

# Destilação Binária por Estágios

Prof. Rodolfo Rodrigues  
Universidade Federal do Pampa

BA310 – Operações Unitárias II  
Curso de Engenharia Química  
Campus Bagé

21 de agosto de 2018



# Introdução



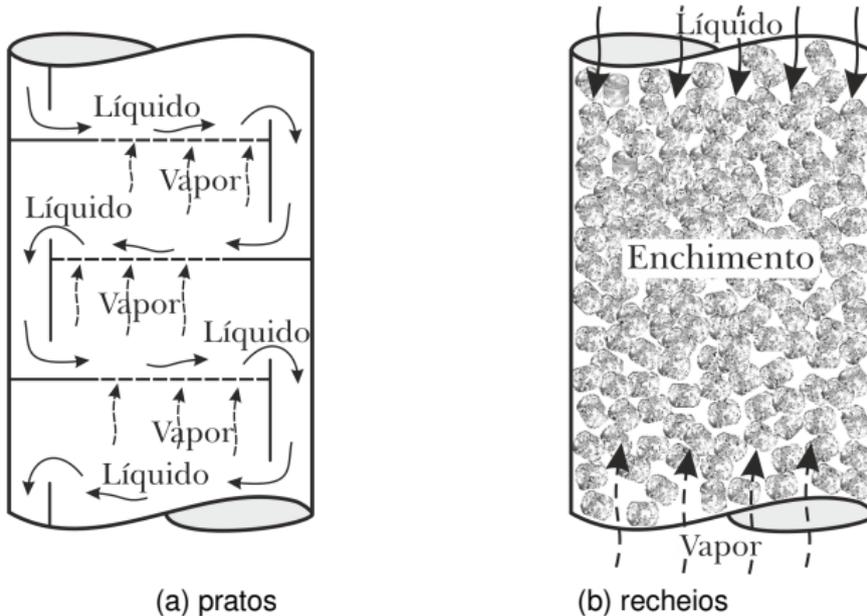
# Introdução

## Destilação por Estágios

- Nesse processo, os estágios de equilíbrio são organizados em um reservatório cilíndrico sob pressão controlada: **coluna** ou **torre de destilação**;
- Na coluna circulam 2 correntes em contracorrente e contato permanente: **vapor ascendente** e **líquido descendente**;
- Os internos das torres podem ser de 2 tipos principais: **pratos** e **recheios**.



# Destilação por Estágios



**Figura 1:** Tipos de internos de colunas: (a) pratos e (b) recheios.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

# Destilação por Estágios

**Tabela 1:** Operações de destilação binária comerciais representativas.

Binary Mixture	Average Relative Volatility	Number of Trays	Typical Operating Pressure, psia	Reflux-to-Minimum-Reflux Ratio
1,3-Butadiene/vinyl acetylene	1.16	130	75	1.70
Vinyl acetate/ethyl acetate	1.16	90	15	1.15
<i>o</i> -Xylene/ <i>m</i> -xylene	1.17	130	15	1.12
Isopentane/ <i>n</i> -pentane	1.30	120	30	1.20
Isobutane/ <i>n</i> -butane	1.35	100	100	1.15
Ethylbenzene/styrene	1.38	34	1	1.71
Propylene/propane	1.40	138	280	1.06
Methanol/ethanol	1.44	75	15	1.20
Water/acetic acid	1.83	40	15	1.35
Ethylene/ethane	1.87	73	230	1.07
Acetic acid/acetic anhydride	2.02	50	15	1.13
Toluene/ethylbenzene	2.15	28	15	1.20
Propane/1,3-butadiene	2.18	40	120	1.13
Ethanol azeotrope/water	2.21	60	15	1.35
Isopropanol/water	2.23	12	15	1.28
Benzene/toluene	3.09	34	15	1.15
Methanol/water	3.27	60	45	1.31
Cumene/phenol	3.76	38	1	1.21
Benzene/ethylbenzene	6.79	20	15	1.14
HCN/water	11.20	15	50	1.36
Ethylene oxide/water	12.68	50	50	1.19
Formaldehyde/methanol	16.70	23	50	1.17
Water/ethylene glycol	81.20	16	4	1.20

Fonte: Henley, Seader & Roper (2011).

