

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL – CAMPUS FELIZ

MATHIAS BOTH

**ADAPTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA COLUNA DE
DESTILAÇÃO DE BANCADA PARA FLUXO CONTÍNUO**

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL – CAMPUS FELIZ

MATHIAS BOTH

**ADAPTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA COLUNA DE
DESTILAÇÃO DE BANCADA PARA FLUXO CONTÍNUO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de
bacharelado em Engenharia Química.

Área da Engenharia Química: Operações unitárias.

Sub-área: Destilação.

Orientador: Dr. Matheus Felipe Pedrotti

FELIZ

2024

MATHIAS BOTH

**ADAPTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA COLUNA DE
DESTILAÇÃO DE BANCADA PARA FLUXO CONTÍNUO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Flávia Dagostim Minatto

Prof^ª. Nicéia Chies da Fré

ORIENTADOR

Prof. Matheus Felipe Pedrotti

Feliz, 13 de dezembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Ao **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS)**, pela oportunidade da realização deste trabalho.

Aos docentes do curso de **Bacharelado em Engenharia Química** pelos ensinamentos, que me fizeram evoluir no processo de formação profissional.

Ao Prof. Dr. **Matheus Felipe Pedrotti**, pela orientação, pelos aconselhamentos e ensinamentos.

As prof^a. Flávia Dagostim Minatto e prof^a. Nicéia Chies da Fré, por aceitarem o convite de serem membros da banca avaliadora.

Ao meu pai, João Carlos Both, por ser meu maior exemplo de força e dedicação. Agradeço por me mostrar o valor do trabalho árduo e da disciplina, além de todos os outros ensinamentos, esforços e carinho a mim depositados.

À minha mãe, Marlise Altmann Both, por todo seu amor incondicional, paciência e apoio constante em todas as fases de minha jornada acadêmica e de minha vida. Sua sabedoria, carinho e fé em mim foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu irmão, Jeferson Mateus Both, que sempre esteve presente comigo, me apoiando ao longo dessa jornada.

A minha namorada, Vitória Ritter Lopes, que foi uma verdadeira fonte de apoio e motivação ao longo dessa jornada. Agradeço por ser essa pessoa que me entende e me impulsiona a ser melhor a cada dia.

Aos meus **colegas** do curso, que estiveram sempre presentes compartilhando conhecimentos e pela amizade criada ao longo dos anos.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, participaram dessa trajetória e contribuíram para a realização deste TCC.

RESUMO

A destilação é uma operação crucial em indústrias químicas e petrolíferas, usada para separar componentes de misturas líquidas com base na diferença de composição entre vapor e líquido em equilíbrio. Existem métodos de destilação simples e fracionada, e processos contínuos e em batelada. Neste trabalho foi alterado o fluxo para contínuo de uma coluna de destilação de bancada disponível no laboratório de Engenharia Química do IFRS – Campus Feliz. Na configuração anterior, a coluna operava em batelada em um sistema dinâmico ou em estado estacionário sem remoção de produto. Com as adaptações, a coluna de destilação opera em fluxo contínuo, utilizando um sistema de pré-aquecimento da solução de alimentação e bombas peristálticas para alimentação da coluna e remoção dos produtos de topo e de fundo. Foram avaliados os efeitos da vazão de alimentação, razão de refluxo e potência do refeedor na pureza, vazão dos produtos e estabilidade da coluna. A partir dos resultados, foram obtidos os melhores pontos operacionais, que foram os pontos com razão de refluxo igual a 2 e 4 para as três vazões de alimentação e três potências de refeedor testadas. Os parâmetros definidos para escolha dos melhores pontos operacionais foram a eficiência energética, estabilidade, vazão efetiva de etanol e teor de etanol no topo. Foram obtidos pontos operacionais com estágios estáveis, possuindo camada de líquido e vapor ascendente, o que possui grande importância para o adequado funcionamento da coluna. A partir da análise dos resultados e dos parâmetros definidos, foi obtido o melhor ponto operacional, com vazão de 49 mL/min, razão de refluxo igual a 2 e potência do refeedor de 352 W.

Palavras-chave: Coluna de destilação. Fluxo contínuo. Razão de refluxo. Vazão.

Abstract

Distillation is a crucial operation in chemical and petroleum industries, used to separate components of liquid mixtures based on the difference in composition between vapor and liquid in equilibrium. There are both simple and fractional distillation methods, as well as continuous and batch processes. In this work, the flow of a bench-scale distillation column available at the Chemical Engineering Laboratory of IFRS – Campus Feliz was changed to continuous. In the previous configuration, the column operated in batch mode in a dynamic or steady-state system without product removal. With the adaptations, the distillation column now operates in continuous flow, using a pre-heating system for the feed solution and peristaltic pumps for feeding the column and removing top and bottom products. The effects of feed flow rate, reflux ratio, and reboiler power on product purity, flow rates, and column stability were evaluated. Based on the results, the best operating points were obtained, which were the points with reflux ratios of 2 and 4 for the three feed flow rates and three reboiler power levels tested. The parameters defined for selecting the best operating points were energy efficiency, stability, effective ethanol flow, and ethanol content at the top. Stable operating points were achieved, with stages having a liquid layer and ascending vapor, which is crucial for the proper functioning of the column. From the analysis of the results and the defined parameters, the best operating point was obtained, with a flow rate of 49 mL/min, a reflux ratio of 2, and reboiler power of 352 W.

Keywords: Distillation column, Continuous flow, Reflux ratio, Flow rate

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	10
1.1.1 Objetivo Geral.....	10
1.1.2 Objetivos específicos.....	10
2 REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1 EQUILÍBRIO DAS FASES.....	11
2.1.1 Regra das Fases e Equilíbrio	11
2.1.2 Equilíbrio Líquido-Vapor.....	11
2.1.3 Pressão de vapor	12
2.1.4 Diagramas do Equilíbrio Líquido-Vapor.....	13
2.1.5 Soluções	14
2.2 OPERAÇÃO DE DESTILAÇÃO.....	15
2.2.1 Destilação Fracionada Contínua.....	16
2.2.2 Razão de refluxo (R).....	19
2.3 OUTROS TRABALHOS	20
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 MATERIAIS.....	25
3.2 MÉTODOS	27
3.2.1 Condições de alimentação	27
3.2.2 Avaliação da potência do refeedor e da razão de refluxo	28
3.2.2 Avaliação dos melhores pontos operacionais.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32

4.1 ADAPTAÇÕES E MODIFICAÇÕES NA COLUNA.....	32
4.2 AVALIAÇÃO DO EFEITO DA POTÊNCIA DO REFERVEDOR E DA RAZÃO DE REFLUXO	40
4.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	49
5 CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A destilação é uma das principais operações em indústrias petrolíferas e químicas, e possui diversas aplicações, desde a separação do petróleo cru a obtenção de oxigênio puro para uso em soldas, foguetes e aplicações médicas. Industrialmente, a destilação é realizada em equipamentos multiestágios e equipamentos de contato contínuo (Foust, 1982). Geralmente, a destilação tem objetivo de separar substâncias de uma mistura homogênea, podendo ser aplicada desde pequenos laboratórios até grandes indústrias (Matos, 2015).

A destilação trata-se de um método para separar vários componentes de uma solução líquida que depende da distribuição desses componentes entre uma fase de vapor e uma fase líquida, sendo a fase vapor enriquecida com o componente mais volátil e a fase líquida com o componente menos volátil, em que todos os componentes estão presentes em ambas as fases. Para a separação dos componentes ocorrer, é necessário que a composição do vapor seja diferente da composição do líquido com o qual está em equilíbrio no ponto de ebulição do líquido (Geankoplis, 2018).

Na prática, a destilação pode ser realizada por dois métodos principais: a destilação simples, que envolve apenas um único estágio de separação do vapor e do líquido, e a destilação fracionada, que envolve mais estágios de separação líquido-vapor (Geankoplis, 2018), comumente usada no âmbito industrial (Matos, 2015). Os processos de destilação também podem ser classificados em processos contínuos ou batelada. Os processos contínuos normalmente são empregados para grandes vazões e nesse processo a coluna de destilação é alimentada continuamente, assim obtendo produtos de forma contínua. Enquanto no processo em batelada, uma carga líquida é adicionada na coluna de destilação de modo intermitente e assim é obtido uma quantidade definida de produtos (Barbosa, 2015).

Este trabalho tem como objetivo alterar para fluxo contínuo, avaliar o efeito da vazão de alimentação, razão de refluxo e potência do refeedor na pureza e vazão dos produtos de uma coluna de destilação de bancada disponível no laboratório de Engenharia Química do IFRS – Campus Feliz. Na configuração anterior a este trabalho, a coluna operava em batelada em um sistema dinâmico ou em estado estacionário sem remoção de produto (todo produto volta para o fundo da coluna).

Com a adaptação, a coluna de destilação passou a operar em fluxo contínuo, utilizando um sistema de pré-aquecimento da alimentação e bombas peristálticas para alimentar e retirar continuamente os produtos de topo e de fundo, assim possibilitando a visualização da operação de destilação contínua por outros alunos da instituição, agregando qualidade a formação dos mesmos. Além disso, esses experimentos em fluxo contínuo se assemelham a colunas de destilação contínuas que são usadas industrialmente, agregando qualidade a formação dos alunos da instituição.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um método para transformar uma coluna de destilação de bancada em fluxo contínuo e avaliar as melhores condições operacionais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um método para transformar a coluna de destilação de bancada em fluxo contínuo através do uso de bombas peristálticas e um pré-aquecedor na alimentação;
- Avaliar as vazões de alimentação, destilado e produto de fundo para a coluna de destilação operar continuamente em estado estacionário;
- Avaliar o efeito da potência do refeedor, vazão de alimentação e razão de refluxo na pureza e vazão dos produtos;
- Identificar as melhores condições operacionais da coluna.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 EQUILÍBRIO DAS FASES

O equilíbrio é considerado uma condição estática na qual não ocorrem variações das propriedades macroscópicas de um sistema com o tempo, resultando na igualdade dos potenciais que podem alterar o sistema. No entanto, no nível microscópico, não há uma condição de estaticidade, pois as moléculas com velocidades suficientemente altas para superar as forças superficiais e posicionadas próximas a interface passam para outra fase, e assim vice-versa. Contudo, a taxa média de passagem das moléculas é igual nas duas direções, não havendo transferência líquida de matéria entre as fases (Smith, 2007).

2.1.1 Regra das Fases e Equilíbrio

Em todos os casos em que envolvem equilíbrio, duas fases estão envolvidas, como líquido-vapor ou líquido-líquido. As variáveis que afetam o equilíbrio são temperatura, pressão e concentração. O equilíbrio entre duas fases é restringido pela regra das fases, conforme a Equação 1 (Geankoplis, 2018):

$$F = C - P + 2 \quad (1)$$

Onde C é o número total de componentes presentes nas duas fases, P é o número de fases em equilíbrio e F é o número de graus de liberdade do sistema (Geankoplis, 2018).

2.1.2 Equilíbrio Líquido-Vapor

O equilíbrio líquido-vapor pode ser analisado termodinamicamente ou cineticamente. Da forma termodinâmica, a condição de equilíbrio de um sistema heterogêneo é a igualdade de potencial químico de cada componente em todas as fases, com T e P constantes. Essa igualdade de potencial químico resulta a igualdade das fugacidades (Pilla, 2010).

Analisando do ponto de vista cinético, o equilíbrio líquido-vapor é atingido quando as velocidades de vaporização e liquefação se tornam iguais. Em outras palavras, o equilíbrio é atingido quando o número de moléculas que abandonam a superfície do líquido é igual ao número de moléculas que voltam ao líquido (Pilla, 2010).

Segundo a Lei de Distribuição de Maxwell-Boltzmann, a energia cinética média das moléculas aumenta com a elevação da temperatura, assim os equilíbrios líquido-vapor se ajustam a pressões de vapor maiores (Pilla, 2010).

