

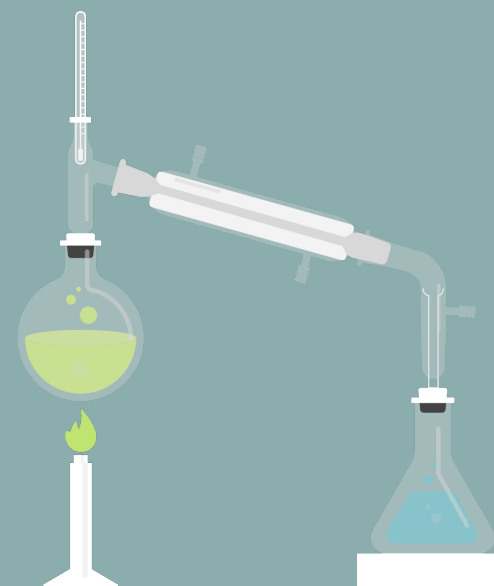
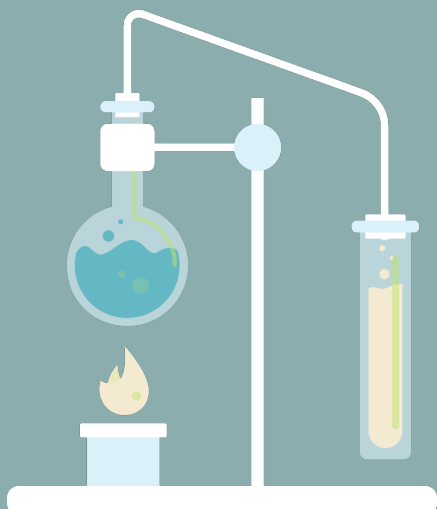


UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

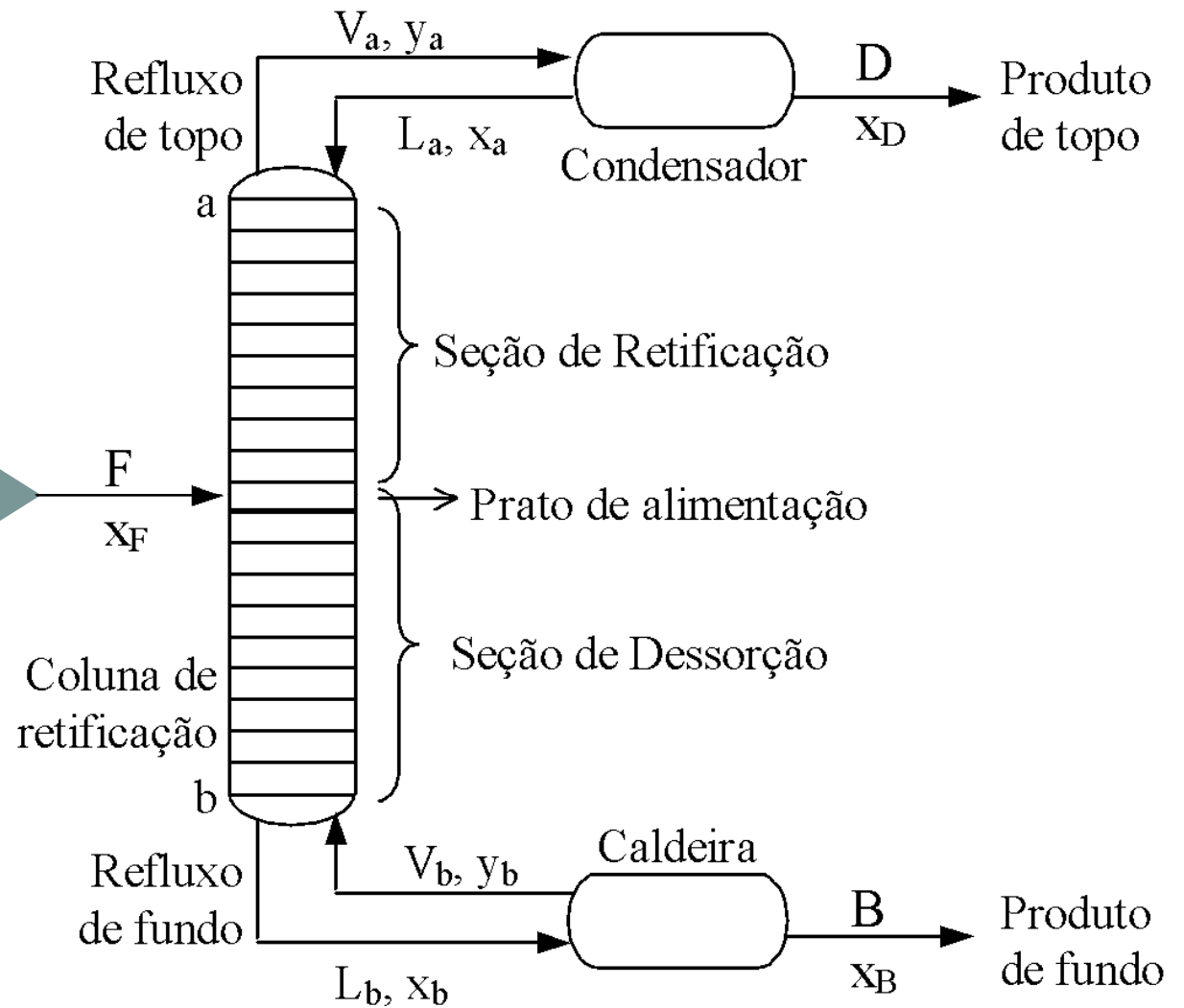
Operações Unitárias III

Prof^a. Dr^a. Simone de Fátima Medeiros

Contato: simonemedeiros@usp.br



Destilação multiestágios



Destilação com Retificação

Balanço de Massa:

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

B: produto de fundo (fase líquida)

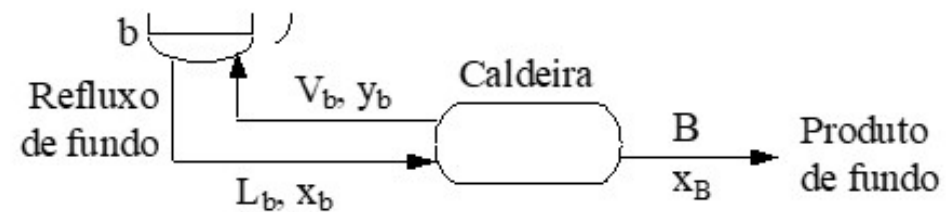
D: produto de topo (vaporizado)

Incorporando a fração molar do componente mais volátil, tem-se:

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

Destilação com Retificação

Balanço de Massa:



Caldeira:

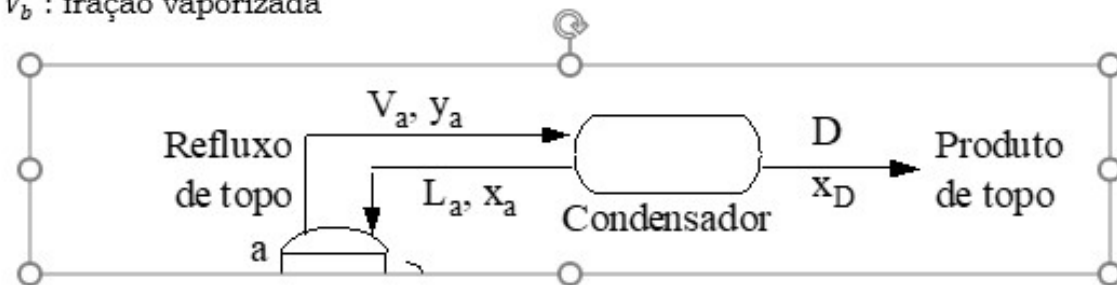
$$L_b = B + V_b \quad (3)$$

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

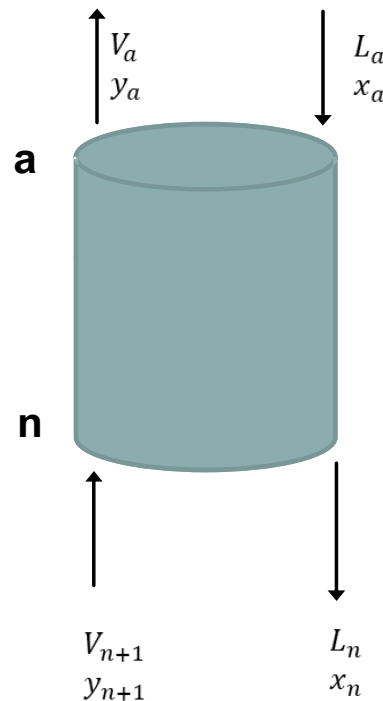
$$V_a * y_a = D * x_D + L_a * x_a \quad (6)$$

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

Tem-se que: $V_{n+1} = L_n + D$ Então: $y_{n+1} = \frac{L_n * x_n}{L_n + D} + \frac{D * x_D}{L_n + D}$

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:

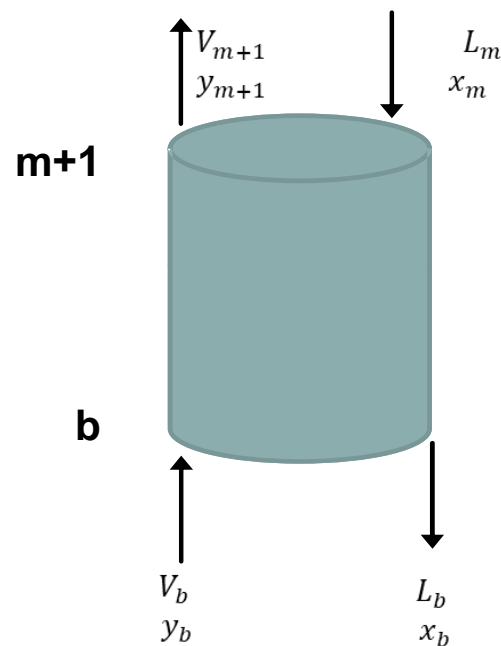
$$y_{n+1} = \frac{\frac{L}{D} * x_n}{\frac{D}{D} + \frac{L}{D}} + \frac{\frac{D}{D} * x_D}{\frac{D}{D} + \frac{L}{D}} \rightarrow y_{n+1} = \frac{R_D * x_n}{R_D + 1} + \frac{x_D}{R_D + 1} \quad (\text{LOR})$$

Linha de operação da dessorção:

Seção de dessorção

primeiro prato da
seção de dessorção

último prato da
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:

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

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

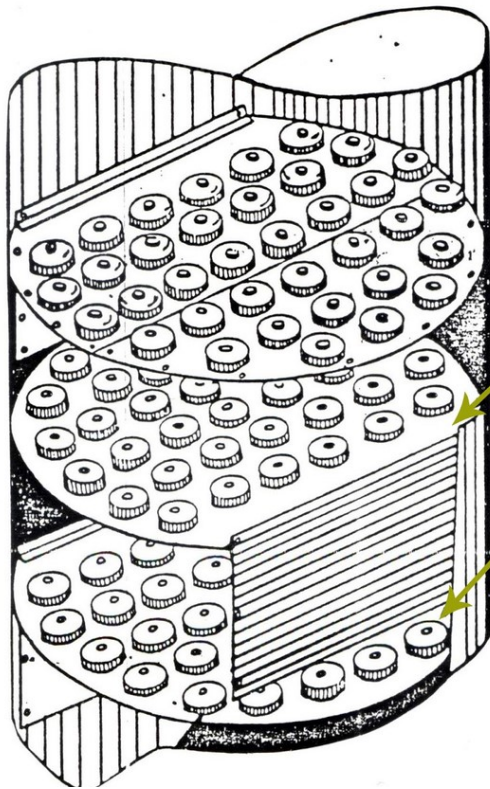
$$V_b * y_b - L_b * x_b = -(B * x_B)$$

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

$$y_{m+1} = \frac{L_m * x_m}{V_{m+1}} + \frac{B * x_B}{V_{m+1}}$$

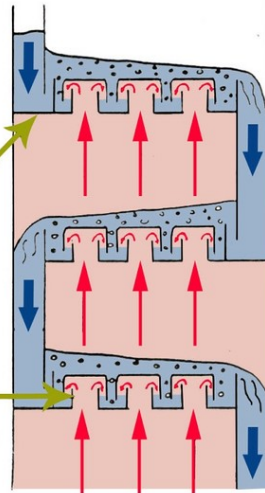
$$y_{m+1} = \frac{L_m * x_m}{-B + L_m} - \left(\frac{B * x_B}{B + L_m} \right) \text{ (LOD)}$$



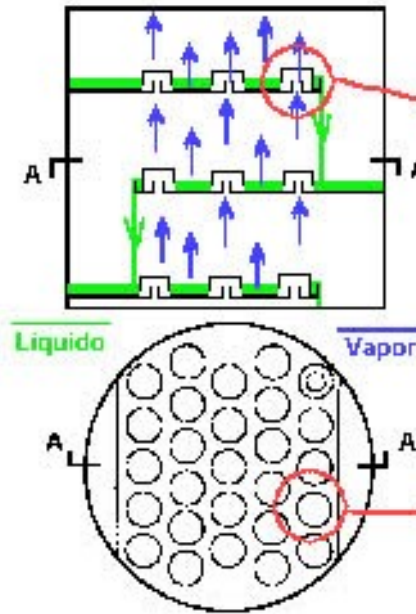


BANDEJAS

BORBULHADORES



SENTIDO DO FLUXO
 ↑ GASES
 ↓ LÍQUIDOS



Líquido

Vapor



Processos de Destilação

[23141 Zoe advancing tech professional PT BR \(youtube.com\)](#)