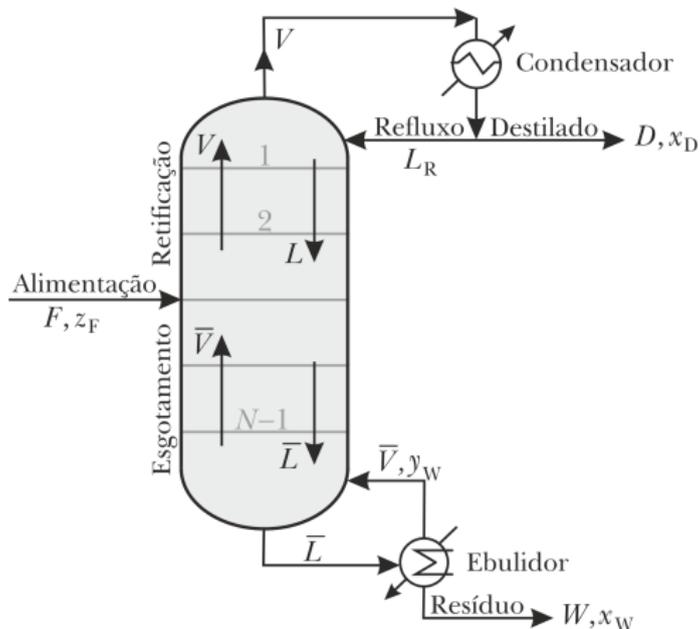
# Introdução

## Destilação por Estágios

- A corrente líquida descendente é requerida para o *enriquecimento* do vapor que sobe;
- Esta corrente é garantida pelo *refluxo* de parte do destilado (**condensador**) que é obtido no topo;
- Do mesmo modo, para promover o *esgotamento* do líquido no fundo da coluna, este é parcialmente vaporizado (**refervedor**) e reenviado a coluna.



# Destilação por Estágios



**Figura 2:** Esquema de uma coluna de destilação de pratos.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

# Dimensionamento de Colunas

## São 3 passos:

- 1 Passo 1:** Levantamento de dados de **equilíbrio de fases** (ELV) e demais propriedades;
- 2 Passo 2:** Determinação do **nº de estágios teóricos** para uma dada separação desejada ou a partir de uma coluna já existente, determinar a separação que se pode obter;
- 3 Passo 3:** Determinação o **nº de estágios reais** utilizando o conceito de eficiência de pratos ou global aos estágios teóricos;



# Dimensionamento de Colunas

## 1 Modelo Rigoroso:

- Equações MESH (Simuladores de processos);

## 2 Modelo Reduzido:

- Método de Lewis: Método algébrico (ou analítico);
- **Método de McCabe-Thiele (1925)\*: Método gráfico;**
- Método de Ponchon-Savarit: Método gráfico.

\*McCabe, W. L.; Thiele, E. W. Graphical design of fractionating columns. *Ind. Eng. Chem.* v. 17, n. 6, p. 605–611, 1925. [▶ DOI](#)

# Método de McCabe-Thiele



# Método de McCabe-Thiele

## Hipóteses:

- 1 Vazões de vapor e líquido são constantes em uma mesma seção da coluna (CMO, *constant molar overflow*);
- 2 Coluna é adiabática;
- 3 Variações de calor sensível são desprezíveis diante de variações de calor latente;
- 4 Entalpia de mistura é desprezível e
- 5 Entalpias de vaporização das espécies e da mistura são constantes.

# Método de McCabe-Thiele

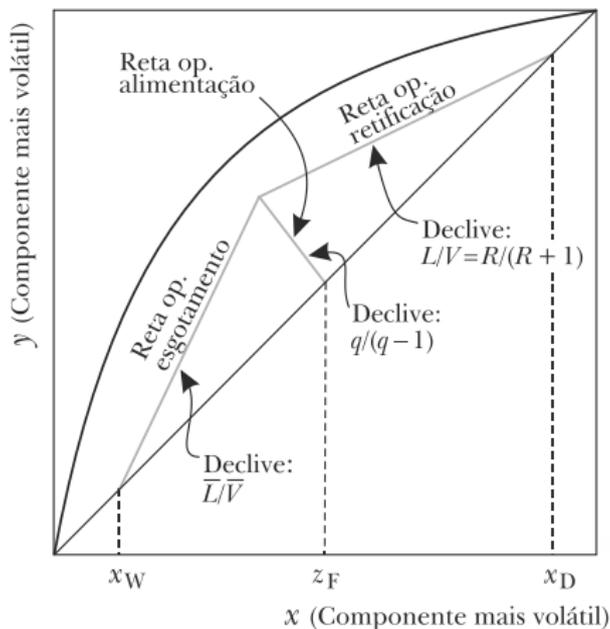
O **método de McCabe-Thiele** se baseia na resolução gráfica de equações de balanço de massa e energia das:

- **Seção de retificação** (ou **enriquecimento**);
- **Seção de esgotamento** (ou **empobrecimento**) e
- **Seção de alimentação** (ou **carga**),

em um **diagrama x-y** (relação de equilíbrio).



