

Análise de sensibilidade de um sistema de destilação por alternância de pressão

Sensitivity analysis to produce anhydrous ethanol using pressure-swing system

Análisis de sensibilidad de un sistema de destilación por alternancia de presión

Recebido: 23/03/2022 | Revisado: 01/04/2022 | Aceito: 07/04/2022 | Publicado: 13/04/2022

Lucas Aparecido Oliveira

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

Daniel Alves Cerqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3195-1995>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: daniel.cerqueira@uftm.edu.br

Cássia Regina Cardoso

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3226-7653>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: cassia.cardoso@uftm.edu.br

Nádia Guimarães Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3142-5875>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: nadia.sousa@uftm.edu.br

Resumo

A destilação por alternância de pressão é utilizada para separar misturas azeotrópicas sem a necessidade de adição de nenhuma substância ao sistema. O objetivo do presente trabalho foi realizar a análise de sensibilidade de alguns parâmetros de operação das duas colunas envolvidas no processo. Para tais análises, os modelos termodinâmicos utilizados foram validados através de dados experimentais. As simulações foram feitas através dos softwares livres COFE e ChemSep. Os parâmetros foram avaliados levando em consideração, a saída de água praticamente pura no fundo da coluna de baixa pressão, e uma corrente de fundo de etanol anidro deixando a coluna de alta pressão. Os resultados obtidos vão de encontro ao observado por diversos pesquisadores. A configuração final do sistema encontrada foi, para a coluna de alta pressão: 37 estágios, alimentada no estágio 14 e com uma razão de refluxo de 0,380. Para a coluna de baixa pressão: 32 estágios, com a corrente de alimentação e reciclo posicionados nos pratos 30 e 14, respectivamente, e uma razão de refluxo de 4,250. Os resultados e a discussão esclarecem o funcionamento da coluna e agregam conhecimento ao processo de separação.

Palavras-chave: Etanol anidro; Modelagem Termodinâmica; Simulação.

Abstract

Pressure-swing distillation is used to separate azeotropic mixtures without the addition of chemical compounds to the system. The objective of the present work was to perform a sensitivity analysis for the system composed by two distillation columns to produce anhydrous ethanol. The used thermodynamic models were validated through experimental data. The simulations were performed using the free software COFE and ChemSep. The operation parameters were evaluated considering the release of practically pure water at the bottom of the low-pressure column, and a bottom release of anhydrous ethanol for the high-pressure column. The final configuration of the system was, for the high-pressure column: 37 stages, fed at stage 14, with a reflux ratio of 0.380. For the low-pressure column: 32 stages, with the feed stream and recycle positioned on trays 30 and 14, respectively, and a reflux ratio of 4.250. The results and the discussion clarify the operation of the column and add knowledge to the separation process.

Keywords: Anhydrous ethanol; Thermodynamic modelling; Simulation.

Resumen

La destilación por alternancia de presión se utiliza para separar mezclas azeotrópicas sin necesidad de añadir ninguna sustancia al sistema. El objetivo del presente trabajo fue realizar un análisis de sensibilidad de algunos parámetros de operación de dos columnas de destilación. Para tales análisis, los modelos termodinámicos utilizados fueron validados a través de datos experimentales. Las simulaciones se realizaron utilizando el software libre COFE y ChemSep. Los parámetros se evaluaron teniendo en cuenta, la salida de agua prácticamente pura por el fondo de la columna de baja presión, y una corriente de fondo de etanol anidro saliendo de la columna de alta presión. Los resultados obtenidos concuerdan con los observados por varios investigadores. La configuración final del sistema encontrada fue, para la columna de alta presión: 37 etapas, alimentadas en la etapa 14 y con una relación de reflujo de 0,380. Para la columna de baja presión: 32 etapas, con la corriente de alimentación y recirculación posicionadas en los platos 30 y 14,

respectivamente, y una relación de reflujo de 4.250. Los resultados y la discusión aclaran el funcionamiento de la columna y agregan conocimiento al proceso de separación.

Palabras clave: Etanol anhidro; Modelado Termodinámico; Simulación.

1. Introdução

A forma mais comum de produção do etanol é a fermentação de moléculas de glicose encontradas em vegetais ricos em açúcares ou amido, tais como a cana-de-açúcar, o milho e a beterraba (Martins, 2018; Muller et al. 2019). A produção através da cana-de-açúcar confere ao Brasil destaque na produção de etanol, sendo o maior produtor do vegetal no mundo, segundo dados de 2021, publicados em um relatório pelo Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (Vidal, 2021).

A adição de etanol anidro à gasolina tem como objetivo reduzir os custos e a emissão de carbono, bem como aumentar a octanagem do combustível (Lira, 2015). Atualmente, no Brasil, a gasolina apresenta até 27% de etanol anidro em sua composição, de acordo com a Resolução nº 807, de 23 de janeiro de 2020. O etanol anidro é o etanol com alto índice de pureza, sendo a sua composição mássica 99,3% etanol e 0,07% água, conforme estabelecido na Resolução nº 764, de 20 de dezembro de 2018.

