	Vazão de vapor na Coluna A (Kg/h)	Vazão de vapor na Coluna B (Kg/h)	Fração mássica de etanol no produto	Fração mássica de etanol na vinhaça	Fração mássica de etanol na flegmaça
1	28000	8000	0,944	0,008	0,059
2	29000	7000	0,944	0,0054	0,082
3	30000	6000	0,944	0,0028	0,104
4	31000	5000	0,944	0,0012	0,120
5	32000	4000	0,944	9,2x10 ⁻⁵	0,122
6	33000	3000	0,944	7,85x10 ⁻⁵	0,124
7	34000	2000	0,944	6,17x10 ⁻⁵	0,126

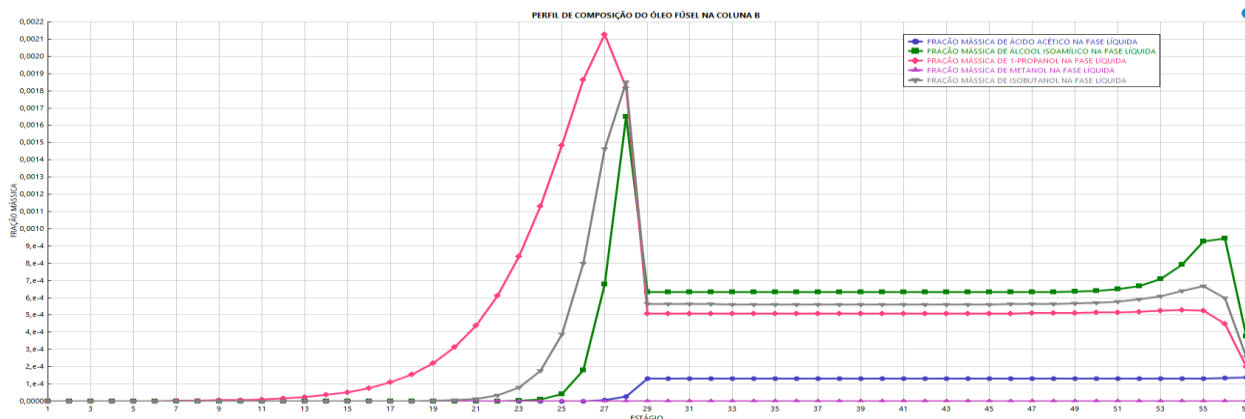
Fonte: (AUTOR, 2024)

Os resultados da simulação foram coerentes com as expectativas teóricas, visto que: nota-se um aumento da fração mássica de etanol na vinhaça conforme a

diminuição da vazão de vapor na Coluna A. Esse fato é compensado pela adição de vapor na Coluna B, que faz com que a flegmaça apresente uma fração mássica de etanol maior com o aumento da vazão de vapor na Coluna B.

Em sistemas com borbotagem de vapor na coluna B, o óleo fúsel tende a se acumular em estágios intermediários da coluna, geralmente nos estágios próximos a alimentação de flegma vapor, como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21: Perfil de composição do óleo fúsel na coluna B



Fonte: (AUTOR, 2024)

Porém, como a Usina Sonora dispõe do sistema “Flegstil”, preza-se pela menor perda possível na vinhaça, visto que é a única corrente de saída do sistema. Dessa forma, entre os cenários analisados, os cenários mais viáveis são o 6 e 7, pois apresentam os menores valores de fração mássica de etanol na vinhaça. Na Tabela 13, pode-se observar a comparação do cenário 7 com a simulação do processo produtivo de etanol hidratado da Usina Sonora.

Tabela 12: Comparação entre dados da simulação do processo vigente e do melhor cenário com injeção de vapor direto na coluna A e B.

Corrente material	Fração mássica de etanol	
	Simulação do processo vigente de destilação da Usina Sonora	Simulação com injeção de vapor na Coluna B - Cenário 7
Etanol Hidratado	0,940	0,944
Vinhaça	$1,44 \times 10^{-7}$	$6,17 \times 10^{-5}$
Flegmaça	0,128	0,126

Fonte: (AUTOR, 2024)

Analisando os dados da Tabela 13, nota-se um aumento da fração mássica de etanol no produto no cenário 7. Porém, esse aumento não é necessariamente um indicador positivo, visto que o etanol é vendido pelo mesmo preço, independente de seu grau alcóolico, desde que esteja dentro das especificações (92,5 – 94,6° %m). Como o produto já cumpre esse requisito no processo vigente, o aumento de fração mássica não pode ser considerado como vantajoso.

Observa-se também um leve aumento na fração mássica de etanol na vinhaça no cenário 7, o que representa um aumento quase desprezível na perda processual da planta. Este fato é justificado pela diminuição de 2000 Kg/h na vazão de vapor na Coluna A.

Por fim, nota-se também uma diminuição da fração mássica de etanol na flegmaça no cenário 7, que é justificado pela injeção de vapor direto na coluna B. Isso traria uma pequena economia de vapor ao sistema, pois menores quantidades de etanol seriam reprocessadas.

Dessa forma, o sistema de injeção direta de vapor apresenta vantagens e desvantagens quando comparado ao processo vigente na Usina Sonora. Porém, o aumento das perdas na vinhaça dificulta uma possível decisão de mudança, visto que a empresa apresenta problemas com oscilação de vapor na planta, devido à rotina de limpeza dos evaporadores. Em dias de limpeza das maiores caixas de evaporação, o vapor vegetal distribuído para a destilaria diminui, o que agravaria as perdas de etanol na vinhaça caso houvesse injeção de vapor na Coluna B. Dessa forma, devido aos problemas com oscilação de pressão e vazão de vapor vegetal, o sistema “Flegstil” ainda se mantém como a opção mais viável nas condições atuais da Usina Sonora.