# Método de McCabe-Thiele



**Figura 3:** Linha de equilíbrio líquido-vapor e linhas de operação do método de McCabe-Thiele.

# Método de McCabe-Thiele

## Seção de Alimentação

**Linha de operação de alimentação** ou “linha- $q$ ”:

$$y = \left( \frac{q}{q-1} \right) x - \frac{z}{q-1} \quad (1)$$

onde:

$$q = \frac{\bar{L} - L}{F} = \frac{h_V - h_F}{h_V - h_L} \quad (2)$$



# Método de McCabe-Thiele

## Condições Térmicas da Carga

**a**  $q > 1$ : líquido subresfriado

$$q = 1 + \frac{c_{p,L}(T_b - T_F)}{\Delta h^{vap}} \quad (3)$$

**b**  $q = 1$ : líquido saturado

**c**  $0 < q < 1$ : líquido e vapor

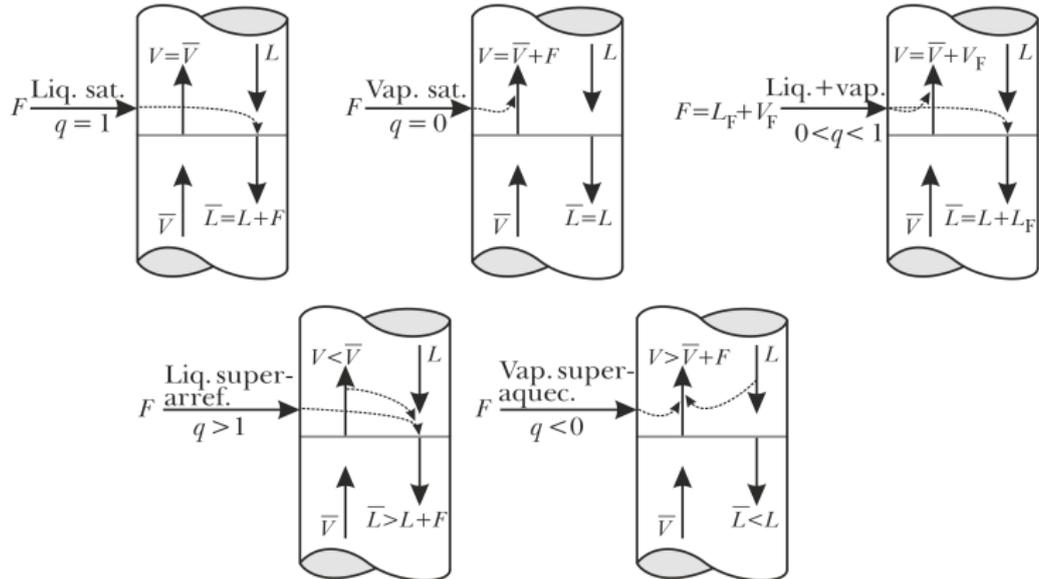
$$q = 1 - f \quad (4)$$

**d**  $q = 0$ : vapor saturado

**e**  $q < 0$ : vapor superaquecido

$$q = \frac{c_{p,V}(T_d - T_F)}{\Delta h^{vap}} \quad (5)$$

# Método de McCabe-Thiele

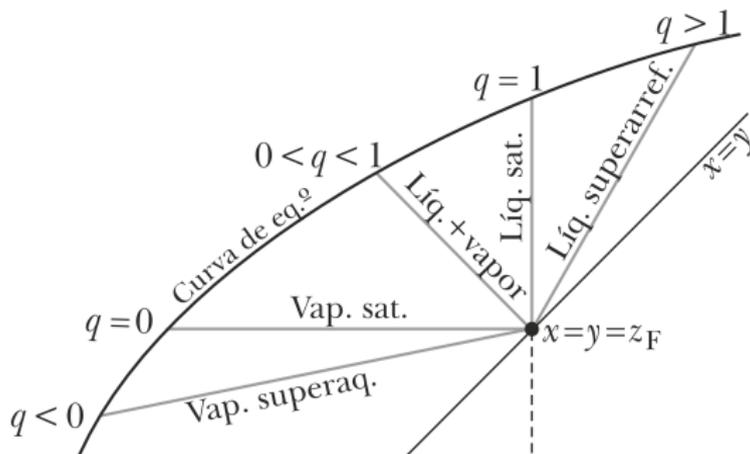


**Figura 4:** Valores possíveis de  $q$  e suas relações com as vazões de líquido e de vapor.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).



# Método de McCabe-Thiele



**Figura 5:** Efeito das condições térmicas da carga no coeficiente angular da linha- $q$ .

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

# Método de McCabe-Thiele

**Tabela 2:** Condições térmicas da carga.

Estado	$q$	$q/(q - 1)$	$T$
Líquido subresfriado	$>1$	$>1$	$< T_b$
Líquido saturado	1	$\infty$	$T_b$
Líquido e vapor	entre 0 e 1	$<1$	entre $T_b$ e $T_d$
Vapor saturado	0	0	$T_d$
Vapor superaquecido	$<0$	entre 0 e 1	$>T_d$

**Legenda:**  $T_b$  é a temperatura do ponto de bolha e  $T_d$  é a temperatura do ponto de orvalho (“dew”).



# Método de McCabe-Thiele

## Seções de Retificação e Esgotamento

**Linha de operação de retificação:**

$$y = \left( \frac{R}{R+1} \right) x + \frac{x_D}{R+1} \quad (6)$$

onde  $R = L/D$  é a razão de refluxo.