O elevado grau de pureza impede a separação de fases no combustível, causando problemas no motor de um automóvel (Belicanta et al., 2016). Portanto, para adição à gasolina, o etanol hidratado deve passar por uma desidratação na última etapa de sua produção. Entretanto, tal processo de separação é dificultado pela formação de um ponto de azeótropo na mistura etanol-água (Kiran & Jana, 2015).

O ponto de azeótropo é formado devido a desvios na idealidade presentes em uma mistura. Para o sistema etanol-água, a composição do azeótropo, i.e., a capacidade máxima de separação por destilação fica em torno de 86% molar de etanol a 1 atm (Cui et al. 2022; Yang et al. 2020). Dessa forma, faz-se necessário o uso de outros métodos de separação que possibilitem ultrapassar tal concentração, tais como destilação extrativa, destilação azeotrópica e destilação por alternância de pressão, sendo a última o objeto de estudo do presente trabalho (Seader et al., 2010).

A destilação por alternância de pressão não demanda a adição de solvente ao processo (Battisti et al., 2019). O método utiliza variações de pressão, capazes de modificar a volatilidade relativa dos componentes, alterando o ponto de azeótropo (Kumar et al., 2015). Existem outros métodos para obtenção de etanol anidro amplamente empregados industrialmente, como a adsorção por peneiras moleculares.

A otimização dos principais parâmetros de um processo, está diretamente relacionada com a eficiência da operação. Entretanto, devido ao alto custo, risco de acidentes e perdas de especificação do produto, se torna inviável a constante alteração desses parâmetros em escala industrial (Souza et al., 2021). O uso de *softwares* pode ser considerada uma alternativa para o estudo da sensibilidade e otimização do processo, levando a uma análise segura e garantindo resultados satisfatórios (Santos, 2016).

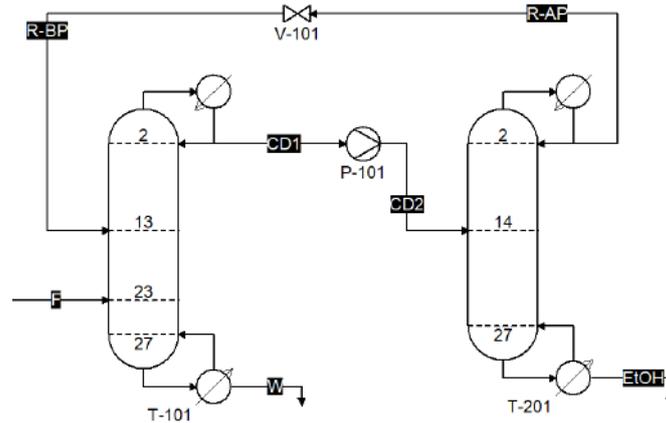
Considerando a importância dos processos de separação por destilação, faz-se necessário entender a sensibilidade dos parâmetros da coluna, de forma que as análises possibilitem melhor entendimento a respeito da alternância de pressão e sua viabilidade em contexto industrial. Mulia-Soto e Flores-Tlacuahuac (2011) realizaram estudos envolvendo alguns métodos de obtenção de etanol anidro e destacaram a eficiência do método de alternância de pressão; Liang et al. (2017) realizaram um estudo envolvendo a mistura etanol-água, bem como Battisti et al. (2019); e ambos constataram a viabilidade do processo em escala industrial.

Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho foi a análise de sensibilidade dos parâmetros de construção e operação das duas colunas de destilação que constituem o método de alternância de pressão, sistema utilizado na produção de etanol anidro.

2. Metodologia

Este trabalho utilizou os *softwares* livres COFE, versão 3.5.0.13 e ChemSep, versão 8; para a simulação do sistema de destilação por alternância de pressão, objetivando a produção do etanol anidro. O fluxograma de processo a ser estudado foi desenhado no próprio COFE e é constituído por 2 torres de destilação operando a pressões diferentes, uma bomba e uma válvula de expansão, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma PFD do processo de alternância de pressão.



Fonte: Autores (2022).

O primeiro passo foi a escolha do pacote termodinâmico que melhor se adequa ao sistema. Para validar o modelo na coluna de baixa pressão, foram utilizados dados experimentais (Arce et al., 1996). Para a coluna operando a alta pressão os dados experimentais foram cedidos pelo Dortmund Data Bank (DDBST GmbH) (Grybat, 2021).

2.1 Parâmetros iniciais de simulação

Para realizar a simulação e, posteriormente, a análise de sensibilidade, foi necessária a definição de um sistema inicial, utilizou-se a configuração não otimizada proposta por Battisti et al. (2019). A Tabela 1 contém informações sobre a corrente de alimentação e a Tabela 2 parâmetros de configuração das colunas.

