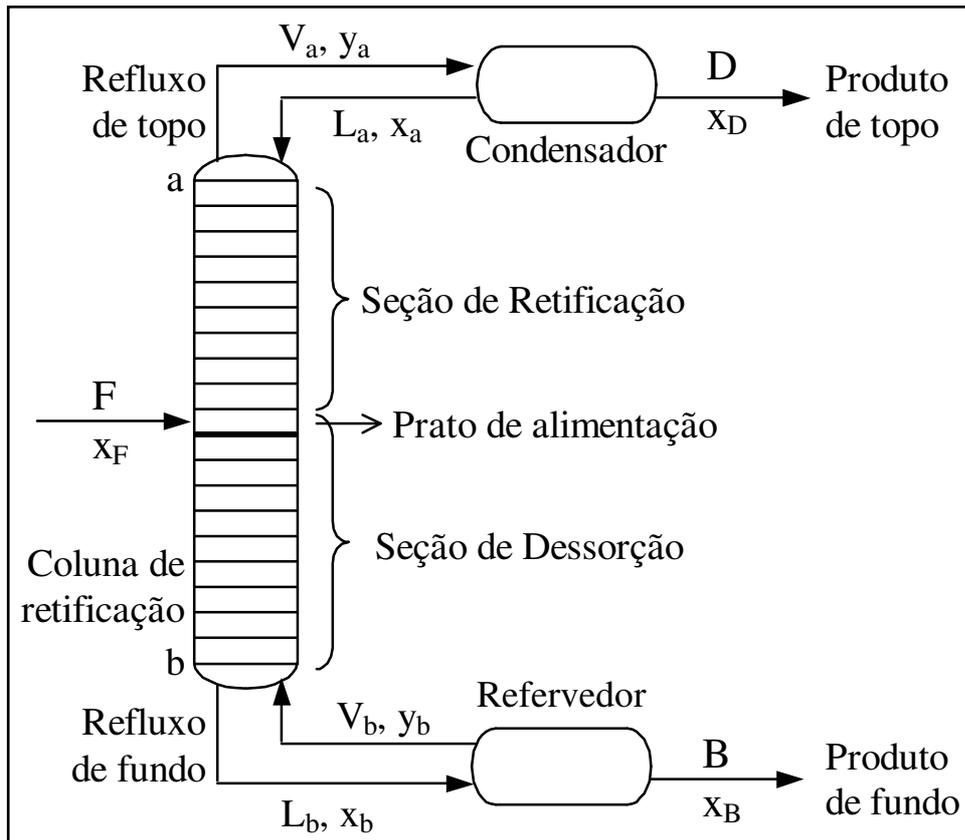


## DESTILAÇÃO COM RETIFICAÇÃO (misturas binárias)



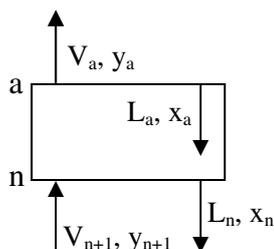
### 1) BALANÇO DE MASSA:

Global:  $F = D + B$  (1)  $F \cdot x_F = D \cdot x_D + B \cdot x_B$  (2)

Caldeira:  $L_b = B + V_b$  (3)  $L_b \cdot x_b = B \cdot x_B + V_b \cdot y_b$  (4)

Condensador:  $V_a = D + L_a$  (5)  $V_a \cdot y_a = D \cdot x_D + L_a \cdot x_a$  (6)

**Seção de Retificação:** inclui todos os pratos acima do prato de alimentação.



$$V_{n+1} + L_a = V_a + L_n \quad \therefore \quad V_{n+1} = V_a - L_a + L_n$$

$$\text{De (5): } V_a - L_a = D \quad \therefore \quad V_{n+1} = D + L_n \quad (7)$$

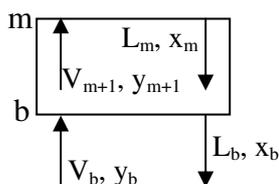
$$V_{n+1} \cdot y_{n+1} + L_a \cdot x_a = V_a \cdot y_a + L_n \cdot x_n \quad \therefore \quad V_{n+1} \cdot y_{n+1} = V_a \cdot y_a - L_a \cdot x_a + L_n \cdot x_n$$

$$\text{De (6): } V_a \cdot y_a - L_a \cdot x_a = D \cdot x_D \quad \therefore \quad V_{n+1} \cdot y_{n+1} = D \cdot x_D + L_n \cdot x_n$$

$$y_{n+1} = \frac{D \cdot x_D}{D + L_n} + \frac{L_n \cdot x_n}{D + L_n} \quad (8)$$

