

Construção e operação de uma coluna de destilação

Construction and operation of a distillation column

Construcción y operación de una columna de destilación

Recebido: 08/11/2022 | Revisado: 17/11/2022 | Aceitado: 18/11/2022 | Publicado: 25/11/2022

Fabrizio Gusmão Ribeiro Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5881-4133>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: fabriciogus1@gmail.com

João Vitor Tostes Pitta

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2375-7984>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: jtostespitta59@gmail.com

Leonardo de Melo Siqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9993-3497>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: leonardoms186@hotmail.com

Lucas Aparecido Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3085-1976>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: lucasoliveira.lc@gmail.com

Bruna de Paula Guardieiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2380-5947>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: bgdepaula09@gmail.com

Eduardo Moreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7104-9635>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: moreiraedu1998@gmail.com

Thaís Paulino Pereira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4817-9105>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: thaispaulinopereira@hotmail.com

Davi Leonardo de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1995-9057>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: davi.souza@uftm.edu

Resumo

A destilação é uma operação unitária de suma importância em diversos processos industriais. É utilizada para purificar e separar diversos compostos, e seu funcionamento se baseia na diferença de volatilidade entre os componentes presentes na operação. O objetivo do presente trabalho foi construir uma coluna de destilação de pratos perfurados removíveis para práticas laboratoriais dos alunos da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, a qual ainda permita estudar os efeitos de algumas variáveis: número de pratos, refluxo, condição de alimentação, carga térmica empregada e composições nas correntes de saída. Para tais análises, os modelos termodinâmicos utilizados foram validados através de dados experimentais e simulados. As simulações foram feitas através dos softwares livres COFE®, *ChemSep*® e Excel®. Os parâmetros foram avaliados levando em consideração a saída de água praticamente pura no fundo da coluna e uma corrente de topo de etanol anidro deixando a coluna. Adaptações para otimização tanto da estrutura disponível e operação do equipamento quanto dos resultados são as propostas deste trabalho.

Palavras-chave: Destilação; Operações unitárias; Azeótropo; Coluna de destilação; Simulação.

Abstract

Distillation is an important unit operation in several industrial processes. It is used to purify and separate various compounds, and it is based on the difference in volatility between the components present in the operation. The objective of the present work was to build a distillation column of removable perforated stages for laboratory practices of students at the Universidade Federal do Triângulo Mineiro, which also allows to study the effects of some variables: number of stages, reflux, feeding condition, thermal load employed and compositions in the output currents. For such analyses, the thermodynamic models used were validated through experimental and simulated data. The simulations were performed using the free software COFE®, *ChemSep*® and Excel®. The parameters were evaluated taking into account the exit of nearly pure water at the bottom of the column and an overhead stream of anhydrous ethanol leaving the column.

Adaptations in order to optimize both the available structure and equipment operation as well as the results are the purposes of this work.

Keywords: Distillation; Unit operations; Azeotrope; Distillation column; Simulation.

Resumen

La destilación es una operación unitaria muy importante en varios procesos industriales. Se utiliza para purificar y separar diversos compuestos, y su funcionamiento se basa en la diferencia de volatilidad entre los componentes presentes en la operación. El objetivo del presente trabajo fue construir una columna de destilación de platos perforados removibles para prácticas de laboratorio de estudiantes de la Universidade Federal do Triângulo Mineiro, que además permite estudiar los efectos de algunas variables: número de platos, reflujo, condición de alimentación, carga térmica empleados y composiciones en las corrientes de salida. Para tales análisis, los modelos termodinámicos utilizados fueron validados a través de datos experimentales y simulados. Las simulaciones se realizaron utilizando el software libre COFE®, *ChemSep*® y Excel®. Los parámetros se evaluaron teniendo en cuenta la salida de agua prácticamente pura por el fondo de la columna y una corriente superior de etanol anhidro saliendo de la columna. En este trabajo se proponen adaptaciones para optimizar tanto la estructura disponible y el funcionamiento de los equipos como los resultados.

Palabras clave: Destilación; Operaciones unitarias; Azeótropo; Columna de destilación; Simulación.

1. Introdução

A destilação é uma operação unitária muito utilizada em diversos processos da indústria química, a qual se baseia na transferência de massa entre correntes em contato e fundamenta-se no processo termodinâmico de equilíbrio líquido/vapor. O objetivo da destilação é a separação de diferentes componentes de uma mistura desde que os mesmos apresentem diferentes níveis de volatilidade (Teleken, 2014), sendo que quanto maior for essa diferença, mais facilmente ocorrerá a separação. A principal aplicação industrial dessa operação ocorre na indústria petroquímica para a refinação do petróleo, porém, encontram-se aplicações, também, em indústrias alimentícias, como as de produção de bebidas alcoólicas destiladas, farmacêuticas, na obtenção de cafeína, além de ser a principal operação na obtenção dos componentes do ar.