A lei de Raoult, que descreve o comportamento das pressões parciais em soluções ideais, pode ser definida para equilíbrios líquido-vapor, conforme a Equação 2 (Geankoplis, 2018):

$$p_A = P_A x_A \quad (2)$$

Onde p_A é a pressão parcial do componente A no vapor, P_A é a pressão de vapor de A puro e x_A é a fração molar de A no líquido. Essa lei somente é válida para soluções ideais. Para outros sistemas de soluções ideais e não ideais é usado a lei de Henry em soluções diluídas (Geankoplis, 2018). Esta lei de Henry rege as soluções diluídas. Ela relaciona a pressão parcial do soluto na fase vapor com a fração molar do soluto na solução. Algebricamente, tem-se a Equação 3 (Castellan, 1995):

$$p_j = K_j x_j \quad (3)$$

Onde x_j é a fração molar de soluto e K_j é uma constante empírica (Castellan, 1995).

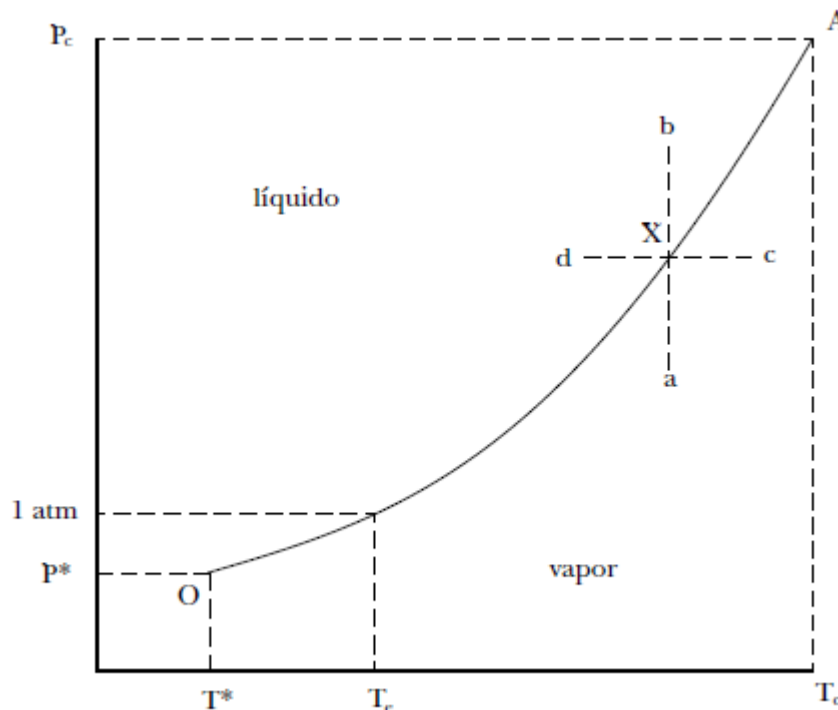
2.1.3 Pressão de vapor

A pressão que um vapor exerce sobre um líquido em um sistema em equilíbrio térmico e mecânico em um recipiente fechado é chamada de pressão de vapor do líquido e o valor é independente da quantidade de líquido no recipiente (Geankoplis, 2018).

No equilíbrio líquido-vapor, a temperatura determina a pressão de vapor. Essa pressão de vapor varia de maneira semelhante a uma exponencial, conforme ilustra a

Figura 1, onde a curva OA separa os estados do líquido e do vapor. A ultrapassagem de um ponto nesse equilíbrio líquido-vapor causa o desaparecimento de uma das fases por vaporização ou por liquefação (Pilla, 2010).

Figura 1 – Pressão de vapor e temperatura.



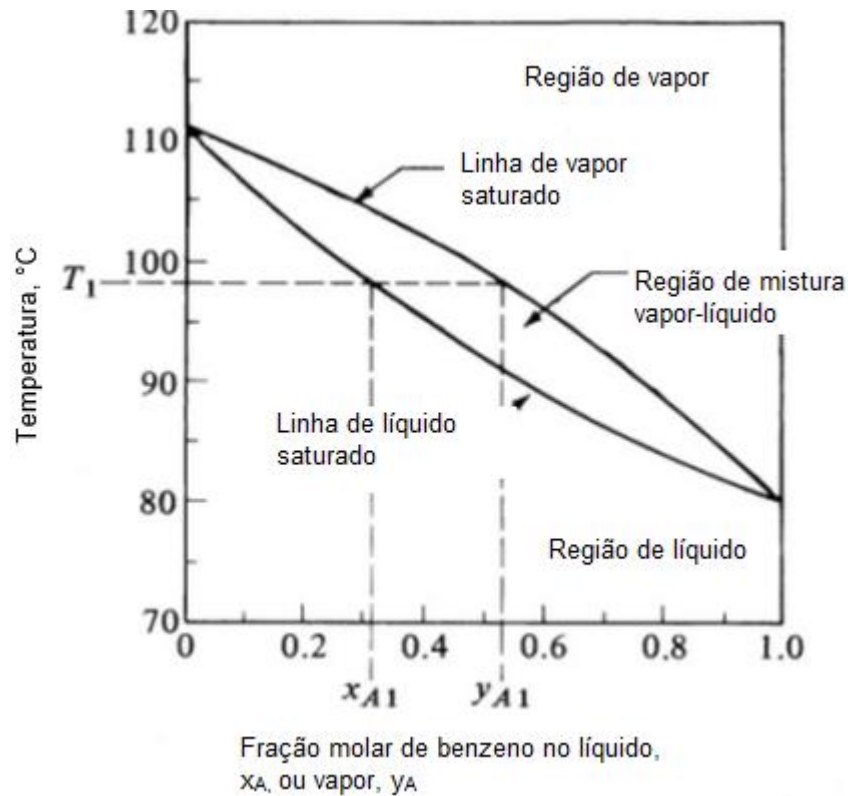
Fonte: Pilla, 2010.

Entre as temperaturas T^* do ponto triplo e a T_c do ponto crítico, existe a temperatura de ebulição (Pilla, 2010), em que é considerada a temperatura onde a pressão de vapor se torna igual a pressão atmosférica total. Por exemplo, se a pressão atmosférica total for 1 atm ou 760 mmHg, água entra em ebulição a 100 °C. (Geankoplis, 2018).

2.1.4 Diagramas do Equilíbrio Líquido-Vapor

Em geral, as relações de equilíbrio líquido-vapor para misturas binárias são dadas na forma de diagramas, como mostrado na Figura 2, para um sistema de benzeno (A) e tolueno (B) (Geankoplis, 2018).

Figura 2 – Diagrama de ELV de benzeno (A) e tolueno (B).



Fonte: Adaptado de Geankoplis, 2018.

No eixo x se tem a fração molar de benzeno no líquido (x_A) ou no vapor (y_A) e no eixo y se tem a temperatura em °C. A linha superior é a linha de vapor saturado (linha do ponto de orvalho) e a linha inferior é a linha de líquido saturado (linha do ponto de bolha). A região entre as duas linhas é a região das duas fases (líquido-vapor) (Geankoplis, 2018).

2.1.5 Soluções

Soluções podem ser definidas como misturas homogêneas de espécies químicas dispersas em uma escala molecular, ou seja, possuem apenas uma fase, podendo ser sólida, líquida ou gasosa. As soluções podem ser denominadas conforme a quantidade de componentes presentes, sendo denominadas binárias quando

possuem dois componentes, terciárias quando possuem três componentes, e assim em diante (Castellan, 1995).

Soluções ideais são misturas em que a energia média das interações entre as moléculas das misturas é igual a energia média das interações nos líquidos puros. Ou seja, a entalpia da mistura e a variação de volume devido a mistura são zeros (Atkins, 2017). Portanto, uma solução ideal é aquela que segue a lei de Raoult em todo intervalo de concentrações (Castellan, 1995).

As soluções reais possuem interações entre as moléculas diferentes, podendo haver variações de entalpia, volume e entropia. Normalmente são usadas funções de excesso para expressar as propriedades termodinâmicas das soluções reais, mostrando o grau de afastamento da solução com a idealidade (Atkins, 2017).

Em soluções que apresentam desvios da idealidade é usado o coeficiente de atividade, y_i , que pode ser função da temperatura, pressão e da composição, medindo o afastamento da idealidade da solução (Castellan, 1995).

2.2 OPERAÇÃO DE DESTILAÇÃO

O processo de separação chamado de destilação é um método para separar vários componentes de uma solução líquida e essa separação depende da distribuição desses componentes entre uma fase vapor e uma fase líquida, onde todos os componentes estão presentes em ambas as fases. A fase vapor é criada a partir da fase líquida por meio da vaporização no ponto de ebulição (Geankoplis, 2018).

O requisito básico para a separação dos componentes pelo método da destilação é que a composição do vapor seja diferente da composição do líquido com qual está em equilíbrio no ponto de ebulição (Geankoplis, 2018).

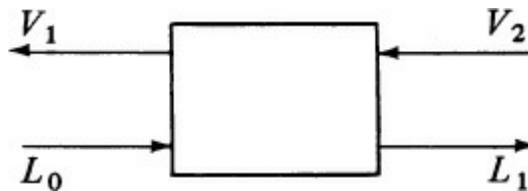
A destilação pode ser realizada por dois métodos principais. O primeiro método trata-se de uma destilação que envolve a produção de um vapor por meio da ebulição da mistura líquida, ocorrendo em um único estágio, não havendo retorno de condensado para o sistema. O segundo método de destilação envolve o retorno de parte do condensado para a coluna de destilação. Os vapores sobem por uma série de estágios ou bandejas, e parte do condensado flui para baixo através da série de estágios em contracorrente com os vapores. Esse método é chamado de destilação

fracionada, destilação com refluxo ou retificação (Geankoplis, 2018), sendo o método de maior interesse pra este trabalho.

2.2.1 Destilação Fracionada Contínua

A destilação fracionada pode ser considerada como um processo no qual há uma coluna com uma série de estágios de destilação simples que são dispostos de uma forma que o vapor e o líquido de cada estágio escoem em contracorrente entre si. O líquido de um estágio é conduzido para o estágio abaixo, enquanto o vapor do estágio flui para o estágio acima, portanto, em cada estágio da coluna o fluxo de vapor e o fluxo de líquido entram, misturam-se e entram em equilíbrio, e simultaneamente, um fluxo de vapor e de líquido em equilíbrio saem (Geankoplis, 2018). Um único estágio de equilíbrio, explicado anteriormente, é mostrado na Figura 3, onde L_0 (líquido) e V_2 (vapor) entram no estágio, são misturados e entram em equilíbrio, enquanto L_1 (líquido) e V_1 (vapor) saem em equilíbrio entre si.

Figura 3 – Estágio simples de equilíbrio.

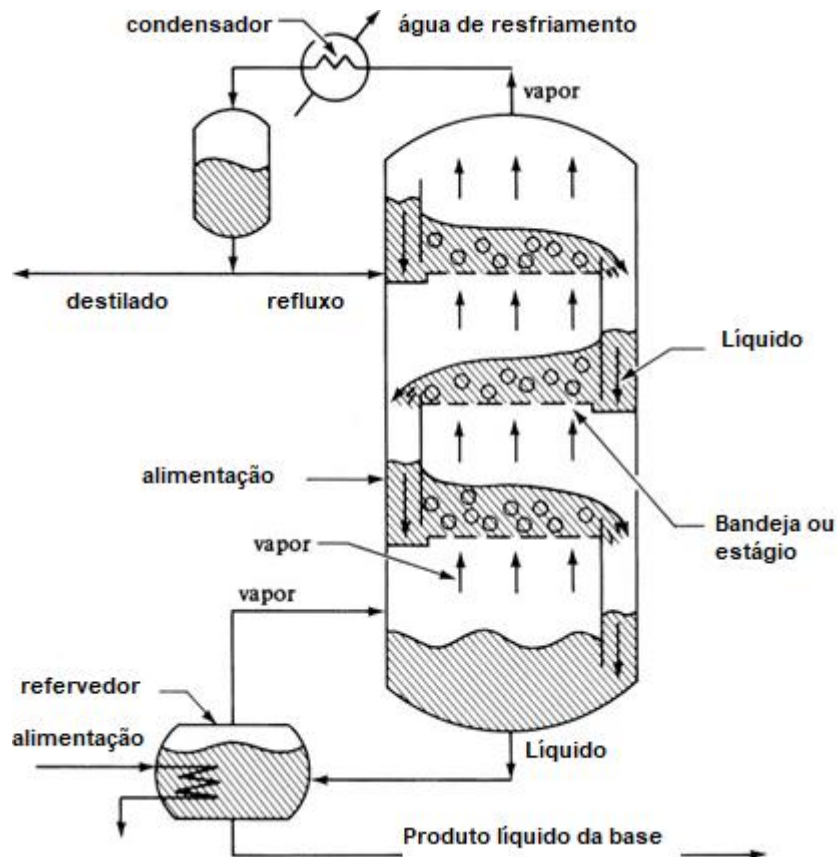


Fonte: Geankoplis, 2018.