**Linha de operação de esgotamento:**

$$y = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} x - \frac{W}{\bar{V}} x_W = \left( \frac{R_B + 1}{R_B} \right) x - \frac{x_W}{R_B} \quad (7)$$

onde  $R_B = \bar{V}/W$  é a razão de *boilup*.



# Método de McCabe-Thiele

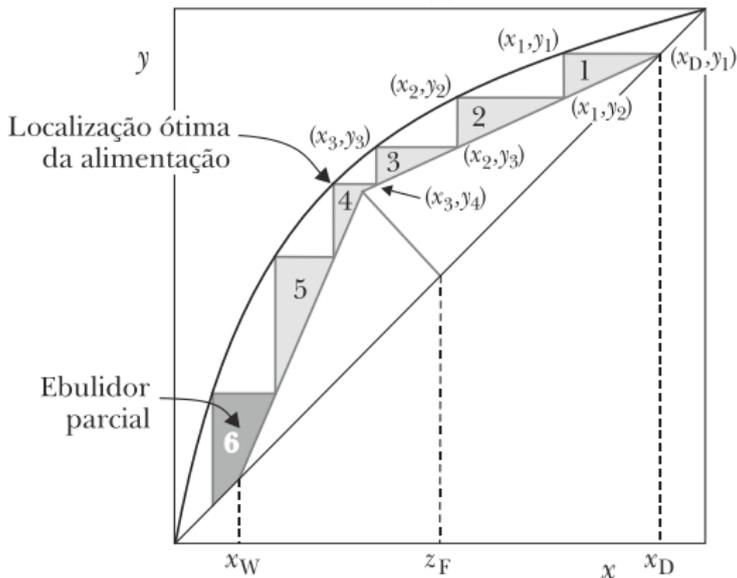
## Passo-a-passo:

- 1 No diagrama  $x$ - $y$ , marcar  $x_W$ ,  $z$  e  $x_D$  na linha de  $45^\circ$ ;
- 2 Traçar a **linha- $q$**  a partir de  $z$  e do coef. angular  $(q/q - 1)$ ;
- 3 Traçar a **linha de retificação** a partir de  $x_D$  e do coef. linear  $(x_D/R + 1)$ ;
- 4 Traçar a **linha de esgotamento** a partir de  $x_W$  e do ponto de intersecção entre as linhas  $q$  e de retificação;
- 5 O nº de degraus traçados de  $x_D$  até coincidir ou ultrapassar  $x_W$  (do topo para o fundo da coluna) é o **nº de estágios teóricos**,  $N$ ;
- 6 O estágio onde a prolongação da linha- $q$  primeiro atravessar é o **estágio ótimo para carga**,  $N_F$ .

**Obs.:** O refeedor conta como um estágio teórico quando for um refeedor parcial.



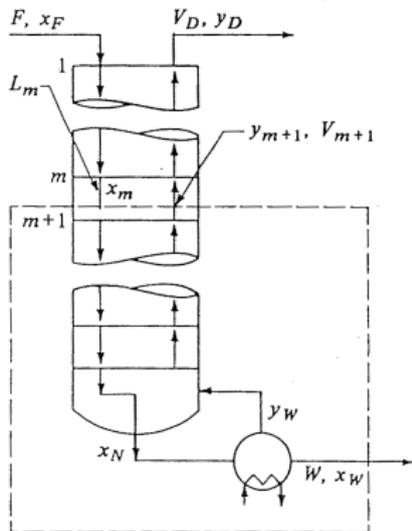
# Método de McCabe-Thiele



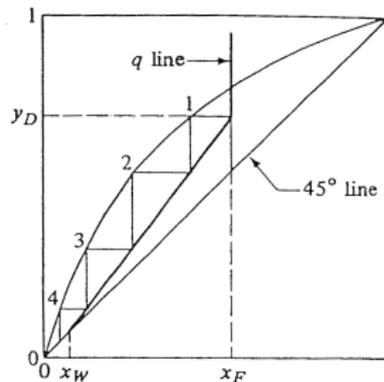
**Figura 6:** Determinação do nº de estágios teóricos e do estágio ótimo para carga pelo método de McCabe-Thiele.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