(LOR – Linha de Operação da Retificação)

**Seção de Dessorção:** inclui o prato de alimentação e todos os pratos abaixo dele.



$$V_{m+1} + L_b = V_b + L_m \quad \therefore \quad V_{m+1} = V_b - L_b + L_m$$

$$\text{De (3): } V_b - L_b = -B \quad \therefore \quad V_{m+1} = -B + L_m \quad (9)$$

$$V_{m+1} \cdot y_{m+1} + L_b \cdot x_b = V_b \cdot y_b + L_m \cdot x_m \quad \therefore \quad V_{m+1} \cdot y_{m+1} = V_b \cdot y_b - L_b \cdot x_b + L_m \cdot x_m$$

$$\text{De (4): } V_b \cdot y_b - L_b \cdot x_b = B \cdot x_B \quad \therefore \quad V_{m+1} \cdot y_{m+1} = -B \cdot x_B + L_m \cdot x_m$$

$$y_{m+1} = \frac{B \cdot x_B}{-B + L_m} + \frac{L_m \cdot x_m}{-B + L_m} \quad (10)$$

(LOD – Linha de Operação da Dessorção)

A equação (8) é denominada Linha de Operação da Retificação (LOR) e mostra a relação entre as composições de equilíbrio de dois pratos consecutivos da Seção de Retificação. A equação relaciona  $y_{n+1}$  (composição do vapor do prato n+1) e  $x_n$  (composição do líquido do prato n). O prato n+1 é o prato abaixo do prato n.

A equação (10) é denominada Linha de Operação da Dessorção (LOD) e mostra a relação entre as composições de equilíbrio de dois pratos consecutivos da Seção de Dessorção. A equação relaciona  $y_{m+1}$  (composição do vapor do prato m+1) e  $x_m$  (composição do líquido do prato m). O prato m+1 é o prato abaixo do prato m.

As equações da LOR e da LOD mostram que os estados de equilíbrio líquido-vapor nos diversos pratos na coluna estão relacionados. O equilíbrio líquido-vapor em cada prato é o resultado do equilíbrio térmico entre os fluxos que entram no prato (líquido que vem do prato acima e vapor que vem do prato abaixo). As composições de equilíbrio  $x$  e  $y$  são função da temperatura de equilíbrio do prato.

## 2) MÉTO DE McCABE-THIELE:

Quando as Linhas de Operação representadas pelas equações (8) e (10) são traçadas em um diagrama  $y$ - $x$  junto com a Curva de Equilíbrio para a mistura, o Método de McCabe-Thiele permite determinar o número de pratos necessários para se obter a diferença de concentração definida quer na Seção de Retificação, quer na Seção de Dessorção.

Aproximações do Método McCabe-Thiele: os fluxos de líquido (descendente) e de vapor (ascendente) são admitidos constantes em todos os pratos de uma mesma seção da coluna. Assim, na Seção de Retificação, temos fluxos constantes  $V$  e  $L$  e na Seção de Dessorção temos fluxos constantes  $\bar{V}$  e  $\bar{L}$ .

**Razão de Refluxo** – No topo da coluna, o vapor (com a vazão  $V_a$ ) flui para um condensador. Parte do condensado é retirado como produto de topo (com a vazão  $D$ ) e o restante é refluxado para a coluna (com a vazão  $L_a$ ). A relação entre as vazões de líquido que retorna para a coluna e produto de topo é denominada

$$\text{Razão de Refluxo: } R_D = \frac{L_a}{D}$$

Como o Método de McCabe-Thiele considera que as vazões de líquido e de vapor são constantes em cada Seção da coluna, na Seção de Retificação  $L = L_a$  e:  $R_D = \frac{L}{D} = \frac{V - D}{D}$

$$\text{Na equação (8): } y_{n+1} = \frac{D \cdot x_D}{D + L_n} + \frac{L_n \cdot x_n}{D + L_n} = \frac{D \cdot x_D}{D + L} + \frac{L \cdot x_n}{D + L}$$