Em uma coluna de destilação, os estágios, também chamados de pratos ou bandejas, são dispostos verticalmente, conforme a Figura 4 (Geankoplis, 2018).

A alimentação entra na coluna em algum estágio do meio da coluna, fluindo para baixo do estágio. O vapor que entra no estágio borbulha através do líquido do mesmo estágio à medida que o líquido que entra escoia através dele. O vapor sobe para o próximo estágio onde novamente é misturado com o líquido que escoia para parte inferior da coluna e nesse caso, a concentração do componente mais volátil (menor ponto de ebulição) é enriquecida na fase vapor de cada estágio superior e diminui na fase líquida em cada estágio inferior (Geankoplis, 2018).

Figura 4 – Coluna de destilação fracionada com pratos perfurados.



Fonte: Adaptado de Geankoplis, 2018.

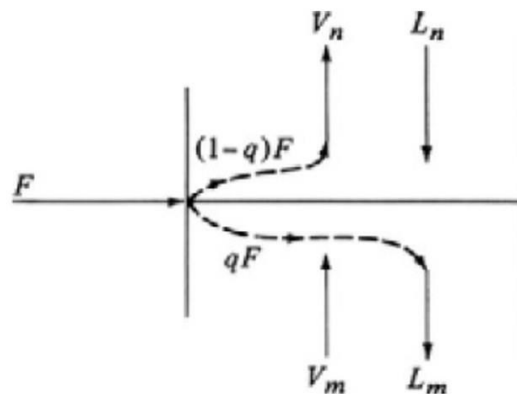
O produto final de vapor do estágio superior é condensado em um condensador, onde uma parte do líquido enriquecido em concentração do componente mais volátil é removida como produto de topo e outra parte volta para o estágio superior (refluxo). O líquido que sai do estágio inferior entra em um refeedor, onde é parcialmente vaporizado e volta para a coluna no estágio inferior. Já o líquido do refeedor enriquecido do componente menos volátil é retirado como produto de fundo (Geankoplis, 2018).

O condensador e o refeedor mostrados na Figura 4, são chamados de parciais pois parte do produto é retirado e outra parte volta para a coluna. Condensadores e refeedores em que todo produto é retirado da coluna são chamados de totais (Geankoplis, 2018).

2.2.1.1 Efeitos das Condições de Alimentação

A condição do fluxo de alimentação influencia nas relações do líquido e do vapor da coluna. A condição do fluxo determina a relação entre o vapor na seção inferior (V_m) e o vapor na seção superior (V_n), bem como entre líquido na seção inferior (L_m) e o líquido na seção superior (L_n), como mostra a Figura 5 (Geankoplis, 2018).

Figura 5 – Relações entre os fluxos acima e abaixo da entrada de alimentação.



Fonte: Geankoplis, 2018.

Por conveniência, a condição de alimentação é representada por q , definida como (Geankoplis, 2018):

$$q = \frac{\text{calor necessário para vaporizar 1 mol da alimentação nas condições de entrada}}{\text{calor latente molar de vaporização da alimentação}} \quad (4)$$

A equação também pode ser escrita em termos de entalpia, conforme a Equação 5 abaixo (Geankoplis, 2018):

$$q = \frac{H_V - H_F}{H_V - H_L} \quad (5)$$

Em que H_V é a entalpia da alimentação no ponto de orvalho, H_L é a entalpia da alimentação no ponto de ebulição e H_F é a entalpia da alimentação nas suas condições de entrada (Geankoplis, 2018). Para cada tipo de alimentação são obtidos valores diferentes de q , conforme a Quadro 1:

Quadro 1 – Valores de q para os diferentes tipos de alimentação.

Tipo de alimentação	q
Líquido subresfriado	$q > 1$
Líquido saturado	$q = 1$
Líquido + vapor	$0 < q < 1$
Vapor saturado	0
Vapor superaquecido	$q < 0$

Fonte: Adaptado de Geankoplis, 2018.

2.2.2 Razão de refluxo (R)

A razão de refluxo é considerada a razão entre a vazão de líquido que retorna a coluna do condensador e a vazão de produto do topo, assim chegando à equação 6 (Geankoplis, 2018):

$$R = \frac{L}{D} \quad (6)$$

Onde, L é a vazão de líquido que retorna a coluna e D é a vazão de produto de topo (Geankoplis, 2018). Essa razão de refluxo é uma variável operacional que pode ser controlada regulando a divisão entre o refluxo e o produto de topo (McCabe, Smith e Harriot, 1993).

A razão de refluxo tem relação direta com o número de estágios necessários em uma coluna, onde à medida que a razão de refluxo diminui, a quantidade de estágios necessários aumenta. O refluxo total, onde $R = \infty$, é muito usado para calcular o número mínimo de estágios necessários para uma coluna de destilação. Já a razão de refluxo mínima, é considerada a taxa de refluxo em que exigirá um número infinito de estágios na coluna de destilação (McCabe, Smith e Harriot, 1993).

Para o caso de refluxo total, o número de estágios é mínimo, mas o diâmetro da coluna é infinito. Para o caso de refluxo mínimo, o número de bandejas é infinito. Assim, estes são dois limites operacionais da coluna. A taxa de refluxo operacional

deve ser um valor entre esses dois limites operacionais, e em muitos casos, esse valor fica a uma razão de refluxo de 1,2 a 1,5 multiplicado a razão de refluxo mínima (McCabe, Smith e Harriot, 1993).

2.3 OUTROS TRABALHOS

Mayer (2010), realizou estudos para desenvolvimento de um destilador em escala de bancada em um sistema misto, constituído por pratos e recheios afim de buscar inovação no processo de destilação de álcool combustível em microdestilarias. A coluna de destilação consiste em três módulos, sendo um módulo uma coluna do tipo *vigreux* e os outros dois módulos compostos por colunas de recheio de anéis de rasching, conforme mostra a Figura 6. Além dos módulos, a coluna possui um balão de fundo, uma cabeça de destilação e um condensador total, sendo que a cabeça de destilação possui um módulo de duas vias para retorno de parte do produto para coluna e outra parte como destilado.

A alimentação da coluna de Mayer (2010), é pré-aquecida em um tanque com serpentina antes de ser bombeada através de uma bomba peristáltica. A razão de refluxo é controlada por um nível e é mantido constante através de uma válvula que regula a saída de destilado e por outra válvula que regula a vazão de produto que retorna a coluna.

Figura 6 – Destilador contínuo para fracionamento de misturas hidroalcoólicas.



Fonte: Mayer, 2010.

Os testes operacionais realizados por Mayer (2010), foram divididos em duas etapas. Primeiramente, foram realizados testes com razão de refluxo total para determinar o número de unidades de transferência, altura da unidade de transferência e a altura equivalente a um prato teórico. Na segunda etapa, foram realizados testes operacionais e coleta de dados em regime de operação contínua.

Como resultados, Mayer (2010), encontrou o ponto ótimo de operação da coluna segundo seus testes operacionais, conforme ilustra o Quadro 2:

Quadro 2 – Dados operacionais para o ponto ótimo de operação.

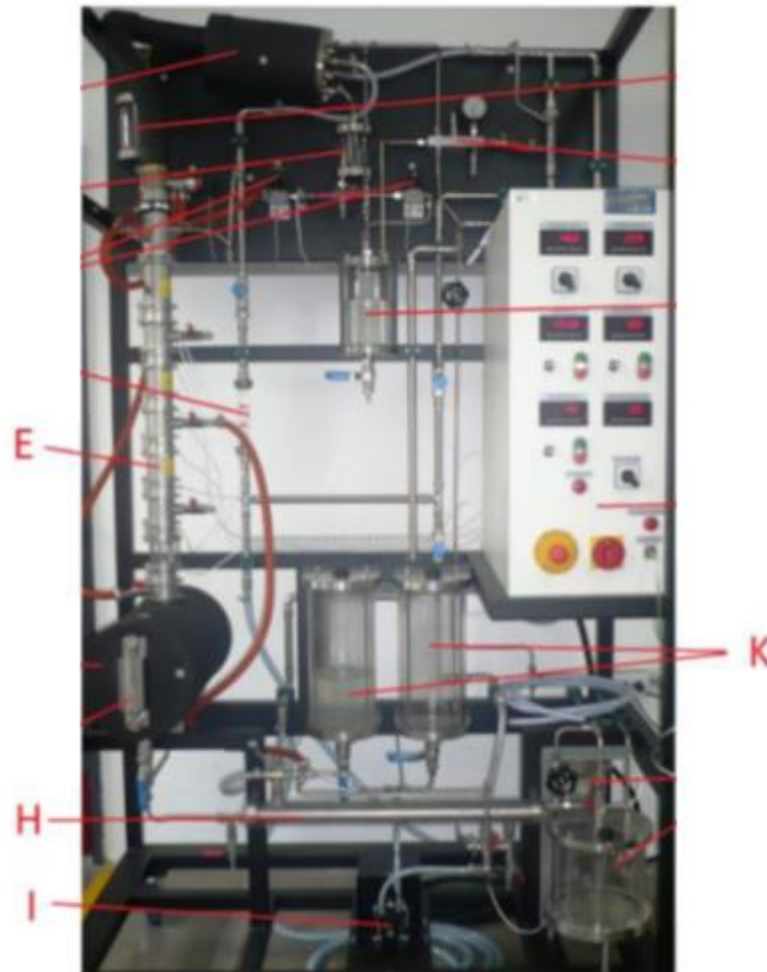
Parâmetros	Valor
Vazão de alimentação, mol/h	137,12
Vazão de destilado, mol/h	3,69
Vazão de produto de fundo, mol/h	133,48
Concentração do destilado, % mol	83,14
Concentração de produto de fundo, % mol	0,16
Razão de refluxo	2,293
Fator energético	1,342

Fonte: Adaptado de Mayer, 2010.

Benabithé et al (2020), realizaram estudos da destilação de etanol-água em operação contínua e descontínua. Se estabeleceu a concentração da solução de alimentação entre 10% e 15%. A torre de destilação contínua do tipo placa perfurada é apresentada na Figura 7. Trata-se de uma coluna de destilação de oito estágios, onde a alimentação é feita pelo estágio mais próximo do refeedor (estágio 7) por conta da baixa concentração e temperatura da solução de alimentação.

Na torre de destilação estudada por Benabithé et al. (2020), a solução de alimentação é armazenada em tanques pulmões (K), onde a coluna de pratos (E) é alimentada pela solução por uma bomba peristáltica (I) e a solução de alimentação é aquecida através de um trocador de calor (H). Foram propostos modelos matemáticos e simulações comparando-os com os testes experimentais, para validação dos modelos e definição da potência do refeedor.

Figura 7 – Torre de pratos perfurados da marca GUNT.



Fonte: Benabithe et al. (2020).

A partir das simulações do processo de destilação contínua e em condição de estado estacionário, Benabithe et al (2020), definiram a potência do refeedor em 430 W. Com os valores experimentais, foi observado que a partir de 3 horas de operação a coluna alcançou o estado estacionário em temperatura e composição. Por fim, foi visto que os valores encontrados para as simulações realizadas foram semelhantes aos valores experimentais encontrados, validando os modelos propostos.

Foi possível basear-se nos trabalhos citados acima, para realizar a alteração da coluna de destilação de bancada para fluxo contínuo, considerando as montagens e equipamentos usados nos trabalhos estudados para obtenção de colunas com fluxo contínuo. Também foram observadas as condições de alimentação fixadas e as

variáveis utilizadas para obtenção dos resultados dos trabalhos citados, para realização da avaliação de desempenho da coluna alterada para fluxo contínuo.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

O desenvolvimento do trabalho foi feito em uma coluna de destilação de bancada (UpControl), situada no laboratório de Engenharia Química do Campus Feliz. A coluna de fracionamento possui cinco estágios de fracionamento, onde cada estágio possui altura de 100 mm e 50 mm de diâmetro. A coluna é composta por pratos perfurados e um *downcomer* a cada prato. Os estágios são compostos por tubos de vidro com isolamento a vácuo por meio de uma dupla camada de vidro e manta de isolamento térmico, além de possuir pontos de coleta em cada estágio da coluna.