5.3. Estudos de sensibilidade para otimização do processo produtivo de etanol hidratado da Usina Sonora

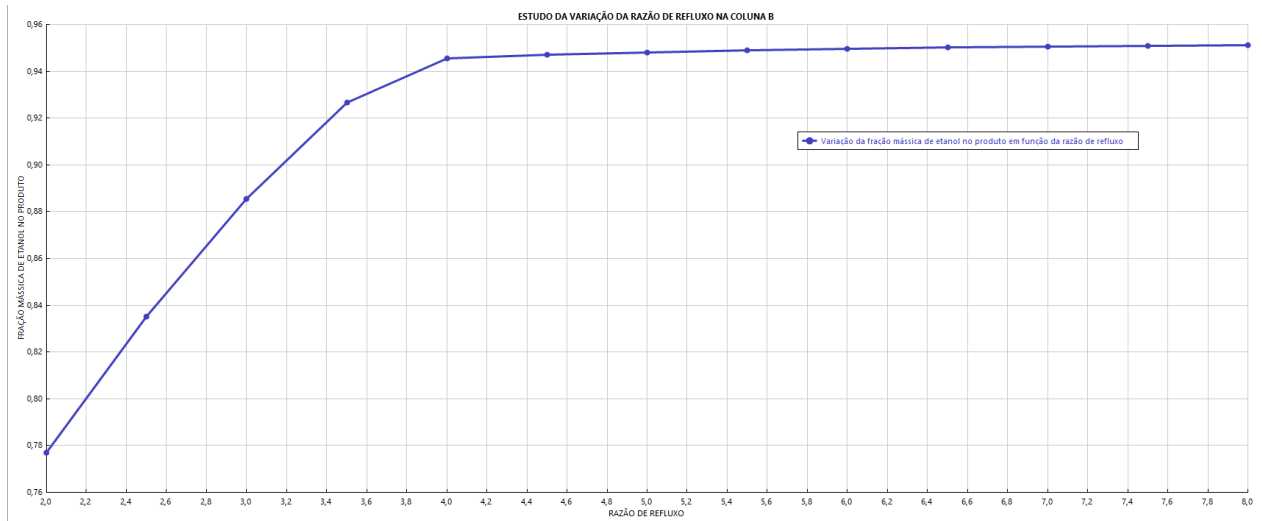
A análise de sensibilidade é uma poderosa ferramenta que os *softwares* de simulação proporcionam, visto que permitem o estudo de variações nas condições estruturais e operacionais da planta com o intuito de otimizar o processo. Como constatado na Tabela 8, foram realizados 4 estudos de sensibilidade.

5.3.1. Razão de refluxo na coluna B

O impacto da variação da razão de refluxo (RR) na coluna B foi analisada nas

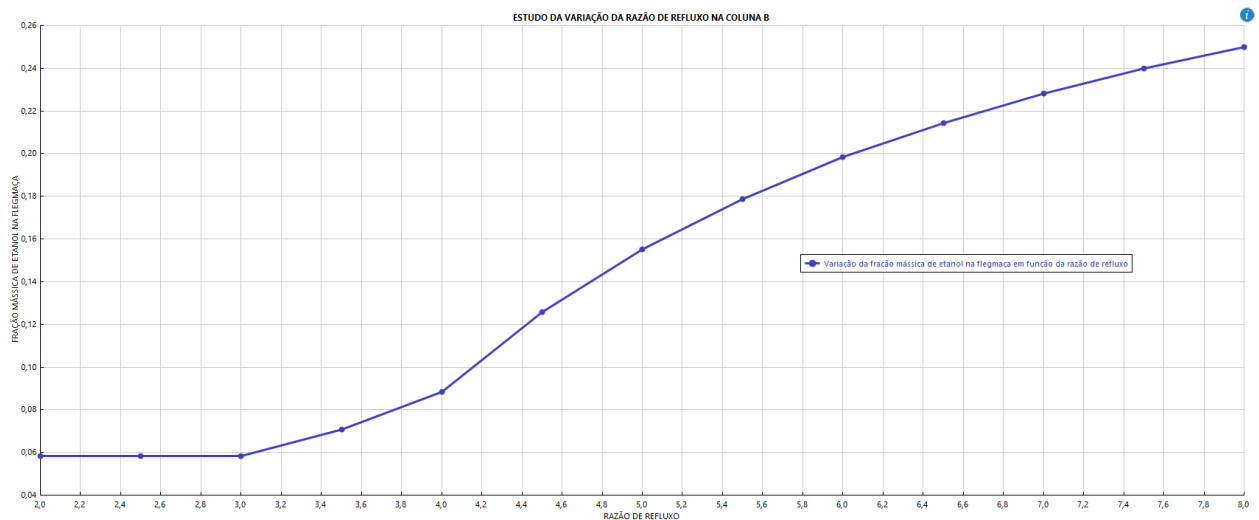
3 principais correntes de processo: etanol hidratado (produto), vinhaça e flegmaça, como pode ser observada nas Figuras 22, 23 e 24.

Figura 22: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna B com relação ao etanol hidratado



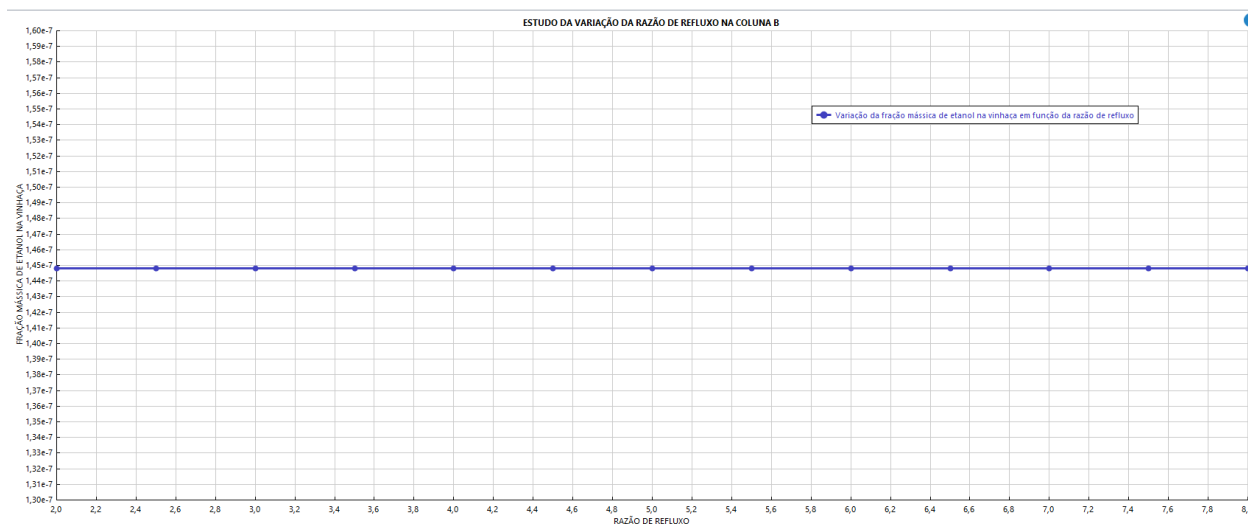
Fonte: (AUTOR, 2024)

