

USP



**Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de Lorena**

**LABORATÓRIO DE
ENGENHARIA QUÍMICA III
LOQ4062 – Turma 20251N3 – Engenharia Química**

EXPERIMENTOS

PROF. ANTONIO CARLOS DA SILVA



FUNDAMENTOS DOS EXPERIMENTOS

(Aulas de 13 de maio a 27 de maio)



USP



Experimento 3

Agitação

MISTURAÇÃO

- **FINALIDADE:**
 - Preparar uma combinação uniforme de dois ou mais materiais.
 - **COMBINAÇÕES:**
 - Dois ou mais sólidos
 - Dois ou mais líquidos
 - Um líquido e um sólido
 - Um líquido e um gás
- } **IMPULSORES**

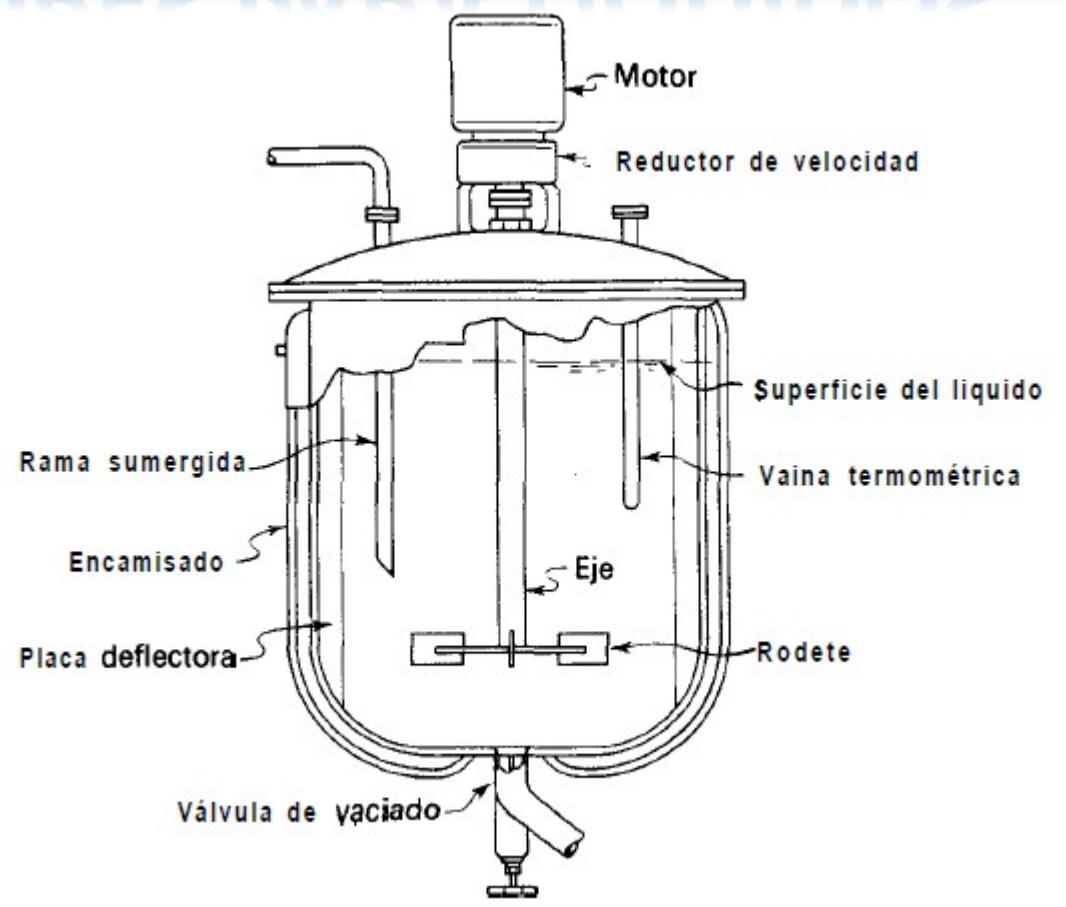


IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

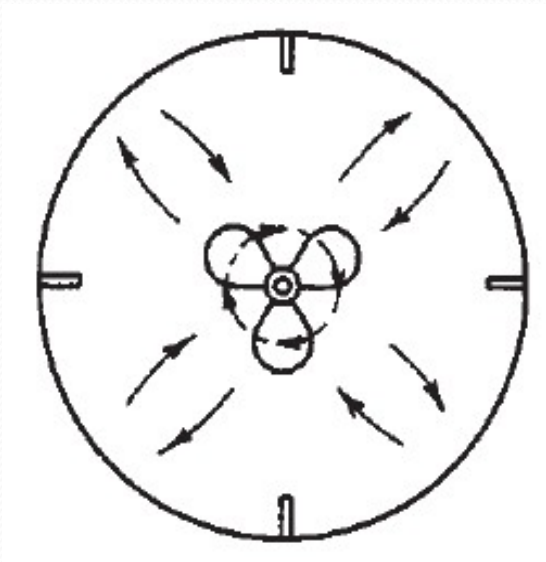
- Utilizam pás, turbinas e hélices para aplicar energia mecânica aos líquidos
- Os dispositivos são ligados a um eixo que gira em um reservatório
