



EFICIÊNCIA DE PRATOS DE COLUNA DE DESTILAÇÃO PILOTO DE ÓLEO FÚSEL PARA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL ISOAMÍLICO

D. R. ALVES¹, J. R. D. FINZER², A.D. LIMA,³ L.C. ASSIS,⁴

^{1,2,3,4} Universidade de Uberaba, PPGEQ – Mestrado Profissional em Engenharia Química

RESUMO – *A etapa de destilação de álcool etílico, bem como suas variáveis, é fundamental para obter um produto final de boa qualidade, porém, é produzido um resíduo que não tem um valor econômico elevado em seu estado bruto, o óleo fúsel. O presente trabalho tem como objetivo realizar os cálculos de eficiência da coluna de destilação utilizando os métodos de interpolação linear, Lagrange e o método de ajuste de modelo exponencial para encontrar os dados de viscosidade comparando-os para verificar se há mudanças significativas na eficiência calculada da coluna de destilação, sendo este o parâmetro que se deve ter maior criticidade visto que alterou uma unidade de prato real na coluna de destilação.*

1. INTRODUÇÃO

O óleo fúsel é um subproduto da destilação do etanol e pode ser definido como a mistura de álcoois obtidos em vários estágios do processo de destilação e, segundo Windholz et al. (1976), os álcoois que o compõe estão na faixa de destilação entre 122 e 138°C e equivalem a 60% do seu peso (m/m). A mistura possui porcentagem dominante em álcool isoamílico, mas também existem frações de etílico, pentanol, propílico, butílico, além de ésteres e ácidos carboxílicos. É um líquido viscoso, de cor amarelada, odor específico e desagradável e tem característica apolar, ou seja, é pouco solúvel em água (Ferreira, 2012).

O álcool isoamílico é um líquido incolor de cheiro característico, com ponto de ebulição de 132°C e densidade 0,81 g/cm³. Suas aplicações mais relevantes são na indústria de tintas e vernizes; na área de cosméticos e de perfumaria, para a remontagem de óleos e essências; na purificação do ácido fosfórico, atuando como solvente de extração (Ferreira, 2012).

O projeto de dimensionamento da coluna de destilação envolve cálculos de balanço de massa, balanço de energia e o uso do método de McCabe-Thiele, para encontrar a quantidade de pratos ideais e depois faz se necessário realizar o cálculo de eficiência da coluna, sendo que a correlação de O'Connell (1946) vem sendo usada como padrão na indústria durante décadas e se baseia na volatilidade relativa e na viscosidade do líquido da carga, ambas tomadas na média aritmética da temperatura no topo e no fundo da coluna e posteriormente encontra-se a quantidade de pratos reais necessários para compor a coluna de destilação, ver a Figura 1.

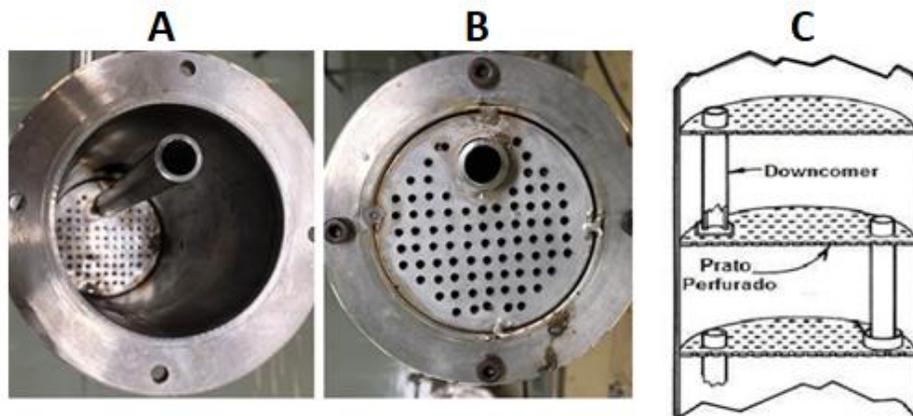


Figura 1 – Exemplo de prato de coluna de destilação piloto de óleo fúsel: em **A** observa-se o interior da ccoluna de destilação, em **B** observa-se o número de orifícios do prato e em **C** há o desenho de corte vertical da coluna de destilação.

A viscosidade dinâmica determina o grau de resistência do fluido a uma força cisalhante, essa grandeza é altamente influenciada pela temperatura (Oliveira, Barros e Rossi, 2009).