Figura 23: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna B com relação a flegmaça



Fonte: (AUTOR, 2024)

Figura 24: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna B com relação a vinhaça



Fonte: (AUTOR, 2024)

A melhor opção de razão de refluxo para a coluna B é 4, pois garante, com uma certa segurança, que o produto estará dentro das especificações (entre 92,5 e 94,6 %m). Isto pode ser observado na Figura 22. Nota-se que, com o aumento da razão de refluxo, a fração mássica de etanol no produto também aumenta. Essa análise é condizente com a expectativa teórica, visto que, quanto mais líquido desce na coluna por unidade de massa de vapor que sobe, mais efetivo será o processo de separação, pois a finalidade é reter os compostos mais pesados contidos nos vapores. Este fato acarreta em uma purificação do etanol e consequentemente um aumento de sua concentração (SILVEIRA, 2021). Os valores de razão de refluxo acima de 4 foram descartados por dois motivos: o primeiro deles é que o aumento da fração mássica não é vantajoso, pois o preço do etanol não varia dentro de sua faixa de especificação. Além disso, o aumento da razão de refluxo gera um aumento no consumo energético do sistema, o que é extremamente indesejável.

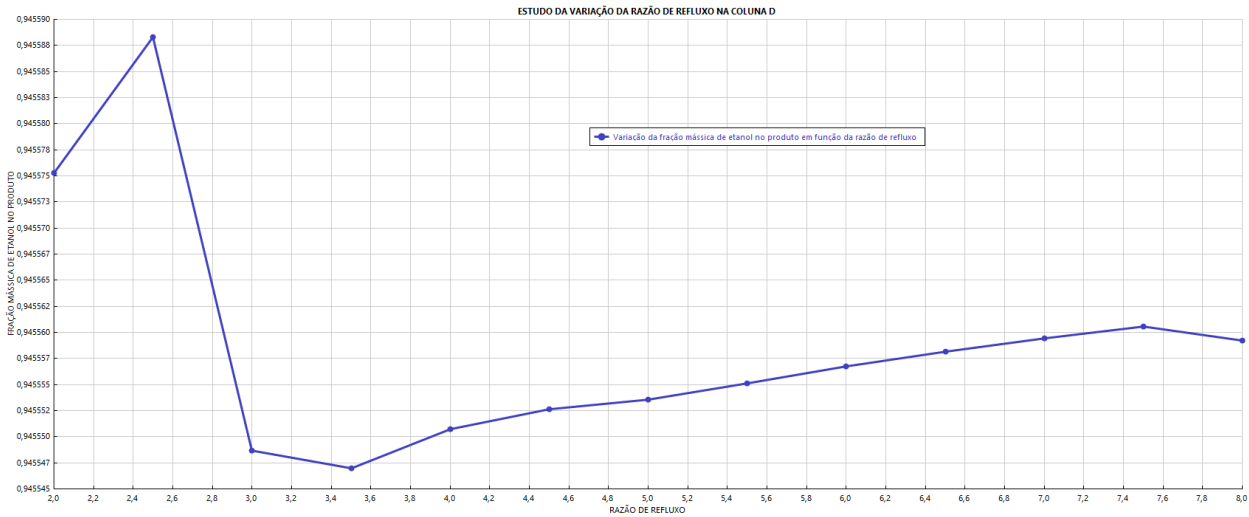
Além disso, a razão de refluxo escolhida apresenta baixas frações mássicas de etanol na flegmaça quando comparado a valores superiores a 4, o que pode se confirmar através da Figura 23. Razões de refluxo abaixo de 4 não foram cogitadas devido a insegurança com relação a especificação do produto final.

As variações na razão de refluxo da coluna B não apresentaram mudanças nas perdas de etanol na vinhaça, como constata-se na Figura 24.

5.3.2. Razão de refluxo na coluna D

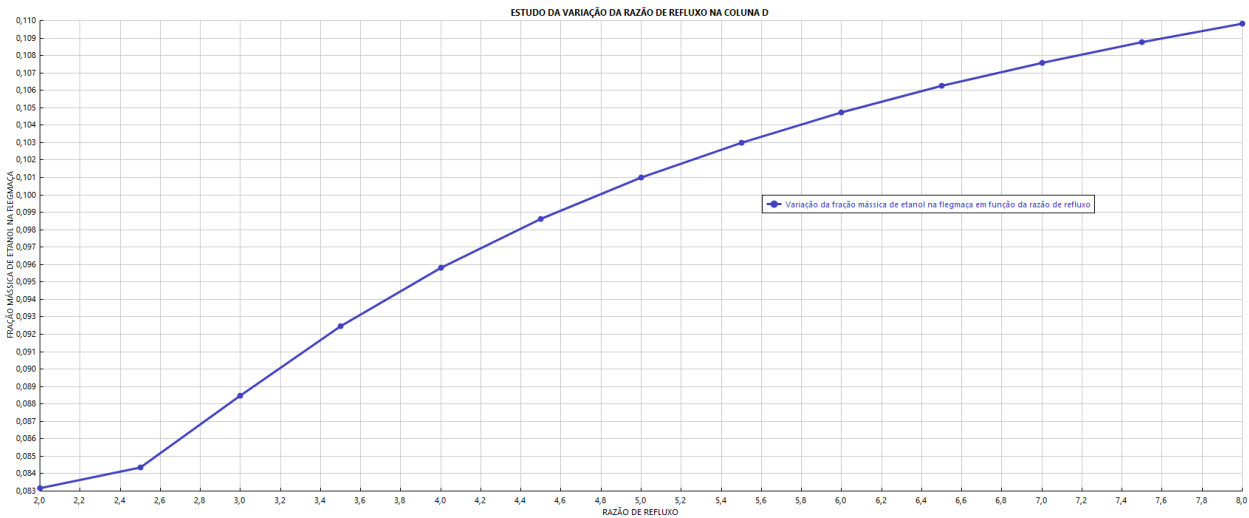
O impacto da variação da razão de refluxo na coluna D foi analisada para 4 correntes materiais: álcool de 2º, etanol hidratado (produto), vinhaça e flegmaça, como pode ser observada nas Figuras 25, 26, 27 e 28.