Existem dois tipos de destilação, os quais são definidos de acordo com o tipo de mistura a ser separada: destilação simples, para misturas sólido-líquido ou líquidos com pontos de ebulição distantes um do outro, e destilação fracionada, no caso de misturas líquido-líquido quando as temperaturas de ebulição dos componentes estão mais próximas (UFRGS, 2004). A primeira é usada para separar misturas homogêneas, por exemplo uma mistura de água e sal, enquanto a última é utilizada para separar misturas de dois ou mais líquidos miscíveis entre si e que não são azeotrópicas, ou seja, misturas de composição bem definidas que possuem pontos de ebulição constantes iguais às substâncias puras (Pereira et.al, 2022).

Para o processo de dessalinização da água do mar, um exemplo de destilação simples, à medida que a mistura é aquecida, a água sofre o processo de vaporização, o vapor condensa ao sofrer um resfriamento dentro do condensador e ao final o líquido é recolhido, sendo assim separado do sal. No caso da destilação fracionada, um exemplo seria a separação do álcool presente no vinho utilizando água, o que acontece baseado na diferença entre pontos de ebulição.

Para que o projeto cumprisse com seus objetivos, é necessário analisar todas as variáveis que afetam a eficiência do processo, com esta dependendo de alguns fatores importantes, como: a posição da alimentação, o número de estágios da coluna, a condição térmica da alimentação e o aumento ou diminuição da razão de refluxo na coluna. A solução destilada na coluna é uma mistura homogênea de água e etanol. Para a análise dos parâmetros nos softwares mencionados, partiu-se do princípio de que no fundo da coluna a composição é feita quase que inteiramente de água (99,5%).

Sobre etanol hidratado, é de extrema importância saber que esse deve passar por uma desidratação na última etapa de sua produção, pois o elevado grau de pureza impede a separação de fases no combustível. Entretanto, tal processo de separação é dificultado pela formação de um ponto de azeótropo na mistura etanol-água. Neste sistema, a capacidade máxima de separação fica em torno de 86% molar de etanol a 1atm, considerando um sistema de destilação convencional para produção de etanol hidratado (Oliveira, 2021).

O ponto de azeótropo é formado devido a desvios na idealidade presentes em uma mistura. Nesse ponto as frações molares dos componentes na fase líquida e vapor se igualam, impossibilitando a troca de massa entre fases (Van Ness, Abbot, 2019). Dessa forma, faz-se necessário o uso de métodos de separação que possibilitem ultrapassar tal concentração (Seader, 2010).

A motivação do projeto de construção dessa coluna se dá pela projeção e construção por parte dos alunos, acrescentando a experiência de aplicação dos conceitos adquiridos ao longo do curso, além do futuro acesso ao equipamento pela comunidade acadêmica. O objetivo do presente trabalho é a construção da coluna de destilação na Universidade Federal do Triângulo Mineiro, para posterior prática laboratorial dos alunos da graduação de Engenharia Química, enriquecendo, dessa forma, o conhecimento dos alunos desenvolvedores e, também, dos alunos que virão a ter contato com o processo.

2. Metodologia

Com o intuito de nortear a construção da unidade experimental proposta, foram utilizadas simulações em ambiente computacional a fim de compreender melhor o processo de destilação da mistura etanol-água e conhecer informações prévias, como vazão de alimentação, produto de topo e fundo, temperatura de operação, fração de destilado, razão de refluxo e carga térmica.

2.1 Validação do modelo termodinâmico

A determinação do modelo termodinâmico, constitui uma etapa essencial do processo de simulação de colunas de destilação, por se tratar de uma operação baseada em equilíbrio termodinâmico faz-se necessário validar o pacote de equações termodinâmicas a ser utilizado.

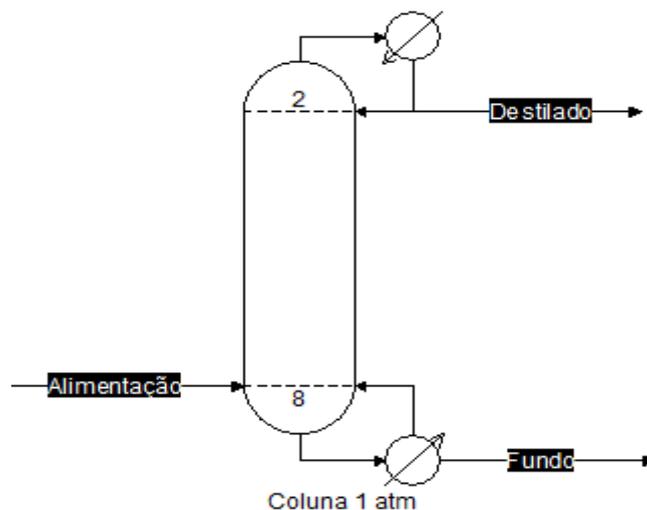
A escolha do modelo pode afetar a predição objetivada pela simulação e, por isso, deve ser selecionado o conjunto de equações que melhor se aproxima do comportamento real do sistema, tendo em vista que uma má escolha pode acarretar simulações imprecisas e não confiáveis para o sistema. (Carlson, 1996).