Brunetti (2008) enfatiza que nos líquidos a viscosidade dinâmica é diretamente proporcional à força de atração entre as moléculas. Com aumento da temperatura, essa força de atração diminui, diminuindo a viscosidade dinâmica. A redução da viscosidade dinâmica nos líquidos devido ao aumento da temperatura é atribuída ao aumento das distâncias intermoleculares provocadas durante o aquecimento. Isso reduz as forças de atração entre as moléculas, diminuindo a viscosidade dinâmica (Granjeiro et., al, 2007).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência de uma coluna de destilação piloto que produz álcool isoamílico do óleo fúsel, calculada pelo método de O'connel e comparar os resultados de eficiência dos dados de viscosidade de interpolação linear, interpolação de lagrange que utiliza equação polinomial e ajuste de modelo exponencial para verificar se há mudança expressiva na eficiência e alteração da quantidade de pratos da coluna piloto de óleo fúsel.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para o estudo da eficiência em função da viscosidade do etanol em diferentes tipos de interpolação, foram testados os métodos de interpolação linear, exponencial e Lagrange (polinomial) e exponencial. Foi utilizado uma coluna de destilação de óleo fúsel piloto para obtenção de álcool isoamílico para obtenção dos dados do estudo. Depois de realizado o cálculo pelo método de McCabe-Thiele para especificar a quantidade de pratos ideais foi realizado o cálculo da eficiência da coluna “ η ” de destilação pelo método de O' Connel segundo a Equação (1), em função da viscosidade e volatilidade relativa (α) da mistura.



$$100 \times \eta = \frac{50}{\sqrt[4]{(\alpha \times \mu)}} \quad (1)$$

Inicialmente foi necessário obter a viscosidade do álcool etílico na temperatura da coluna levando em conta apenas a viscosidade (μ) do componente mais volátil e a volatilidade relativa (α) da mistura na temperatura média da coluna (Magagnin et al., 2017).

$$T_{coluna} = \sqrt{T_{m\acute{a}x} \cdot T_{m\acute{i}n}} \quad (2)$$

A volatilidade relativa (α) consiste na relação entre a pressão de vapor dos componentes da mistura. Quanto maior o valor de α , mais fácil será a separação dos componentes. No cálculo da volatilidade, a pressão de vapor do mais volátil é inserida no numerador e a do menos volátil no denominador (Mayer, 2010), segundo a Equação (3):

$$\alpha = \frac{P_{v \text{ etanol}}}{P_{v \text{ isoamílico}}} \quad (3)$$

Calculou-se a viscosidade (μ) do componente mais volátil pela equação (1) e com os métodos citados e obteve-se a quantidade de pratos reais necessários na coluna de destilação, com a Equação (4):

$$\text{pratos reais} = \frac{\text{pratos ideais}}{\eta} \quad (4)$$

2.1. MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO SIMPLES

O método de interpolação simples é necessariamente efetuado entre dois pontos conhecidos e o ponto que se deseja interpolar a determinada temperatura, ver a Tabela 1.

Tabela 1: Viscosidade do álcool etílico em diferentes temperaturas (Dortmund, 2018).

Temperatura (K)	Viscosidade (cP)
373,15	0,320
Temperatura informada	Viscosidade interpolada (x)
393,15	0,245

De posse dos dados realizou-se a interpolação, sendo que os pontos (x_0, y_0) e (x_1, y_1), a interpolante linear é a linha entre os dois pontos (x_0, y_0) como demonstrado na Equação (5).

$$\frac{y-y_0}{y_1-y_0} = \frac{x-x_0}{x_1-x_0} \quad (5)$$



2.2. INTERPOLAÇÃO PELO MÉTODO DE LAGRANGE

O método de Lagrange foi realizado utilizando sete pontos de temperaturas e viscosidades da Tabela 2 para construção da curva polinomial e posteriormente calculado pelo aplicativo VCN.

Tabela 2: Temperatura e Viscosidade do Etanol (Geankoplis, 1978).