Tabela 1: Informações sobre a corrente de alimentação.

Parâmetro	Valor
Vazão molar ($kmol h^{-1}$)	100
Fração de etanol	0,2
Fração de água	0,8
Temperatura (K)	365,15
Pressão (kPa)	101,32

Fonte: Adaptado de Battisti et al. (2019)

Tabela 2: Configuração inicial das colunas.

Parâmetro	Colunas	
	CBP ^a	CAP ^b
Número de estágio	28	28
Razão de refluxo	4,725	0,435
Posição de entrada da alimentação	23	14
Posição de entrada do reciclo	13	-
Pressão de operação (kPa)	101,32	1.013,25

^aCBP – Coluna de Baixa Pressão. ^bCAP – Coluna de Alta Pressão.
Fonte: Adaptado de Battisti et al. (2019).

Além dos dados dispostos nas Tabelas 1 e 2, foi necessário fixar uma variável para cada coluna. Para a CBP, a composição molar na corrente de fundo foi fixada para um valor de 99,5% molar de água. Já nas simulações da CAP, fixou-se a recuperação de 98% do etanol alimentado. Segundo Mulia-Soto & Flores-Tlacuahuac (2011), tal porcentagem garante, junto a outros fatores, a viabilidade econômica da destilação por alternância de pressão. Realizando o balanço de massa global para etanol, foi constatado que a saída dessa substância no fundo da coluna operada a altas pressões, deve ser de $19,6 \text{ kmol h}^{-1}$.

2.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade do sistema consistiu em variar um a um os parâmetros da coluna e analisar os resultados obtidos. Partindo da Figura 1, foi utilizada a ferramenta *parametric study* presente no COFE, tomando como critério a composição de álcool na corrente de topo (CD1), para a coluna de baixa pressão e na corrente de fundo (EtOH), para a coluna de alta pressão. O objetivo de tais análises, foi verificar como a mudança de parâmetros de construção da coluna modificariam as composições das correntes. É importante dizer que o sistema de alternância de pressão analisado, deve alcançar a fração mássica de 99,3% (98,2% em fração molar) de etanol na corrente de saída do sistema, conforme estabelecido na Resolução nº 764, de 20 de dezembro de 2018 (ANP, 2018).

Os seguintes parâmetros das colunas foram analisados:

- Coluna de Baixa Pressão - CBP: número de estágios, razão de refluxo, posição de entrada da corrente de alimentação (F), posição de entrada da corrente de reciclo (R-BP);
- Coluna de Alta Pressão - CAP: número de estágios, razão de refluxo, posição de entrada da corrente de alimentação (CD1).

A ordem em que as análises foram realizadas foi definida com base nos estudos realizados por Moussa (2001).

O número de estágios escolhido na CBP, foi o número mínimo necessário para que a coluna atingisse a maior fração mássica de etanol possível, mantendo todos os outros parâmetros fixados no valor inicial. Para a CAP a escolha foi do número mínimo de pratos que permitisse atingir a fração molar desejada de etanol na saída do sistema.

A melhor maneira de reduzir o consumo de energia em uma coluna é diminuindo sua razão de refluxo (Moussa, 2001). Foi escolhida para a CBP, a menor razão de refluxo que possibilitasse manter a fração mássica obtida a partir da análise do número de estágios. Para a CAP, foi selecionada a menor razão de refluxo que resultasse em fração mássica de 98,2% de etanol na corrente de fundo (EtOH).

Os critérios de escolha para as posições de alimentação e reciclo foram, além da composição de saída das colunas, a carga energética nos condensadores e refeedores de cada coluna de destilação. Segundo Moussa (2001), a análise pode ser feita realizando a simulação sucessiva das colunas, alternando o prato de alimentação em cada uma delas e observando o efeito das mudanças no consumo de energia.

Por fim, as simulações das colunas foram realizadas separadamente. A corrente de saída, obtida nas simulações da CBP,

foi utilizada na simulação da CAP. Após todas as análises de sensibilidade, as colunas foram simuladas em conjunto, no intuito de ajustar os resultados obtidos.

