



X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica

“Influência da pesquisa em Engenharia Química no desenvolvimento tecnológico e industrial brasileiro”

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Universidade Severino Sombra
Vassouras – RJ – Brasil

MÉTODO McCABE-THIELE: DETERMINAÇÃO DA RAZÃO DE REFLUXO NO PROJETO E OPERAÇÃO DE COLUNAS COM SAÍDA LATERAL NA SEÇÃO DE RETIFICAÇÃO

¹MALAVAZI, G. M. ; ²MOTTA LIMA, O. C.

¹Aluno grupo PET - DEQ/UEM ; ²Professor DEQ/UEM
Departamento de Engenharia Química - Universidade Estadual de Maringá
Avenida Colombo 5790, Bloco D-90, Maringá-PR ; CEP: 87020-900
e-mail: oswaldo@deq.uem.br

RESUMO – Colunas de destilação estão entre os equipamentos mais usados nas indústrias químicas e petroquímicas. No caso da destilação binária, o método McCabe-Thiele tem ampla utilização em sala de aula por sua simplicidade no entendimento dos conceitos envolvidos, sendo bem discutido na literatura de Operações Unitárias e de Destilação. Entretanto, pouco se encontra quando do projeto e/ou operação de colunas binárias que possuam retiradas de produto não apenas no topo e no fundo da coluna (saídas/retiradas laterais). Dentro deste contexto, este trabalho tem como finalidade a apresentação de uma metodologia para a determinação das razões de refluxo mínima e operacional de colunas binárias que operem com saídas laterais na seção de retificação. Esta determinação é importante em função da saída lateral alterar os fluxos nesta seção, sendo necessária a operação com maiores vazões entre a saída lateral e o topo da coluna, ou seja, de uma maior vazão (ou razão) de refluxo. A metodologia proposta se mostrou adequada para a determinação dos refluxos mínimo e operacional da coluna, sendo de fácil entendimento e implementação didática no contexto do projeto e da análise de colunas de destilação binária pelo método de McCabe-Thiele.

Palavras chave: destilação, refluxo mínimo, saída lateral, mistura binária

INTRODUÇÃO

Colunas de destilação estão entre os equipamentos mais usados na separação de produtos nas indústrias químicas, petroquímicas, entre outras. No caso da destilação binária, dois métodos gráficos podem ser utilizados no projeto e análise da operação das colunas: os métodos de McCabe-Thiele e Ponchon-Savarit.

O método de McCabe-Thiele tem ampla utilização em sala de aula por sua simplicidade

no entendimento dos conceitos envolvidos, apesar de ser um método simplificado que possui restrições em certas situações. A literatura de Operações Unitárias e de Destilação é ampla na discussão desta metodologia (Foust *et al.*, 1980 ; McCabe *et al.*, 1993 ; Perry e Green, 1984).

Neste contexto, este trabalho tem como finalidade a apresentação e discussão de uma metodologia didática para implementação em sala de aula visando à determinação das razões de refluxo mínima e operacional de colunas

binárias que operem com uma saída lateral na seção de retificação (i.e., entre a alimentação e o topo da coluna).

Esta determinação se mostra importante em função da presença da saída lateral alterar os fluxos nesta seção, sendo então necessária a operação com maiores vazões entre a saída lateral e o topo da coluna, ou seja, de uma maior vazão (ou razão) de refluxo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apesar de um uso industrial limitado, o estudo dos processos de destilação geralmente é iniciado com misturas binárias, com algumas hipóteses simplificadoras que facilitam os cálculos envolvidos, sendo normalmente utilizado o método gráfico de McCabe-Thiele (McCabe *et al.*, 1993) para a determinação do número de estágios de separação.

Neste método, considera-se que a coluna opera em estado estacionário, em uma mesma pressão e que o líquido e o vapor saindo dos estágios estão em equilíbrio. Sendo assim, a ferramenta básica para o método de McCabe-Thiele é o diagrama ou curva de equilíbrio (“x-y”), que fornece a fração do vapor em equilíbrio com um líquido (e vice-versa) para sistemas binários a pressão constante.