# Método de McCabe-Thiele



(a) esquema da coluna



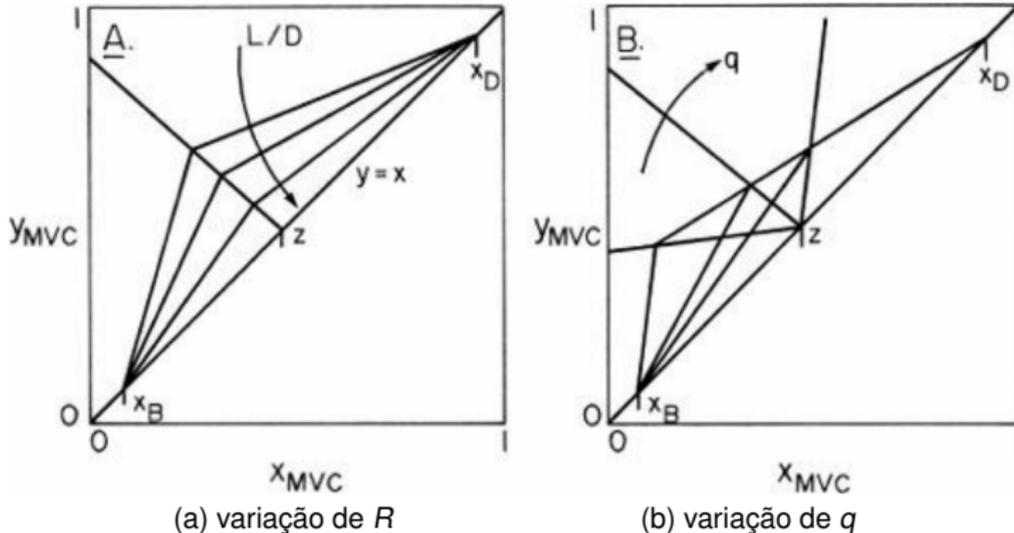
(b) diagrama

**Figura 7:** Balanço material e linhas de operação para coluna de esgotamento (*stripping*): (a) correntes na coluna (b) linhas de operação e equilíbrio. Mesmo raciocínio vale para coluna de retificação.

Fonte: Geankoplis (2003).



# Método de McCabe-Thiele



**Figura 8:** Interseção das linhas de operação: (a) modificando a razão de refluxo com  $q$  constante; (b) modificando  $q$  com razão de refluxo constante. Razão de *boilup* varia.

Fonte: Wankat (2012).

# Condições Limites de Operação



# Condições Limites de Operação

## ■ Refluxo Total

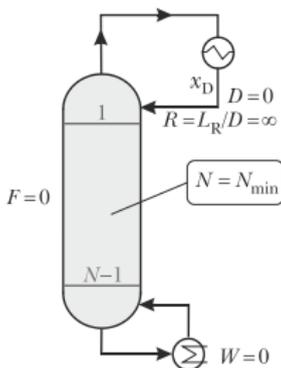
$$R \rightarrow \infty$$

$$N \rightarrow N_{\min}$$

- Na prática, significa que a coluna opera sem retirada de produto de topo.
- **Graficamente** acontece quando a linha de retificação coincide com a linha de 45°.

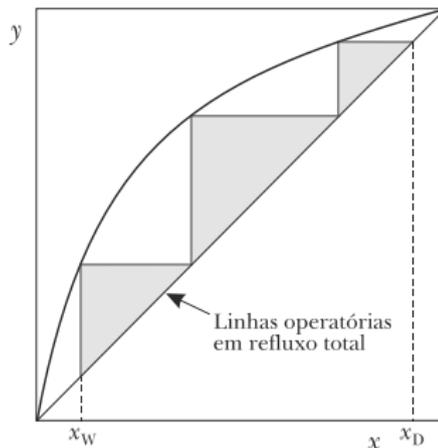


# Condições Limites de Operação



Refluxo total:  
 $F = D = W = 0$   
 $R = \infty$   
 $N = N_{\min}$

(a) refluxo total



(b) nº mínimo de estágios

**Figura 9:** Número mínimo de estágios teóricos na condição de refluxo total.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

## Condições Limites de Operação

### ■ Refluxo Mínimo

$$R \rightarrow R_{\min}$$

$$N \rightarrow \infty$$

$$R_{\min} = \frac{x_D - y^*}{y^* - x^*} \quad (8)$$

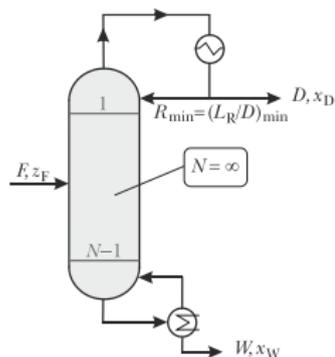
**Ponto de estrangulamento** ( $x^*$ ,  $y^*$ ): Quando os triângulos formados pelas linhas de operação e de  $45^\circ$  tocam/tangenciam a curva de equilíbrio.