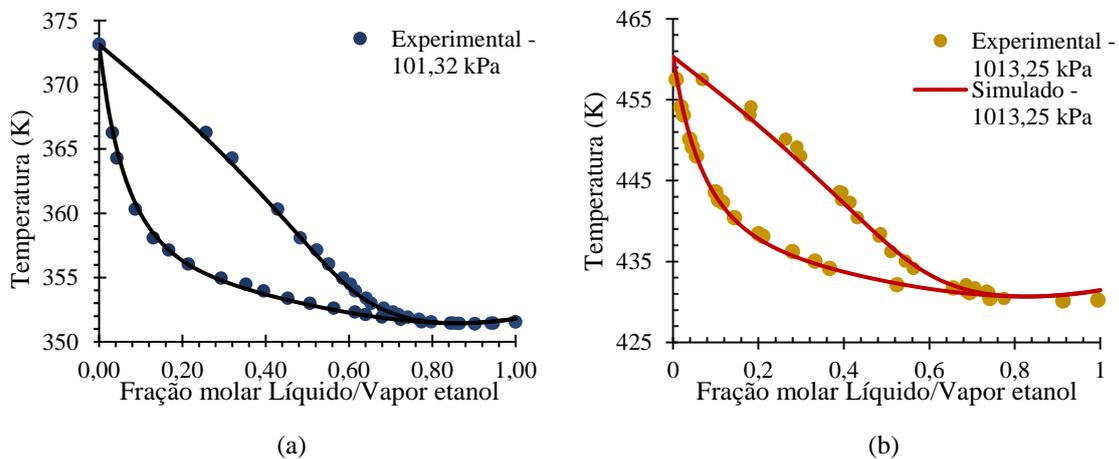
3. Resultados e Discussão

3.1 Validação experimental do modelo termodinâmico

Como citado anteriormente, no intuito de validar o modelo na coluna de baixa pressão, foram utilizados dados experimentais presentes na literatura (Arce et al., 1996). Para a coluna operando a alta pressão, os dados experimentais foram cedidos pelo Grybat, 2021.

A Figura 2 representa o diagrama de equilíbrio líquido-vapor do sistema etanol-água. Estão apresentados os valores obtidos experimentalmente e os valores simulados utilizando o pacote termodinâmico UNIQUAC. As simulações foram realizadas no ChemSep, nas mesmas condições do experimento.

Figura 2: Validação do modelo UNIQUAC através dos dados experimentais. (a) $P = 101,32 \text{ kPa}$ (b) $P = 1.013,25 \text{ kPa}$.



Fonte: Autores (2022).

Tomando as temperaturas como referência calculou-se os desvios para a fração molar de etanol. O desvio máximo obtido foi de 1,7% para a pressão $101,32 \text{ kPa}$ e 5,34% para a pressão de $1.013,25 \text{ kPa}$.

Foi constatado por Dias (2016) e Souza et al. (2021), que desvios médios de até 6,1% representam um ajuste satisfatório do modelo termodinâmico. Portanto, o modelo UNIQUAC se mostrou adequado para realizar as simulações das colunas utilizadas no sistema estudado.

3.2 Ponto inicial da simulação

Com os parâmetros iniciais do sistema, foi realizada a primeira simulação, objetivando encontrar o comportamento e vazões de trabalho. O fluxograma (Figura 1) foi construído no COFE e os parâmetros iniciais das Tabelas 1 e 2 foram implementados. Os resultados da simulação em questão estão dispostos na Tabela 3. Partindo dos valores encontrados, é possível iniciar as análises de sensibilidade do sistema.

3.3 Análise de sensibilidade – Coluna de baixa pressão

A coluna de baixa pressão foi simulada de maneira isolada, e configurada com os parâmetros dispostos na Tabela 2. Essa coluna foi alimentada por duas correntes: alimentação (F), que especificada na Tabela 1, e o reciclo do sistema (R-BP),

detalhado na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados obtidos para a simulação do ponto de partida das análises.

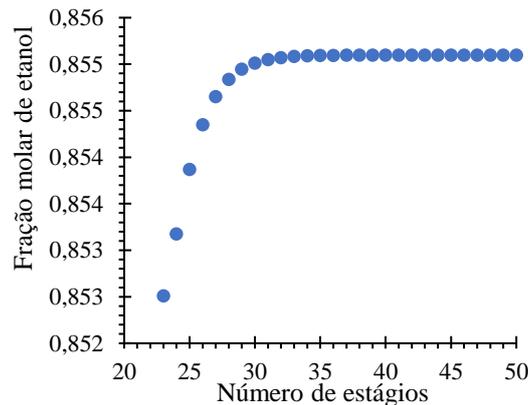
Correntes	Vazão molar ($kmol\ h^{-1}$)	Fração molar de etanol	Pressão (kPa)	Temperatura (K)
Reciclo (R-AP)	263,163	0,847	1013,25	424,392
Reciclo (R-BP)	263,163	0,847	101,320	351,449
Corrente de fundo CAP (EtOH)	20,505	0,956	1013,25	424,934
Corrente de fundo CBP (W)	79,492	0,005	101,320	371,806
Alimentação CAP (CD2)	283,666	0,855	1013,25	351,949
Corrente de topo CBP (CD1)	283,666	0,855	101,320	351,448

Fonte: Autores (2022).

3.3.1 Número de estágios

A Figura 3 representa o comportamento da concentração de etanol na corrente de topo (CD1) da CBP, em relação ao número de estágios do processo. As simulações foram iniciadas a partir do número mínimo de estágios que suportasse as condições iniciais estabelecidas.

