



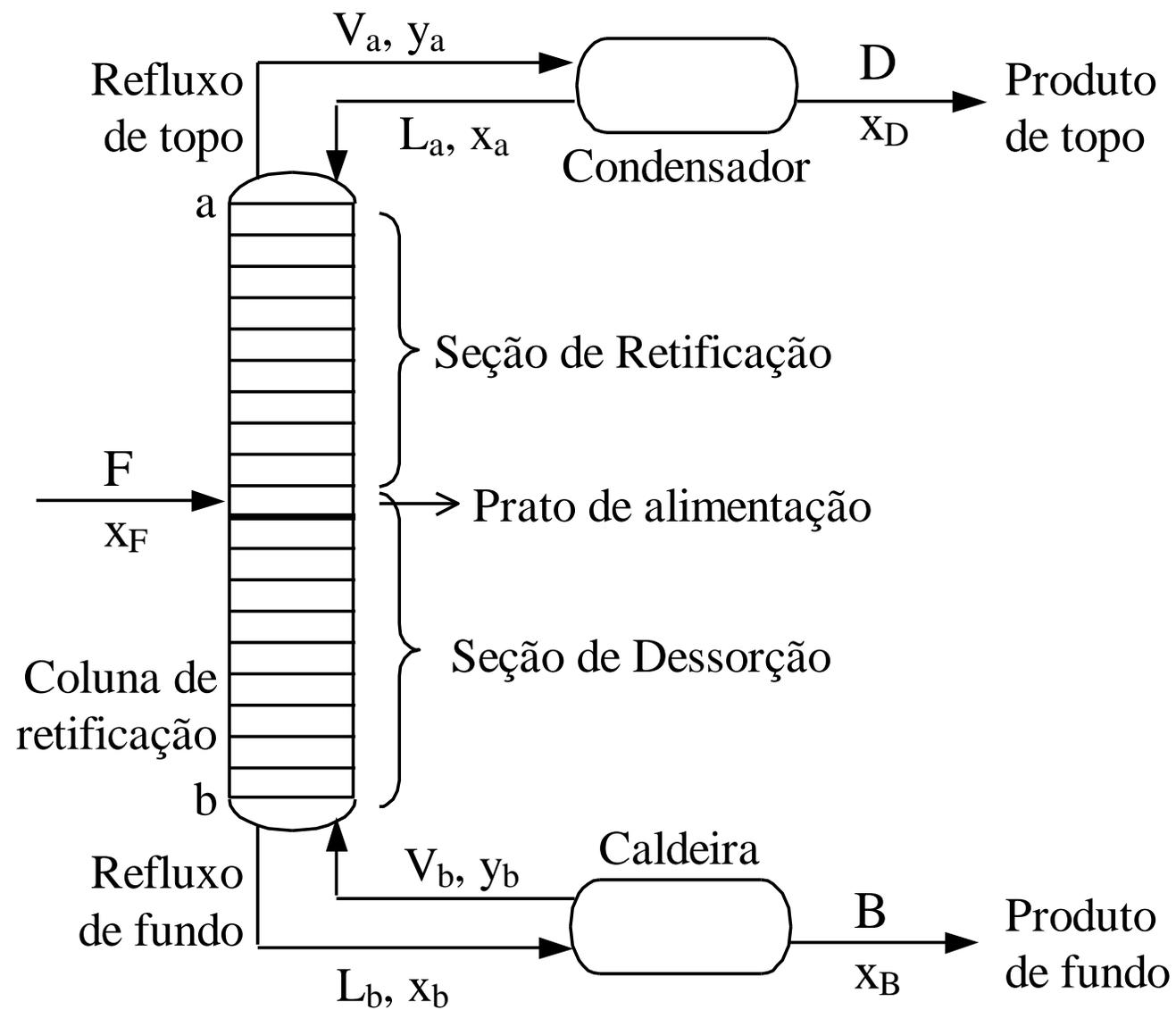
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena - EEL

# Operações Unitárias

## III

*Profa. Dra.: Simone de Fátima Medeiros*





# Destilação com retificação

Balanço de massa global

$$F = B + D \quad (1)$$

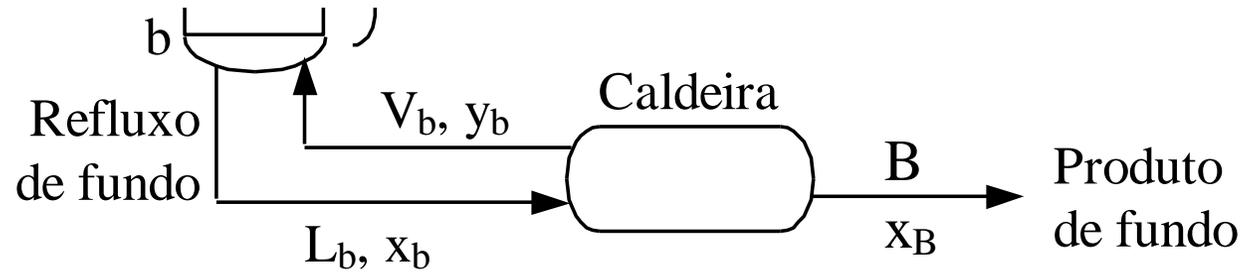
B: produto de fundo (fase líquida)

D: produto de topo (vaporizado)

Incorporando a fração molar do componente mais volátil, temos:

$$F x_F = B x_B + D x_D \quad (2)$$

# Destilação com retificação:



Caldeira:

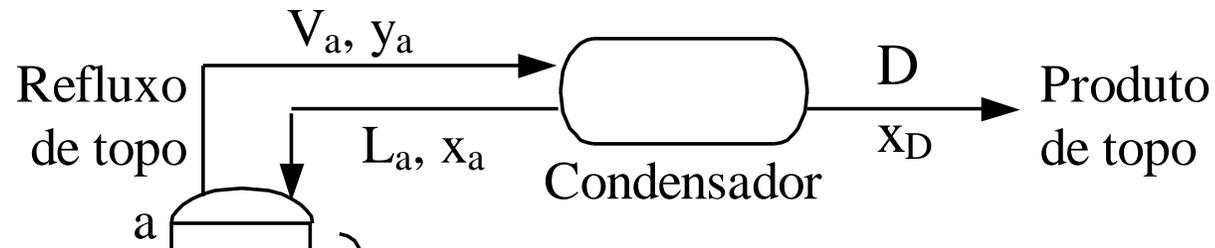
$$L_b = B + V_b \quad (3)$$

$L_b$  : líquido que saiu da coluna

$V_b$  : fração vaporizada

→ Considerando as frações molares

$$L_b * x_b = B * x_B + V_b * y_b \quad (4)$$



Condensador:

$$V_a = D + L_a \quad (5)$$

$V_a$  : vapor que saiu da coluna

$L_a$  : fração condensada

→ Considerando as frações molares

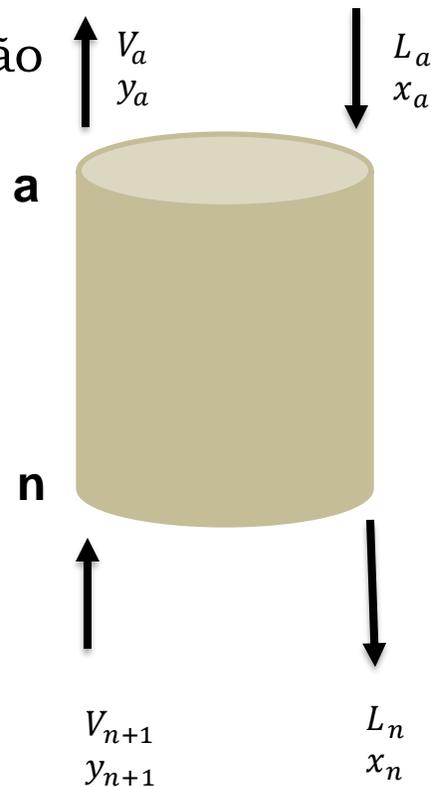
$$V_a * y_a = D * x_D + L_a * x_a \quad (6)$$

# Linha de operação da retificação:

Seção de retificação

primeiro prato da  
seção de retificação

último prato da  
seção de retificação



$$V_{n+1} + L_a = L_n + V_a$$

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

$$\text{De (5): } V_a = D + L_a$$

$$V_{n+1} = D + L_n \quad (7)$$

Considerando a fração molar do  
componente mais volátil:

$$V_{n+1} * y_{n+1} + L_a * x_a = L_n * x_n + V_a * y_a$$

$$V_{n+1} * y_{n+1} = L_n * x_n + V_a * y_a - L_a * x_a$$

Comparando com a equação (6), temos  
que:

$$V_{n+1} * y_{n+1} = L_n * x_n + D * x_D$$

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

# Linha de operação da retificação:

Equação de operação da linha de retificação:  $y_{n+1} = \frac{L_n * x_n}{V_{n+1}} + \frac{D * x_D}{V_{n+1}}$

Temos que:  $V_{n+1} = L_n + D$ , então:

$$y_{n+1} = \frac{L_n * x_n}{L_n + D} + \frac{D * x_D}{L_n + D}$$

Simplificando

1ª condição simplificadora: McCabe-Thiele

Retificação - V e L : constantes

Dessorção -  $\bar{V}$  e  $\bar{L}$  : constantes

2ª condição simplificadora: razão de refluxo:  $R_D = \frac{L_n}{D}$

↑ razão de refluxo      ↓ número de pratos

# Linha de operação da retificação

$$L_a = L = cte$$

$$y_{n+1} = \frac{L * x_n}{L+D} + \frac{D * x_D}{L+D}$$

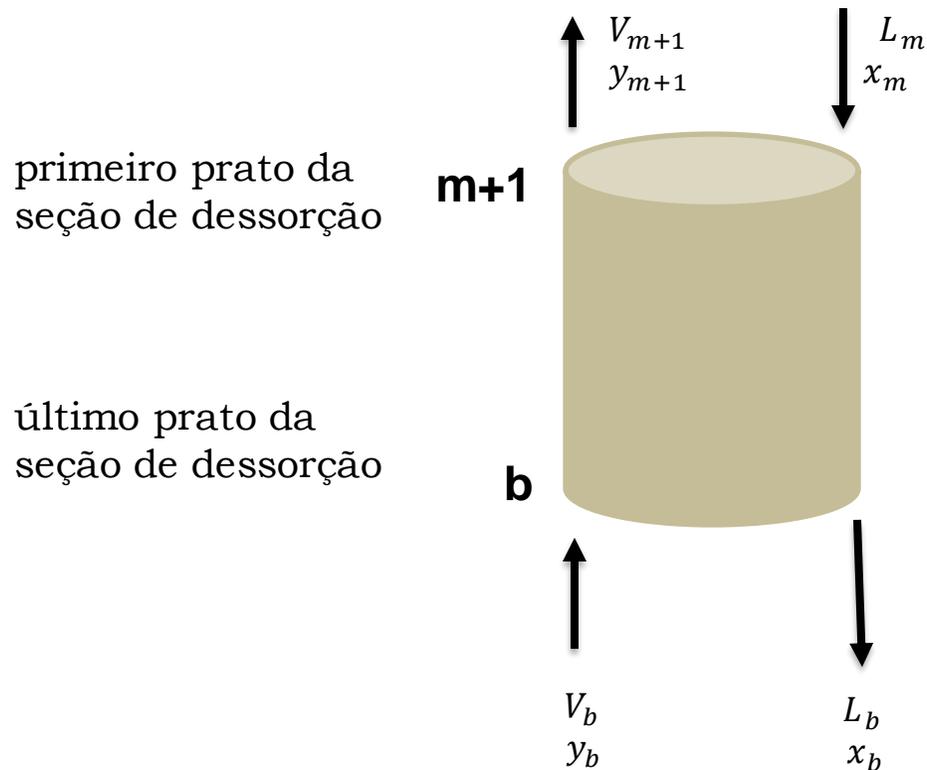
$$R_D = \frac{L}{D} = \frac{V - D}{D}$$

Dividindo por D, temos:

$$y_{n+1} = \frac{\frac{L}{D} * x_n}{\frac{D}{D} + \frac{L}{D}} + \frac{\frac{D}{D} * x_D}{\frac{D}{D} + \frac{L}{D}} \rightarrow y_{n+1} = \frac{R_D * x_n}{R_D + 1} + \frac{x_D}{R_D + 1} \quad (\text{LOR})$$

# Linha de operação da dessorção:

## Seção de dessorção



$$V_b + L_m = L_b + V_{m+1}$$

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

$$V_b - L_b = -B \text{ (produto de fundo)}$$

$$V_{m+1} = -B + L_m$$

Considerando a fração molar do componente mais volátil:

$$V_b * y_b + L_m * x_m = L_b * x_b + V_{m+1} * y_{m+1}$$

$$V_{m+1} * y_{m+1} = L_m * x_m + V_b * y_b - L_b * x_b$$

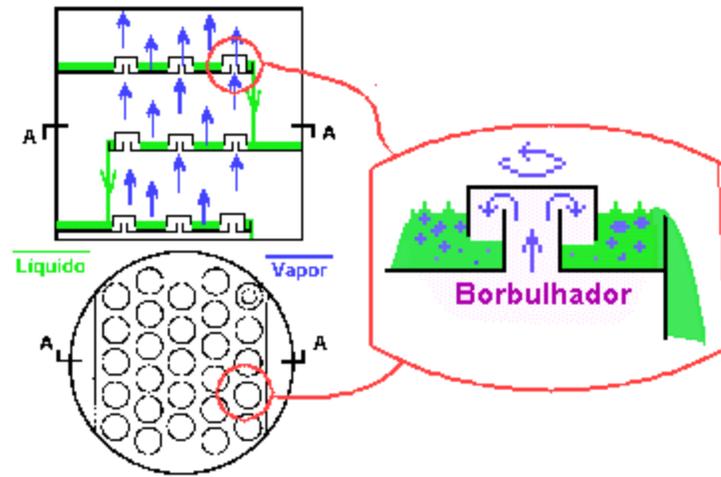
$$V_b * y_b - L_b * x_b = -(B * x_B)$$

$$V_{m+1} * y_{m+1} = L_m * x_m - (B * x_B)$$

$$y_{m+1} = \frac{L_m * x_m}{V_{m+1}} + \frac{B * x_B}{V_{m+1}} \rightarrow y_{m+1} = \frac{L_m * x_m}{-B + L_m} - \left( \frac{B * x_B}{B + L_m} \right)$$

(LOD)





Processos de Destilação:

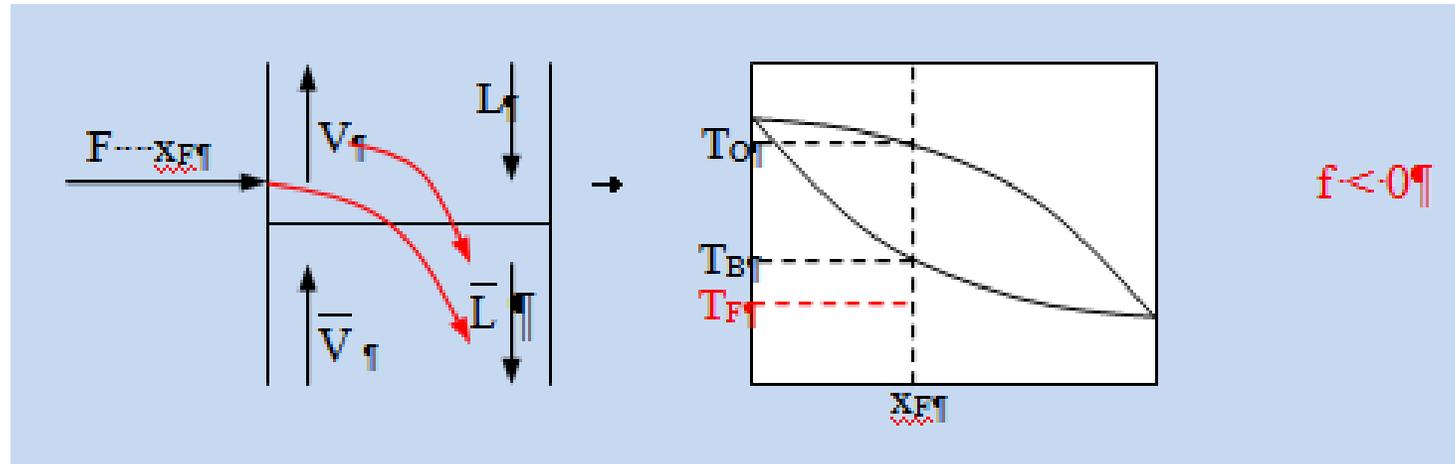
[https://www.youtube.com/watch?v=\\_mjq29VIHjo](https://www.youtube.com/watch?v=_mjq29VIHjo)