Dividindo o numerador e o denominador de cada termo por  $D$ :

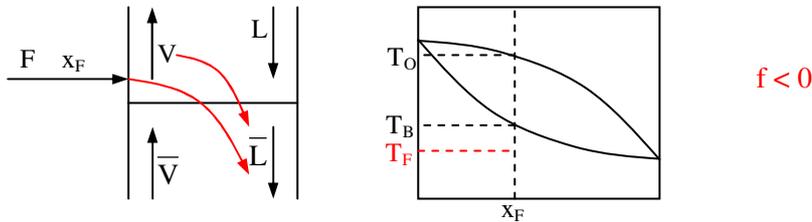
$$y_{n+1} = \frac{(D/D) \cdot x_D}{(D/D) + (L/D)} + \frac{(L/D) \cdot x_n}{(D/D) + (L/D)}$$

$$\boxed{y_{n+1} = \frac{x_D}{R_D + 1} + \frac{R_D \cdot x_n}{R_D + 1}} \quad (11) \quad (\text{LOR – Linha de Operação da Retificação})$$

### Prato de alimentação:

A alimentação pode ser realizada com a mistura em cinco estados físicos diferentes, que podem ser representados, matematicamente, por um fator representado por  $f$ , definido como o número de moles de vapor escoando na Seção de Retificação que resultam da introdução de cada mol de alimentação. Os estados possíveis de alimentação são:

1º caso: alimentação é líquida, em uma temperatura inferior à temperatura de bolha (líquido sub-resfriado):



Toda a vazão de alimentação é líquida e escoará para a Seção de Dessorção, sem gerar vapor para a Seção de Retificação. Como a alimentação entra a uma temperatura baixa, para atingir o equilíbrio térmico, trocará calor com o fluxo de vapor, causando a condensação de parte desse fluxo, assim, na Seção de Retificação, o fluxo de vapor será menor que o fluxo de vapor da Seção de Dessorção. Dessa forma, a alimentação não gerará vapor na Seção de Retificação, ao contrário irá diminuir o fluxo de vapor, e o fator  $f$  terá um valor negativo.

O fator  $f$  será calculado pela fórmula: 
$$f = \frac{C_{pL} \cdot (T_F - T_B)}{\lambda}$$

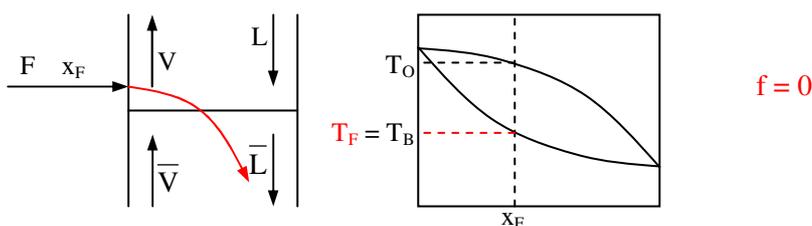
onde:  $C_{pL}$  ... calor específico da mistura no estado líquido

$T_F$  ... temperatura de alimentação

$T_B$  ... temperatura de bolha da mistura

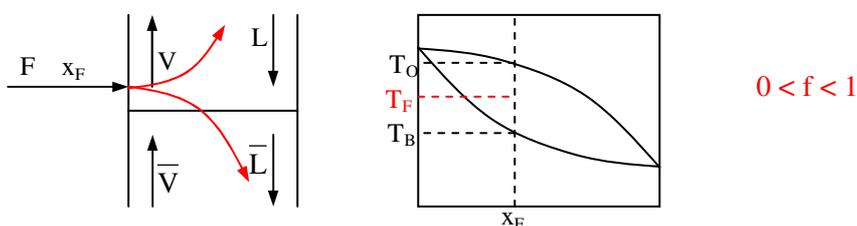
$\lambda$  ... calor latente molar da mistura

2º caso: alimentação é líquida, na temperatura de bolha (líquido saturado):



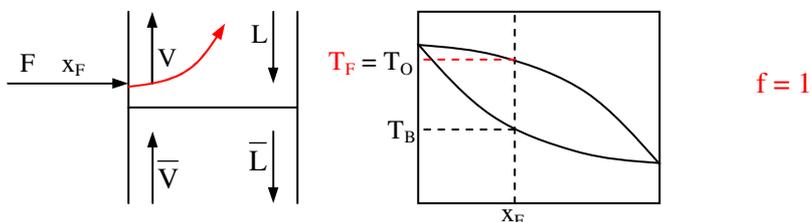
A vazão de alimentação é líquida, na temperatura de bolha e escoará na Seção de Dessorção, sem contribuir para o escoamento de vapor na Seção de Retificação, logo o fator  $f$  será zero.