Temperatura (K)	Viscosidade (cP)
293,15	1,11
313,15	0,8
333,15	0,6
343,15	0,5
348,15	0,46
373,15	0,32
393,15	0,245

O método usado para determinar os valores a viscosidade em função da temperatura pelo método de Lagrange necessita da obtenção de polinômios interpoladores a partir de pontos no plano onde estes polinômios devem obrigatoriamente passar. A interpolação polinomial utilizar-se-á do recurso de aproximação de funções $f(x)$, para qual $f(x_0) = y_0, f(x_1) = y_1 \dots f(x_n) = y_n$ por polinômios de grau $(n - 1)$ que passe pelos pontos $(x_0, y_0), (x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$, como demonstrado pelas Equações (6) e (7):

$$P_{(n-1)}(x) = f(x_0) * L_0 + f(x_1) * L_1 + \dots + f(x_n) * L_n \quad (6)$$

$$L_{(n)}(x) = \frac{(x-x_0)}{(x_n-x_0)} * \frac{(x-x_1)}{(x_n-x_1)} * \dots * \frac{(x-x_{n-1})}{(x_n-x_{n-1})} * \frac{(x-x_{n+1})}{(x_n-x_{n+1})} * \dots * \frac{(x-x_k)}{(x_n-x_k)} \quad (7)$$

2.3. MÉTODO DE AJUSTE DE MODELO

O método de ajuste exponencial foi realizado também utilizando 7 pontos da literatura de temperatura e viscosidade conforme Tabela 2 e simulado no excel, plotando o gráfico de dispersão correspondente e ajustando a equação tipo exponencial. A equação (8) apresenta o modelo exponencial utilizando:

$$y = \beta_0 \exp(-\beta_1 x) \quad (8)$$



Em que y corresponde ao vetor de valores de viscosidade cP; X corresponde ao vetor de valores de temperatura (K) e β_0 e β_1 , são coeficientes do modelo. Utilizou-se o método dos Mínimos Quadrados utilizado pelo software MS Excel para estimativa dos valores dos coeficientes.

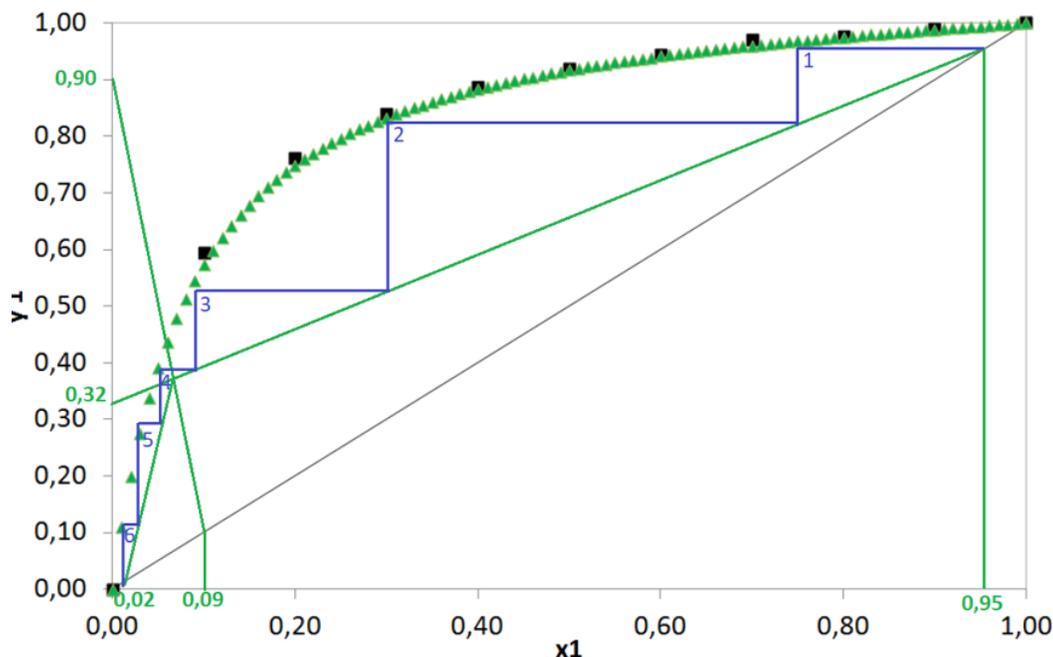
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o início do dimensionamento da coluna, foi utilizado o método de McCabe-Thiele, e usada a curva de equilíbrio líquido-vapor para o sistema etanol e álcool isoamílico. A mesma foi obtida da literatura, onde Silva (2012), utilizou o software EMSO.