Figura 3: Comportamento da composição da corrente de saída (CD1) em relação ao número de estágios.



Fonte: Autores (2022).

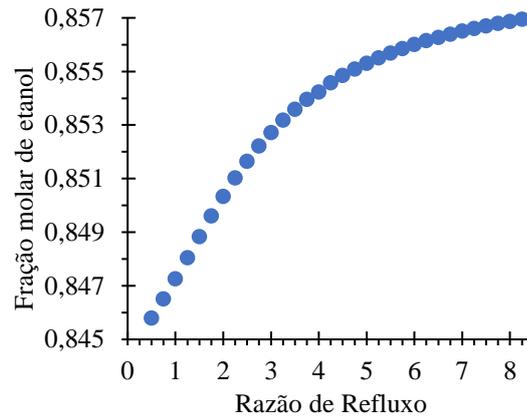
Observando o comportamento da Figura 3, notou-se que a partir do prato 32 o comportamento passa a ser constante, logo este número de estágios foi escolhido para dar continuidade às análises. A fração molar de etanol na corrente de topo, obtida na análise do número de estágios foi de 0,855.

3.3.2 Razão de refluxo

Conforme mencionado, a razão de refluxo escolhida será a menor razão que consegue manter a fração molar de etanol obtida na análise do número de pratos, portanto analisando a Figura 4, foi escolhida uma razão de refluxo de 4,250.

Outro ponto importante é analisar o comportamento do gráfico, já que erros no processo de simulação podem acarretar comportamentos distorcidos. Nesse caso, o comportamento foi coerente já que a inclinação da curva fica menos intensa conforme a fração molar se aproxima do azeótropo.

Figura 4: Comportamento da composição da corrente de saída (CD1) em relação a razão de refluxo.

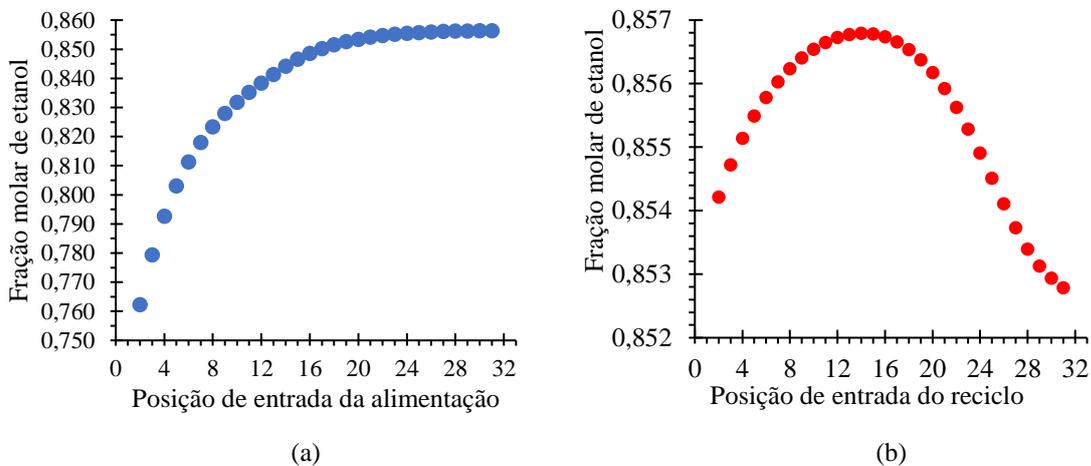


Fonte: Autores (2022).

3.3.3 Posição de entrada da alimentação e reciclo

A Figura 5 mostra o comportamento da fração molar de etanol, na corrente de destilado da coluna de baixa pressão (CD1), ao alterar o prato de entrada da alimentação (a), e do reciclo (b).

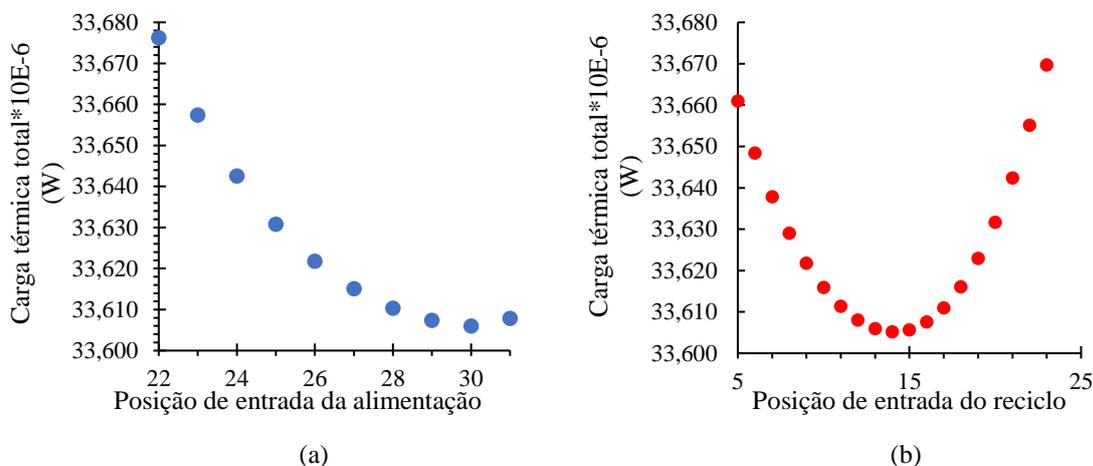
Figura 5: Comportamento da composição da corrente de saída (CD1) em relação a posição de entrada da alimentação (a) e do reciclo (b).