<https://www.youtube.com/watch?v=BaBMXgVBQKk>

<https://www.youtube.com/watch?v=6Zqe-rHf2v0>

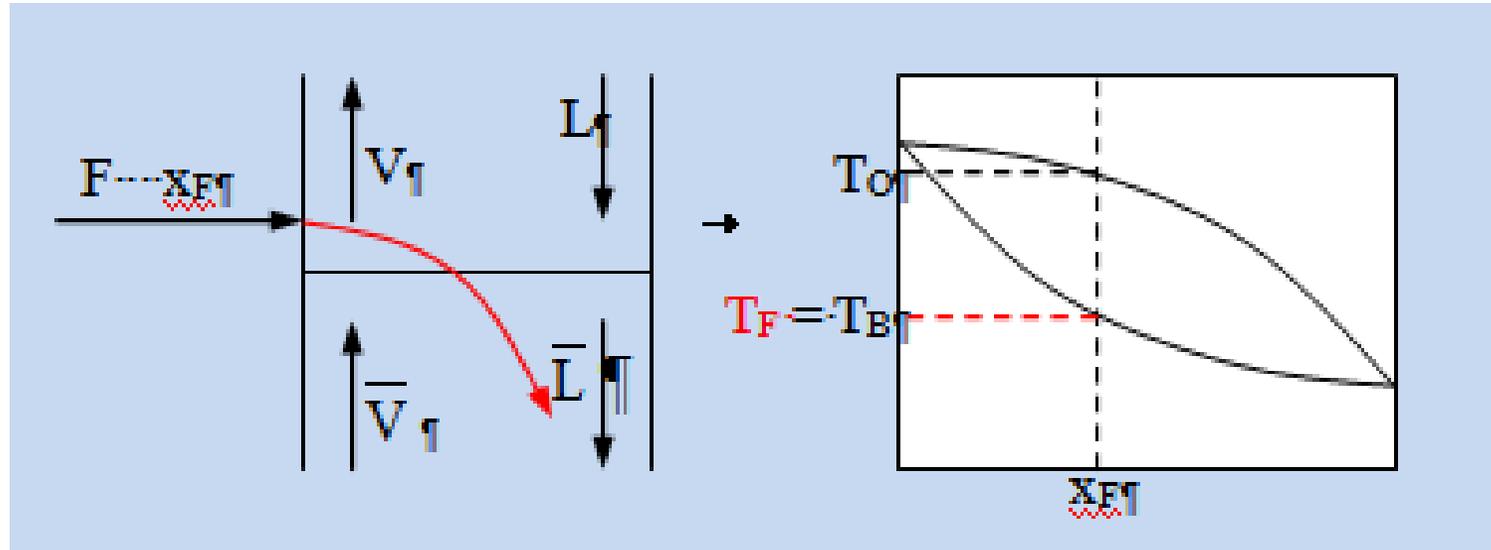
Linha de operação da  
alimentação:

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



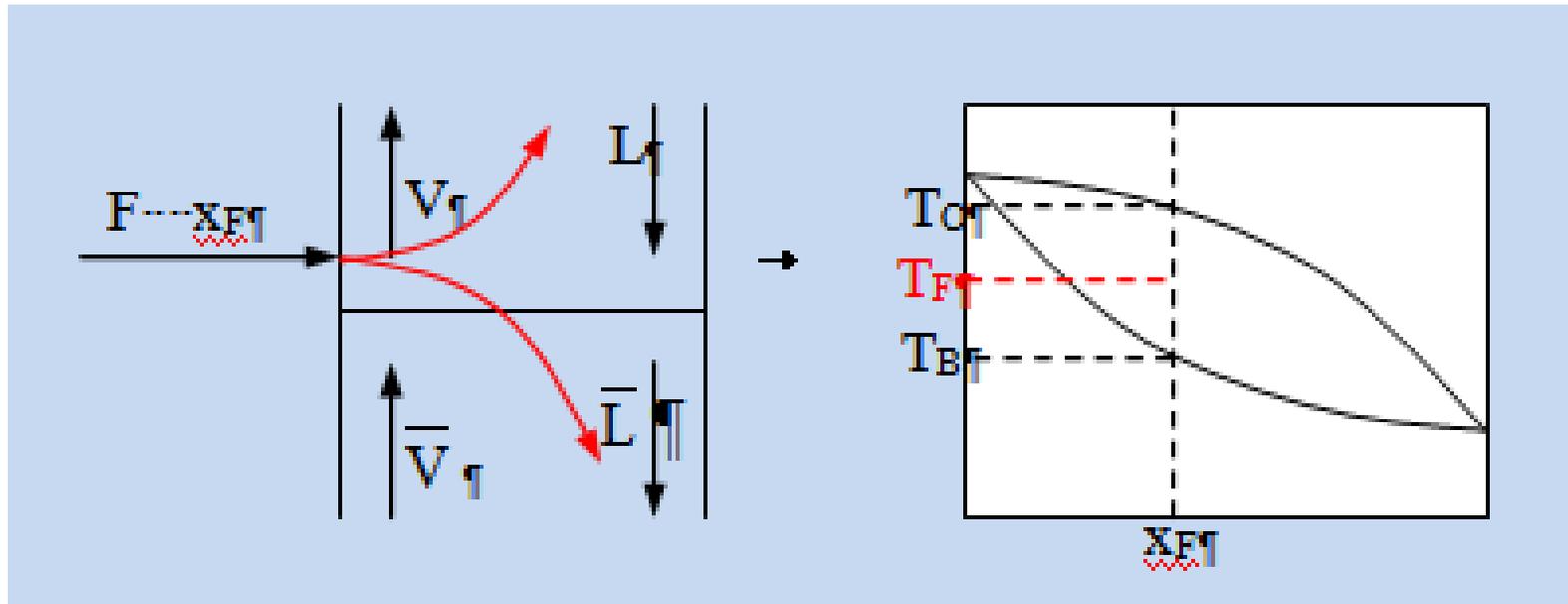
Toda a vazão de alimentação é líquida e escoará para a Seção de Dessorção, sem gerar vapor para a Seção de Retificação. Como a alimentação entra a uma temperatura baixa, para atingir o equilíbrio térmico, trocará calor com o fluxo de vapor, causando a condensação de parte desse fluxo, assim, na Seção 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.