Figura 25: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna D com relação ao etanol hidratado



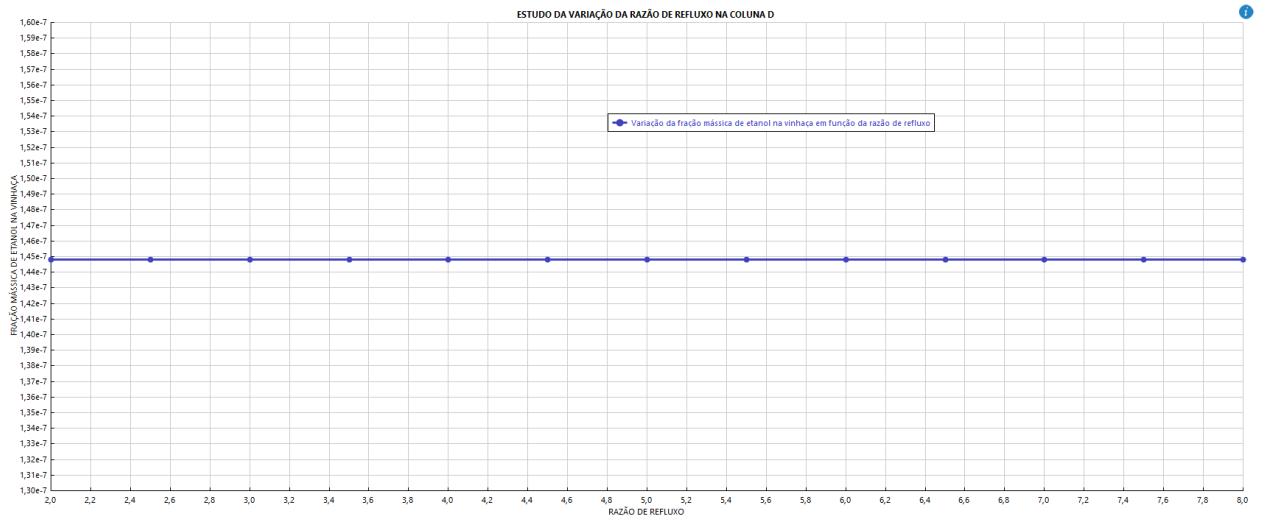
Fonte: (AUTOR, 2024)

Figura 26: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna D com relação a flegmaça



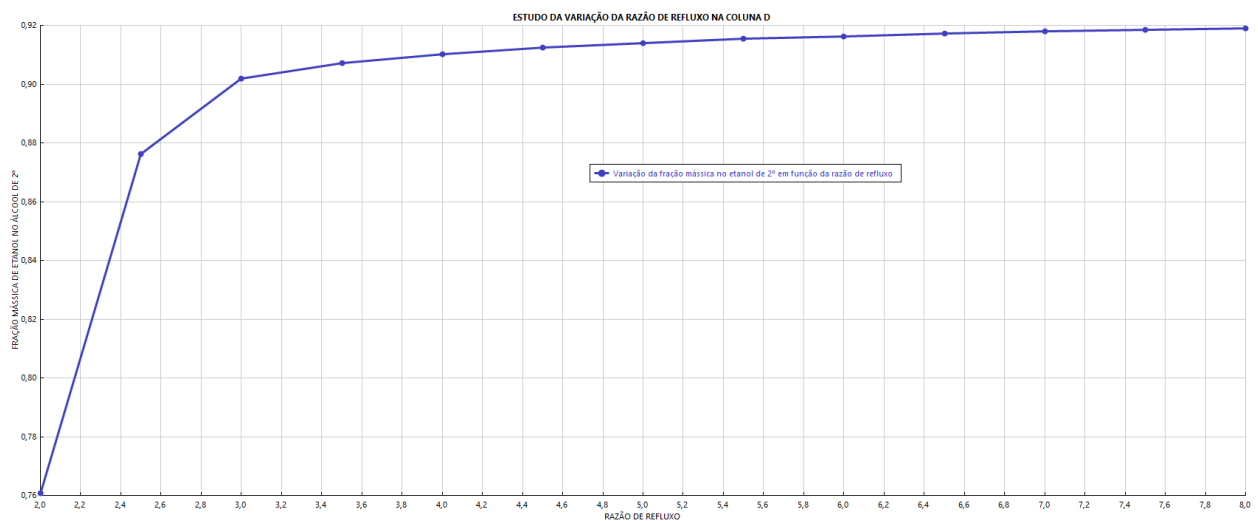
Fonte: (AUTOR, 2024)

Figura 27: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna D com relação a vinhaça



Fonte: (AUTOR, 2024)

Figura 28: Estudo da variação da razão de refluxo na coluna D com relação a o álcool de 2ª



Fonte: (AUTOR, 2024)

Na Figura 25, nota-se que a variação na razão de refluxo possui influência desprezível na variação da fração mássica de etanol.

Além disso, na Figura 26, observa-se um aumento na fração mássica de etanol na flegmaça conforme o aumento da razão de refluxo. Dessa forma, valores mais baixos de RR são desejados.

A fração mássica de etanol na vinhaça não foi afetada com a alteração da razão de refluxo, como constatado na Figura 27.