As equações que governam o método de McCabe-Thiele resultam de balanços de massa para o componente mais volátil na seção superior da coluna (seção de retificação) e na seção inferior da coluna (seção de esgotamento), considerando as vazões de líquido e de vapor constantes para cada seção. A interseção das retas de operação das seções de retificação (ROR) e de esgotamento (ROE), ponto de coordenadas (x' , y'), em conjunto com a composição da alimentação (x_F), determina a equação da reta da alimentação (reta q_F), função da condição térmica (ou “fração líquida”) da alimentação, conforme apresentado na Figura 1.

A inclinação da ROR para refluxo mínimo faz com que ela passe pelo ponto de coordenadas (x' , y'), determinado pela interseção da reta de alimentação (q_F) com a curva de equilíbrio, e pelo ponto de coordenadas (x_D , x_D). Deste modo, o valor do refluxo mínimo (R_{DM}) pode ser calculado a partir desta inclinação (Figura 2):

$$(x_D - y')/(x_D - x') \quad (1)$$

$$\text{que é igual a: } R_{DM}/(R_{DM} + 1) \quad (2)$$

$$\text{desta forma: } R_{DM} = (x_D - y')/(y' - x') \quad (3)$$

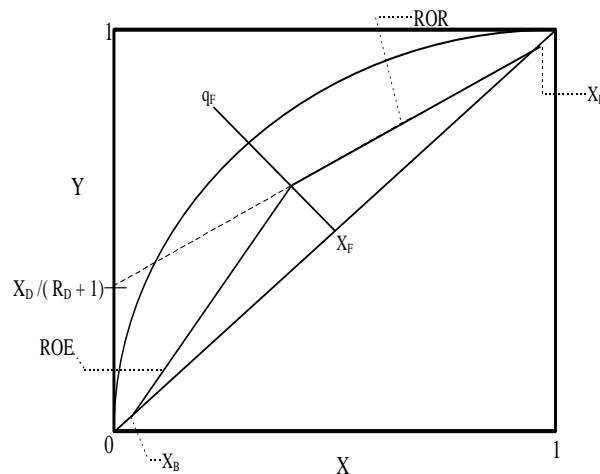


Figura 1 – Retas de operação do método McCabe-Thiele

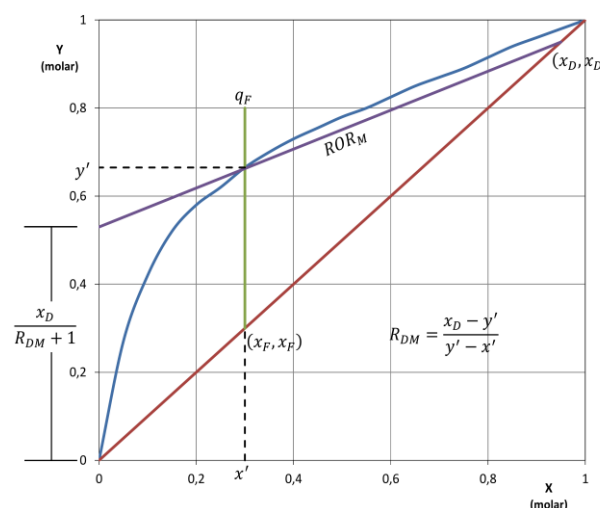


Figura 2 – Refluxo mínimo pelo método McCabe-Thiele

O refluxo mínimo também pode ser determinado a partir da ordenada da interseção da reta de operação da seção de retificação (ROR_M) que passa pelo ponto (x' , y') com o eixo y , $x_D/(R_{DM} + 1)$, conforme mostrado na Figura 2.

Razão de Refluxo Operacional

O aumento da razão de refluxo diminui o número de pratos teóricos necessários para se efetuar uma determinada separação, estando, ao mesmo tempo, relacionada a um aumento da vazão do vapor que sobe do refeedor para o topo da coluna, mantida a mesma retirada do produto de topo.