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



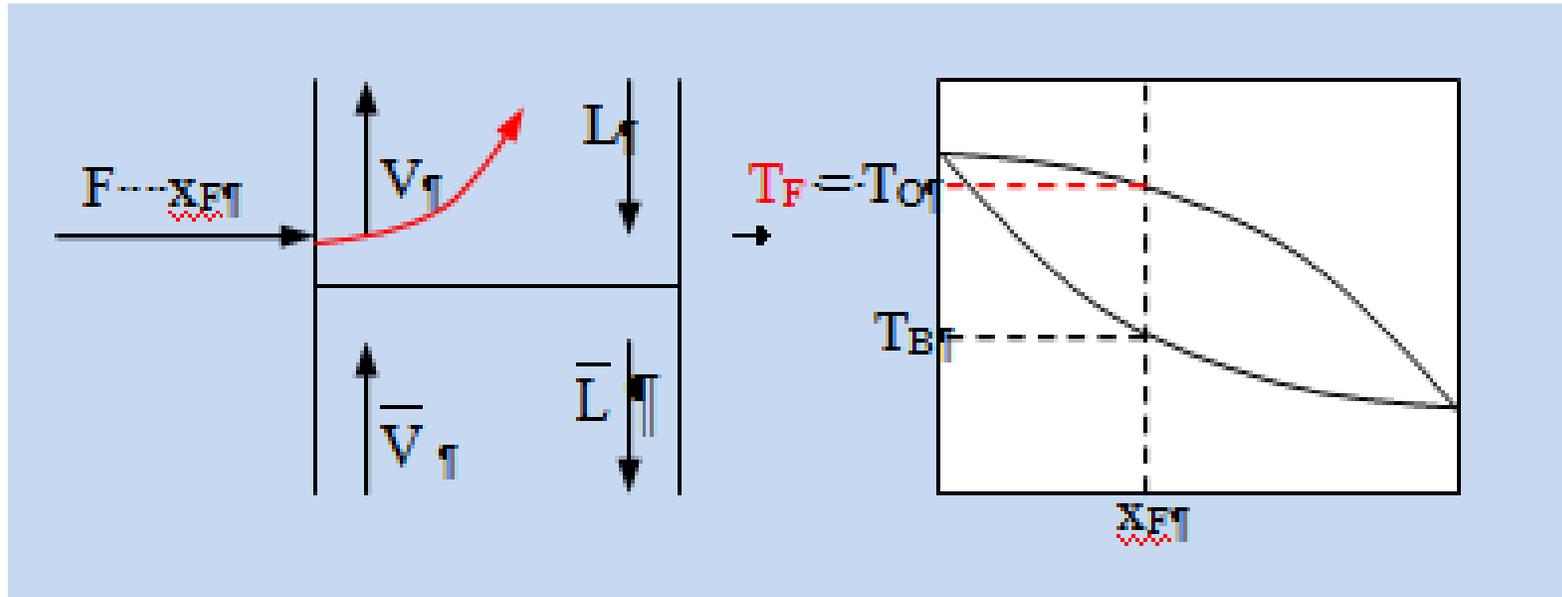
A vazão de alimentação é líquida, na temperatura de bolha e escoará na Seção de Dessorção, sem contribuir para o escoamento de vapor na Seção de Retificação, logo o fator  $f$  será zero.