Depois de locada curva de equilíbrio, foi inserida a linha de alimentação. A composição de álcool etílico com fração molar x_F igual a 0,09, possibilitou obter o coeficiente linear de 0,9.

Prosseguindo com o método, foi estabelecida a razão de refluxo (R_D) na coluna igual a 2, o qual em uma coluna de grande porte deve ser otimizado, estabelecendo a composição do destilado de 95% de etanol, ou seja, x_D é 0,95 e o coeficiente linear calculado obtendo 0,32. A linha de operação superior foi locada na Figura 2.

Figura 2: Projeto de coluna de destilação para obtenção de álcool isoamílico no óleo fúsel



De acordo com a Figura 2, a coluna necessitaria de seis pratos teóricos, três na seção de retificação e três na seção de esgotamento. A alimentação ideal ocorreria no quarto prato.



Para determinação da quantidade de pratos reais da coluna foi utilizado a correlação empírica de O'Connell (1946), levando em conta a viscosidade (μ) do componente mais volátil, a volatilidade relativa (α) da mistura na temperatura média de toda a coluna.

A temperatura média é dada pela Equação (2), obtendo 101,47°C (374,62 k).

3.1. INTERPOLAÇÃO LINEAR

Em seguida, utilizando o método de interpolação linear foi obtida a viscosidade do álcool etílico na temperatura média da coluna, obtendo 0,3144 cP na temperatura de 374,62 K.

A pressão de vapor do etanol na temperatura média da coluna é de 225,979 kPa (Dortmund, 2018), e a pressão do álcool isoamílico é de 18,665 kPa (Stenutz, 2018). A volatilidade relativa calculada pela equação (3) é: 12,11.

Como a quantidade de pratos reais depende da eficiência da coluna (η), O'Connell (1946), usando a Equação (1), obtém-se: 0,3579. Assim, os pratos da coluna possuem uma eficiência global de 36% o que corresponde a um valor inferior à maioria das colunas que, geralmente, operam de 65 a 80% de eficiência (Mayer, 2010).

O cálculo da quantidade de pratos reais está diretamente relacionado com a eficiência da coluna e com os pratos ideais estabelecidos no método de McCabe-Thiele, porém, inicialmente, subtrai-se uma unidade dos pratos teóricos já que este representa o evaporador (McCabe et al., 1993).

Com esse resultado, a quantidade de pratos reais foi calculada através da Equação (4) foi de 13,97 pratos reais, ou seja, neste caso de interpolação simples seriam necessários 14 pratos.

3.2. MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO DE LAGRANGE

Seguindo a mesma rota metodológica calculou-se para o método de Lagrange, a viscosidade na temperatura média com os dados experimentais mostrados na Tabela 2.

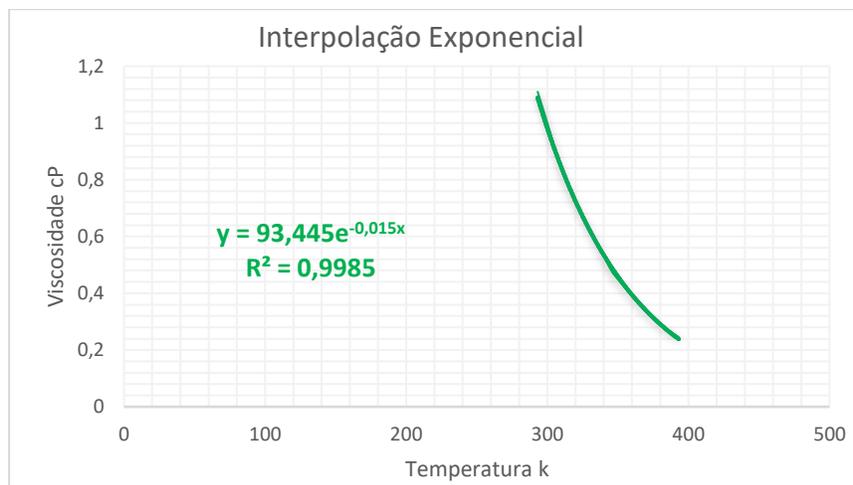
Pelo método de Lagrange seguiu-se conforme metodologia da Seção 2.2 e imputou-se os dados no aplicativo VCN que forneceu a viscosidade de 0,3104 cP. calculado pela Equação (1) a eficiência dos pratos foi de 0,3590, obtendo-se pela Equação (4), também, 14 pratos reais.