Portanto, no intuito de validar o sistema etanol-água foram utilizados dados retirados da literatura (Arce et al., 1996).

2.2 Condições de simulação

A partir da validação dos dados termodinâmicos, iniciou-se as simulações. Utilizou-se os softwares livres COFE®, versão 3.5.0.13 e *ChemSep*®, versão 8, para a simulação do sistema de destilação. O fluxograma do processo estudado foi construído no próprio COFE® e está mostrado na Figura 1, tal sistema é constituído por uma coluna de destilação, refeedor e condensador total.

Figura 1 – Fluxograma do processo simulado.



Fonte: Autores (2022).

Como pode ser observado na Figura 1, a alimentação é feita no 8º prato, há um condensador parcial e um produto de fundo. As nomenclaturas de correntes apresentadas na Figura 1, serão utilizadas ao longo do artigo.

2.3 Parâmetros de simulação

A simulação realizada consistiu em uma coluna de destilação com 8 estágios, sendo 7 pratos, 1 condensador parcial e 1 reboiler. A Tabela 1 contém informações sobre a corrente de alimentação (F). A Tabela 2 os parâmetros de operação da coluna.

Tabela 1 - Informações da corrente de alimentação (F).

Pressão [atm]	1
Temperatura [C°]	25
Fração molar de água	0,90
Fração molar de etanol	0,1
Vazão de entrada [kg/h]	4,8

Fonte: Autores.

Tabela 2 - Configuração da coluna.

Número de estágios	8
Prato de alimentação	4
Razão de refluxo	1
Pressão de operação [atm]	1

Fonte: Autores.

Além dos dados dispostos nas Tabelas 1 e 2, foi necessário fixar uma variável de simulação na coluna. Tal ação é necessária para zerar os graus de liberdade no *ChemSep*®. Foi fixado que a fração molar de água na corrente de fundo (B) deve ser de 99,5%. O valor estipulado corrobora com a teoria envolvendo a destilação de etanol e água, é possível através do diagrama de equilíbrio Txy do sistema, notar a possibilidade de obtenção de água pura na corrente de líquido em determinada temperatura.

Além disso, trabalhos como Battisti et.al (2018) e Mulia-Soto e Flores-Tlacuahuac (2011) também fixam a corrente de produto de fundo da coluna como água praticamente pura.

A escolha de construir uma coluna de 8 estágios, foi devido a questão do orçamento disponível por parte dos membros e, com base nisso, foram arbitrados os outros parâmetros para realizar as análises paramétricas e construir uma melhor coluna a partir das condições possíveis.

2.4 Análises paramétricas.

Para determinar os melhores parâmetros de operação da coluna, foram realizadas análises de sensibilidade. O método de análise consistiu em variar um determinado parâmetro e analisar o comportamento das saídas do sistema, bem como da carga térmica dispendida pelo refeedor e condensador para atender variadas configurações.

Portanto, foi utilizada a ferramenta Parametric Study presente no COFE®, tomando como critério principal a composição de etanol na corrente de destilado (D), após realizado o estudo dos parâmetros para maximizar essa condição, foi realizado um estudo térmico do sistema afim de escolher valores viáveis a serem instalados no Laboratório de Engenharia Química. O objetivo das análises paramétricas, portanto, foi maximizar a produção de etanol no destilado.

A ordem das análises foi baseada no estudo realizado por Saliba (2001) e Souza et.al (2021), e os seguintes parâmetros foram analisados na seguinte ordem: número de estágios, razão de refluxo, estágio de alimentação.

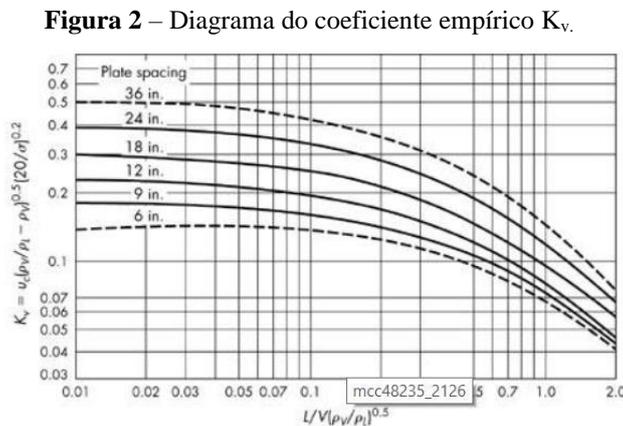
2.5 Dimensionamento da coluna de destilação

O dimensionamento foi realizado utilizando correlações e métodos gráficos propostos pelas principais referências em operações unitárias envolvendo equilíbrio, foram utilizados gráficos apresentados nos livros de Giankopolis et. al e McCabe, além disso as correlações apresentadas, bem como a ordem de aplicação seguem a metodologia proposta por Kister (1992).