A diminuição do número de pratos se traduz na redução da altura total da coluna, enquanto que, com o aumento do fluxo de vapor, será necessário aumentar o diâmetro da coluna, em função dos maiores fluxos de líquido e vapor no seu interior. Ocorrerá também um aumento na quantidade de calor que se deve fornecer ao refeedor (aumento de consumo do fluido de aquecimento) e na quantidade de água de resfriamento utilizada no condensador.

Deste modo, para cada razão de refluxo arbitrada para uma coluna de destilação, haverá um certo número de pratos, um determinado diâmetro e determinadas quantidade de calor (e fluido de aquecimento) a ser fornecida ao refeedor e de água de resfriamento, para o condensador.

Assim, para uma torre de destilação, os custos variáveis aumentam à medida que a razão de refluxo aumenta, enquanto que o investimento de aquisição dos equipamentos e acessórios diminui com o aumento da razão de refluxo. Desta forma, a curva que representa o custo total de produção/operação apresenta um comportamento típico, reduzindo-se este custo, inicialmente, e aumentando o custo após certo valor da razão de refluxo. Assim, podemos definir uma *razão de refluxo operacional ótima* como aquela em que o custo total é mínimo.

Na prática, quando não se estabelece no projeto o valor do *refluxo ótimo* para a operação de uma torre de destilação, podem ser escolhidos valores na faixa de 1,25 a 1,5 vezes o encontrado para o *refluxo mínimo*.

Saídas Laterais - Método McCabe-Thiele

A operação com saídas (retiradas) laterais em processos de destilação pode ser ilustrada por meio da Figura 3, que apresenta uma coluna com duas saídas laterais, uma na seção de retificação (S_1), e outra na de esgotamento (S_2).

A partir de balanços materiais, as retas de operação podem ser modificadas para considerar este novo elemento. Para a seção de retificação, entre o topo da coluna e a saída lateral, continua valendo a reta de operação já estudada (ROR). Após a saída lateral, a reta de operação passa a ter a seguinte expressão:

$$y_{n+1} = \frac{L_S}{V_S} x_n + \frac{D \cdot x_D + S_1 \cdot x_{S_1}}{V_S} \quad (5)$$

em que o sub-índice S indica que as vazões se alteraram em função da saída lateral e S_1 é a vazão da saída lateral considerada.

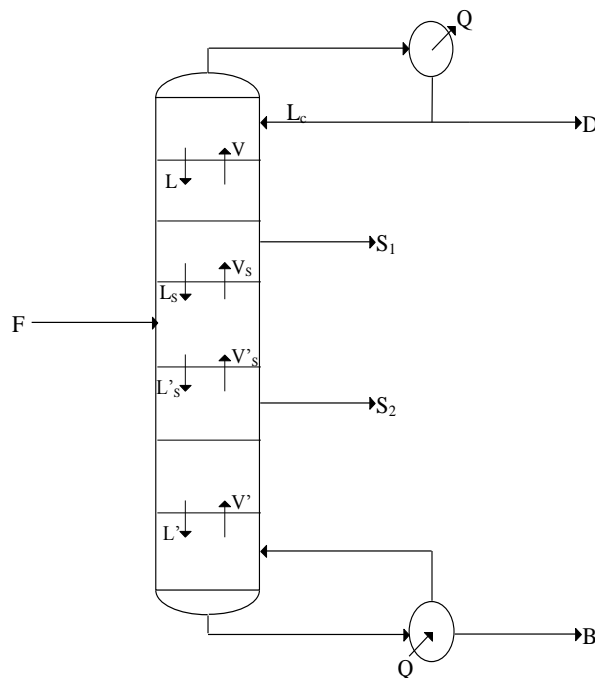


Figura 3 – Coluna de destilação com saídas laterais nas seções de retificação e esgotamento

A Equação 5 é válida até a linha da alimentação, a partir da qual, e até a outra saída lateral (S_2), deve ser usada a seguinte expressão para a reta de operação desde trecho da seção de esgotamento:

$$y_{m+1} = \frac{L'_S}{V'_S} \cdot x_m - \frac{B \cdot x_B + S_2 \cdot x_{S_2}}{V'_S} \quad (6)$$

Da saída lateral S_2 até a base da coluna, deve ser utilizada a reta de operação da seção de esgotamento (ROE).