### Custo Total Mínimo (Refluxo Ótimo)

$$R_{\text{Op}} \approx 1,2 \cdot R_{\min} \quad (9)$$

pa

# Condições Limites de Operação

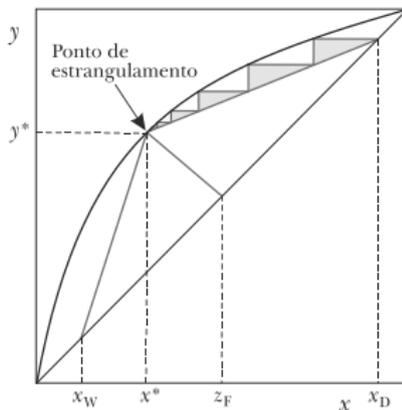


Refluxo mínimo:

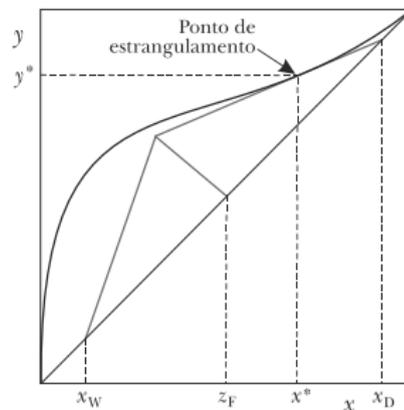
$$R = R_{\min}$$

$$N = \infty$$

(a) refluxo mínimo



(b) mistura ideal

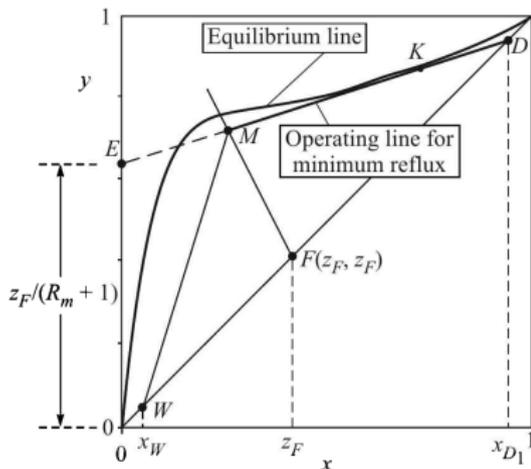


(c) mistura não-ideal

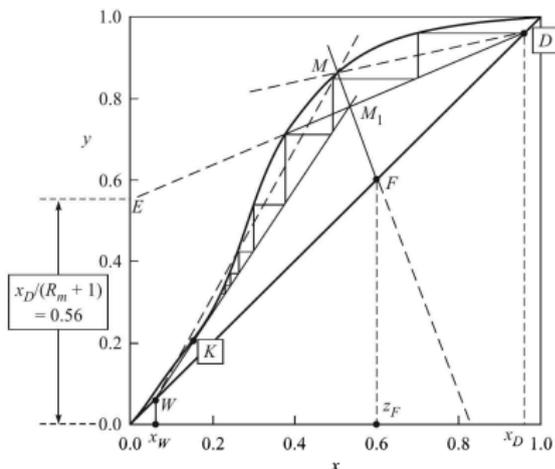
**Figura 10:** Número infinito de estágios teóricos na condição refluxo mínimo.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

# Condições Limites de Operação



(a) seção de retificação

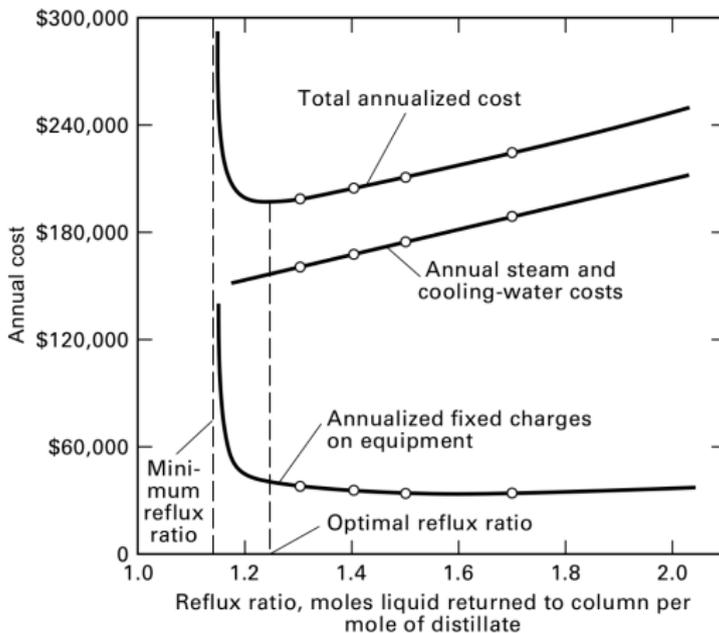


(b) seção de esgotamento

**Figura 11:** Ponto de estrangulamento,  $K$ , na linha de operação da (a) seção de retificação e (b) seção de esgotamento.

Fonte: Dutta (2007).

# Condições Limites de Operação



**Figura 12:** Razão de refluxo ótima para uma operação de destilação representativa.

Fonte: Henley, Seader & Roper (2011).