2.5.1 – Determinação do Diâmetro da Coluna

Tendo em mãos os dados de vazão de vapor e líquido simulados, torna-se possível o dimensionamento da coluna. A princípio é preciso obter o coeficiente empírico K_v através da Figura 2, e para isso é necessário o cálculo do valor da abcissa que corresponde a Equação 1 e conhecer preliminarmente o espaçamento entre os pratos perfurados.

$$\frac{L}{V} \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{1/2} \quad (1)$$



Fonte: Geankopolis et al., (2018).

A Figura 2 mostra a relação do coeficiente empírico K_v em função da vazão de líquido e vapor que se encontra na coluna.

Pode-se utilizar a Equação 2 para o cálculo da velocidade máxima de vapor na coluna.

$$u_c = K_v \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V}} \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0,2} \quad (2)$$

Posteriormente, calcula-se a vazão volumétrica de vapor pela Equação 3 e a área disponível para o borbulhamento do vapor pela Equação 4.

$$Q_v = \frac{V}{\rho_v} \quad (3)$$

$$Q = u_c + A_b \quad (4)$$

É feito a consideração que a área de borbulhamento é 80% da área da seção transversal da coluna, assim pode-se encontrar a área total da coluna através da Equação 5, e de posse deste dado calcula-se o diâmetro da coluna pela Equação 6.

$$A_T = \frac{A_b}{0,8} \quad (5)$$

$$D_c = \left(\frac{4 * A_T}{\pi}\right)^{1/2} \quad (6)$$

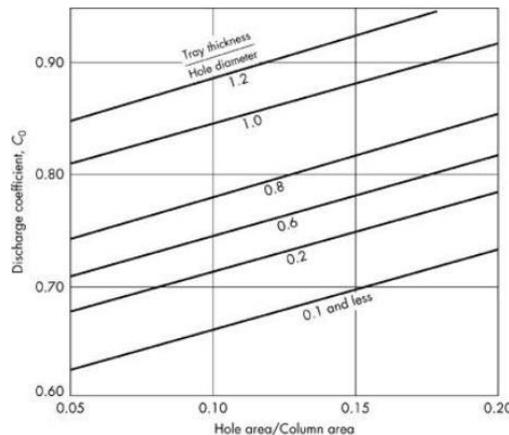
2.5.2 Determinação da altura do vertedouro

A partir da Figura 3 é possível obter o coeficiente de descarga (C_0), entretanto é necessário calcular através das Equações 7 e 8 as relações da coluna e dos furos a fim de encontrar o C_0 na figura abaixo.

$$\frac{A_f}{A_T} \quad (7)$$

$$\frac{\text{Espessura dos furos}}{\text{Tamanho dos furos}} \quad (8)$$

Figura 3 – Diagrama do coeficiente de descarga do vapor em pratos perfurados.



Fonte: Geankoplis et al., (2018).

A Figura 3, mostra o coeficiente de descarga (C_0) em função da relação da área dos furos por área da coluna.

De posse dos dados obtidos, calcula-se a altura do vertedouro através da Equação 9.

$$h_d = 51,0 \left(\frac{u_0^2}{C_0^2} \right) \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right) \quad (9)$$

2.5.3 Determinação da altura além do vertedouro

Para se calcular a altura além do vertedouro é preciso primeiramente utilizar as Equações 10 e 11 a fim de obter a vazão de líquido e o comprimento do vertedouro respectivamente.

$$Q_L = \frac{L}{\rho_L} \quad (10)$$

$$L_w = 1,62 \left(\frac{D_c}{2} \right) \quad (11)$$

A Equação 11 supracitada é baseado em que o *downcomer* ocupa de 10 a 15% da área de secção transversal da coluna, e que é indicado segundo a 6 edição do livro *Chemical's Engineers Handbook*, página 1-26, o comprimento do vertedouro de segmento reto é dado como 1,62 vezes o raio da coluna.

Após a obtenção dos valores da vazão e do comprimento, pela Equação 12 obtém-se o valor da altura além do vertedouro (h_{ow}).

$$h_{ow} = 43,4 \left(\frac{q_L}{L_w} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

2.5.4 – Determinação da altura do líquido

Para se determinar a altura do líquido (h_l) é preciso saber o fator de aeração (β), adota-se o valor usual de 0,6 e utiliza a Equação 13 para sua obtenção.

$$h_l = \beta(h|w + h_{ow}) \quad (13)$$

2.5.5 Determinação da queda de pressão total no prato

De posse dos valores de altura do vertedouro e do líquido, pode-se obter pela Equação 14 a queda de pressão total no prato (h_t).

$$h_t = h_d + h_l \quad (14)$$

2.5.6 Cálculo da altura de líquido limpo

Pela Equação 15 pode-se obter a altura de líquido limpo (Z_c) no downcomer.

$$\begin{aligned} Z_c &= 2\beta(h|w + h_{ow}) + h_d \\ Z_c &= 2\beta(h|w + h_{ow}) + h_d + h_{f,L} h_{f,L} \end{aligned} \quad (15)$$

Ademais, é preciso considerar a fração média de volume líquido no downcomer ($\Phi_D=0,5$ $\Phi_D = 0,5$), considerando que se pode ter bolhas de vapor, desta forma utiliza-se a Equação 16 para encontrar a altura real de líquido limpo.

$$Z = \frac{Z_c}{\Phi_D} \quad (16)$$

2.5.7 Cálculo da altura aproximada da coluna

Para se estimar a altura aproximada da coluna considera-se multiplicar o espaçamento entre pratos pelo número de estágios teóricos.