3º caso: alimentação é uma mistura em equilíbrio de fases líquida e vapor:



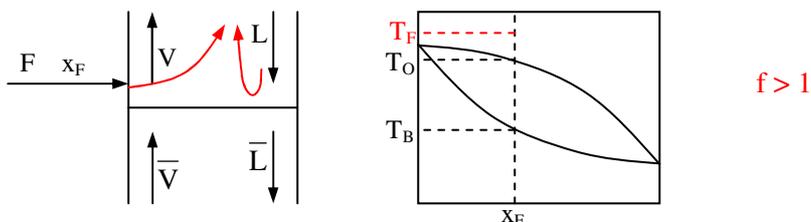
A parte da alimentação que constitui a fase líquida irá escoar na Seção de Dessorção e a parte da alimentação que constitui a fase vapor irá escoar na Seção de Retificação, na forma de vapor, logo o fator  $f$  será igual à fração de vapor na alimentação. Assim, se na alimentação tivermos 1/4 de vapor e 3/4 de líquido,  $f$  será igual a 1/4.

4º caso: alimentação é vapor, na temperatura de orvalho (vapor saturado):



A vazão de alimentação é vapor, na temperatura de orvalho e escoará na Seção de Retificação, gerando um mol de vapor para cada mol alimentado, logo o fator  $f$  será igual 1.

5º caso: alimentação é vapor, em uma temperatura superior à temperatura de orvalho (vapor superaquecido):



Toda a vazão de alimentação é vapor e escoará para a Seção de Retificação. Como a alimentação entra a uma temperatura alta, para atingir o equilíbrio térmico, trocará calor com o fluxo de líquido, causando a evaporação de parte desse fluxo, assim, na Seção de Retificação, o fluxo de vapor será maior que o fluxo de vapor da Seção de Dessorção. Dessa forma, na Seção de Retificação irá escoar mais de um mol de vapor, para cada mol alimentado e o fator  $f$  será maior que 1.

O fator  $f$  será calculado pela fórmula:  $f = 1 + \frac{C_{pV} \cdot (T_F - T_O)}{\lambda}$

onde:  $C_{pV}$  ... calor específico da mistura no estado de vapor

$T_F$  ... temperatura de alimentação

$T_O$  ... temperatura de orvalho da mistura

$\lambda$  ... calor latente molar da mistura

### Linha de alimentação:

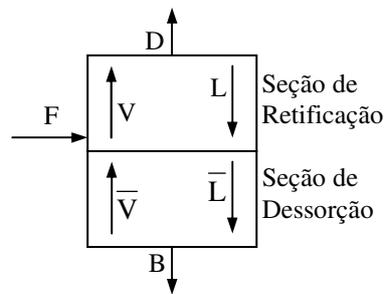
As vazões de líquido e de vapor são constantes em cada Seção da coluna. Entretanto, devido à introdução da alimentação, as vazões de líquido e de vapor mudam de uma Seção para outra.

Temos, então:

$$V = \bar{V} + f \cdot F \quad \therefore \quad V - \bar{V} = f \cdot F \quad (12)$$

$$\bar{L} = L + (1 - f) \cdot F \quad \therefore \quad \bar{L} - L = (1 - f) \cdot F \quad (13)$$

$$F + \bar{V} + L = V + \bar{L} \quad (14)$$



Na Seção de Retificação:  $V = L + D$  e  $V.y = L.x + D.x_D$  (15)

Na Seção de Dessorção:  $\bar{L} = \bar{V} + B$   $\therefore \bar{V} = \bar{L} - B$  e  $\bar{V}.y = \bar{L}.x - B.x_B$  (16)