- O rendimento dos impulsores dependem da criação de correntes que atinjam todos os pontos do reservatório, com turbulência
- A ação de mistura ocorre em regiões afastadas do impulsor, onde ocorre a misturação de correntes
- O tanque não atua na misturação

IMPULSORES PARA LÍQUIDOS



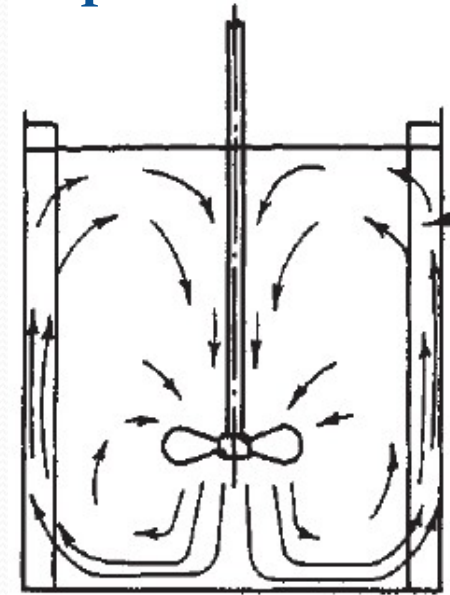
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Componentes da velocidade do líquido:
 - **RADIAL:** perpendicular ao eixo do impulsor



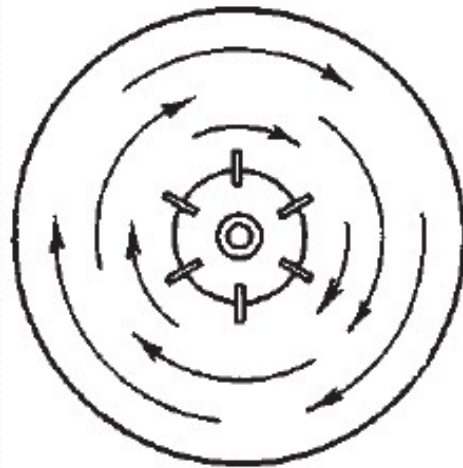
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Componentes da velocidade do líquido:
 - LONGITUDINAL: paralela ao eixo do impulsor



IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Componentes da velocidade do líquido:
 - TANGENCIAL ou ROTACIONAL: tangencial ao caminho circular, ao redor do eixo