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



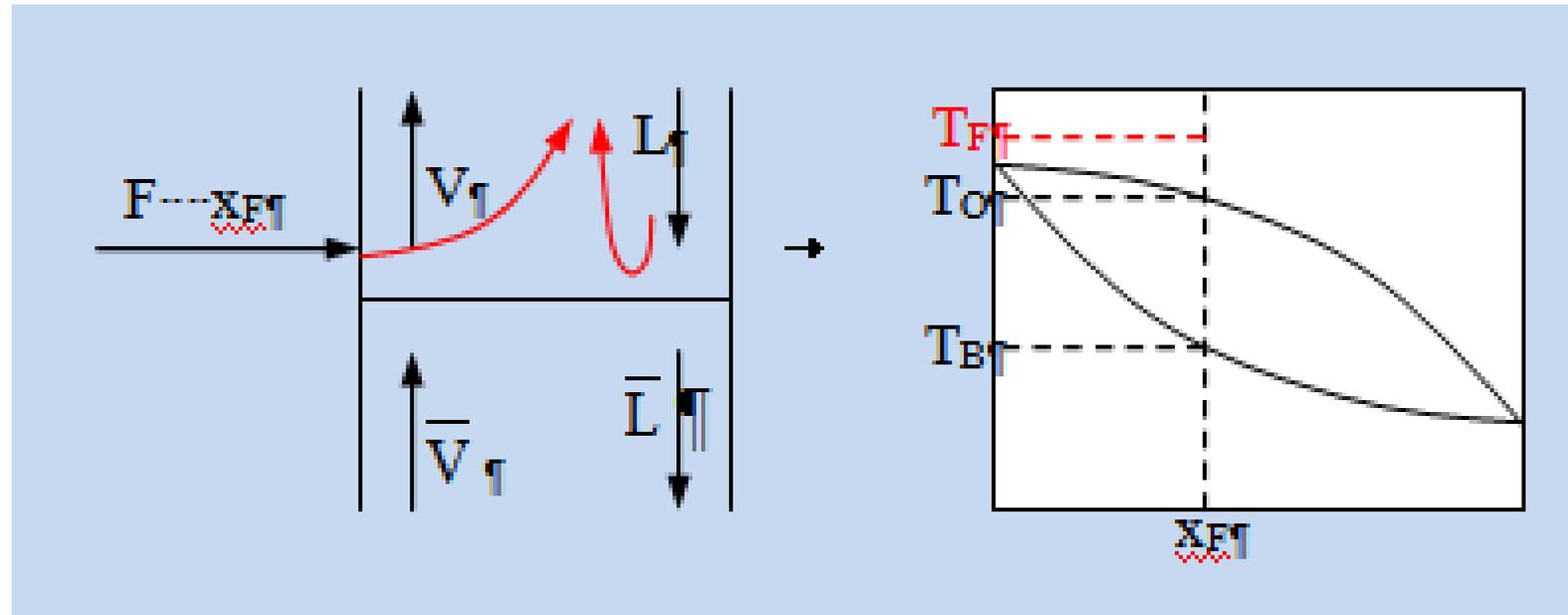
A parte da alimentação que constitui a fase líquida irá escoar na Seção de Dessorção e a parte da alimentação que constitui a fase vapor irá escoar na Seção de Retificação, na forma de vapor, logo o fator  $f$  será igual à fração de vapor na alimentação. Assim, se na alimentação tivermos  $1/4$  de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

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



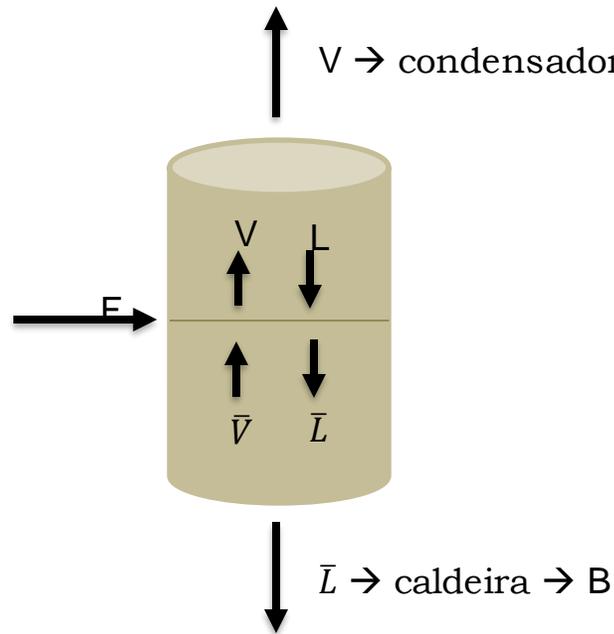
A vazão de alimentação é vapor, na temperatura de orvalho e escoará na Seção de Retificação, gerando um mol de vapor para cada mol alimentado, logo o fator  $f$  será igual 1.

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.

# Linha de operação da alimentação



Balço de massa

$$F + \bar{V} + L = V + \bar{L} \quad (12)$$

$$V = \bar{V} + (f * F) \rightarrow V - \bar{V} = f * F \quad (13)$$

$$\bar{L} = L + (1 - f) * F \rightarrow \bar{L} - L = (1 - f) * F \quad (14)$$

Condensador (Sessão de retificação):

$$V = L + D \rightarrow V * y = L * x + D * x_D \quad (15)$$

Caldeira (Sessão de dessorção):

$$\bar{L} = \bar{V} + B \rightarrow \bar{L} * x = \bar{V} * y + B * x_B \quad (16)$$

Fazendo (15) - (16):

$$V * y - \bar{V} * y = L * x - \bar{L} * x + D * x_D + B * x_B$$

$$(V - \bar{V}) * y = (L - \bar{L}) * x + D * x_D + B * x_B$$

$$f * F * y = -(1 - f) * F * x + F * x_F$$

$$y = - \left[ \frac{(1-f)}{f} \right] * x + \frac{x_F}{f} \rightarrow \text{L.A.}$$