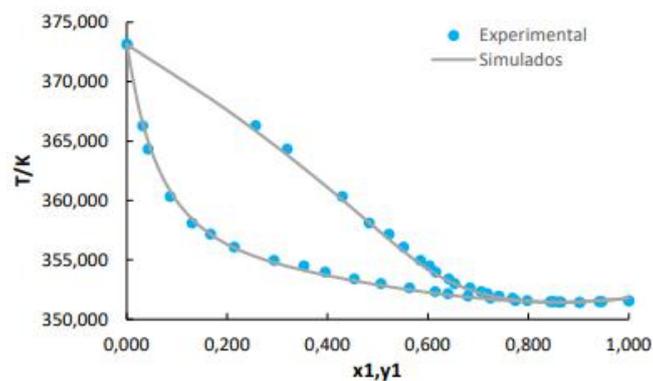
3. Resultados e Discussões

3.1 Validação termodinâmica

Como já mencionado, foram utilizados dados experimentais retirados da literatura (Arce et al., 1996). Utilizando o *ChemSep*® foi possível simular o comportamento do diagrama T-xy do sistema etanol-água para os principais modelos termodinâmicos citados na literatura.

O modelo que apresentou o menor erro comparado aos dados experimentais foi o modelo UNIQUAC, na Figura 4 é possível observar a comparação entre dados experimentais e o pacote termodinâmico escolhido para simulações.

Figura 4 - Validação do modelo termodinâmico UNIQUAC.



Fonte: Autores.

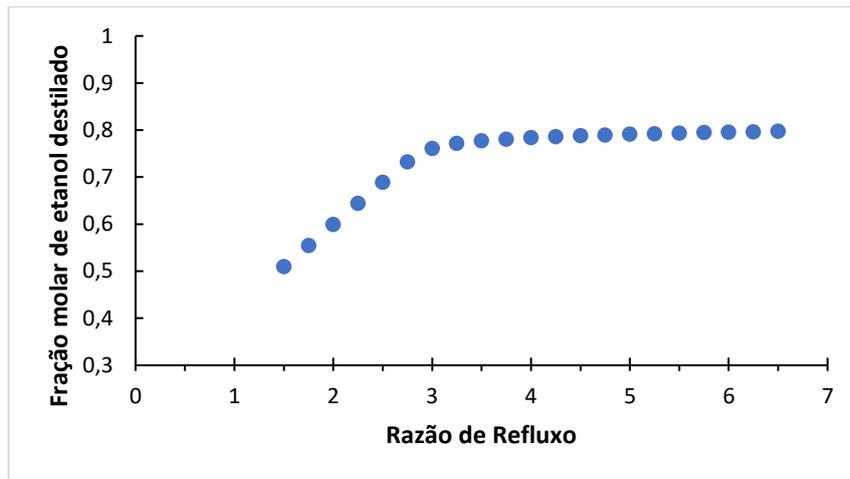
O erro médio, comparando a distância entre pontos experimentais e pontos simulados, foi de 1,75%. Dias (2016) constatou em seu estudo que desvios máximos de 6,1% já representam um ajuste adequado do modelo. Portanto, o modelo UNIQUAC foi escolhido para dar procedimento as simulações.

3.2 Resultados das simulações

A coluna de 8 pratos foi definida baseada no orçamento disponível para construção do equipamento, que foi realizada em chapas de aço galvanizado, baseado nessa quantidade de pratos pré-definida foi realizada uma análise paramétrica, para a determinação dos parâmetros que maximizam a produção de etanol destilado da coluna, ao passo que não aumentam muito a carga térmica do equipamento simulado.

A Figura 5 indica os resultados obtidos para o estudo paramétrico realizado em relação a influência da razão de refluxo na pureza do etanol obtido no topo.

Figura 5 – Influência da razão de refluxo na fração molar de etanol no destilado.



Fonte: Autores (2022).