Conforme foi visto, a inclinação de uma reta de operação é modificada sempre que se passar pela alimentação. Sendo assim, as saídas laterais também serão representadas por retas que irão modificar o curso (inclinações) das retas de operação.

Como as saídas laterais são sempre líquidos ou vapores saturados, pois são retiradas de um prato/estágio em equilíbrio líquido-vapor, suas retas serão verticais, para o primeiro caso e horizontais, para o segundo.

As saídas laterais podem ser facilmente incorporadas na resolução gráfica de McCabe-Thiele. Tomando como exemplo a Figura 3, S_1

Retas de Operação com Saídas Laterais

- plotar os pontos (x_F , x_F) e (x_D , x_D);
- traçar a linha da alimentação (q_F);
- traçar a reta da saída lateral 1 (q_{S1}), líquido saturado, portanto, uma reta vertical, construída a partir do ponto x_{S1} (fração molar da saída lateral 1);
- ligar os pontos (x_D , x_D) e $[0 ; x_D/(R_D + 1)]$, parando em q_{S1} , ficando determinada a reta de operação da seção de retificação (ROR);
- do ponto de interseção de q_{S1} com a ROR, traçar uma reta até a reta de alimentação (q_F), a partir do ponto (x_1 , x_1), sendo x_1 :

$$x_1 = \frac{S_1 \cdot x_{S1} + D \cdot x_D}{S_1 + D} \quad , \quad (7)$$

METODOLOGIA PROPOSTA

- na diagonal do diagrama de equilíbrio, marcar o ponto que representa a composição do produto de topo, (x_D , x_D);
- com a condição térmica da alimentação e seu ponto na diagonal (x_F , x_F), traçar a reta da alimentação (q_F);
- traçar a reta da saída lateral (q_S), pelo ponto que a representa na diagonal (x_{SL} , x_{SL}), sendo esta vertical (líquido saturado) ou horizontal (vapor saturado);
- na diagonal do diagrama de equilíbrio, marcar o ponto que serve de base para a construção da reta de operação da saída lateral, (x_1 , x_1);
- ligar o ponto de interseção da reta de alimentação (q_F) com a curva de equilíbrio, (x' , y'), ao ponto (x_1 , x_1), interrompendo a construção da reta no ponto em que esta intercepta a reta da saída lateral (q_S), definido assim o ponto P_M e a reta de operação da saída lateral ($ROSL_M$);
- traçar a reta de operação da seção de retificação na condição de refluxo mínimo (ROR_M), a partir da ligação do ponto (x_D , x_D) ao ponto P_M , estendendo esta reta até interceptar o eixo y no ponto $[0 ; x_D/(R_{DM} + 1)]$;
- calcular o refluxo mínimo (R_{DM}) a partir do valor obtido para a expressão $x_D/(R_{DM} + 1)$.

O refluxo ótimo para a operação da coluna de destilação com uma saída lateral na seção de retificação (R_D) pode ser então determinado multiplicando-se o refluxo mínimo obtido acima (R_{DM}) por 1,25 @ 1,5.

Definido o refluxo operacional da coluna, a construção das retas de operação da seção de retificação (ROR e ROSL), segue os passos listados no final da seção anterior (Retas de Operação com Saídas Laterais). A Figura 6 apresenta as retas ROR e ROSL construídas a

partir do detalhamento da metodologia mostrado na Figura 5.