# Eficiência Global e de Prato



## Eficiência Global e de Prato

- Na prática, L-V que deixam um estágio **não** estão em equilíbrio devido a:
  - Tempo insuficiente de contato entre as fases e
  - Mistura deficiente
- O conceito de **eficiência** relaciona um **estágio de equilíbrio** (ideal) com o respectivo **estágio real**;
- **Eficiência global**,  $E_0$ , se refere globalmente à coluna e **eficiência de prato** ou **de Murphree**,  $E_M$ , se refere a cada prato individualmente.



# Eficiência Global e de Prato

## Eficiência de Murphree

- Eficiência de Murphree relativa à fase vapor,  $E_{MV}$ :

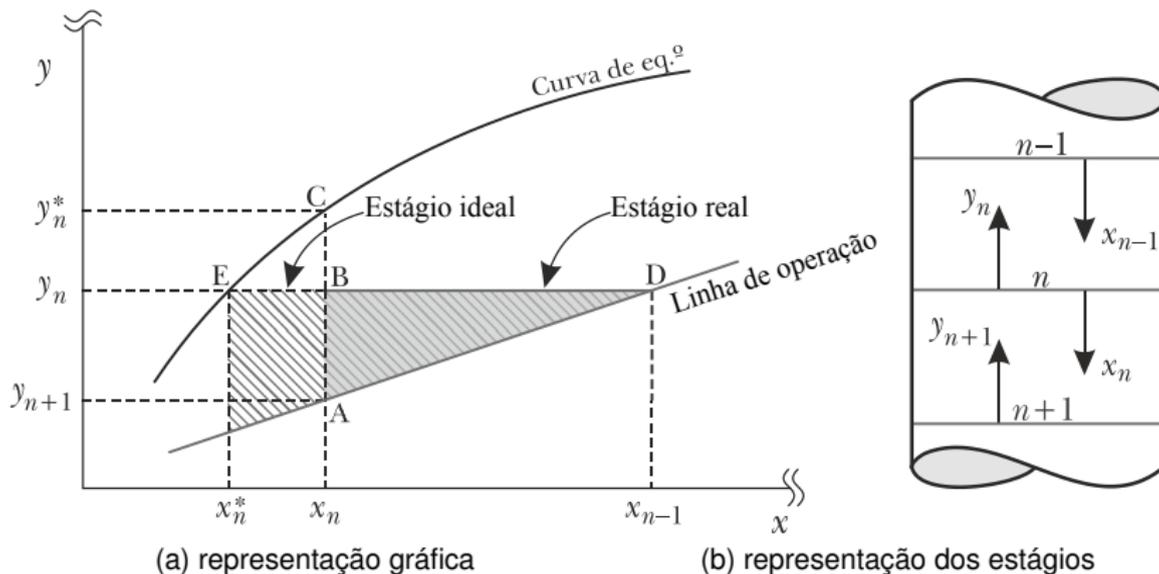
$$E_{MV} = \frac{\text{Enriquecimento real do vapor}}{\text{Enriquecimento ideal do vapor}} = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}} \quad (10)$$

- Eficiência de Murphree relativa à fase líquida,  $E_{ML}$ :

$$E_{ML} = \frac{\text{Empobrecimento real do líquido}}{\text{Empobrecimento ideal do líquido}} = \frac{x_n - x_{n+1}}{x_n^* - x_{n+1}} \quad (11)$$



# Eficiência Global e de Prato



**Figura 13:** Eficiência de prato ou de Murphree: (a) representação gráfica entre estágio ideal e real e (b) representação dos estágios ideais de uma coluna.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

# Eficiência Global e de Prato

## Eficiência de Murphree

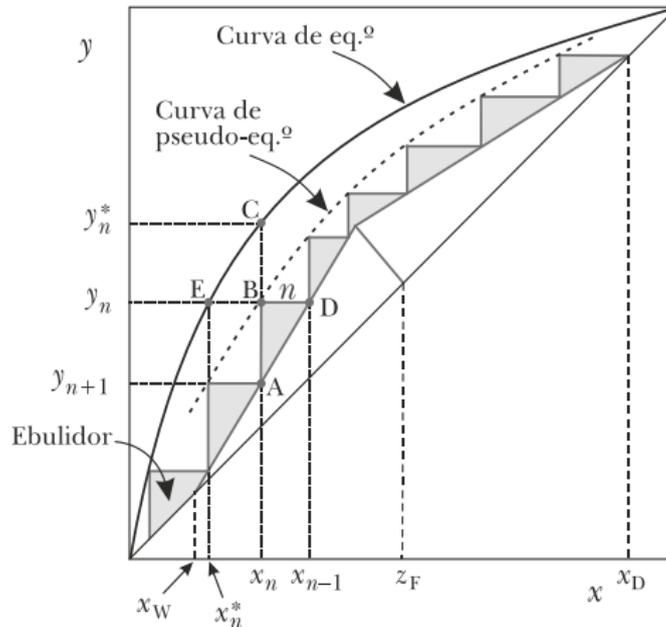
- Graficamente, tem-se:

$$E_{MV} = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{AC}} \quad (12)$$

$$E_{ML} = \frac{x_n - x_{n+1}}{x_n^* - x_{n+1}} = \frac{\overline{DB}}{\overline{DE}} \quad (13)$$