O refeedor é composto por um balão de fundo redondo de 5 L e também possui manta de isolamento térmico. Seu aquecimento é feito através de um ebulidor de imersão, com potência de 855 W controlada por um reostato (TDGC2-0.5KVA, JMG, Brasil). Para medição da corrente e tensão aplicadas ao ebulidor é utilizado um multímetro digital (MODEL A6, POLITERM, Brasil). O vapor do produto de topo é condensado através de um condensador de topo do tipo serpentina, o qual opera em contracorrente utilizando água como líquido refrigerante. Na saída do condensador há um frasco coletor graduado para medição da vazão do produto de topo da coluna. A coluna também possui sensores de temperatura, tipo Pt 100, em cada estágio, no topo e no refeedor, onde as temperaturas são mostradas em um quadro de comando ao lado da coluna.

A solução de alimentação é armazenada em um tanque com capacidade de 20 litros de armazenamento. Essa alimentação é direcionada para um banho térmico de 85 °C, através de uma bomba peristáltica e por fim, a solução é alimentada no estágio 4 da coluna.

A razão de refluxo é realizada através de um sistema composto por uma bomba peristáltica e uma válvula solenoide de três vias (100T3-S45, BIO-CHEN) conectadas no frasco coletor, onde a bomba impulsiona o produto de topo para o topo da coluna, na forma de refluxo, ou para o tanque de armazenamento de destilado. Através de um controlador lógico programável (CLIC 02, WEG, Brasil) é possível determinar o tempo que válvula solenoide fica ligada e desligada, podendo assim controlar a razão de

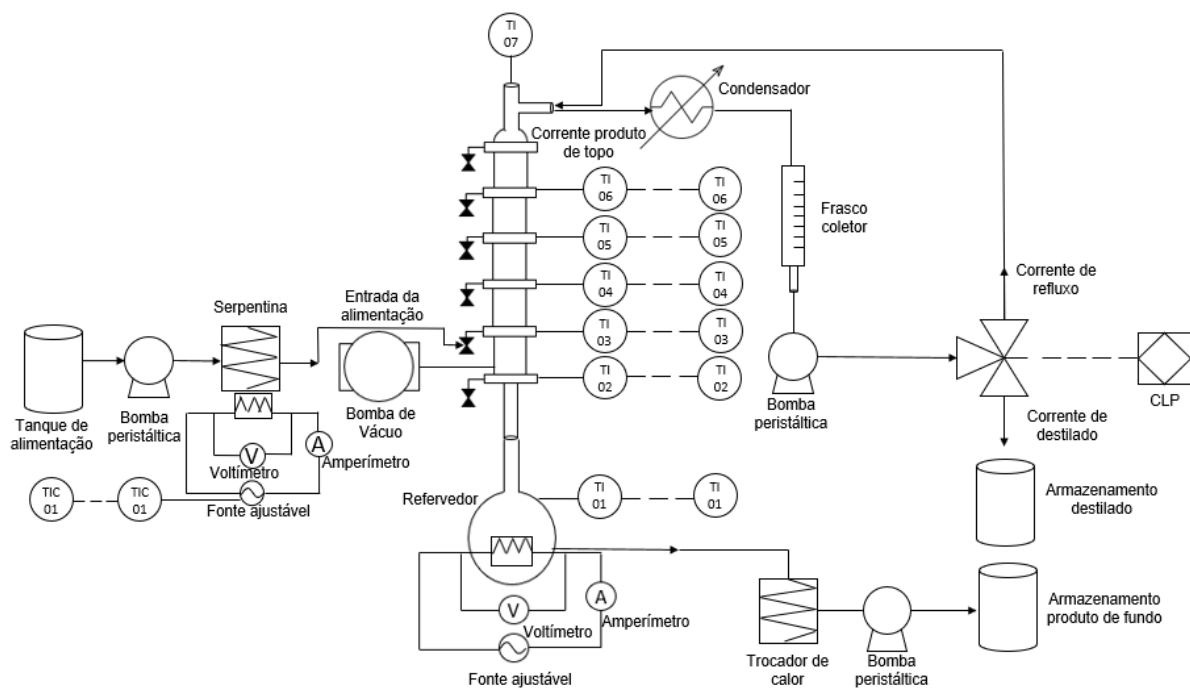
refluxo da coluna. Quando a válvula é energizada, a bomba direciona o produto de topo para o topo da coluna na forma de refluxo e quando a válvula é desenergizada, a bomba envia o produto de topo para o armazenamento de destilado.

O produto de topo que volta para a coluna de destilação na forma de refluxo, é aquecido pelo vapor ascendente do topo da coluna antes de ser bombeado para o estágio 1 da coluna. Esse aquecimento ocorre através de uma tubulação que passa por dentro do topo da coluna em contracorrente com o vapor direcionado ao condensador.

O produto de fundo é retirado do refeedor através de uma bomba peristáltica, em um sistema de nível de líquido do refeedor. Esse produto de fundo é resfriado através de um trocador de calor, que opera em contracorrente utilizando água como líquido refrigerante. Por fim, o produto de fundo é bombeado para o tanque de armazenamento de produto de fundo.

A coluna de destilação de bancada do laboratório descrita acima pode ser representada conforme o diagrama de instrumentação apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Diagrama de instrumentação da coluna de destilação.



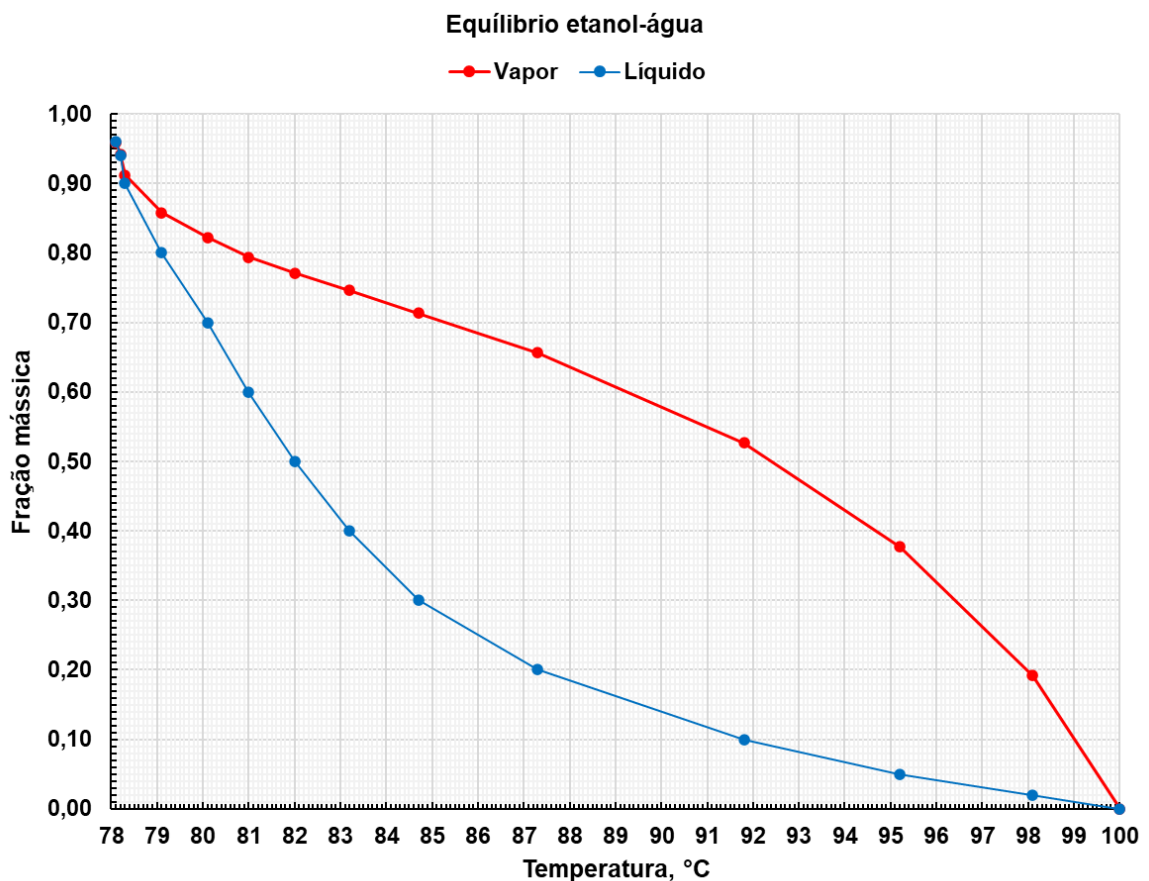
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Condições de alimentação

A solução de alimentação e do refeedor foi preparada com água destilada e etanol na proporção de 19% em massa de etanol, medida através da elevação da temperatura até o ponto de ebulição de uma amostra da alimentação e, posterior análise no gráfico da linha de equilíbrio da solução de etanol e água da Figura 9, retirado da literatura.

Figura 9 – Linha de equilíbrio da solução de etanol e água.



Fonte: Adaptado de Geankoplis. (2018, p. 1681).

A vazão, temperatura e estágio de alimentação foram determinados experimentalmente pois não é possível determinação através de cálculos. Os

parâmetros limitantes para determinação da alimentação foram semelhantes ao do trabalho realizado por Mayer (2010), sendo eles:

- a) Vazão interna de líquido em quantidade suficiente para promover a adequada molhabilidade de cada estágio (limite inferior de operação);
- b) Vazão interna de líquido que não ocasione inundação em nenhum ponto da coluna (limite superior de operação).

A partir desses limites de operação, foi fixado o estágio de alimentação no estágio 4, devido a solução de alimentação possuir pouco teor de etanol para uma coluna com apenas cinco estágios de fracionamento. E para a temperatura de alimentação, foi fixado a temperatura de 85 °C, formando uma entrada de líquido subresfriado no estágio, sendo essa temperatura um pouco abaixo da temperatura do estágio durante a operação na coluna.

Para determinação da vazão de alimentação, foram realizados testes com três diferentes vazões, reguladas pela bomba peristáltica de alimentação. O limite inferior de alimentação da coluna foi obtido através do limite operacional inferior da bomba peristáltica instalada. Já, o limite superior da vazão de alimentação foi obtido através da visualização de instabilidades e inundações do estágio de alimentação. Sendo assim foram realizados testes com as vazões de alimentação de 35, 42 e 49 mL/min.

3.2.2 Avaliação da potência do refeedor e da razão de refluxo

Inicialmente o sistema foi carregado com determinada quantidade de solução de alimentação no refeedor e, posteriormente o refeedor foi ligado em potência máxima para aquecimento da solução. Após aquecimento da solução, iniciou-se a alimentação da solução de 19% em massa de etanol da coluna no estágio 4 com velocidade mínima de 35 mL/min a temperatura de 85 °C e com razão de refluxo igual a 1. Ao atingir o limite superior, visto através da inundação dos estágios, foi realizado a diminuição da potência entregue do refeedor até cessar a inundação dos estágios. Após estabilização da coluna (cerca de 10 minutos), visto através da estabilização do gráfico de temperaturas dos estágios no painel da coluna, foi realizado a coleta dos seguintes dados: temperatura dos estágios, temperatura do topo, temperatura do refeedor e vazão de destilado.

A partir da vazão do destilado, obtida experimentalmente, foi obtida a vazão de fundo, conforme Equação 7, retirada através do balanço de massa da coluna.

$$Q_F = Q_A - Q_D \quad (7)$$

Onde Q_F é igual a vazão de fundo, Q_A é igual a vazão de alimentação e Q_D representa a vazão de destilado, todas em mL/min.

Para a mesma vazão de alimentação, diminuiu-se a potência elétrica através do reostato até secar os estágios, indicando o limite inferior de potência da coluna, em que não havia vaporização suficiente para manter a adequada camada de líquido em cada estágio da coluna. Assim, as coletas de dados foram realizadas a partir de potências intermediárias do limite superior e inferior, controladas pelo reostato.

Seguindo com a mesma vazão, foram realizados testes alterando o valor do refluxo. Esses testes consistiram em alterar a razão de refluxo, inicialmente em 1, para os valores de 2, 4, 6 e 8, variando também a potência, conforme citado acima.