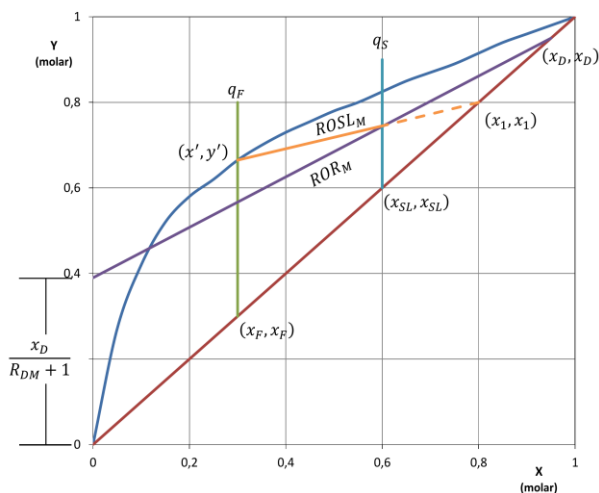


Figura 5 – Refluxo mínimo para operação com saída lateral na seção de retificação pelo método McCabe-Thiele

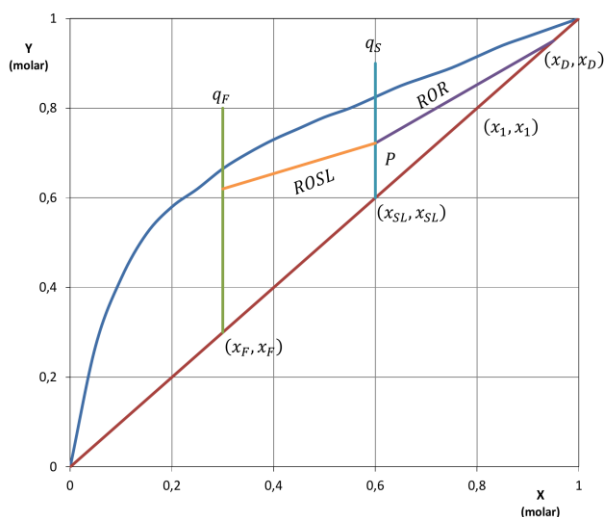


Figura 6 – Retas de operação para saída lateral na seção de retificação pelo método McCabe-Thiele

RESULTADOS

Para exemplificar o uso da metodologia proposta, serão comparados os resultados obtidos para os refluxos mínimo e operacional calculados a partir da ROR_M (Figura 2), sem considerar a saída lateral, e a partir da $ROSL_M$ e da ROR_M , considerando a presença da saída lateral na seção de retificação, Figuras 5 e 6. Para os cálculos das razões de refluxo operacionais (R_D), as razões de refluxo mínimas (R_{DM}) foram multiplicadas por um fator de 1,3.

Foram obtidos os seguintes resultados, extraídos diretamente das Figuras 2, 5 e 6:

- coluna sem saída lateral na retificação:

$$x_D/(R_{DM} + 1) = 0,528 \Rightarrow R_{DM} = 0,80$$

$$R_D = 1,04 \Rightarrow x_D/(R_D + 1) = 0,47$$

- coluna com saída lateral na retificação:

$$x_D/(R_{DM} + 1) = 0,392 \Rightarrow R_{DM} = 1,42$$

$$R_D = 1,83 \Rightarrow x_D/(R_D + 1) = 0,33$$

A partir dos resultados acima, podemos verificar que o refluxo mínimo considerando a presença da saída lateral (1,42 - metodologia proposta) é maior que o refluxo operacional da operação sem saída lateral (1,04). Este resultado está de acordo com as menores vazões de vapor e líquido que circulam na seção da coluna entre a alimentação e a saída lateral.

Desta forma, fica evidente que, se forem utilizadas as razões de refluxo mínima e operacional da operação tradicional (sem saída lateral), o projeto e a análise de colunas de destilação binária operando com saída lateral na seção de retificação pode se tornar inviável.

Este resultado está de acordo com aquele observado por Scheiman (1969) e Motta Lima et al. (2012), que analisam a determinação do refluxo mínimo de colunas operando com saídas laterais ou múltiplas alimentações a partir de balanços de energia e do diagrama entalpia-composição (método Ponchon-Savarit).