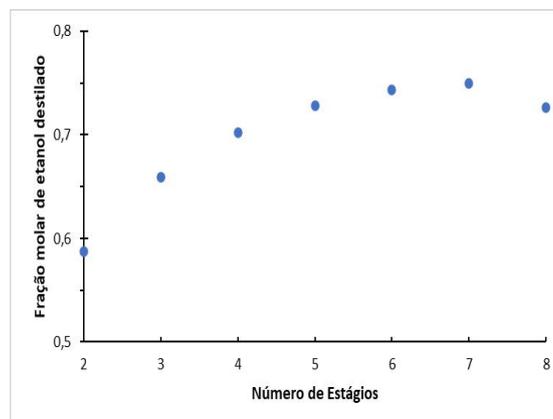
Pode-se perceber que a partir de uma razão de refluxo igual a 3, a fração molar de etanol no destilado estagna em valores próximos a 0,8, isso ocorre devido ao fato da mistura etanol-água ser de caráter azeotrópico, ou seja, a partir dessa fração molar a destilação convencional não é mais possível, sendo necessário métodos como a Destilação extrativa, azeotrópica ou o uso de peneiras moleculares, por exemplo.

Sabe-se que o aumento da razão de refluxo é o principal responsável pelo aumento da carga térmica em uma coluna de destilação (Moussa, 2001). Dessa forma, optou-se pela razão de refluxo igual a 3, valor em que o gráfico da Figura 5 passa a estagnar, indicando que o aumento de razão de refluxo não será compensatório para os resultados alcançados.

O estudo paramétrico em relação ao prato de alimentação consistiu em definir a melhor posição de entrada a fim de obter a composição desejada na saída da coluna, e a decisão tomada, partiu também da análise de carga térmica, visando o melhor balanço entre custos com carga térmica e pureza do produto de topo extraído.

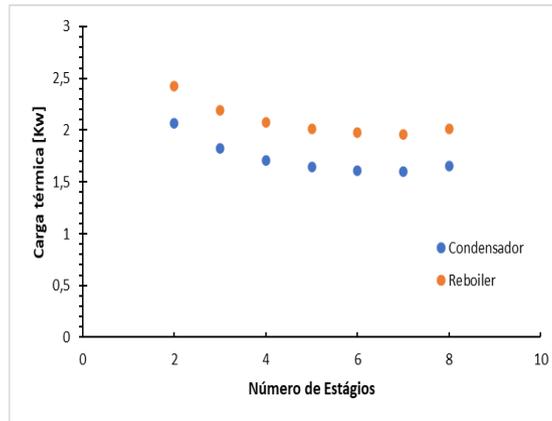
Com a análise da Figura 6 (a) e 6 (b) podemos concluir que o melhor prato de alimentação é o prato 7, já que ele apresenta a maior pureza de produto de topo, bem como as menores cargas térmicas para o condensador e *reboiler*.

Figura 6-a – Estudo paramétrico da pureza do etanol em relação ao número de estágios.



Fonte: Autores (2022).

Figura 6 - b – Estudo paramétrico da carga térmica em relação ao número de estágios.



Fonte: Autores (2022).

Simulando a coluna com os parâmetros definidos nas análises paramétricas, foi obtido que a carga térmica para o refeedor é de 2200W. Para a construção da unidade experimental foi utilizada uma resistência de 2400W, visando considerar as perdas térmicas que ocorrem no processo, a simulação foi realizada considerando uma eficiência térmica de 80% para o processo.

A carga térmica no condensador, pelas simulações, foi de 1800W. Optou-se pela utilização de água resfriada a 0°C em um sistema fechado, para evitar desperdício de água potável. Estima-se, pelos deltas de temperatura, que a capacidade de remoção do sistema montado utilizando um condensador laboratorial de 40cm, uma bomba para recirculação e água resfriada é de até 5000W, chegando a 0W quando a água de resfriamento atinge o equilíbrio com o produto de topo a ser condensado. Portanto, foi de extrema importância, observar empiricamente a temperatura da água de resfriamento nos experimentos.

O resultado das simulações do sistema com 8 pratos, refluxo igual a 3, alimentado no prato 7 está disponível na Tabela 3. Para comparar as simulações com os resultados experimentais que serão coletados, foi utilizado como parâmetro a pureza de etanol obtido no topo da coluna em frações mássicas.

É importante salientar que a alimentação de 4,8 kg/h foi obtida durante os testes da unidade experimental, a capacidade teórica da coluna, pelo dimensionamento era de 10 kg/h, entretanto o aumento excessivo de carga térmica não poderia ser suprido pela resistência de 2400W, bem como problemas com vazamentos nos flanges da coluna, chegando-se no valor de 4,8 kg/h utilizado nas simulações.

Tabela 3 - Corrente de Alimentação, Destilado e Fundo.

Propriedades	Alimentação	Destilado	Fundo
Pressão [atm]	1	1	1
Temperatura [C°]	25	78,70	98,66
Fluxo mássico [kg/h]	4,80	1,20	3,60
Fração mássica – água	0,90	0,10	0,99
Fração mássica – etanol	0,100	0,89	0,01

Fonte: Autores (2022).

3.3 Construção da coluna

Após o dimensionamento pode-se iniciar a construção da coluna. A Tabela 4 indica as dimensões calculadas para o dimensionamento.

Tabela 4 - Dimensões da coluna.