Fonte: Autores (2022).

Foi necessário analisar o comportamento da carga térmica do sistema para decidir o prato a ser escolhido (Figura 6), já que vários pratos satisfazem a condição mínima de fração molar estabelecida. Foram escolhidas as posições que retornavam a menor carga energética, portanto o prato 30 para a entrada de alimentação (F) e o prato 14 para a entrada de reciclo (R-BP).

Figura 6: Comportamento da carga energética da coluna de baixa pressão em relação a posição de entrada da alimentação (a) e do reciclo (b).



Fonte: Autores (2022).

Com os novos valores dos parâmetros obtidos, foi realizada uma nova simulação, os valores encontrados para a saída de destilado estão mostrados na Tabela 4. Esses valores foram utilizados como alimentação da coluna de alta pressão.

Tabela 4: Informações da saída de destilado (CD1).

Parâmetro	Valor
Vazão molar ($kmol h^{-1}$)	283,320
Fração molar de etanol	0,144
Fração molar de água	0,856
Temperatura (K)	451,450
Pressão (kPa)	101,320

Fonte: Autores (2022).

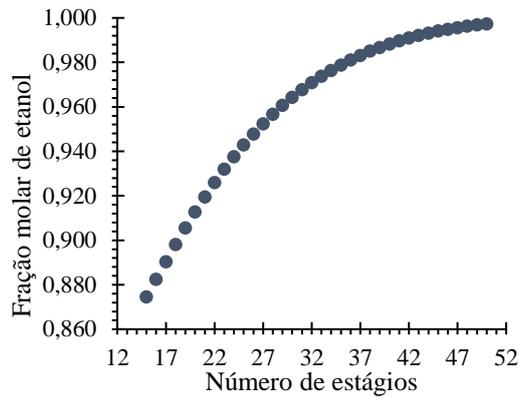
3.4 Análise de sensibilidade da coluna de alta pressão

O processo de análise da coluna de alta pressão foi semelhante ao realizado na coluna de baixa pressão. A coluna foi configurada, com os parâmetros de CAP dispostos na Tabela 2. Essa coluna foi alimentada com uma única corrente, a saída de destilado da coluna de baixa pressão (CD1), especificada na Tabela 4. A pressão da alimentação foi elevada até a pressão de trabalho na coluna; 1.013,25 kPa.

3.4.1 Número de estágios

A Figura 7 mostra o comportamento da concentração de etanol na corrente de produto (EtOH). Nesse caso, a fração molar de interesse é conhecida (98,2% molar de etanol). O menor número de estágios que atinge a porcentagem de etanol estabelecida foi 37 pratos. Pode-se notar também que, para valores de fração molar acima de 0,982 o aumento do número de pratos leva a fração mássica de etanol para valores próximos a 1.

Figura 7: Comportamento da composição da corrente de fundo (EtOH) em relação ao número de estágios.

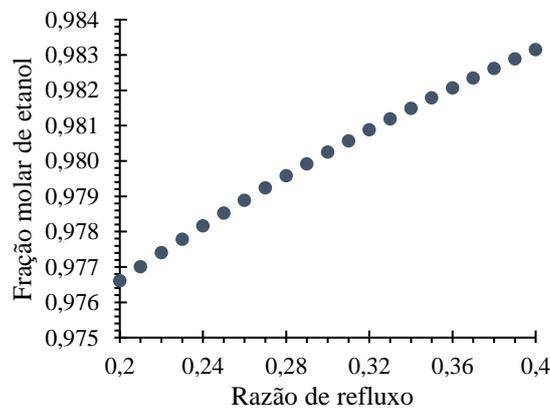


Fonte: Autores (2022).

3.4.2 Razão de refluxo

Seguindo o mesmo critério adotado para a CBP, a razão de refluxo escolhida foi a menor razão para manter a fração molar de etanol desejada. Como a razão de refluxo é o parâmetro mais influente nos gastos energéticos de uma coluna (Moussa, 2001), foram feitas duas análises, uma delas com o intuito de encontrar um valor aproximado de razão de refluxo. E uma segunda análise com um intervalo reduzido, próximo ao valor obtido pela primeira. A Figura 8 mostra o comportamento da razão de refluxo para a segunda análise; sendo fixada em 0,380.