https://www.youtube.com/watch?v=_mjQ29VIHjo

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

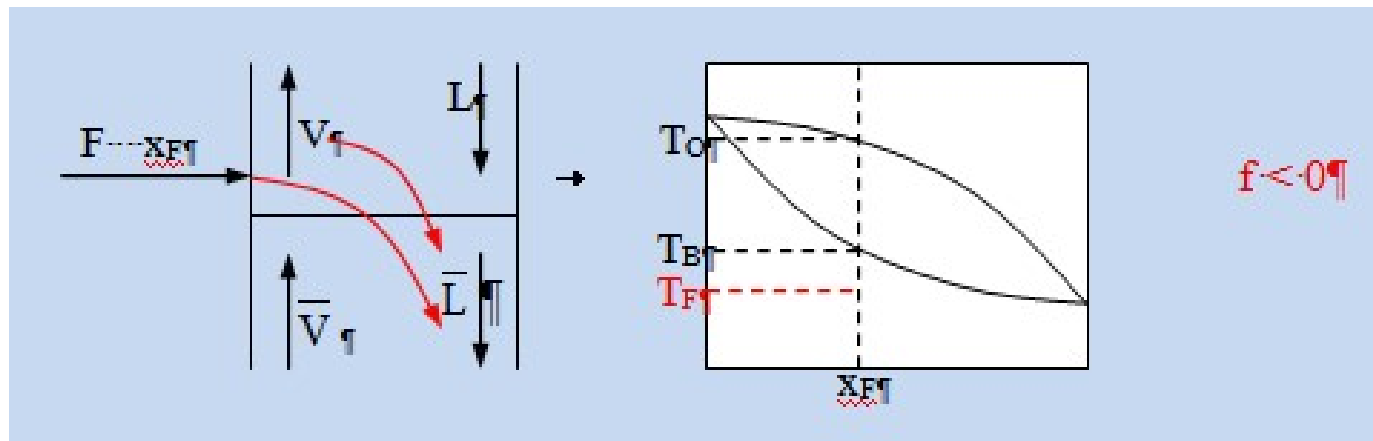
<https://www.youtube.com/watch?v=6Zqe-rHf2v0>

Linha de operação da alimentação:

- ★ **1ª possibilidade:** alimentação é líquida, em uma temperatura inferior à temperatura de bolha (líquido sub-resfriado)
- ★ **2ª possibilidade:** alimentação é líquida, na temperatura de bolha (líquido saturado)
- ★ **3ª possibilidade:** alimentação é uma mistura em equilíbrio de fases líquida e vapor
- ★ **4ª possibilidade:** alimentação é vapor, na temperatura de orvalho (vapor saturado)
- ★ **5ª possibilidade:** alimentação é vapor, em uma temperatura superior à temperatura de orvalho (vapor superaquecido)

1ª possibilidade:

Alimentação é líquida, em uma temperatura inferior à temperatura de bolha (líquido sub-resfriado)