Fazendo (15) – (16):  $(V - \bar{V}).y = (L - \bar{L}).x + D.x_D + B.x_B$

Das equações (2), (12) e (13):  $f.F.y = -(1-f).F.x + F.x_F$

$$\boxed{y = -\frac{(1-f).x}{f} + \frac{x_F}{f}} \quad (17) \quad (\text{LA} - \text{Linha de Alimentação})$$

### Determinação do número de pratos de uma coluna:

No projeto de uma coluna de destilação com retificação, serão dados: a vazão de alimentação (F), a composição da alimentação ( $x_F$ ), as composições desejadas dos produtos ( $x_D$  e  $x_B$ ), a razão de refluxo ( $R_D$ ) e o estado da alimentação (f). Com esses dados, pode-se determinar as equações da Linha de Operação da Retificação, Linha de Operação da Dessorção e Linha de Alimentação.

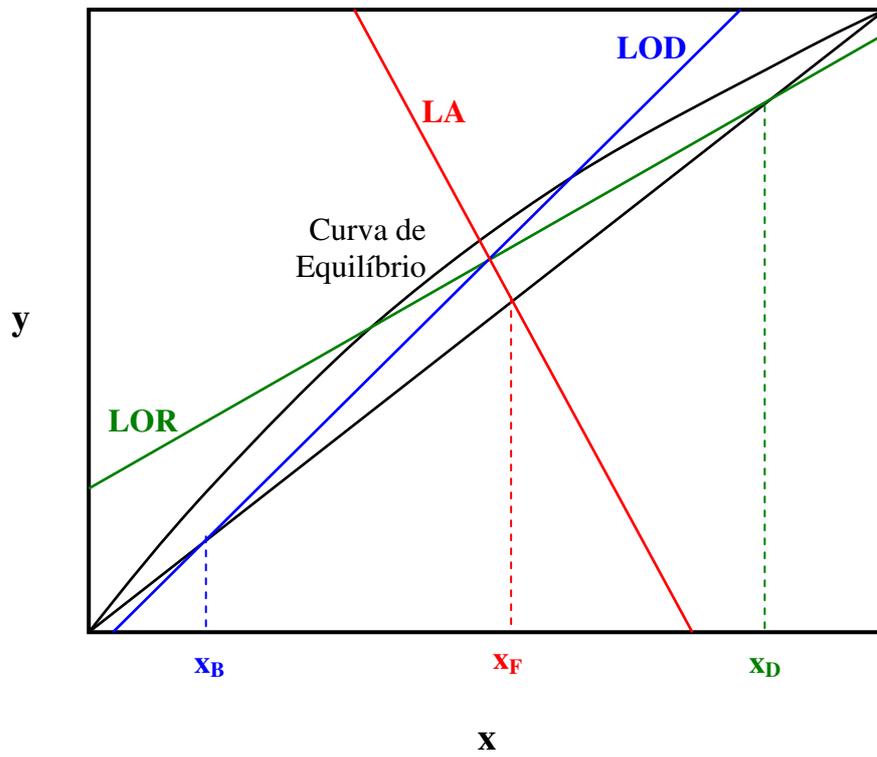
A Linha de Operação da Retificação sempre irá cruzar com a linha  $y=x$  no ponto ( $x_D$ ;  $x_D$ ). A Linha de Operação da Dessorção sempre irá cruzar com a linha  $y=x$  no ponto ( $x_B$ ;  $x_B$ ) e a Linha de Alimentação sempre irá cruzar com a linha  $y=x$  no ponto ( $x_F$ ;  $x_F$ ).

As Linhas de Operação representam as Seções da Coluna e a Linha de Alimentação está associada ao prato de alimentação. Como o prato de alimentação é a interface entre as duas Seções, as três linhas irão se cruzar num mesmo ponto.