- Para  $E_{ML}$ , começar a determinação dos pratos a **partir do topo da coluna**;
- Para  $E_{MV}$ , começar a determinação dos pratos a **partir do fundo da coluna**;
- O refeedor corresponde a um estágio de equilíbrio (100% de eficiência).

# Eficiência Global e de Prato



**Figura 14:** Eficiência de Murphree e construção de McCabe-Thiele.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

# Eficiência Global e de Prato

## Eficiência Global

- Define-se:

$$E_0 = \frac{N^{\circ} \text{ de estágios ideais}}{N^{\circ} \text{ de estágios reais}} = \frac{N_{\text{ideal}}}{N_{\text{real}}} < 1 \quad (14)$$

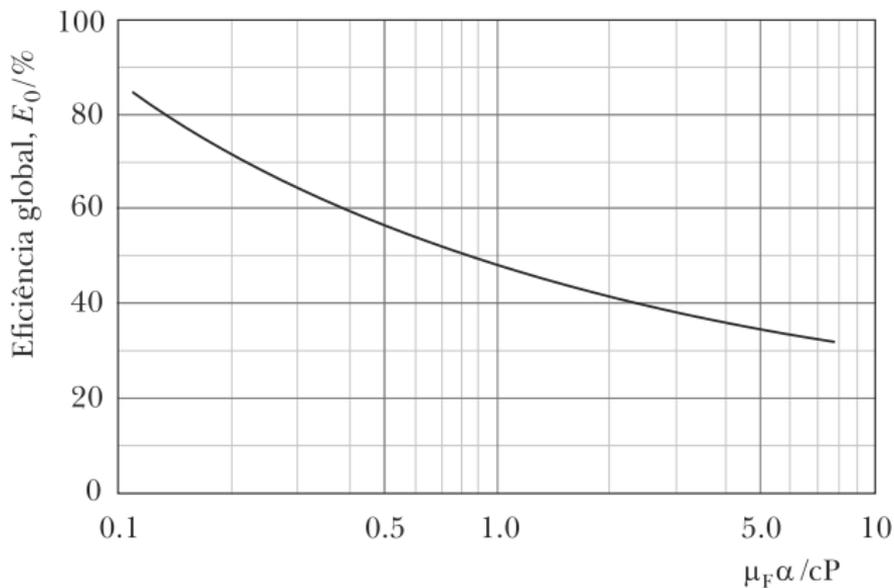
- Pela correlação de O'Connell, tem-se:

$$E_0 = 49,2 \cdot (\mu\alpha)^{-0,245} \quad (15)$$

válido para  $0,1 < \mu < 10$  cP.



# Eficiência Global e de Prato



**Figura 15:** Correlação de O'Connell para a eficiência global (%) de colunas de pratos de campânulas em função do produto da viscosidade da carga,  $\mu$  (cP), com a volatilidade,  $\alpha$ , do componente mais volátil relativo ao menos volátil.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

## Referências

- AZEVEDO, E. G.; ALVES, A. M. **Destilação por Andares: Misturas Binárias**. In: \_\_\_\_\_. (Org.). *Engenharia de Processos de Separação*. 2. ed. Lisboa: IST Press, 2013, p. 99-227.
- DUTTA, B. K. **Continuous Multistage Fractionation of Binary Mixtures**. In: \_\_\_\_\_. (Org.). *Principles of Mass Transfer and Separation Process*. New Delhi: Prentice Hall of India, 2007, p. 359-386.
- GEANKOPLIS, C. J. **Distillation with Reflux and McCabe-Thiele Method**. In: \_\_\_\_\_. (Org.). *Transport Processes and Separation Process Principles (Includes Unit Operations)*. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003, p. 706-724.

## Referências

- HENLEY, E. J.; SEADER, J. D.; ROPER, D. K. **Binary Distillation**. In: \_\_\_\_\_. (Org.). *Separation Process Principles*. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011, p. 280-322.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Continuous Distillation with Reflux**. In: \_\_\_\_\_. (Org.). *Unit Operations of Chemical Engineering*. 7. ed. Boston: McGraw-Hill, 2005, p. 666-701.
- WANKAT, P. C. **Column Distillation: Internal Stage-by-Stage Balances**. In: \_\_\_\_\_. (Org.). *Separation Process Engineering Includes Mass Transfer Analysis*. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2012, p. 101-181.