O próximo passo, consistiu em variar a vazão de alimentação e realizar uma nova rodada de testes variando a potência e a razão de refluxo, como explicado anteriormente.

3.2.2 Avaliação dos melhores pontos operacionais

Após o término da coleta de dados, foi realizado a escolha dos melhores pontos operacionais para posterior duplicata e análise desses pontos. Para determinação dos melhores pontos operacionais, foram considerados os seguintes parâmetros, em ordem hierárquica:

- a) Eficiência energética;
- b) Estabilidade dos estágios;
- c) Vazão efetiva de etanol no destilado;
- d) Concentração de etanol no topo.

Para o cálculo das eficiências energéticas dos pontos operacionais, foi necessário, primeiramente, a conversão das vazões volumétricas para vazões mássicas, através da densidade da solução (tabelado), conforme Equação 8:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho \quad (8)$$

Em que Q_m é a vazão mássica, em g/min, Q_v é a vazão volumétrica, em mL/min, e ρ é a densidade, em g/mL.

Com as vazões mássicas, multiplicadas pelo teor de etanol, conforme Equação 9, obteve-se as vazões mássicas de etanol no topo e no fundo.

$$Q_{\text{etanol}} = Q_m \cdot x_{\text{etanol}} \quad (9)$$

Onde Q_{etanol} é a vazão mássica de etanol, em g/min, Q_m é a vazão mássica, e x_{etanol} é o teor de etanol.

A partir das vazões de etanol no topo e no fundo, foram obtidas as vazões efetivas de etanol, conforme Equação 10.

$$Q_{\text{efetiva}} = Q_{\text{etanol topo}} - Q_{\text{etanol fundo}} \quad (10)$$

Onde Q_{efetiva} é a vazão de etanol efetiva, em g/min, $Q_{\text{etanol topo}}$ é a vazão de etanol no topo, em g/min, e $Q_{\text{etanol fundo}}$ é a vazão de etanol no fundo, em g/min.

A potência elétrica do refervedor, em W, foi calculada conforme a Equação 11.

$$P_{\text{ref}} = V \cdot I \quad (11)$$

Onde V é a tensão, em V, e I é a corrente, em A.

A potência do refervedor consumida, em kJ/min, foi calculada através da Equação 12.

$$P_{\text{consumida}} = \frac{P_{\text{ref}} \cdot 60}{1000} \quad (12)$$

Por fim, a eficiência energética, em g/kJ, foi calculada através da Equação 13.

$$Ef_{\text{energética}} = \frac{Q_{\text{efetiva}}}{P_{\text{consumida}}} \quad (13)$$

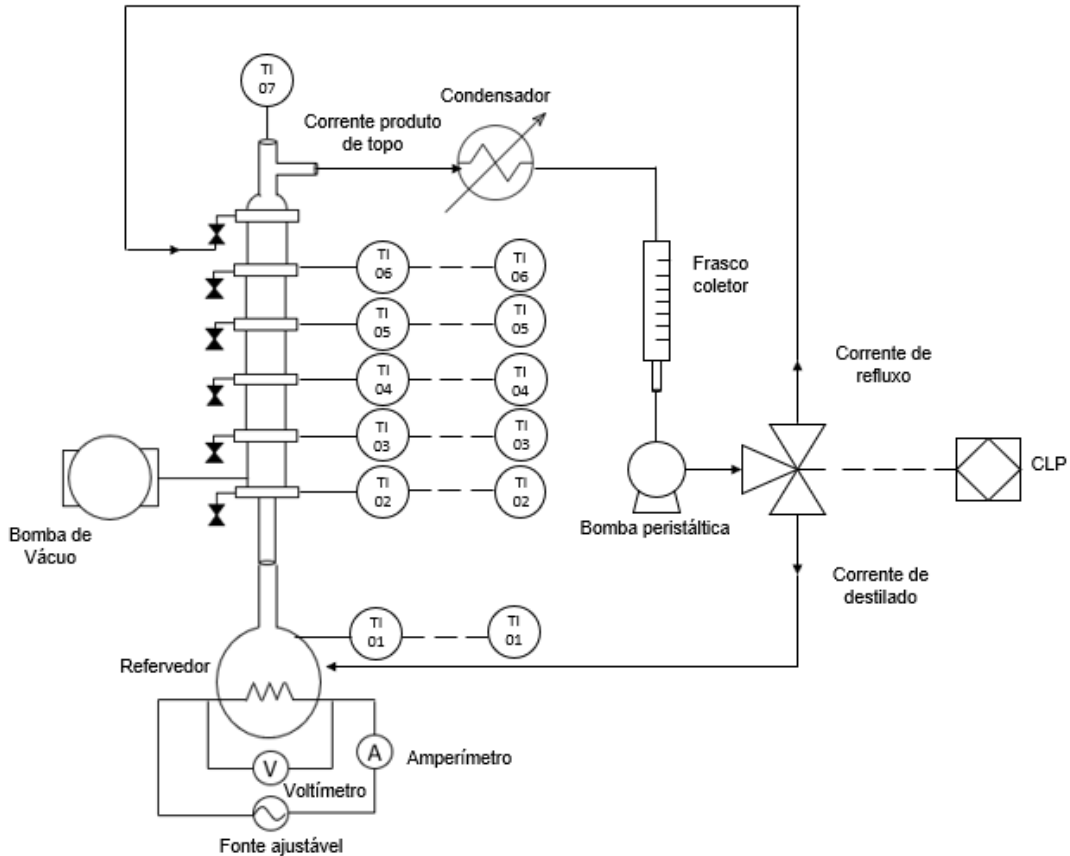
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para melhor organização e compreensão dos resultados, primeiramente será descrito as adaptações e modificações realizadas na coluna de destilação. Após, serão apresentados os resultados obtidos durante a operação da coluna.

4.1 ADAPTAÇÕES E MODIFICAÇÕES NA COLUNA

A configuração inicial da coluna de destilação, pode ser vista através do diagrama de instrumentação na Figura 10. Nesse sistema, apenas havia a possibilidade de operar a coluna em batelada ou em estado estacionário, com refluxo variável, assim, sem remoção de produtos.

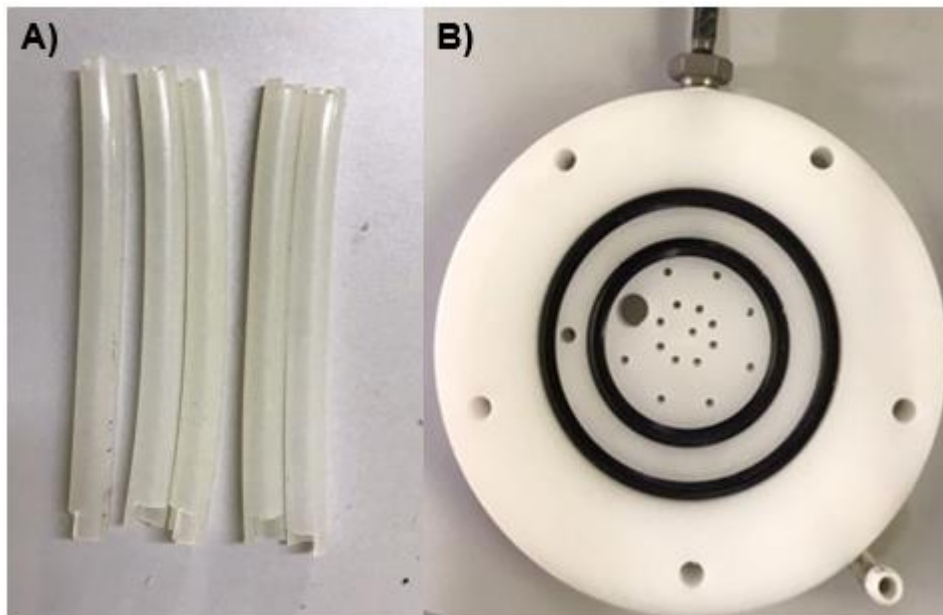
Figura 10 – Diagrama de instrumentação da configuração inicial da coluna de destilação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Um dos primeiros problemas visto no sistema de operação da coluna, foi a instabilidade nos estágios devido os diâmetros internos dos *downcomers* serem muito pequenos, fazendo com que o líquido não descesse para os estágios inferiores devido a capilaridade. Sendo assim, uma das primeiras modificações na coluna foi o aumento do diâmetro dos *downcomers* para tubulações de diâmetro de 9,5 mm. Para tal modificação, foi necessário a desmontagem dos estágios da coluna, recorte das tubulações e aumento da furação dos encaixes dos *downcomers* de cada estágio, conforme ilustrado na Figura 11, onde é possível observar as novas tubulações e os estágios adaptados.

Figura 11 – Adaptação dos *downcomers* da coluna de destilação A) Recorte dos tubos e B) Adaptação dos estágios.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Também foi realizado a troca condensador de bolas do antigo sistema por um condensador de metal tipo serpentina, conforme ilustrado na Figura 12, assim obtendo uma maior eficiência de troca térmica do produto de topo com a água corrente.

Figura 12 – Condensador do tipo serpentina na coluna de destilação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Na parte do topo, onde havia um adaptador de três vias de vidro com juntas esmerilhadas, foi realizado a troca por um adaptador em Tê metálico, conforme ilustra a Figura 13, aumentando a robustez do sistema pois o adaptador de vidro era muito frágil, não encaixando devidamente no topo.

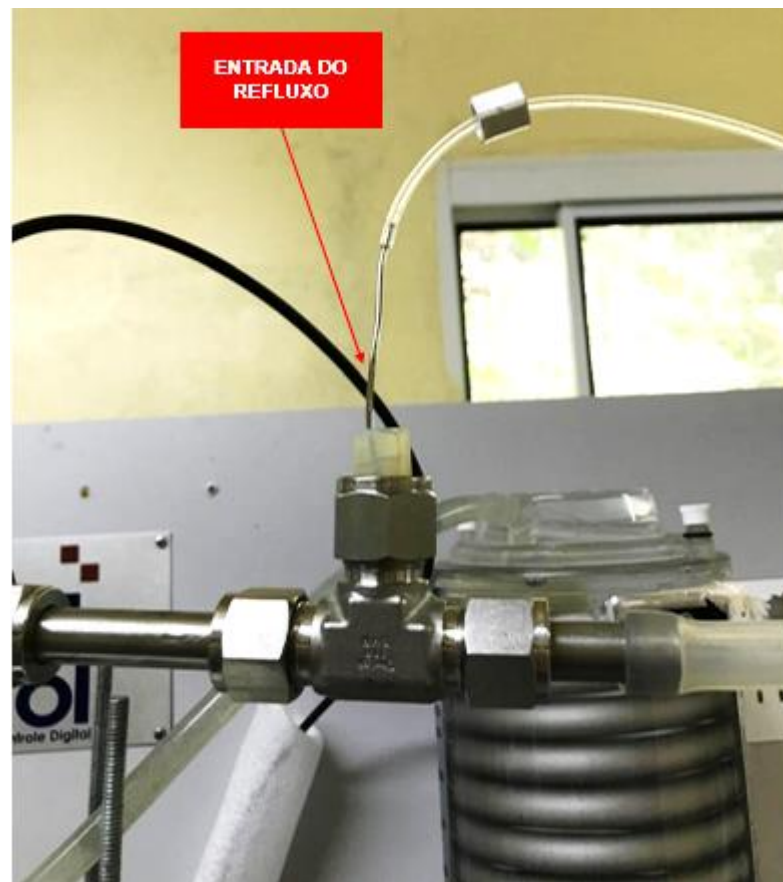
Figura 13 – Topo da coluna com adaptador em Tê metálico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Ainda no sistema do topo, foi adaptado um Tê metálico antes do condensador, inserindo o refluxo em contracorrente com o produto de topo através de uma pequena tubulação metálica, conforme ilustrado na Figura 14. Dessa forma, é possível aquecer o refluxo, através do aproveitamento energético do produto de topo ascendente. Após o aquecimento, o refluxo volta para a coluna pelo estágio 1.

Figura 14 – Sistema de aquecimento do refluxo da coluna de destilação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para o sistema de alimentação da coluna, foi necessário a adaptação de um tanque de alimentação com capacidade de 20 litros. A solução do tanque é bombeada através de uma bomba peristáltica, mostrada na Figura 15, para o estágio de alimentação.