## Determinação do número de pratos de uma coluna:

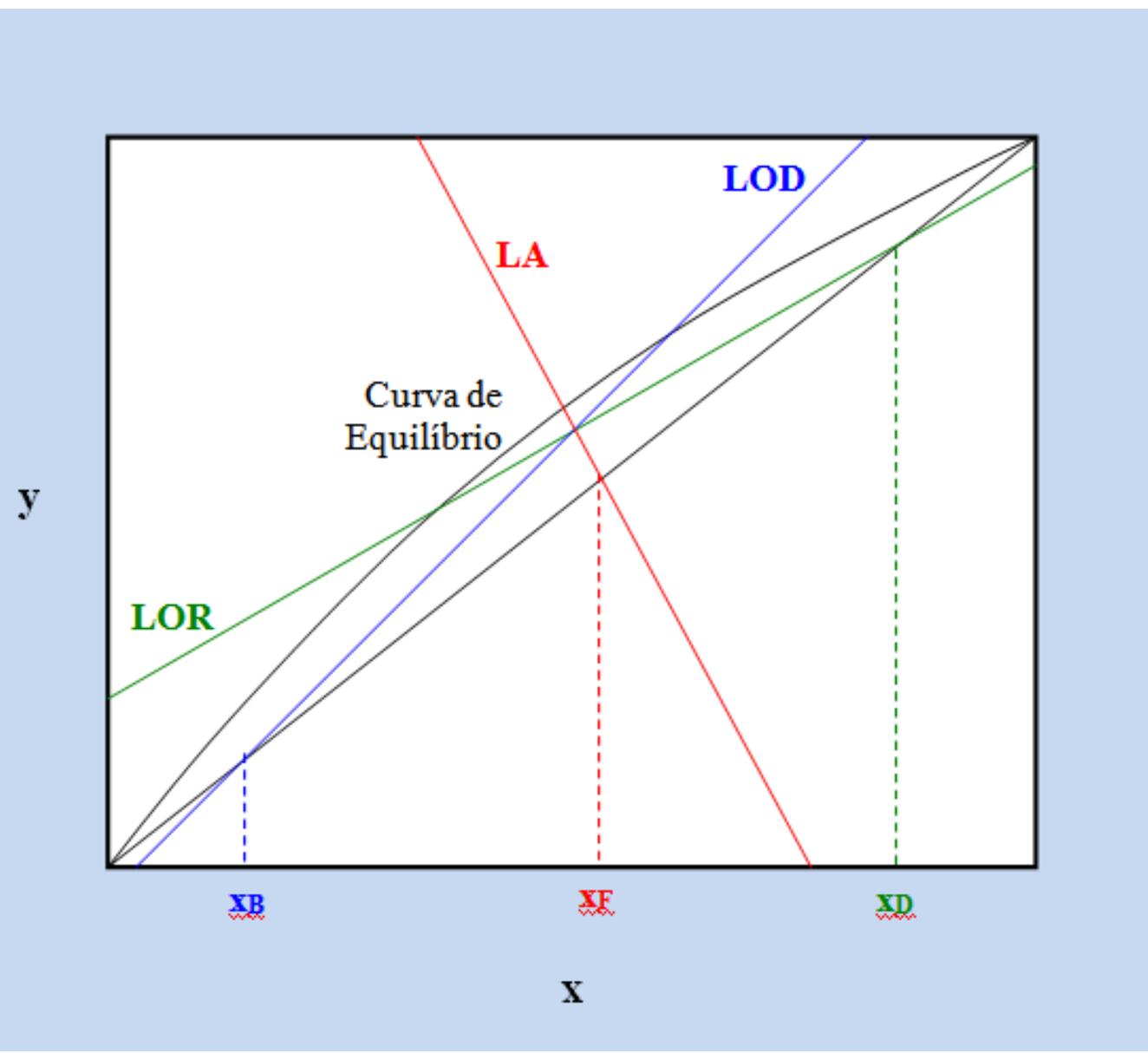
No projeto de uma coluna de destilação com retificação, serão dados: a vazão de alimentação ( $F$ ), a composição da alimentação ( $x_F$ ), as composições desejadas dos produtos ( $x_D$  e  $x_B$ ), a razão de refluxo ( $R_D$ ) e o estado da alimentação ( $f$ ).

Com esses dados, pode-se determinar as equações da Linha de Operação da Retificação, Linha de Operação da Dessorção e Linha de Alimentação.