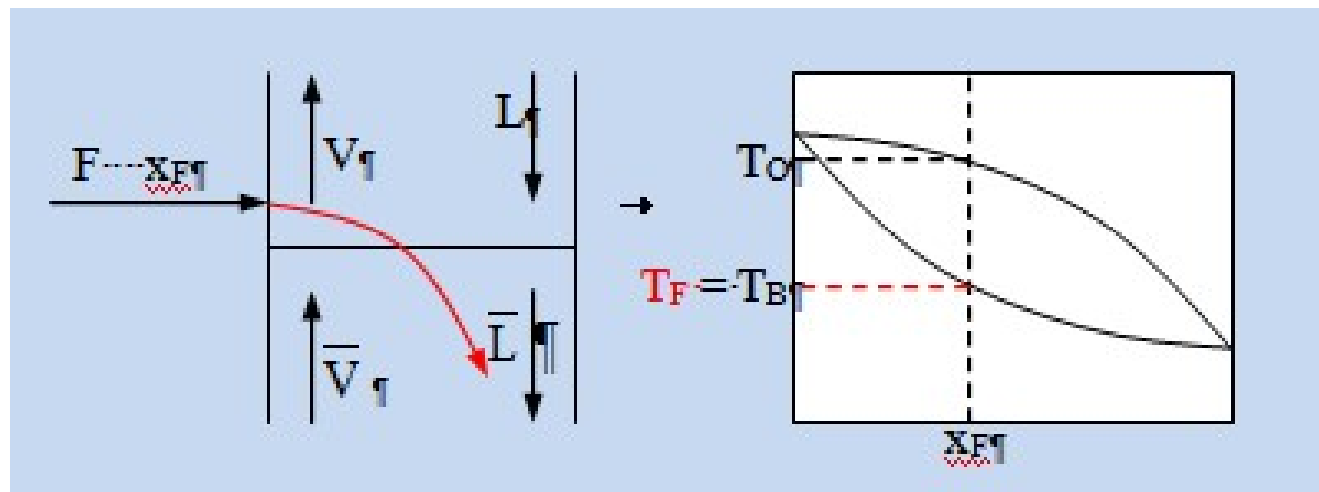


- Toda a vazão de alimentação é **líquida** e escoará para a Seção de Dessorção, sem gerar vapor para a Seção de Retificação;
- Como a alimentação entra a uma temperatura baixa, para atingir o equilíbrio térmico, trocará calor com o fluxo de vapor, causando a condensação de parte desse fluxo. Assim,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

$$f = \frac{C_{pL} \cdot (T_F - T_B)}{\lambda}$$

2ª possibilidade:

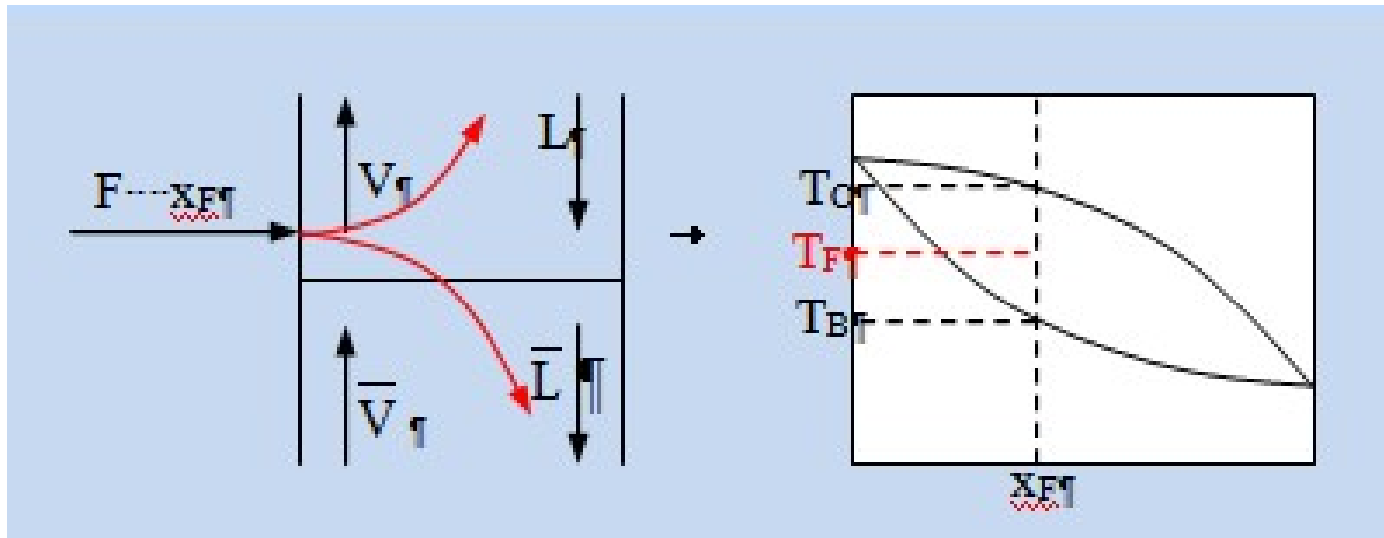
Alimentação é líquida, na temperatura de bolha (líquido saturado)



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**.

3ª possibilidade:

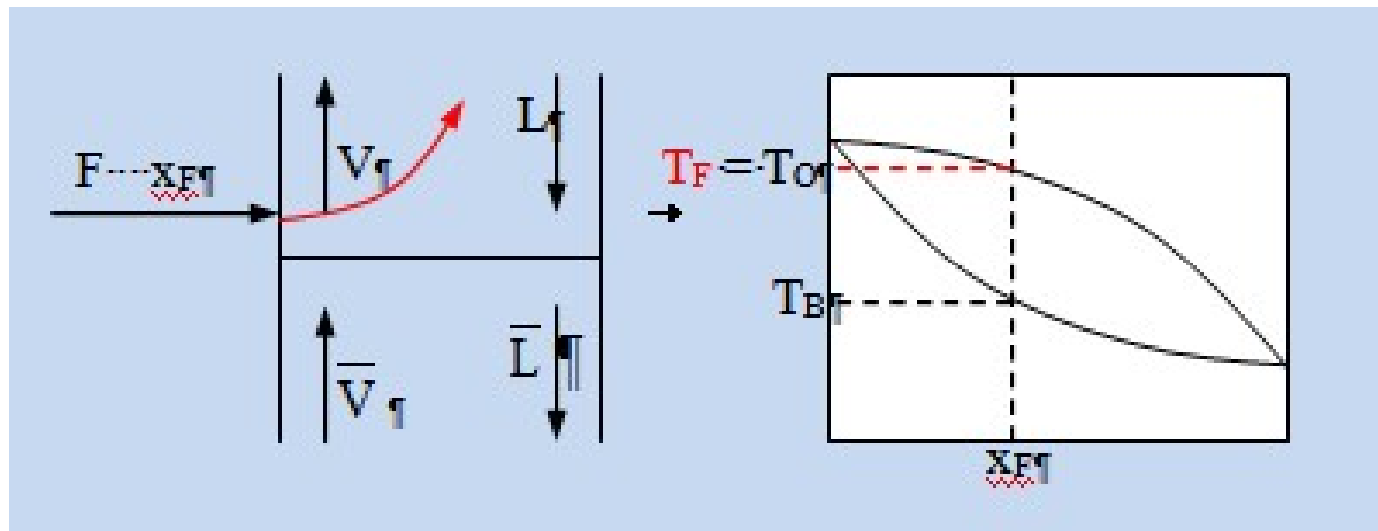
Alimentação é uma mistura em equilíbrio de fases líquida e vapor



- 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.

4ª possibilidade:

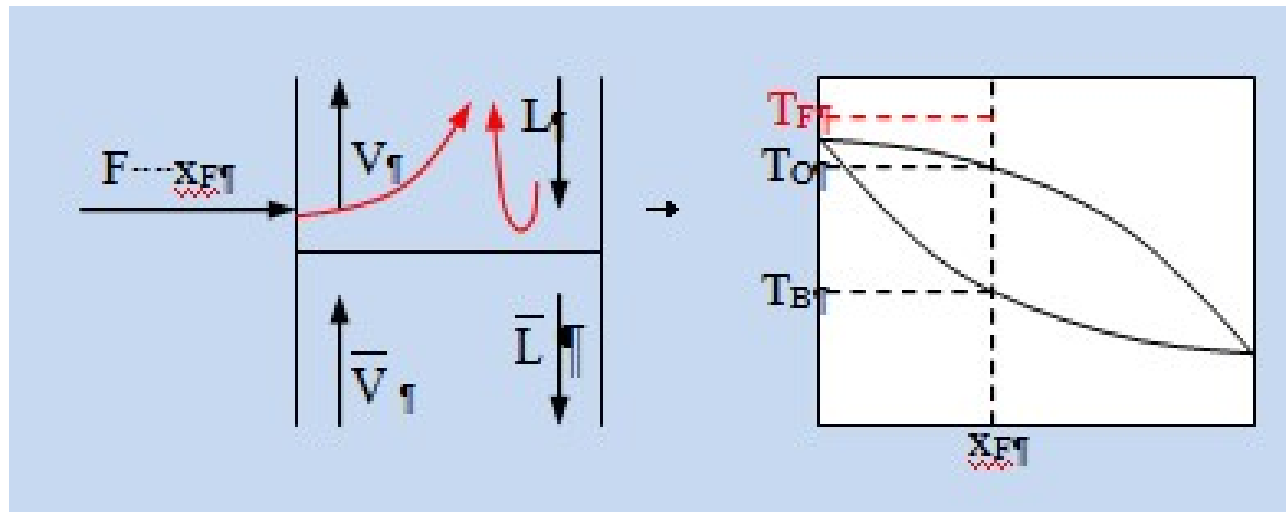
Alimentação é vapor, na temperatura de orvalho (vapor saturado)



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**.

5ª possibilidade:

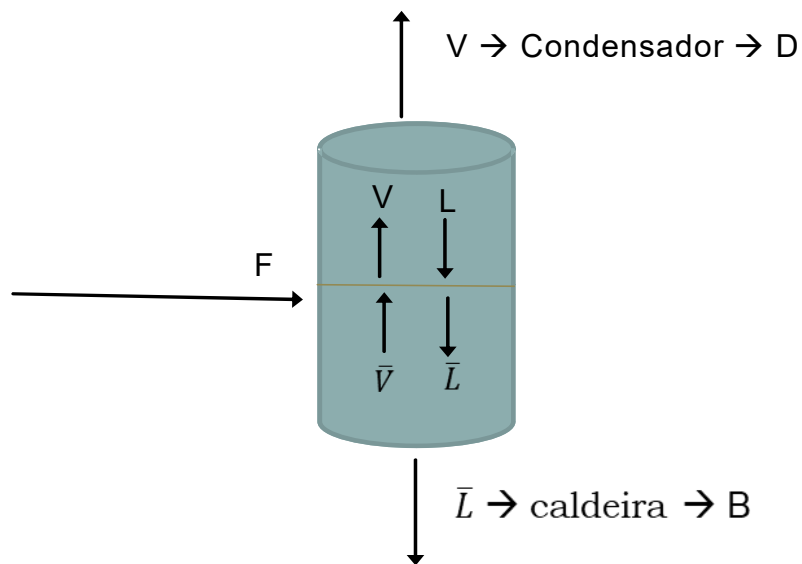
Alimentação é vapor, em uma temperatura superior à temperatura de orvalho
(vapor superaquecido)



- 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**.

$$f = 1 + \frac{Cp_v \cdot (T_F - T_O)}{\lambda}$$

Linha de operação da alimentação:



Balanco 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:

- vazão de alimentação (F)
- composição da alimentação (x_F)
- composições desejadas dos produtos (x_D e x_B)
- razão de refluxo (R_D)
- 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.

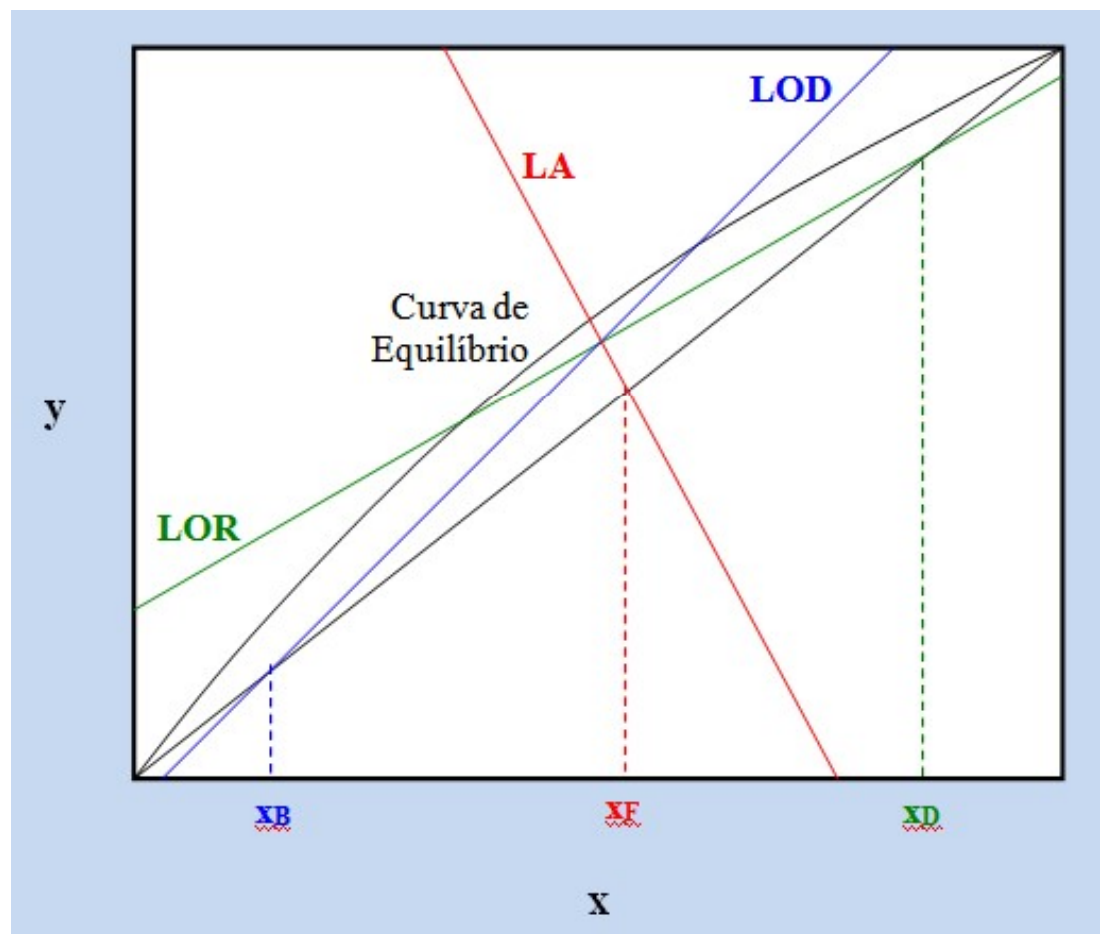
A **Linha de Operação da Retificação** (LOR) sempre irá cruzar com a linha $y=x$ no ponto (x_D ; x_D).