Estruturas	Dimensões (m)
Altura da coluna	0,7
Diâmetro da coluna	0,062
Espaçamento entre os pratos	0,075
Altura do vertedouro	0,025
Diâmetro do Downcomer	0,04
Diâmetro das perfurações	0,002
Distância entre as perfurações	0,002

Fonte: Autores (2022).

Com o dimensionamento em mãos, iniciou-se a construção da coluna. A estrutura principal da coluna com os pratos, foi desenvolvida por terceiros, devido a ausência de ferramentas para a construção da mesma.

Após a entrega da estrutura com os pratos, iniciou-se a perfuração, montagem da coluna e todo o sistema que auxiliaria o processo de destilação projetado, como condensador, reboiler, tanques de armazenagem, mangueiras, uma bomba e um controlador de temperatura.

Figura 7 – Sistema de destilação.



Fonte: Autores (2022).

O resultado da construção do sistema se encontra na Figura 7, com todo os componentes citados anteriormente. Pode-se observar a coluna a esquerda na parte inferior, logo acima do reboiler, com o controlador de temperatura ao lado. Na parte superior um condensador, com dois tanques a direita, sendo o primeiro da alimentação, e o segundo de recirculação (responsável pela água do condensador).

3.4 Resultados experimentais

Para reduzir os custos de construção, optou-se por colocar a resistência de aquecimento em contato íntimo com a mistura a ser destilada, dessa forma a utilização de um líquido de aquecimento seria prejudicial ao sistema, já que a troca de massa entre esse líquido e a solução alimentada reduziria as frações de etanol no topo da coluna. A solução encontrada para tal problema foi preencher o refervedor com a solução alimentada. O maior problema dessa adaptação está relacionado ao produto de fundo, que não terá composição representativa quando comparado às simulações.

Os resultados experimentais estão foram medidos em duplicata, sendo que nas 2 operações foram realizados alguns ajustes finos de vazão de refluxo para que o experimento chegasse o mais próximo possível do estipulado para as simulações. Os resultados obtidos estão na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados experimentais.

Testes Contínuos	Fração mássica de etanol no destilado	Temperatura
I	83,5 %	39 °C
II	81,8%	44 °C

Fonte: Autores (2022).

A média entre os resultados contínuos é de 82,65 % de etanol no topo, a uma temperatura 41,5 °C. Comparando com os valores encontrados na simulação, vemos que a temperatura de saída do destilado é 48,7% do que a estimada computacionalmente. Tal resultado nos revela que não é necessário utilizar água a 0°C como fluido de resfriamento. Além do mais, o fato de que na construção foi instalado um recipiente para armazenar o produto de topo, auxilia a ocorrência do resfriamento das alíquotas removidas.

Quando as frações mássicas de simulação e experimento são comparadas, temos um desvio percentual de 8%, revelando que os testes foram realizados satisfatoriamente dentro do refluxo e vazões de alimentação estimadas. Para que o balanço de massa fosse coerente, as vazões de destilado e saída simuladas foram também respeitadas na unidade experimental, essas foram medidas realizando coletas de massa por determinada quantidade de tempo. O desvio que ocorre nas frações mássicas pode ser resultado da dificuldade em controlar o refluxo em um valor exatamente igual a 3, foram utilizadas válvulas de baixo custo e que dificultavam o ajuste fino das correntes.

Após 30 minutos de operação, os níveis no refeedor e no recipiente de produto de topo eram constantes, evidenciando que a soma das correntes de destilado e produto de fundo era igual a alimentação proposta de 4,8 kg/h.

Um problema enfrentado na coluna foi o aumento da pressão interna, quando alguma variável saía dos “ranges” propostos, a coluna começava a sofrer com aumento da pressão interna, ocasionando vazamentos nos flanges da coluna. Para contornar esse problema, foi utilizado um controlador de temperatura, com *SetPoint* = 98°C, valor encontrado por tentativa e erro em que a coluna mantém sua produção dentro do nível estimado e que evita o aumento excessivo da vazão interna. Esse pode ser outro agente responsável pelo desvio de 8%, já que foi uma medida preventiva para evitar danos na estrutura da coluna, entretanto faz com que a operação da coluna seja um pouco abaixo de sua capacidade máxima.

4. Considerações Finais

O projeto desenvolvido teve o objetivo de modelar e dimensionar uma coluna de destilação para separação de etanol e água com a utilização de softwares auxiliares, como o COFE® e ChemSep®, que se mostraram muito eficientes para a conclusão dos objetivos abordados. O estudo paramétrico possibilitou encontrar os dados necessários para a operação definida pelo grupo. Através da análise das dimensões de uma coluna já existente e comparações com a literatura, foi possível determinar que a vazão de alimentação indicada por eles é errônea, pois a torre pode operar com alimentação de 100,5 Kg/h e produzir destilado na vazão de 9,9 Kg/h.

Pode-se observar, na prática, a importância da realização de simulações prévias, pois as frações mássicas obtidas de etanol no destilado foram totalmente condizentes com o que foi detectado computacionalmente. Para um sistema contínuo com refluxo a fração média foi de 82,65%, à uma temperatura média de 41,5°C. Os dados de saída previstos pelo grupo foram alcançados, e o método serviu de aprendizado a respeito do processo de destilação, os parâmetros se mostram positivos para a futura construção da coluna de destilação.