Figura 15 – Bomba peristáltica de alimentação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Antes de entrar na coluna de destilação, a solução de alimentação é aquecida através de um banho térmico, conforme ilustra a Figura 16. Esse banho térmico é composto por um sistema de aquecimento com serpentina controlada por um termostato. A água utilizada no banho térmico é recirculada através de uma bomba centrífuga, garantindo que todos os pontos estejam na temperatura ajustada.

Figura 16 – Sistema de banho térmico da solução de alimentação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Após passar pelo banho térmico, a solução de alimentação segue para o estágio 4 da coluna de destilação através de uma tubulação isolada termicamente para minimizar as perdas de calor da solução para o ambiente.

Para remoção do produto de fundo da coluna, foi utilizado uma bomba peristáltica, conforme ilustra a Figura 17. Para tal remoção, foi inserido uma tubulação no balão de vidro na forma de nível, garantindo que o volume de líquido no balão permaneça constante.

Figura 17 – Bomba peristáltica do produto de fundo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Antes de passar pela bomba peristáltica, foi adaptado um pequeno trocador de calor para o produto de fundo, conforme ilustra a Figura 18, com a passagem de água em contracorrente com o produto de fundo na tubulação metálica.

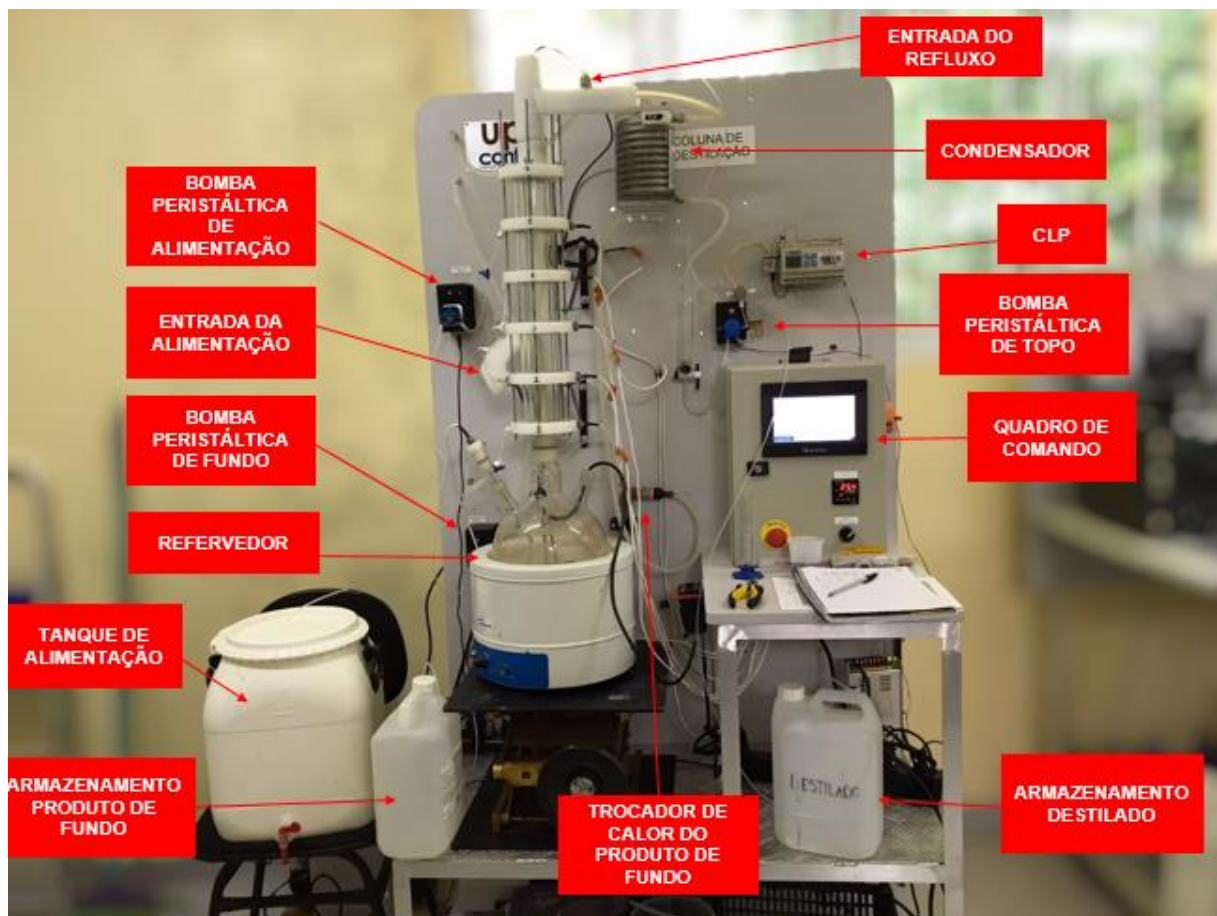
Figura 18 – Trocador de calor do produto de fundo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Por fim, para o armazenamento dos produtos de fundo e destilado, foi utilizado duas bombonas de 5 litros, identificadas como produto de fundo e destilado, respectivamente. Na Figura 19, é possível observar a configuração final da coluna de destilação após as adaptações realizadas.

Figura 19 - Configuração final da coluna de destilação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.2 AVALIAÇÃO DO EFEITO DA POTÊNCIA DO REFERVEDOR E DA RAZÃO DE REFLUXO

A partir dos limites operacionais superiores e inferiores determinados experimentalmente, foram iniciados os testes com a coluna de destilação operando em modo contínuo, a fim de se determinar os melhores pontos operacionais. Diversos

experimentos foram executados, onde dentre eles, foram obtidos resultados que possuíam estágios estáveis e resultados que tiveram instabilidades em alguns estágios. Para melhor organização, os resultados foram divididos a partir da vazão de alimentação, obtendo-se três rodadas de experimentos com as vazões de alimentação de 35 mL/ min, 42 mL/ min e 49 mL/ min.

Dentro de cada grupo, os resultados diferem entre si na razão de refluxo e potência do refeedor, assim, variando também em outras características relacionadas. No Quadro 3, é possível verificar o resultado obtido para os testes operacionais com vazão de alimentação igual a 35 mL/min.

É possível observar que, conforme houve o aumento da razão de refluxo, houve uma tendência na diminuição da vazão de destilado, conforme esperado. Também é possível observar, que com o aumento da razão de refluxo, houve a tendência do aumento dos teores de etanol no topo e no fundo.

Para uma mesma razão de refluxo, é possível observar a tendência do aumento do teor de etanol no topo e no fundo, com a diminuição da potência do refeedor. Também, com a diminuição da potência do refeedor foi observado a diminuição da vazão de destilado e aumento da vazão de fundo.

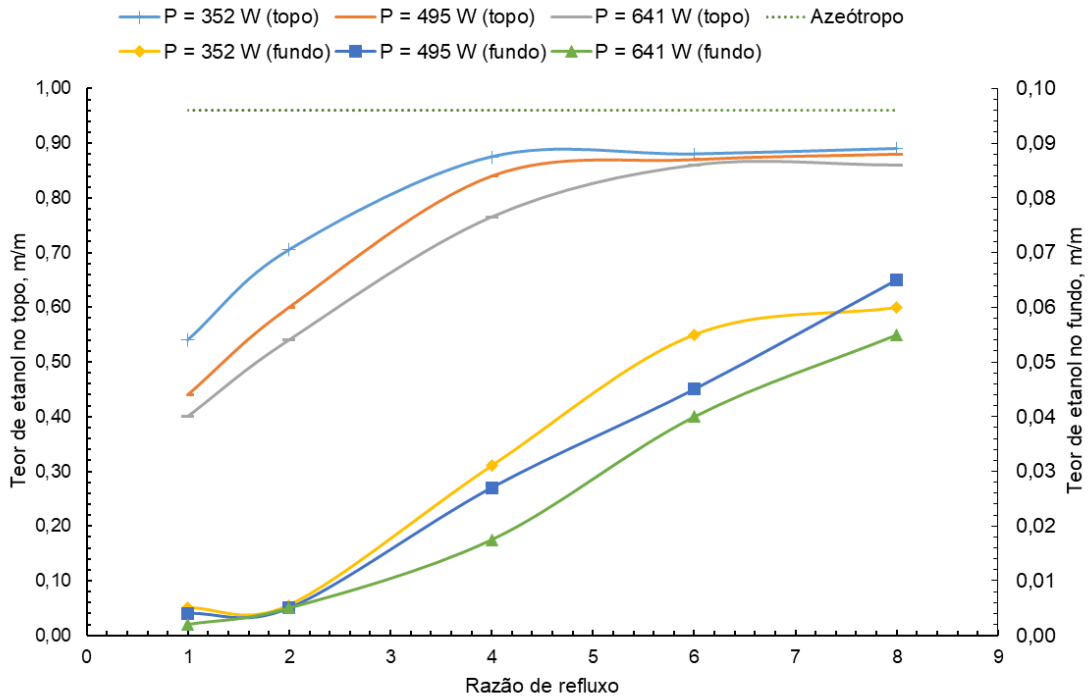
Mas, é possível notar através da Figura 20, uma estagnação nos aumentos dos teores de etanol no topo com o aumento da razão de refluxo para $R=6$ e $R=8$, apenas diminuindo a vazão de destilado e aumentando os teores de etanol no fundo, sendo esses fatores desfavoráveis para esses pontos operacionais.

Quadro 3 – Resultados obtidos para os testes com vazão de alimentação de 35 mL/min.

Razão de refluxo	Potência do refeedor, W	Temperatura, °C		Teor de etanol, m/m		Vazão de fundo, mL/min	Vazão de destilado, mL/min
		Fundo	Topo	Fundo	Topo		
1	641	99,8	94,6	0,002	0,4	21	14
1	485	99,6	93,7	0,004	0,44	24	11
1	352	99,5	91,5	0,005	0,54	26,5	8,5
2	641	99,5	91,1	0,005	0,54	24,0	11
2	485	99,5	88,9	0,005	0,60	26,3	8,8
2	352	99,3	85,2	0,006	0,71	28,8	6,4
4	641	98,2	82,2	0,018	0,77	25,3	8,3
4	485	97,7	79,8	0,027	0,84	27,0	6,7
4	352	97,2	79,1	0,031	0,88	29,5	4,5
6	641	96,0	79,1	0,045	0,86	27,0	8,0
6	485	95,5	78,9	0,045	0,87	28,5	5,4
6	352	94,8	78,8	0,055	0,88	30,0	4,1
8	641	94,7	79,1	0,055	0,86	28,0	7,0
8	485	94,1	78,9	0,065	0,88	29,5	5,5
8	352	94,2	78,8	0,060	0,89	31,0	4,0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

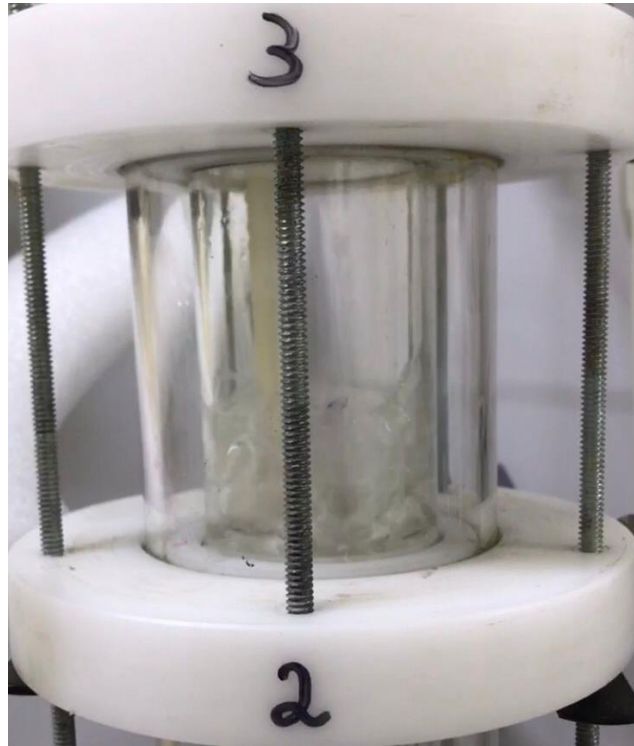
Figura 20 – Efeito da razão de refluxo nos teores de etanol no topo e no fundo para vazão de alimentação de 35 mL/min.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para $R=1$, $R=6$ e $R=8$ foram visualizadas instabilidades em alguns estágios, principalmente no estágio de alimentação, ocorrendo inundações, como mostra a Figura 21. Essas inundações nos estágios provocam instabilidades na coluna e reduzem a eficiência do estágio inundado, devido ao arraste de gotas para o estágio superior, também reduzindo a força motriz na concentração da fase vapor (Geankoplis, 2018).