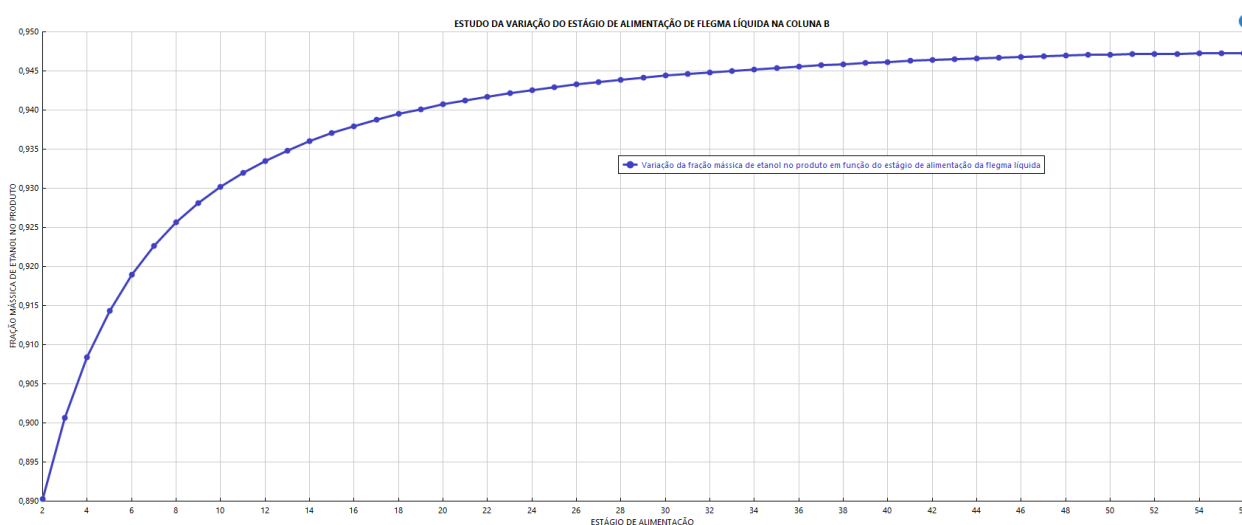
Ademais, é desejável ao processo que se obtenha um álcool de 2º com o maior grau alcóolico possível, para que a menor quantidade de água retorne a dorna volante. Dessa forma, obtém-se uma economia de vapor no processo. Na Figura 28, é evidente que o aumento na razão de refluxo gera um aumento no teor alcóolico do álcool de 2º, atingindo valores acima de 90° GL. Porém, esse aumento é pouco significativo em valores de RR acima de 3. Abaixo de 3, nota-se que a fração mássica de etanol no álcool de 2º cai drasticamente, o que é extremamente indesejável ao processo, visto que uma quantidade considerável de água retornaria ao processo.

Dessa forma, com base principalmente nas Figuras 26 e 28, o melhor valor para a razão de refluxo na coluna D é 3, pois o teor de etanol na flegmaça é baixo e o teor de etanol no álcool de 2º se estabiliza na faixa dos 90 %m, valor este considerado satisfatório para o processo produtivo de etanol hidratado.

5.3.3. Estágio de alimentação da flegma líquida na coluna B

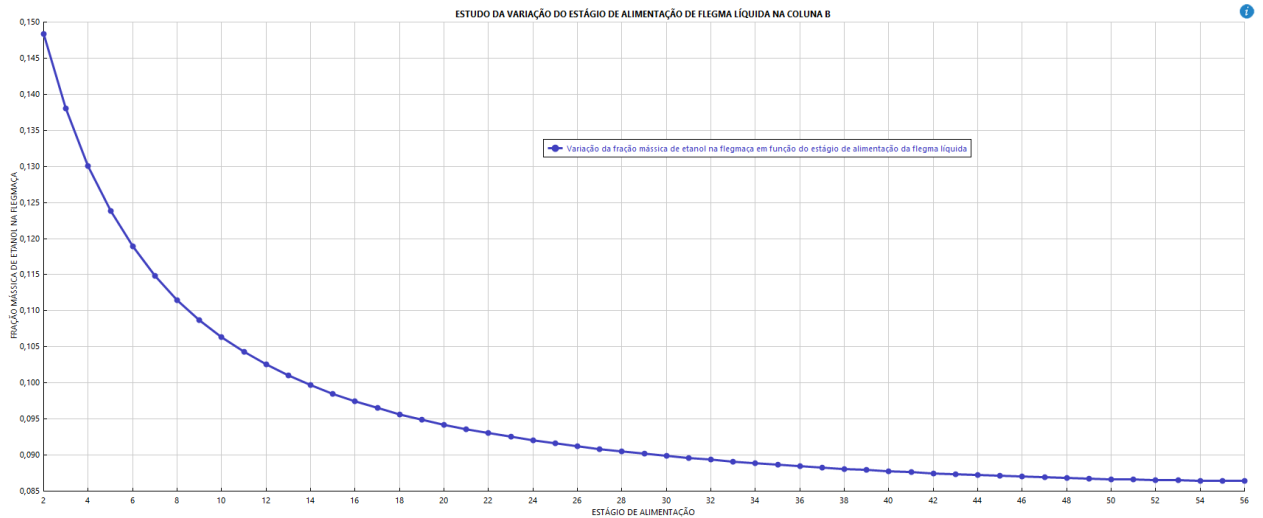
O impacto da variação do estágio de alimentação da flegma líquida na coluna B foi analisada para 3 correntes materiais: etanol hidratado (produto), vinhaça e flegmaça, como pode ser observada nas Figuras 29, 30 e 31. A contagem de estágios é realizada da parte superior para a parte inferior da coluna, ou seja, o estágio 1 representa o topo e o estágio 57 representa a base.