Uma sugestão para trabalhos futuros, é a implementação de um sistema de controles, que possa auxiliar na análise dos dados gerados pela coluna, como alterações de vazões, temperatura, pressão interna. A construção de um supervisor é, também,

uma possibilidade, visto que a partir da implementação de um sistema de controle, torna-se possível a elaboração de um, para poder compreender melhor o processo, e conseguir obter dados em tempo real da operação da coluna.

Referências

- Arce, A., Martínez-Ageitos, J., & Soto, A. *VLE for water + ethanol + 1-octanol mixtures. Experimental measurements and correlations*. Fluid Phase Equilibria, Santiago, 122(1-2), 117-129, jul. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3812\(96\)03041-5](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3812(96)03041-5). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378381296030415>.
- Battisti, R., Claumann, C. A., Marangoni, C., & Machado, R. A. F. (2019). Optimization of pressure-swing distillation for anhydrous ethanol purification by the simulated annealing algorithm. *Brazilian Journal Of Chemical Engineering*, 36(1), 453-9. [dx.doi.org/10.1590/0104-6632](https://doi.org/10.1590/0104-6632). <https://www.scielo.br/bjce/>.
- Cavalcanti, C. J. S. (2018). *Simulação e otimização da produção de etanol anidro combustível*. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. <https://repositorio.ufpe.br/>. Acesso em: 01 de junho de 2022.
- Carlson, E. C. *Don't Gamble With Physical Properties For Simulations*. Chemical Engineering Progress. Cambridge, p. 35-46. 1996. <http://www.cchem.berkeley.edu/cbe150b/docs/VLE/Guidelines.pdf>.
- Dias, R. M. *Estudo de equilíbrio líquido-vapor de soluções hidroetanólicas contendo frutose*. 2016. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.
- Figueiredo, M. F. *Obtenção de etanol anidro via destilação extrativa: simulação e otimização*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba, 2019. <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/5249>>.
- Geankoplis, C. J., Hersel, A., Lepek, D. H. *Transport Processes and Separation Process Principles*. (5ª. ed.): Pearson, 2018.
- Kister, H. Z. *Distillation Operation*. McGraw-Hill, 1990.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*. (7ª ed.): McGraw-Hill, 2005.
- Moussa, L. S. *Análise Termodinâmica de Colunas de Destilação Visando à Otimização Energética*. 2001. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Área de Concentração Sistemas de Processos Químicos e Informática, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001. <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/267546>.
- Mulia-Soto, J. F., Flores-Tlacuahuac, A. *Modeling, simulation and control of an internally heat integrated pressure-swing distillation process for bioethanol separation*. Computers & Chemical Engineering, [S.L.], 35(8), 1532- 1546, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.03.011>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135411001013>.
- Oliveira, L. A., Cardoso, C. R., & Sousa, N. G. *Análise de sensibilidade de um sistema de destilação por alternância de pressão para a produção de etanol anidro*. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*. Abril, 2022.
- Pereira, M. D., Sousa e Silva, I., & Siqueira, A. M. de O. (2022). *Estudo de uma planta de destilação industrial utilizando o software livre ChemSep*. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 8(3), 14209–01e. <https://doi.org/10.18540/jcecvl8iss3pp14209-01e>.
- Perry, R. H., & Green, D. W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. (6ª ed.): McGraw-Hill, 1999.
- Seader, J. D., Henley, E. J., & Roper, D. K. *Separation process principles: chemical and biochemical operations*. (3ª ed.) Hoboken: Johnwiley & Sons, Inc., 2010. 849 p.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. M., & Swihart, M. T. *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*. (8ª ed.): Ltc, 2019. 575 p.
- Souza, A. E. C., Cerqueira, D. A., Souza, N. G., & Cardoso, C. R. *Simulation of the extractive distillation process to produce anhydrous ethanol using ethylene glycol as a separating agent*. *Research, Society and Development*, [S. 1.], 10(4), e45610414228, 2021. 10.33448/rsd-v10i4.14228. <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/14228>.
- Souza, B. D., & Alvarez, J. G. *Projeto de uma coluna de destilação didática*. Orientador: Marlus Pinheiro Rolemborg. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Instituto de Ciência e Tecnologia. Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas, 2013.
- Teleken, J. G. *Destilação*. Material didático (Mestrado) – Universidade Estadual do Centro Oeste, Guarapuava, Paraná, 2014. https://www.unicentro.br/posgraduacao/mestrado/bioenergia/material_didatico/2014/DESTILACAO_Prof_JoeL_538343204e119.pdf.
- UFRGS. *Manual de experimentos – Química orgânica experimental*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. <http://www.iq.ufrgs.br/dqo/images/ Apostilas/Apostila-QUI02004--2019.pdf>