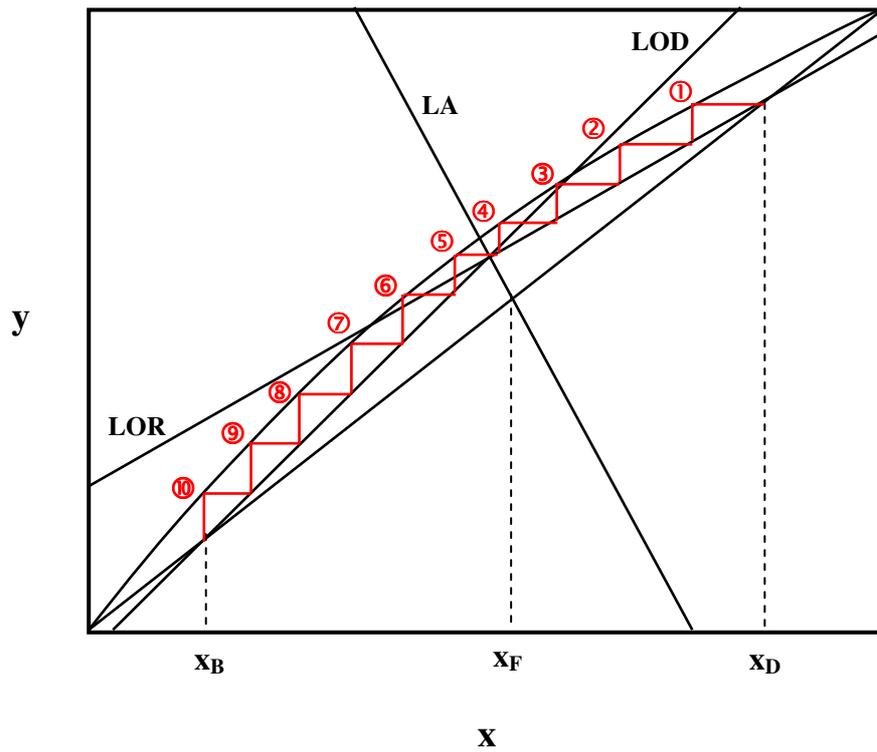
Representando as três linhas num diagrama  $yx$ , juntamente com a Curva de Equilíbrio, obtém-se o gráfico apresentado na próxima página.

A determinação do número de pratos e das composições de equilíbrio de cada prato é feita graficamente, utilizando-se as linhas representadas, da seguinte forma:

- 1) Em cada prato, deve-se determinar as composições das fases líquida e vapor,  $x$  e  $y$ .
- 2) No prato 1 (prato do topo), a composição do vapor,  $y_1$  é igual a  $x_D$ .
- 3) Determina-se, na curva de equilíbrio, a composição  $x_1$  correspondente a  $y_1$ .
- 4) Determina-se, na LOR, a composição  $y_2$  correspondente a  $x_1$ .
- 5) Determina-se, na curva de equilíbrio, a composição  $x_2$  correspondente a  $y_2$ .
- 6) Determina-se, sucessivamente, as composições  $x$  e  $y$ , na LOR e na curva de equilíbrio, até se obter um valor de  $x$  menor que o valor de  $x$  do ponto de interseção das três retas.
- 7) Passa-se, então, a utilizar a LOD para a determinação das composições  $y$ , ao invés da LOR.
- 8) Continua-se a determinar, sucessivamente, as composições  $x$  e  $y$ , na LOD e na curva de equilíbrio, até se obter um valor de  $x$  menor que  $x_B$ .
- 9) Cada ponto sobre a curva de equilíbrio representa um prato da coluna e as coordenadas  $x$  e  $y$  desses pontos representam as composições de equilíbrio de cada prato.



No gráfico a seguir, representa-se a determinação dos pratos e das composições de equilíbrio:



## EXERCÍCIO

Uma coluna de retificação deve ser projetada para separar 25.000 kg/h de uma mistura de 40% de benzeno e 60% de tolueno, fornecendo um produto de topo contendo 97% de benzeno e um produto de fundo contendo, no máximo, 2% de benzeno. Essas porcentagens são em peso. A razão de refluxo deve ser de 3,5 moles de retorno para a coluna para cada mol de produto de topo obtido. O calor latente molar para a mistura benzeno-tolueno da alimentação é 7.240 cal/mol. A volatilidade relativa é  $\alpha = 2,381$ .

- a) determinar as vazões de produto de topo e de produto de fundo;
- b) determinar o número de pratos, as composições de equilíbrio em cada prato e a posição do prato de alimentação se:
  - b.1) a mistura contém 2/3 de vapor e 1/3 de líquido;
  - b.2) a mistura está líquida na temperatura de bolha;
  - b.3) a mistura está líquida a 25°C ( $C_p = 0,44$  cal/g.°C).