3.3. EQUAÇÃO EXPONENCIAL

Pelo método de ajuste seguiu-se a metodologia da Seção 2.3 e também se utilizou os dados da Tabela 2, e imputou-se os dados Excel gerando o gráfico exponencial da Figura 3.



Figura 3 – Interpolação exponencial entre temperatura e viscosidade do etanol



Os dados simulados no Excel forneceram a viscosidade de 0,3389 cP e calculado pela Equação (1) a eficiência dos pratos reais 0,3513 para coluna de destilação e utilizando a Equação (4) obteve-se 14,23 pratos reais, que neste caso necessitaria de 15 pratos reais.

Sendo assim o método de Lagrange e o método de interpolação simples indicam a necessidade de 14 pratos na coluna de destilação, já o método exponencial prevê 15 pratos na coluna de destilação.

A eficiência de um prato depende da qualidade da transferência de massa entre as fases líquida e vapor. Segundo Winkle (1967) as variáveis que afetam a eficiência em uma coluna de pratos são principalmente a densidade, viscosidade, tensão superficial e volatilidade entre líquido-vapor. Pode-se verificar que a viscosidade afeta diretamente o desempenho de uma unidade de destilação pois controla a taxa de difusão do mesmo em cada fase, ou aquelas que determinam a performance da área interfacial, a qual depende das condições de escoamento das fases e da concentração. Isso altera as propriedades físicas, sendo que utilizando o método de ajuste teria necessidade de uma unidade real a mais na coluna piloto de óleo fúsel. Além disso, caso se leve em conta a diferença de temperatura entre as fases pode-se considerar também, os efeitos térmicos daí decorrentes. Estas quantidades são influenciadas pelo tipo do equipamento no qual a operação é conduzida, pelas propriedades físicas das fases e das condições de operação aplicadas. Como trabalhos futuros seria interessante realizar o teste na coluna de destilação com um prato adicional e verificar as alterações físico-químicas do produto obtido.

4. CONCLUSÃO

Desta maneira, salienta-se que qualquer método efetivo de predição de eficiência de separação em uma coluna de destilação deve incluir as propriedades físicas da mistura que está sendo destilada. Assim são importantes as vazões de líquido e de vapor, as características do projeto dos pratos da coluna e a composição da fase líquida. Como verificado o método de interpolação exponencial comparado com o método simples e de Lagrange mostrou a necessidade de uma unidade de prato a mais na coluna de destilação piloto de óleo fúsel e isso pode alterar a pureza do produto final obtido. Conclui-se que o método 2.3 foi o mais eficiente.



5. REFERÊNCIAS

ALVES, D.R.; JUNIOR L.F.S **Projeto piloto de coluna de destilação para obtenção de álcool isoamílico através do óleo fúsel**. 2018. Monografia do curso de engenharia química da Universidade de Uberaba. Acesso em: 27 nov. 2020.

DORTMUND, D. B. **Thermophysical Data for Process Design**. Disponível em: <<http://ddbonline.ddbst.com/AntoineCalculation/AntoineCalculationCGI.exe>> Acesso em: 27 nov. 2020.

GRANJEIRO, A. A.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; MATA, M. E. R. M. C. Viscosidades de polpas concentradas de figo-da-Índia. *Revista Brasileira de Agrociência*, v.13, n.2, p.219-224, 2007.

FERREIRA, M. C. **Estudo do processo de destilação do óleo fúsel**. 2012. 228 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

MAYER, F. D. **Desenvolvimento da tecnologia de destilação apropriada à produção de álcool combustível em pequena escala**. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

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

STENUTZ, R. **Tables for chemistry**. Disponível em: <<http://www.stenutz.eu/chem/solv6.php?name=isoamyl+alcohol>> Acesso em: 28 nov. 2020.

O'CONNELL, H. E. **Plate efficiency of fractionating columns and absorbers**. *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers*, 42, pp. 741–775, 1946.

OLIVEIRA, R. C.; BARROS, S. T. D.; ROSSI, R. M. Aplicação da metodologia Bayesiana para o estudo reológico da polpa de uva. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.11, n.1, p.73-80, 2009

VAN WINKLE, M. **Distillation**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1967.

Windholz, M.; Budavari, S.; Stroumstos, L. Y.; Fertig, M. N. **The Merck index: an encyclopedia of chemicals and drugs**. 9 ed. New Jersey: Merck & CO. 1976.