Figura 21 – Inundação no estágio 4 (alimentação).

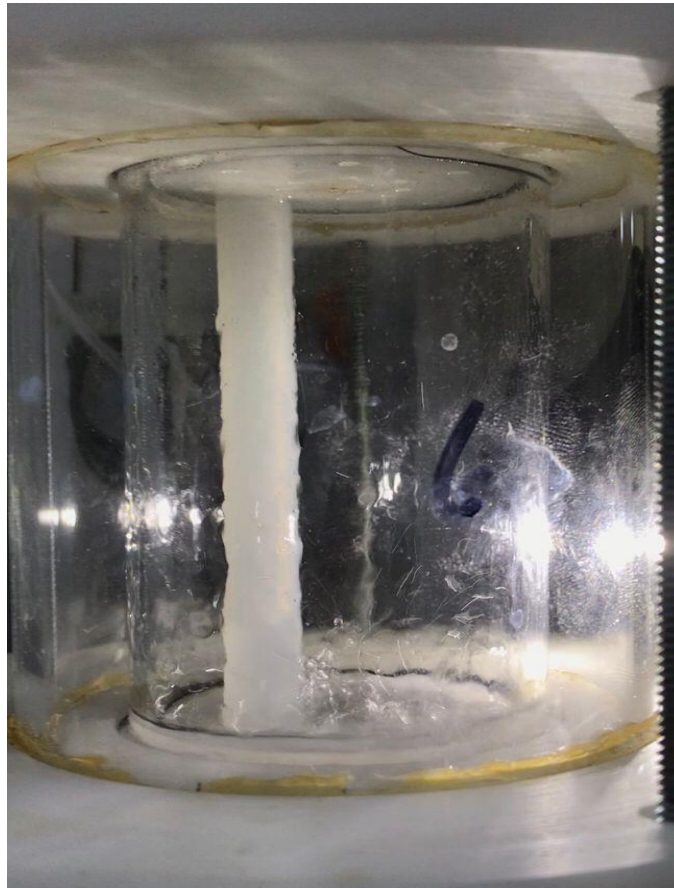


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para $R=2$ e $R=4$, foram visualmente observados estágios mais estáveis, operando de maneira satisfatória, sem inundação e gotejamento, conforme ilustra a Figura 22. Foi visualizado a presença de pequenos gotejamentos nos estágios 1 e 2 na potência do refeedor de 352 W e razão de refluxo igual 2, fato que pode ser tolerado devido a ocorrência em pequenas quantidades.

Esse gotejamento é causado devido as baixas vazões de vapor ascendente, provocando baixas velocidades desses mesmos vapores que atravessam os furos dos estágios, assim permitindo que parte da camada de líquido do estágio goteje para o estágio abaixo (McCabe, Smith e Harriot, 1993).

Figura 22 – Estágio operante sem inundação e gotejamento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

No Quadro 4, é mostrado os resultados obtidos para os testes operacionais com vazão de alimentação de 42 mL/min, também variando a razão de refluxo e potência do refeedor, como mostrado no quadro anterior. É possível observar, através do Quadro 4, a tendência, já esperada, no aumento no teor de etanol no topo e diminuição da vazão de destilado, conforme houve o aumento da razão de refluxo.

Quadro 4 – Resultados obtidos para os testes com vazão de alimentação = 42 mL/min.

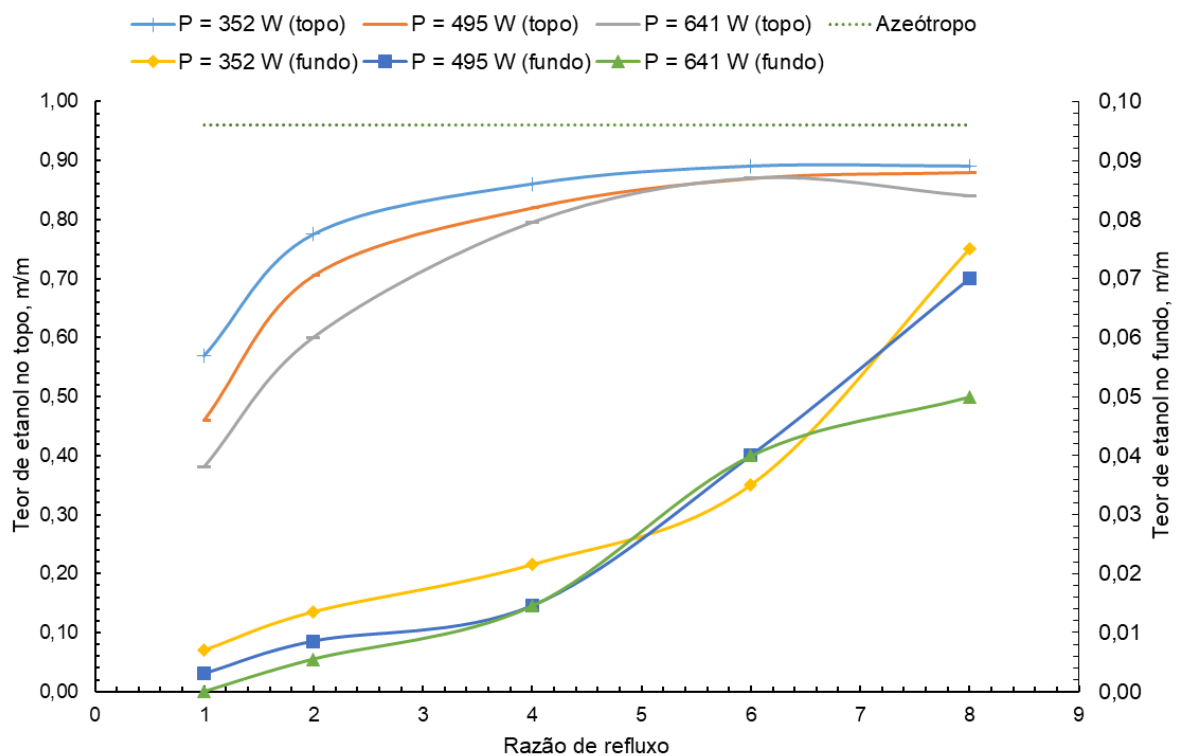
Razão de refluxo	Potência do refeedor, W	Temperatura, °C		Teor de etanol, m/m		Vazão de fundo, mL/min	Vazão de destilado, mL/min
		Fundo	Topo	Fundo	Topo		
1	641	99,9	95,	0,000	0,38	28,0	14,0
1	485	99,7	93,2	0,003	0,46	30,0	12,0
1	352	99,4	90,5	0,007	0,57	33,0	9,0
2	641	99,5	89,3	0,006	0,60	30,0	12,0
2	485	99,1	85,1	0,009	0,71	32,0	10,0
2	352	98,9	82,1	0,014	0,78	34,8	7,3
4	641	98,7	80,1	0,015	0,80	32,0	10,0
4	485	98,6	80,2	0,015	0,82	33,8	8,3
4	352	98,0	79,2	0,022	0,86	36,0	6,0
6	641	96,0	79,0	0,040	0,87	33,0	9,0
6	485	96,0	78,9	0,040	0,87	35,0	7,0
6	352	96,5	78,7	0,035	0,89	37,0	5,0
8	641	95,0	79,6	0,050	0,84	35,0	7,0
8	485	93,9	78,8	0,070	0,88	36,5	5,5
8	352	93,4	78,7	0,075	0,89	38,0	4,0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Em termos de estabilidade dos estágios, foram visualmente observados estágios estáveis, com camada de líquido e vapor ascendente, para os valores de R=2 e R=4. Enquanto, para as outras razões de refluxo, obteve-se alguns pontos operacionais com instabilidades, como inundações nos estágios, vistas anteriormente na Figura 21.

Através do gráfico da Figura 23, é possível observar para os valores de $R=6$ e $R=8$, a tendência de estagnação no aumento do teor de etanol no produto de topo. Além dessa estagnação, deve-se considerar que com o aumento da razão de refluxo, ocorreu a diminuição da vazão de destilado, conforme dito anteriormente. Também é possível observar, a relação do aumento do teor de etanol no fundo com o aumento da razão de refluxo. Assim, é possível entender a relação da razão de refluxo com o teor de etanol no topo e no fundo, ou seja, com o aumento da pureza no topo, também ocorre o aumento de perda de etanol no fundo. Então, é observado uma condição de compromisso, onde enriquecendo o topo haverá o enriquecimento do fundo.

Figura 23 – Efeito da razão de refluxo nos teores de etanol no topo e no fundo para vazão de alimentação de 42 mL/min.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os valores obtidos para as vazões de alimentação de 49 mL/min, estão contidos no Quadro 5. É possível observar que com o aumento do refluxo, obteve-se

maiores teores de etanol e menores vazões de destilado, como visto nos pontos operacionais anteriores.

Quadro 5 – Resultados obtidos para os testes com vazão de alimentação = 49 mL/min.

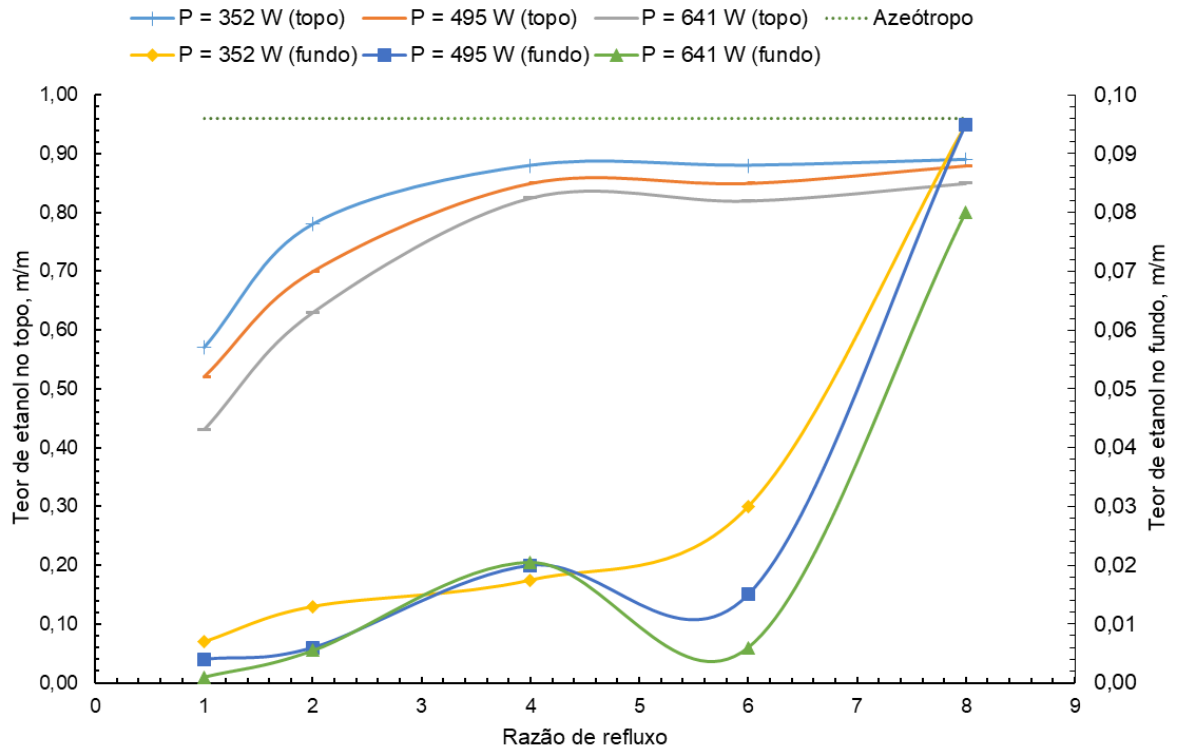
Razão de refluxo	Potência do refeedor, W	Temperatura, °C		Teor de etanol, m/m		Vazão de fundo, mL/min	Vazão de destilado, mL/min
		Fundo	Topo	Fundo	Topo		
1	641	99,8	94,0	0,001	0,43	34,5	14,5
1	485	99,6	92,4	0,004	0,52	37,0	12,0
2	641	99,5	88,2	0,006	0,63	36,5	12,5
2	485	99,3	85,4	0,006	0,70	38,8	10,3
2	352	98,7	81,6	0,013	0,78	40,8	8,3
4	641	97,9	79,8	0,021	0,83	38,3	10,8
4	485	97,6	79,4	0,020	0,85	40,5	8,5
4	352	97,8	79,1	0,018	0,88	43,3	5,8
6	641	99,4	80,4	0,006	0,82	41,0	8,0
6	485	98,5	79,3	0,015	0,85	42,5	6,5
6	352	97,2	78,8	0,030	0,88	44,0	5,0
8	641	93,2	79,2	0,080	0,85	42,5	6,5
8	485	92,8	78,8	0,095	0,88	43,5	5,5
8	352	92,8	78,7	0,095	0,89	45,0	4,0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para R=2 e R=4, foram obtidos pontos operacionais com estágios estáveis. Para as outras razões de refluxo, foram visualizados alguns pontos operacionais com instabilidades, principalmente inundações nos estágios.