Figura 29: Estudo da variação do estágio de alimentação de flegma líquida coluna B com relação ao etanol hidratado



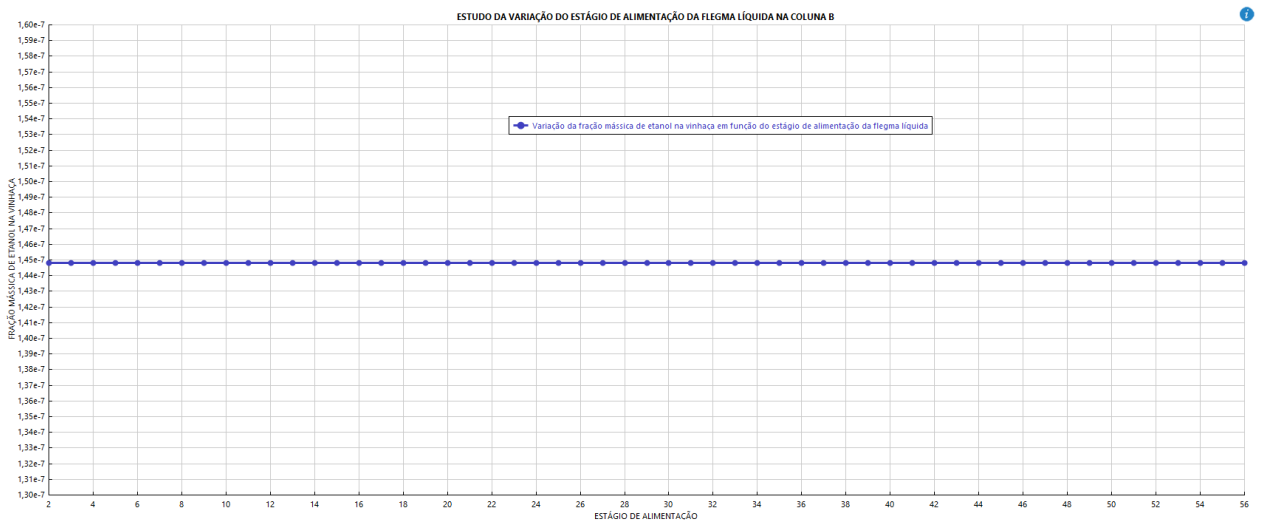
Fonte: (AUTOR, 2024)

Figura 30: Estudo da variação do estágio de alimentação de flegma líquida coluna B com relação a flegmaça



Fonte: (AUTOR, 2024)

Figura 31: Estudo da variação do estágio de alimentação de flegma líquida coluna B com relação a vinhaça



Fonte: (AUTOR, 2024)

Na Figura 29, observa-se um aumento da fração mássica de etanol com o aumento do estágio de alimentação. Baseado nisto, deseja-se que a alimentação de flegma líquida ocorra em estágios inferiores da coluna.

Já na Figura 30, nota-se uma diminuição do teor de etanol na flegmaça com o aumento do estágio de alimentação. Dessa forma, podemos afirmar que o estágio 36 seria uma boa opção de alimentação da flegma líquida, pois a partir dele a redução na

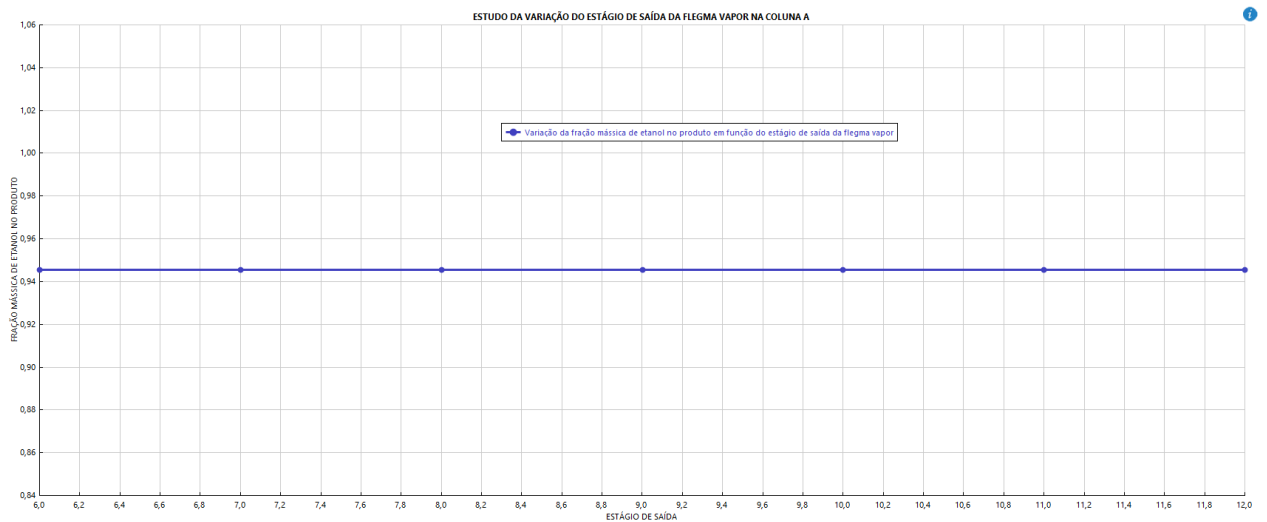
fração mássica de etanol na flegmaça é quase desprezível. Além disso, esta escolha também preza pela distância entre a alimentação da flegma líquida e da flegma vapor, que é fundamental para uma boa destilação.

Por fim, constata-se que a variação do estágio de alimentação da flegma líquida não influencia a perda de etanol na vinhaça, como pode ser observado na Figura 31.