Figura 8: Comportamento da composição da corrente de fundo (EtOH) em relação a razão de refluxo, para razões de refluxo entre 0,2 e 0,4.

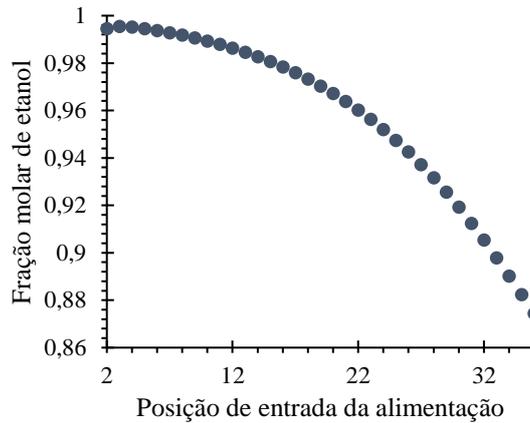


Fonte: Autores (2022).

3.4.3 Posição de entrada da alimentação

Foi necessário mais de um critério para definir a melhor posição de alimentação, já que vários pratos satisfazem o critério principal (fração molar de etanol na saída do processo). Portanto escolheu-se a carga térmica utilizada pelo condensador e pelo refeedor da coluna de alta pressão. O comportamento da fração molar de etanol em relação à posição de alimentação está apresentado na Figura 9.

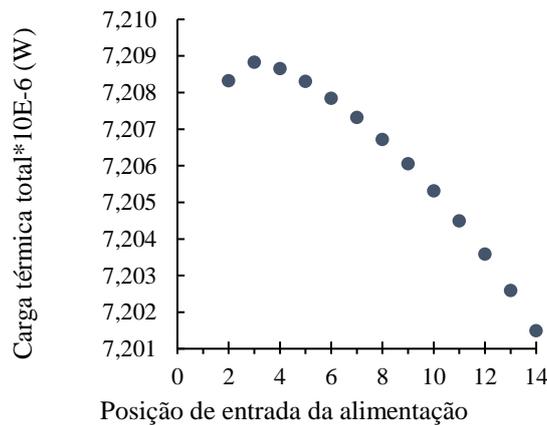
Figura 9: Comportamento da composição da corrente de produto (EtOH) em relação à posição de entrada da alimentação.



Fonte: Autores (2022).

Nesse caso, observou-se que a fração molar maior que 0,982 de etanol foi alcançada entre os pratos 2 a 14. Portanto, realizou-se a análise da carga térmica, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10: Comportamento da carga térmica do condensador e do refeedor em relação à posição de entrada da alimentação.



Fonte: Autores (2022).

A posição de alimentação foi selecionada com menor carga térmica para o sistema, determinou-se o estágio 14 como posição de alimentação. Após todas as análises da coluna de alta pressão, foi realizada a simulação das duas colunas simultaneamente. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 5.

O objetivo inicial das simulações foi cumprido e a corrente de produto obtida possui a porcentagem molar de etanol desejada. A configuração final das colunas foi resumida na Tabela 6.

Tabela 5: Caracterização das principais correntes do sistema.

Parâmetro	CD1 ^a	ETOH	R-AP
Vazão molar ($kmolh^{-1}$)	283,36	19,95	263,41
Fração molar de etanol	0,856	0,982	0,846
Fração molar de água	0,144	0,017	0,154
Temperatura (K)	351,45	425,19	424,39
Pressão (kPa)	101,32	1013,25	1013,25

^a CD1 – saída de topo da CBP. ^b ETOH – saída de fundo de CAP. ^c R-AP – saída de topo de CAP. Fonte: dos autores (2022).

Tabela 6: Configuração final das colunas.

Parâmetro	Colunas	
	CBP	CAP
Número de estágio	32	37
Razão de refluxo	4,250	0,380
Posição de entrada da alimentação	30	14
Posição de entrada do reciclo	14	-
Pressão de operação (kPa)	101,32	1.013,25

Fonte: Autores (2022).

É importante salientar que, o comportamento na segunda coluna foge do usual, já que a corrente de fundo é composta pela mistura com maior concentração do componente mais volátil. Essa inversão de comportamento é resultante do perfil de temperatura, maiores temperaturas são encontradas mais ao fundo da coluna de alta pressão.

4. Conclusão

O estudo desenvolvido teve como intuito demonstrar a viabilidade teórica do sistema de destilação por alternância de pressão para a produção de etanol anidro. Os softwares utilizados, COFE e ChemSep, provaram-se como ferramentas eficientes para realizar as simulações do processo.

O estudo mostra como as correntes de saída, do sistema estudado, reagem às mudanças nos parâmetros, partindo para um campo menos explorado da operação em questão e que visa oferecer uma ótica mais abrangente ao funcionamento do sistema.