No gráfico da figura 24, é possível observar a estagnação do aumento do teor de etanol a partir de $R=6$ e a relação do aumento do teor de etanol no fundo com a razão de refluxo, assim como esperado.

Figura 24 – Efeito da razão de refluxo nos teores de etanol no topo e no fundo para vazão de alimentação de 49 mL/min.



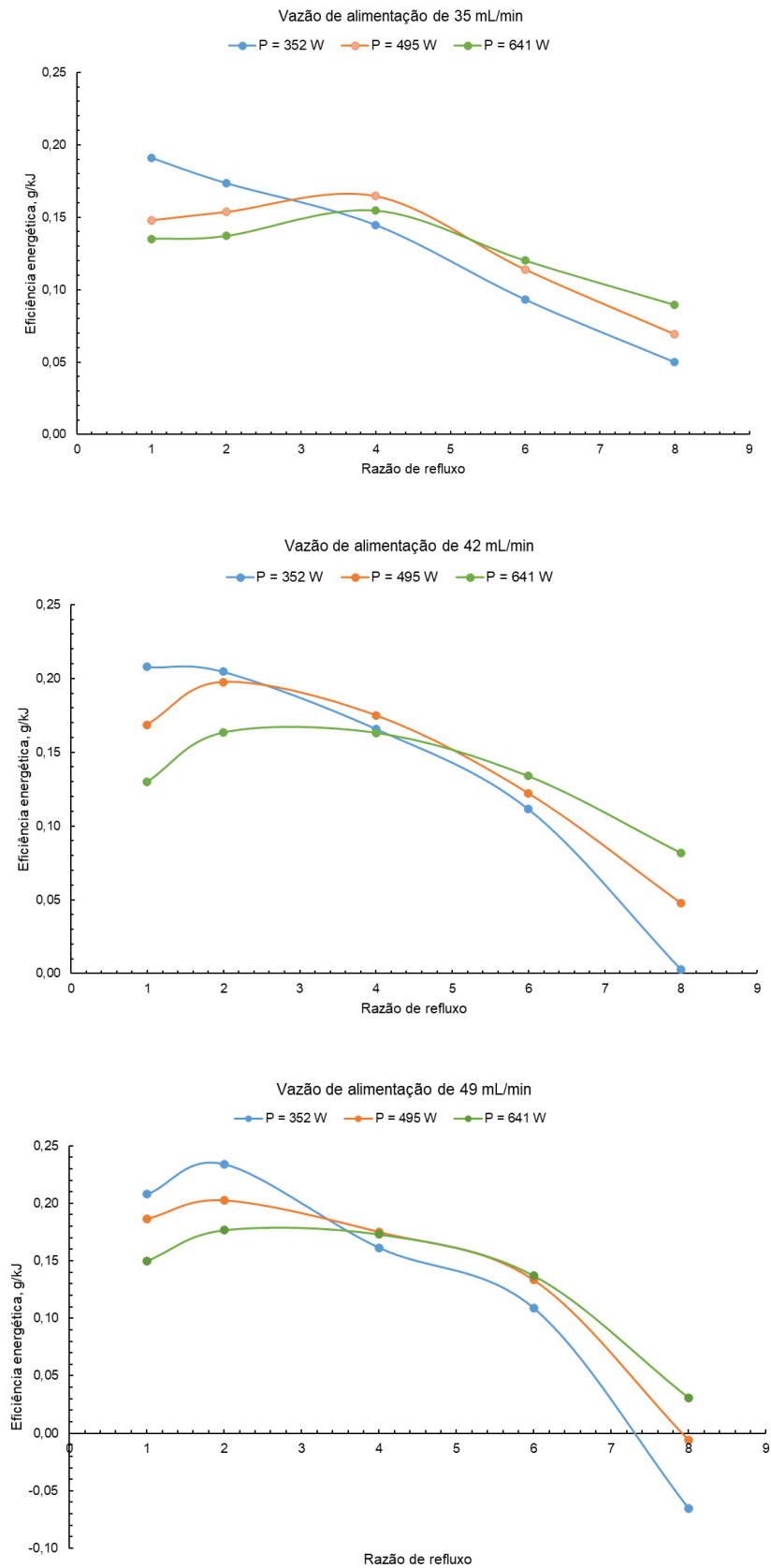
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A partir dos valores obtidos e mostrados nos quadros anteriormente, foram realizadas as conversões das vazões volumétricas para vazões mássicas, vazões mássicas de etanol puro, vazões efetivas de etanol puro, potência do refeedor consumida e vazões efetivas de etanol, conforme as equações mostradas anteriormente nos materiais e métodos.

Na figura 25, é possível observar os gráficos obtidos para os valores de eficiência energética para todos pontos operacionais obtidos.

Figura 25 – Eficiência energética para todos os pontos operacionais obtidos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A partir da análise dos gráficos obtidos na Figura 25, é possível observar a correlação da razão de refluxo com a eficiência energética, sendo que a partir de $R=2$, houve diminuições na eficiência energética com o aumento de R . Também é possível analisar que os maiores valores de eficiência energética foram obtidos para $R=1$, $R=2$ e $R=4$. No entanto, considerando a estabilidade dos estágios, os pontos operacionais com $R=2$ e $R=4$, possuem maior estabilidade quando comparados aos pontos obtidos com $R=1$. Assim, os pontos com $R=2$ e $R=4$, possuem melhores características operacionais, quando comparadas a $R=1$.

Por fim, através da análise dos gráficos da Figura 25, a maior eficiência energética obtida é no ponto operacional com vazão de alimentação de 49 mL/min, razão de refluxo igual a 2 e potência do refeedor de 352 W. No Quadro 6 é possível analisar, os valores obtidos para a temperatura de topo e fundo, teor de etanol no topo e no fundo, vazão de destilado e de fundo, e eficiência energética para o melhor ponto operacional escolhido.

Quadro 6 – Valores obtidos para o melhor ponto operacional.

Temperatura, °C		Teor de etanol, m/m		Vazão de fundo, mL/min	Vazão de destilado, mL/min	Eficiência energética, g/kJ
Fundo	Topo	Fundo	Topo			
98,7	81,6	0,013	0,78	40,8	8,3	0,23

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

No Quadro 7, são apresentadas as temperaturas obtidas e as estabilidades dos estágios para o melhor ponto operacional. Em termos de estabilidade, é possível concluir que o ponto operacional é estável, pois apresentou apenas pequenos gotejamentos nos estágios 1 e 4 (alimentação).

Quadro 7 – Temperaturas e estabilidades dos estágios do melhor ponto operacional.

	Estágio 5	Estágio 4 (alimentação)	Estágio 3	Estágio 2	Estágio 1
Temperatura, °C	95,0	89,9	89,2	83,5	80,7
Estabilidade	Estável	Pequeno gotejamento	Estável	Estável	Pequeno gotejamento

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Sendo assim, considerando os parâmetros definidos anteriormente nos materiais e métodos, o ponto operacional de vazão de alimentação de 49 mL/min, razão de refluxo igual a 2 e potência do refulvedor de 352 W, atende os requisitos, pois possui a melhor eficiência energética entre todos os outros pontos, estabilidade nos estágios, melhor vazão efetiva de etanol no topo e também possui um considerável valor de teor de etanol no topo.

5 CONCLUSÕES

As alterações para coluna de destilação de bancada operar em modo contínuo e a avaliação dos parâmetros operacionais foram concluídas de forma satisfatória, visando o uso no âmbito acadêmico. Os resultados obtidos a partir das variações na vazão de alimentação, razão de refluxo e potência do refeedor foram condizentes com a literatura. Além disso, foram obtidos pontos operacionais com estágios estáveis, possuindo camada de líquido e vapor ascendente, o que possui grande importância para o adequado funcionamento da coluna.

Os melhores pontos operacionais baseados nos parâmetros definidos, foram obtidos para razões de refluxo igual a 2 e 4, para todas as vazões de alimentação e potências de refeedor testadas. A partir da duplicação dos melhores pontos operacionais, foi realizada a escolha do melhor ponto operacional, sendo este com vazão de alimentação de 49 mL/min, razão de refluxo igual a 2 e potência do refeedor de 352 W.

Para esse ponto operacional, foi obtida uma eficiência energética de 0,23 kJ/g, sendo essa a maior eficiência entre todos os pontos observados. Além disso, o ponto escolhido apresentou a maior vazão efetiva de etanol e estabilidade nos estágios.

Como sugestões de possíveis melhorias para a coluna de destilação, propõe-se aumentar o número de estágios da coluna, com objetivo de obter etanol no ponto de azeótropo como destilado. Além disso, sugere-se o desenvolvimento de um sistema de operação no qual as três bombas peristálticas operem de forma sincronizada.

O protótipo se encontra disponível no laboratório de Engenharia Química do IFRS – Campus Feliz. Sendo assim, os discentes do curso têm a possibilidade da visualização do funcionamento e experiências práticas de uma coluna de destilação contínua, agregando qualidade a formação dos mesmos.

REFERÊNCIAS

ATKINS, Peter W. et al. **Físico-química, v.1.** 10. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 1 recurso online. ISBN 9788521634737.

BARBOSA, Gleisa Pitareli. **Operações da indústria química: princípios, processos e aplicações.** São Paulo: Erica, 2015. 1 recurso online. ISBN 9788536520001.

BENABITHE, Zulamita Zapata. et al. Caso de estudio de la destilación etanol-agua en operación continua y discontinua y su simulación con ecuaciones cúbicas de estado y modelos de actividad. **Tecnológicas**, v. 23, n. 49, p. 223–249, 2020. Disponível em: <<http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v23n49/2256-5337-teclo-23-49-201.pdf>> Acesso em: 12 abr.2024

CASTELLAN, Gilbert William. **Fundamentos de Físico Química.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

FOUST, Alan S. **Princípios das operações unitárias.** 2. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1982.

GEANKOPLIS, Christie John. et al. **Transport Processes and Separation Process Principles.** 5th. ed. [S. l.]: Pearson Education, Inc., 2018.

MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOT, Peter. **UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING.** 5th ed.ed. Singapore: McGraw-Hill, 1993.

MATOS, Simone Pires de. **Operações unitárias: fundamentos, transformações e aplicações dos fenômenos físicos e químicos.** São Paulo: Erica, 2015. 1 recurso online. ISBN 9788536520018.

MAYER, Flávio Dias. **Produção de álcool combustível em pequena escala: desenvolvimento da tecnologia de destilação apropriada.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7946>>. Acesso em: 20 mar. 2024.

PERRY, Robert H. et al. **Perry's chemical engineers' handbook.** 7ª ed.ed. [S. l.]: McGraw-Hill, 1997.

PILLA, Luiz. Físico-Química II. **Equilíbrio entre fases, Soluções Líquidas e Eletroquímicas.** 2 ed. Porto alegre: Editora da UFRGS, 2010. p.15, p.16.

SMITH, Joe Mauk. et al. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química.** Rio de janeiro: LTC, 2007.