5.3.4. Estágio de saída da flegma vapor na coluna A

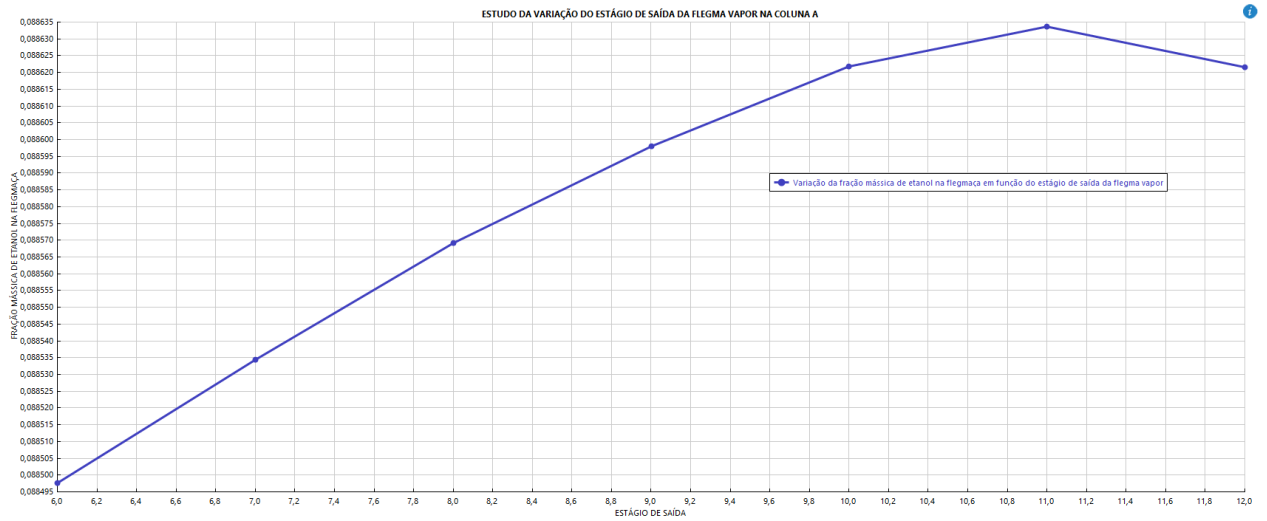
O impacto da variação do estágio de saída da flegma vapor na coluna A foi analisada para 3 correntes materiais: etanol hidratado (produto), vinhaça e flegmaça, como pode ser observada nas Figuras 32, 33 e 34.

Figura 32: Estudo da variação do estágio de saída da flegma vapor na coluna A com relação ao etanol hidratado



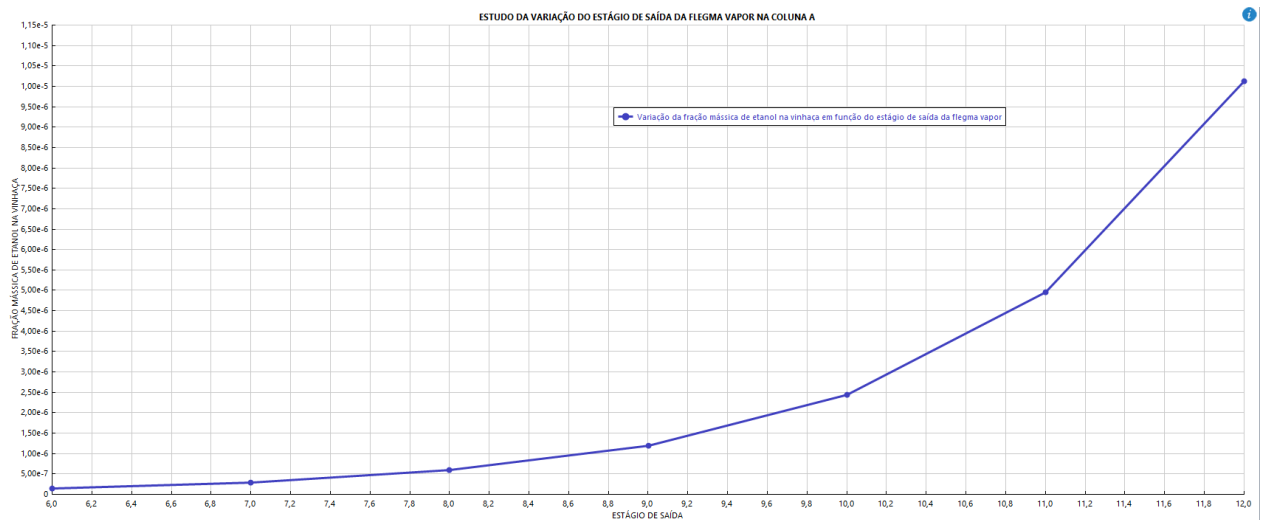
Fonte: (AUTOR, 2024)

Figura 33: Estudo da variação do estágio de saída da flegma vapor na coluna A com relação a flegmaça



Fonte: (AUTOR, 2024)

Figura 34: Estudo da variação do estágio de saída da flegma vapor na coluna A com relação a vinhaça



Fonte: (AUTOR, 2024)

Na Figura 32, nota-se que o estágio de saída da flegma vapor na coluna A não interfere na fração mássica de etanol no produto final.

Já na Figura 33, observa-se um discreto aumento na fração mássica de etanol na flegmaça com o aumento do estágio de saída da flegma vapor, que pode ser considerado quantitativamente desprezível.

O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 34, onde evidencia-se

um leve aumento da fração mássica de etanol na vinhaça concomitante ao aumento do estágio de saída da flegma vapor.

Dessa forma, o estágio 6 se apresenta como uma excelente opção, visto que seus valores de perda de etanol na vinhaça e flegmaça são satisfatoriamente baixos. Estágios inferiores ao 6º não convergiram, portanto não podem ser considerados.

5.3.5. Comparação entre o cenário vigente e otimizado

A Tabela 14 retrata uma comparação realizada entre as condições operacionais/estruturais dos cenários atual e otimizado.

Tabela 13: Comparação entre cenário atual e otimizado.

Variável	Cenário Atual	Cenário Otimizado
Razão de refluxo na coluna B	4,5	4
Razão de refluxo na coluna D	2,5	3
Estágio de alimentação da flegma líquida na coluna B	29	36
Estágio de saída da flegma vapor na coluna A	6	6

Fonte: (AUTOR, 2024)

Além disso, ao se realizar uma simulação no Aspen Plus® com as condições otimizadas aplicadas, evidencia-se na Tabela 15 a notável redução da fração mássica de etanol na flegmaça, concomitante ao aumento na vazão de etanol hidratado. Vale ressaltar que, como a flegmaça não é uma corrente de descarte do processo, essa vazão adicional de produto no cenário otimizado não indica um ganho de produção, mas sim de capacidade. Este ganho representa um valor de 1164 Kg/h, que para uma densidade de 811 Kg/m³, representa uma vazão volumétrica de 1435,26L/h. Dessa forma, o sistema otimizado deixa de recircular 34446,36 L/dia de etanol hidratado. Constata-se também que o teor de etanol na vinhaça não se altera nos 2 cenários.