Com o intuito de complementar o presente estudo, algumas das análises sugeridas são, a otimização do sistema em relação aos custos de operação e construção das colunas envolvidas no processo. Além disso, a comparação econômica com os métodos mais utilizados na obtenção de etanol anidro e um levantamento da redução de impacto ambiental quando o método é comparado a outros tipos de destilação objetivando a produção de etanol anidro, e que utilizam solventes auxiliando na quebra do azeótropo. Pode ser também realizado um estudo analisando as vantagens e desvantagens do método em relação a adsorção em peneiras moleculares, concluindo se há alguma vantagem em utilizar o método de alternância de pressão industrialmente.

Referências

- Arce, A., Martínez-Ageitos, J. & Soto, A (1996) VLE for water + ethanol + 1-octanol mixtures. Experimental measurements and correlations. *Fluid Phase Equilibria*, 122 (1-2), 117-129.
- 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 (01), 453-469.
- Belicanta, J., Alchorne, J. A. & Silva, M. T. (2016) The brazilian experience with ethanol fuel: aspects of production, use, quality and distribution logistics. *Brazilian Journal Of Chemical Engineering*. 33 (4), 1091-1102.

- Cui, C., Zhan, Q., Zhang, X., Sun, J. & Chien, L. (2022) Dynamics and control of thermal- versus electrical-driven pressure-swing distillation to separate a minimum-boiling azeotrope. *Separation and Purification Technology*, 280, 1-17.
- Dias, R. M. (2016) Estudo de Equilíbrio Líquido-Vapor de Soluções Hidroetanólicas Contendo Frutose. *Tese de doutorado - Curso de Engenharia Química*, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.
- Grybat, A. (2021) DDBST - Dortmund Data Bank Software & Separation Tecnology GmbH. <http://www.ddbst.com/ddb.html>.
- Kiran, B & Jana, A. K. (2015) A hybrid heat integration scheme for bioethanol separation through pressure-swing distillation route. *Separation and Purification Technology*, 142, 307-315.
- Kumar, S., Singh, N. & Prasad, R. (2010) Anhydrous ethanol: a renewable source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (7), 1830-1844.
- Liang, S., Cao, Y., Liu, X., Lin, X., Zhao, Y & Wang, Y. (2017) Insight into pressure-swing distillation from azeotropic phenomenon to dynamic control. *Chemical Engineering Research and Design*, 117, 318-335.
- Lira, F. P. (2015) Análise experimental do consumo de um veículo flex operando com diferentes misturas de gasolina/etanol em tráfego urbano. Dissertação de mestrado. Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.
- Martins, C. Z. (2018) Avaliação da produção de etanol de segunda geração. *Monografia de graduação*. Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Moussa, L. S. (2001) Análise Termodinâmica de Colunas de Destilação Visando à Otimização Energética. *Tese de doutorado*, Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Muller, T. A., Resende, J. T. V., Spinosa, W. A., Guerra, E. P. & Constantino, L. V. (2019). Produção de álcool a partir de cultivares de batata nas seleções especial e refugo. *Research, Society and Development*, 9(2), 1-22.
- Mulia-Soto, J. F. & Flores-Tlacuahuac, A. (2011) Modeling, simulation and control of an internally heat integrated pressure-swing distillation process for bioethanol separation. *Computers & Chemical Engineering*, 35 (8), 1532-1546.
- Órgão: Ministério de Minas e Energia/Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2018) RESOLUÇÃO Nº 764, DE 20 DE DEZEMBRO DE 2018, 245th. ed. Brasília, DF, Seção 1, pp. 841. https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/56416199/doi-2018-12-21-resolucao-n-764-de-20-de-dezembro-de-2018-56416135. 2021.
- Seader, J. D., Henley, E. J. & Roper, D. K. (2010) Separation process principles: chemical and biochemical operations. 3rd ed., Hoboken: Johnwiley & Sons, Inc.
- Santos, L. S. (2016). Projeto de colunas de destilação sujeito a incertezas. *Trabalho de conclusão de curso*. Escola de Química e Alimentos. Universidade Federal do Rio Grande, Santo Antônio da Patrulha.
- Souza, A. E. C., Cerqueira, D. A., Sousa, N. G. & Cardoso, C. R. (2021) Simulação do processo de destilação extrativa para produção de etanol anidro utilizando etilenoglicol como agente de separação. *Research, Society and Development*, 10 (4), 1-13.
- Vidal, M. F. (2021) Açúcar: cenário mundial e situação de produção no brasil e no nordeste brasileiro. 162. ed. Banco do Nordeste. https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/765/3/2021_CDS_162.pdf.
- Yang, J., Hou, Z., Dai, Y., Ma, K., Cui, P., Wang, Y., Zhu, Z. & Gao, J. (2020) Dynamic control analysis of interconnected pressure-swing distillation process with and without heat integration for separating azeotrope. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 29, 67-76.