A **Linha de Operação da Dessorção** (LOD) sempre irá cruzar com a linha $y=x$ no ponto (x_B ; x_B).

A **Linha de Alimentação** (LA) 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**.

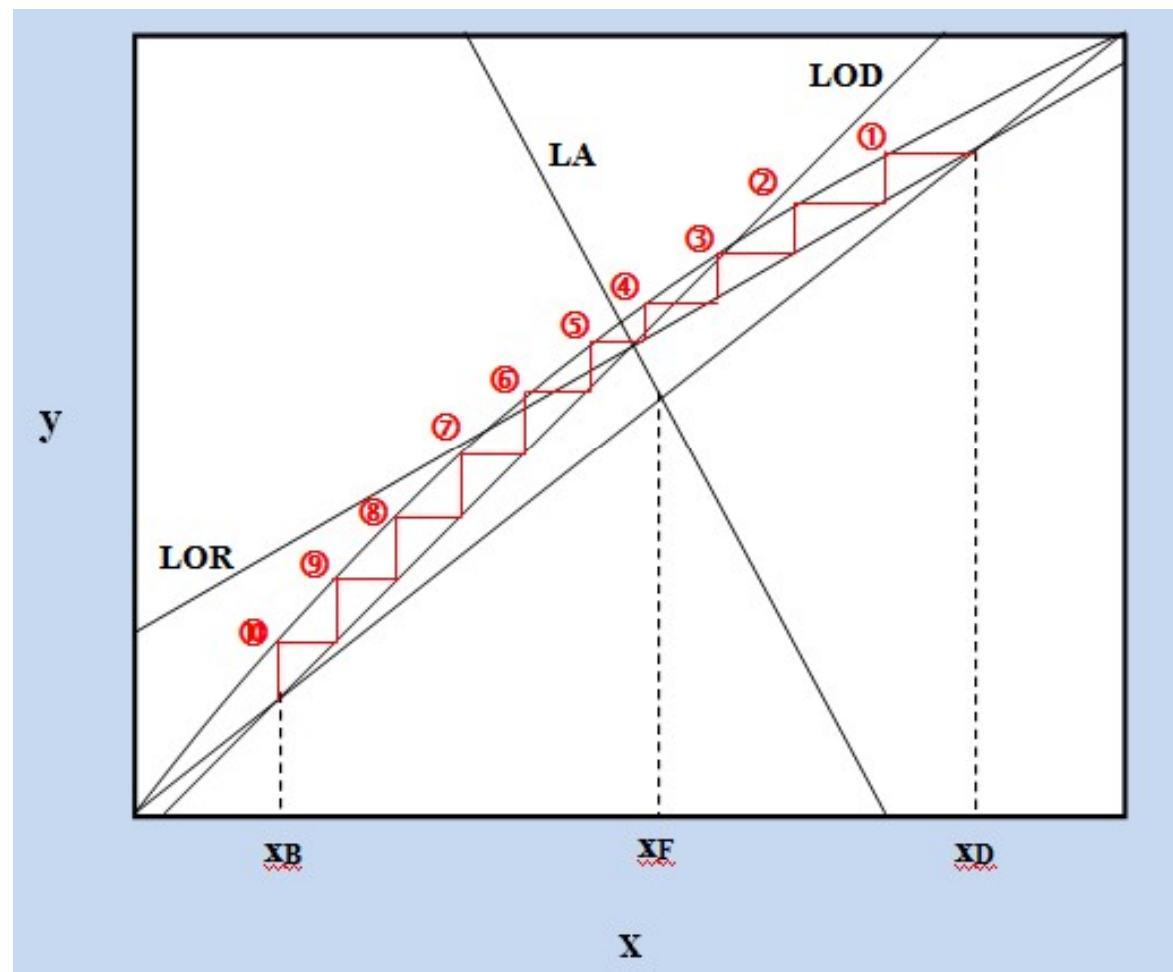
Representando as três linhas num diagrama yx , juntamente com a Curva de Equilíbrio, obtém-se o gráfico abaixo.



Determinação do número de pratos de uma coluna

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.

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)

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

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 ($C_p = 37,77 \text{ cal/mol.}^\circ\text{C}$).

Solução:

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

$$x_F = 0,44;$$

$$x_D = 0,974;$$

$$x_B = 0,024;$$

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

$$\alpha = 2,381.$$

a) D, B = ?

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

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

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

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

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

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.:

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

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

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