Tabela 14: Comparação entre as simulações dos cenários atual e otimizado.

Variável	Simulação do cenário atual	Simulação do Cenário Otimizado
%m de etanol na flegmaça	12,80	8,85
%m de etanol na vinhaça	$1,44 \times 10^{-7}$	$1,44 \times 10^{-7}$
Produção horária de etanol hidratado (Kg/h)	12142,4	13306,4

Fonte: (AUTOR, 2024)

Como a fábrica de etanol da Usina Sonora já apresenta problemas recorrentes de oscilação de vazão e pressão de vapor, esse ganho na capacidade é fundamental para que as perdas de rendimento sejam menores em casos de problemas energéticos na planta, gerando uma maior estabilidade na produção do etanol hidratado.

6. CONCLUSÃO

O Aspen Plus® demonstrou ser uma poderosa ferramenta para simulações de processos de destilação para a produção do etanol hidratado, visto que o *software* apresentou dados confiáveis e condizentes com os obtidos via laboratório industrial da Usina Sonora.

Por meio de análises de sensibilidade, foi possível realizar análises estruturais das colunas de destilação para que se pudesse avaliar quais as condições otimizadas do processo e quais os seus respectivos impactos. Ao fim das análises estruturais, definiu-se o estágio 36 como o ideal para alimentação da flegma líquida na coluna B e o estágio 6 sendo o ideal para saída da flegma vapor da coluna A.

Seguindo a mesma premissa, foram realizados estudos operacionais das colunas de destilação para que se pudesse determinar as razões de refluxo otimizadas do sistema. As análises apresentaram, para a coluna D, um refluxo ideal de 3. Para a coluna B, este valor foi de 4.

Dessa forma, com as otimizações aplicadas, o sistema apresentou uma diminuição percentual na fração mássica de etanol na flegmaça de 3,95% quando comparado a simulação da planta atual da Usina Sonora, o que representa um ganho de capacidade de 1435,26 L/h de etanol hidratado. Dessa forma, evidencia-se que 34446,36 L/dia de etanol hidratado deixam de ser redestilados, gerando uma economia de vapor de 3,46 ton/h de vapor vegetal “V1”, valor este próximo de 10% do montante total disponível para o processo (36 ton/h). Como consequência, atinge-se uma maior estabilidade no processo de destilação. Por fim, o cenário otimizado apresentou baixas perdas de etanol na vinhaça e um produto dentro das especificações técnicas exigidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (94,5 %m).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASSO, C. **Fisiologia e ecologia microbiana**. I Workshop Tecnológico sobre produção de etanol, Projeto Programa de Pesquisa em Políticas Públicas, ESALQ/USP, 2004.

BATISTA, F. **Estudo do processo de destilação alcoólica contínua**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

BRASIL. Resolução ANP Nº 907, de 18 de novembro de 2022 - DOU de 23-11-2022. **Dispõe sobre as especificações do etanol combustível e suas regras de comercialização em todo o território nacional**. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-907-2022>. Acesso em 05/10/2023.

CYSEWSKY, G; WILKIE, C. **Processo design and economic studies of fermentation methods for the production of ethanol**. Biotechnology and Bioengineering. V.20, 1978.

FONSECA, G. C. **Modelagem e simulação de uma destilaria autônoma de produção de etanol de primeira geração (E1G)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

FURLAN, F et al. **Assessing the production of first and second generation bioethanol from sugarcane through the integration of global optimization and process detailed modeling**. Computers and Chemical Engineering. p 1–9. 2012.

FURTADO, T; SCANDIFFIO, M. **Álcool no Brasil – Uma longa história**. Scientific American Brasil, Outubro, 2006.

LIMA, U. A.; BASSO, L. C.; AMORIM, H. V. **Produção de etanol**. In: Lima, U. A. et al. (coord.). **Biotecnologia Industrial: Processos Fermentativos e Enzimáticos**. São Paulo, Edgar Blücher, p.3: 1 – 43, 2001.

LOPES, C. **Tecnologia de produção de açúcar de cana**. Coleção UAB – UFSCar, São Carlos : EdUFSCar, 2011.

PACHECO, T. **Fermentação alcoólica com leveduras de características floculantes em reator tipo torre com escoamento ascendente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

PASCHOALINI, G. **Estudo do processo fermentativo de usina sucroalcooleira e proposta para sua otimização**. Revista de Ciência & Tecnologia • v.16, 2009.

PERES, E.D.; CARDOSO, D.R.; FRANCO, D.W. **Análise dos álcoois, ésteres e compostos carbonílicos em amostras de óleo fúsel**. Química Nova. USP São Carlos. SP. N° 1. Vol. 24. p. 10 – 12. 2001.

QUIMESP QUÍMICA. **Ficha de dados de segurança – Álcool Etílico 96 (etanol)**. Versão 3, 2023.

SANTOS, M. C, et al. **Property Modeling, Energy Balance and Process Simulation Applied to Bioethanol Purification**. Sugar Tech, vol. 22, 2020.

SCHMIDELL, N; FACCIOTTI, M. **Biorreatores e processos fermentativos. Biotecnologia industrial: engenharia bioquímica**. Tradução . São Paulo: Edgard Blucher, 2001. v. 2.

SILVEIRA, C. **Simulação e otimização do processo de destilação para a produção de etanol hidratado**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Química). Universidade Federal de Alagoas, Campus Maceió, 2021.

SOUZA, M; MUTTON, M. **Floculação de leveduras por Lactobacillus fermentum em processos industriais de fermentação alcoólica avaliada por técnica fotométrica**. Ciência. Agrotec., v.28, 2004.

ZARPELON, F. **Destilação do etanol**. Piracicaba. STAB – Sociedade dos técnicos açúcareiros e alcooleiros do Brasil (Regional Sul), 2020.