CONCLUSÃO

A metodologia didática proposta neste trabalho se mostrou adequada para a determinação dos refluxos mínimo e operacional de colunas de destilação binária operando com saída lateral na seção de retificação, sendo de fácil entendimento e implementação no contexto do projeto e da análise de colunas de destilação binária pelo método de McCabe-Thiele.

NOMENCLATURA

B - vazão do produto de fundo, [M/T]

D - vazão de destilado, [M/T]

L - vazão de líquido, retificação, [M/T]

L_C - vazão de refluxo, [M/T]

L_S, L'_S - vazão de líquido entre a alimentação e a saída lateral, [M/T]
 L' - vazão de líquido, esgotamento, [M/T]
 S_1, S_2 - vazão da saída lateral, [M/T]
 V - vazão de vapor, retificação, [M/T]
 V_S, V'_S - vazão de vapor entre a alimentação e a saída lateral, [M/T]
 V' - vazão de vapor, esgotamento, [M/T]
 q_F - reta da alimentação
 q_S, q_{S1}, q_{S2} - reta da saída lateral
 R_D - refluxo operacional da coluna
 R_{DM} - refluxo mínimo da coluna
 ROE - reta de operação do esgotamento
 ROR - reta de operação da retificação
 ROR_M - reta de operação da retificação na condição de refluxo mínimo
 $ROSL, ROS_1, ROS_2$ - reta de operação da saída lateral
 $ROSL_M$ - reta de operação da saída lateral na condição de refluxo mínimo
 x - fração molar do componente mais volátil, fase líquida, [-]
 x_B - fração molar do componente mais volátil na fase líquida, produto de fundo, [-]
 x_D - fração molar do componente mais volátil na fase líquida, destilado, [-]
 x_F - fração molar do componente mais volátil na fase líquida, alimentação, [-]
 x_L, x_{S1}, x_{S2} - fração molar do componente mais volátil na fase líquida, saída lateral, [-]
 x_n - fração molar do componente mais volátil na fase líquida, retificação, [-]
 x_m - fração molar do componente mais volátil na fase líquida, esgotamento, [-]
 x_1 - fração molar do componente mais volátil na fase líquida, conforme Equação 7, [-]
 x_2 - fração molar do componente mais volátil na fase líquida, conforme Figura 4, [-]
 x' - fração molar do componente mais volátil na fase líquida, interseção q_F e curva de equilíbrio, [-]
 y - fração molar do componente mais volátil, fase vapor, [-]
 y_{n+1} - fração molar do componente mais volátil na fase vapor, retificação, [-]
 y_{m+1} - fração molar do componente mais volátil na fase vapor, esgotamento, [-]

y' - fração molar do componente mais volátil, fase vapor, interseção q_F e curva de equilíbrio, [-]

REFERÊNCIAS

- FOUST, A.S., WENZEL, L.A., CLUMP, C.W., ANDERSEN, L.B. (1980), Principles of Unit Operations, 2nd edition. John Wiley & Sons.
- McCABE, W.L., SMITH, J.C., HARRIOT, T.P. (1993), Unit Operations of Chemical Engineering, 5th edition. McGraw-Hill International Editions.
- MOTTA LIMA, O.C., FARIA, S.H.B., AGOSTINI, E.E., GONZALEZ, R.S., SILVA, H.R.V.R. (2012), “Metodologia para a Resolução do Refluxo Mínimo em Coluna de Destilação com Múltiplas Alimentações e Saídas Laterais”. Anais em CD do COBEQ 2012, Búzios-RJ, 1-10.
- MOTTA LIMA, O.C., PEREIRA, N.C. (2007), Destilação - Apostila da disciplina Operações Unitárias II. Publicação Interna - DEQ/UEM, Maringá-PR.
- PERRY, R.H., GREEN, D.W. (1984), Perry's Chemical Engineers' Handbook. 6th edition, McGraw-Hill, New York.
- SCHEIMAN, A.D. (1969) Find minimum reflux by heat balance. Hydrocarbon Processing, p. 187-194, September 1969.