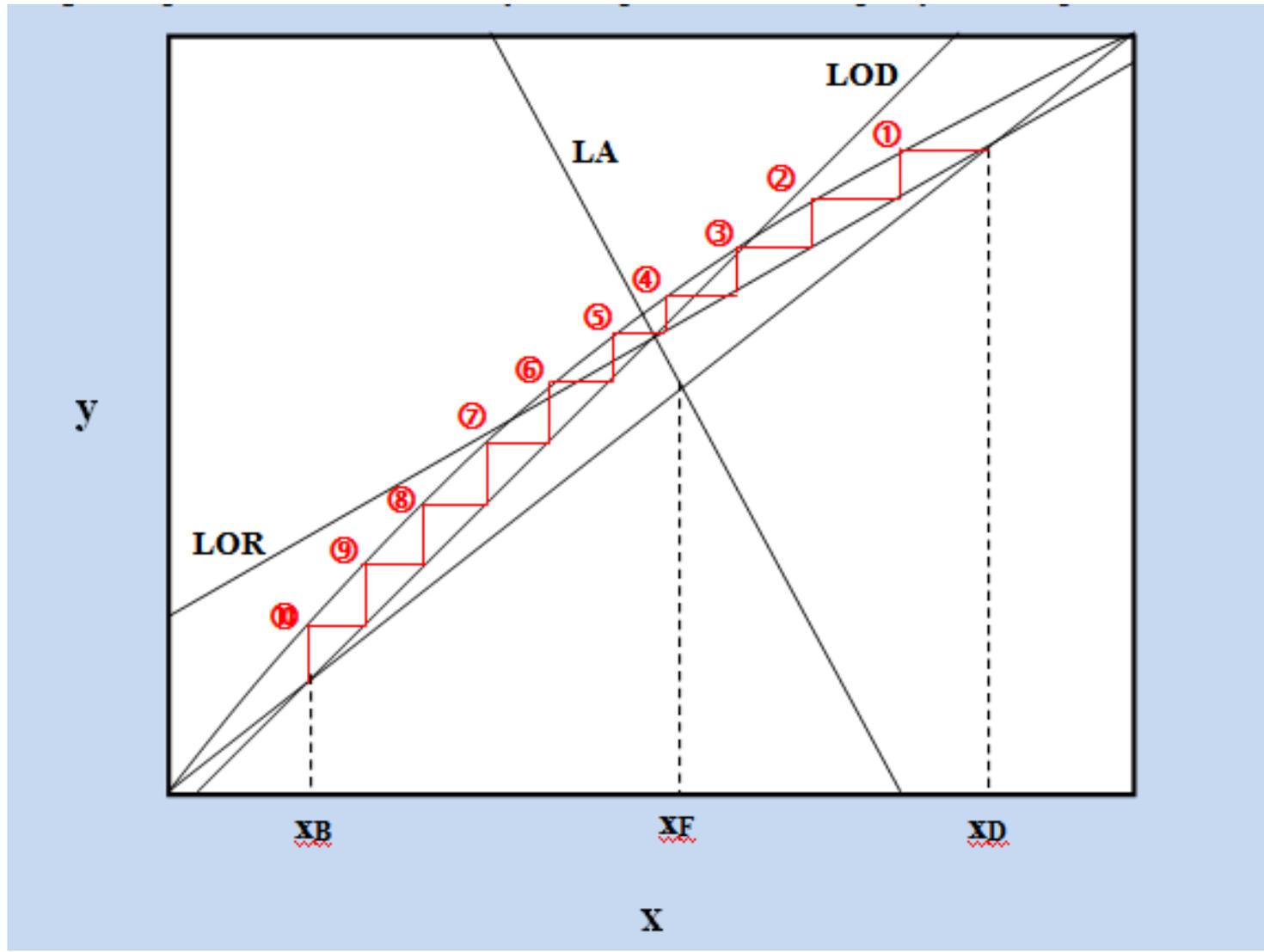
A Linha de Operação da Retificação sempre irá cruzar com a linha  $y=x$  no ponto ( $x_D; x_D$ ). A Linha de Operação da Dessorção sempre irá cruzar com a linha  $y=x$  no ponto ( $x_B; x_B$ ) e a Linha de Alimentação sempre irá cruzar com a linha  $y=x$  no ponto ( $x_F; x_F$ ).

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.



- Em cada prato, deve-se determinar as composições das fases líquida e vapor,  $x$  e  $y$ :
- No prato 1 (prato do topo), a composição do vapor,  $y_1$  é igual a  $x_D$ :
- Determina-se, na curva de equilíbrio, a composição  $x_1$  correspondente a  $y_1$ :
- Determina-se, na LOR, a composição  $y_2$  correspondente a  $x_1$ :
- Determina-se, na curva de equilíbrio, a composição  $x_2$  correspondente a  $y_2$ :
- 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;
- Passa-se, então, a utilizar a LOD para a determinação das composições  $y$ , ao invés da LOR;
- 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  $x_B$ ;
- 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.



# Resolvendo pelas equações das Linhas de Operação ( Método de Lewis-Sorel):

$$y_1 = x_D$$

Prato 1: (? ,  $y_1$ )

Equação da curva de equilíbrio:

$$x = \frac{y}{\alpha - (\alpha^* y) + y}$$

Prato 1: ( $x_1$  ,  $y_1$ )

# Resolvendo pelas equações das Linhas de Operação ( Método de Lewis-Sorel):

Encontrando o ponto de intersecção pelo método matemático:

$$\text{LOR} = \text{LA}$$

Determinando a LOD:  $P_{\text{inicial}}(x_b, x_b)$

Ponto final:  $P_{\text{final}}(x_{PI}, y_{PI}) \rightarrow$  encontrados igualando as equações

Calculado as composições de y a partir da LOD

Interpolando:

$x_b$	$x_b$	$\rightarrow$ Equação da reta
...	...	
$x_{PI}$	$y_{PI}$	

## Exemplo:

Uma coluna de retificação deve ser projetada para separar 292 kmols/h de uma mistura de 44% (molar) de benzeno e 56% (molar) de tolueno, fornecendo um produto de topo contendo 97,4 % (molar) de benzeno e um produto de fundo contendo, no máximo, 2,4 % (molar) de benzeno. 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 ( $C_p = 37,77$  cal/mol.°C).

## Solução:

$$F = 292 \text{ kmols/h};$$

$$x_F = 0,44;$$

$$x_D = 0,974;$$

$$x_B = 0,024;$$

$$R_D = 3,5 \text{ kmols retorno/kmol de saída};$$

$$\alpha = 2,381.$$

$$\text{a) } D, B = ?$$

$$F * x_F = D * x_D + B * x_B$$

$$F * x_F = D * x_D + (F - D) * x_B$$

$$292 * 0,44 = D * 0,974 + (292 - D) * 0,024$$

$$D = 127,6 \text{ kmols / h}$$

$$B = 164,4 \text{ kmols / h}$$

$$\text{b.1) } f = 2/3 = 0,667$$

L.A.:

$$y = -\left[\frac{(1-f)}{f}\right] * x + \frac{x_F}{f}$$

$$y = -\left[\frac{(1-0,667)}{0,667}\right] * x + \frac{0,44}{0,667}$$

$$y = -0,5 * x + 0,6603$$

L.O.R.:

$$y = \frac{R_D}{R_D + 1} * x + \frac{x_D}{R_D + 1}$$

$$y = \frac{3,5}{3,5 + 1} * x + \frac{0,974}{3,5 + 1}$$

$$y = 0,778 * x + 0,2165$$