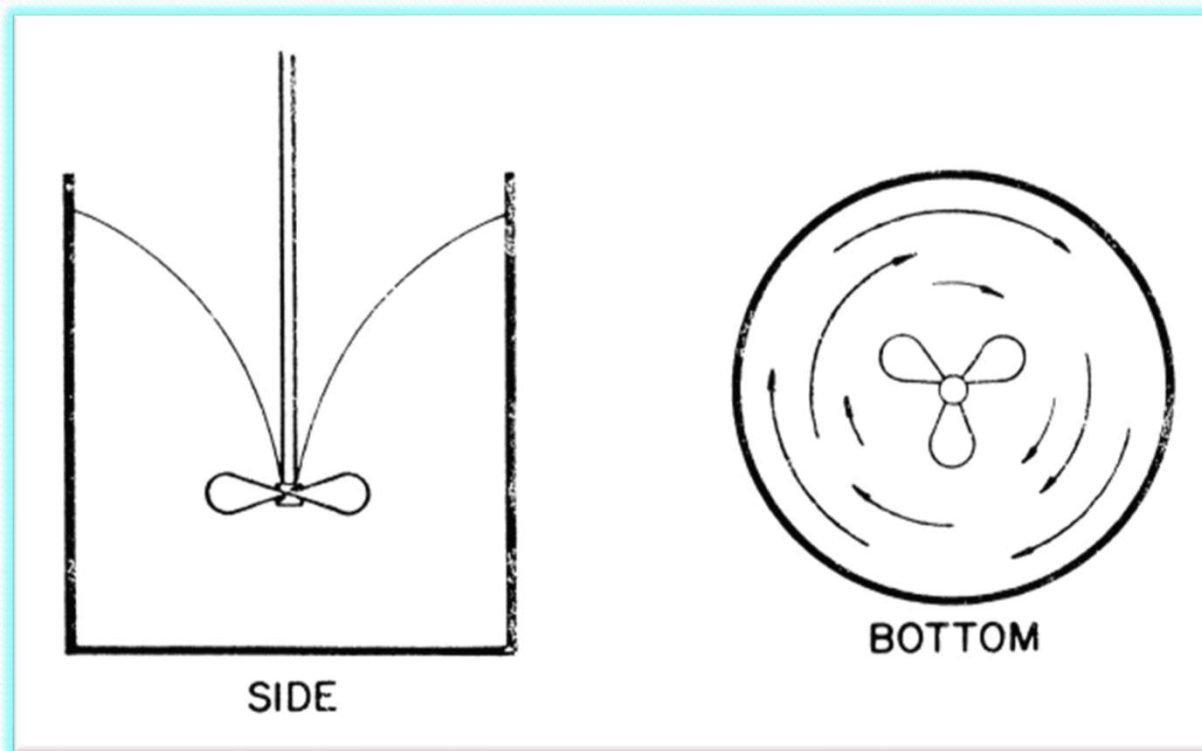


IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- **Componentes da velocidade do líquido:**
 - Os fluxos Longitudinal e Radial são os que mais contribuem com a misturação. São os fluxos que fazem com que correntes oriundas de localizações diferentes se encontrem.
 - O fluxo tangencial pouco contribui para a misturação.
 - O fluxo tangencial provoca a formação de vórtices ou redemoinhos.

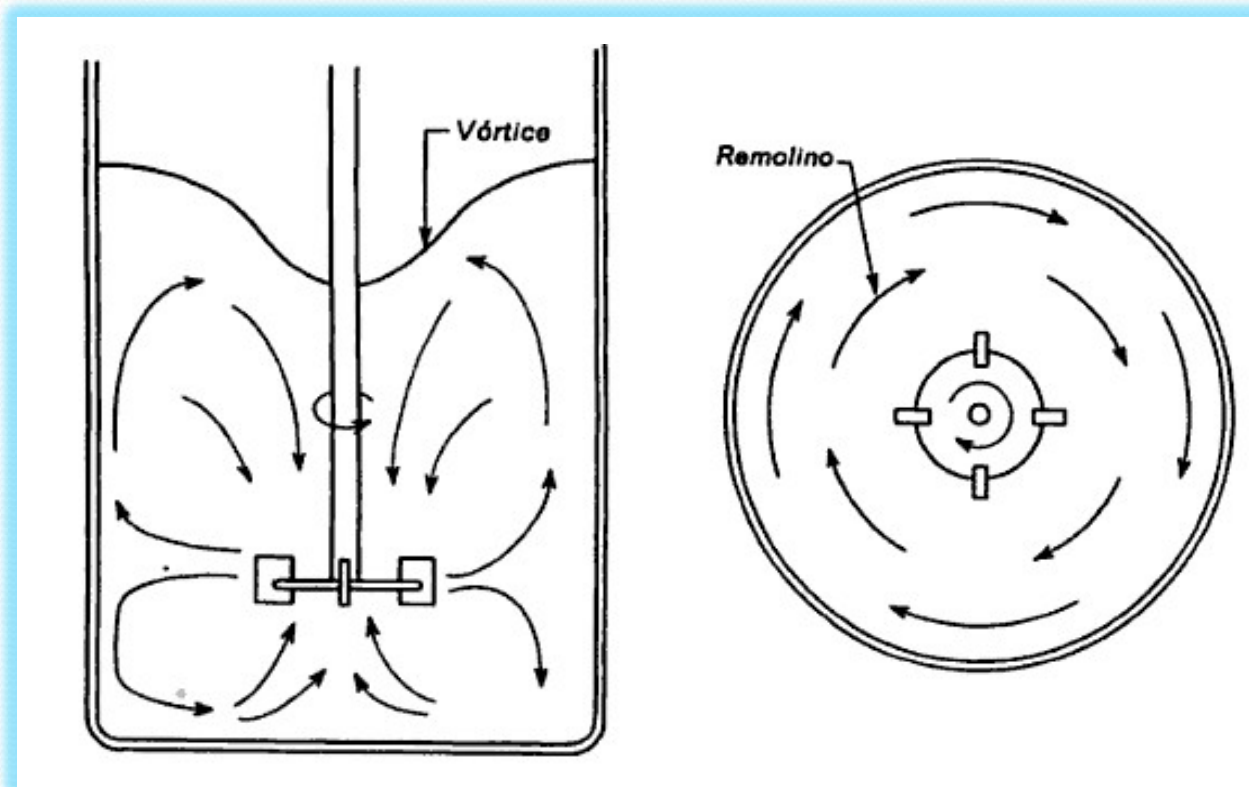
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Vórtices:



IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Vórtices:



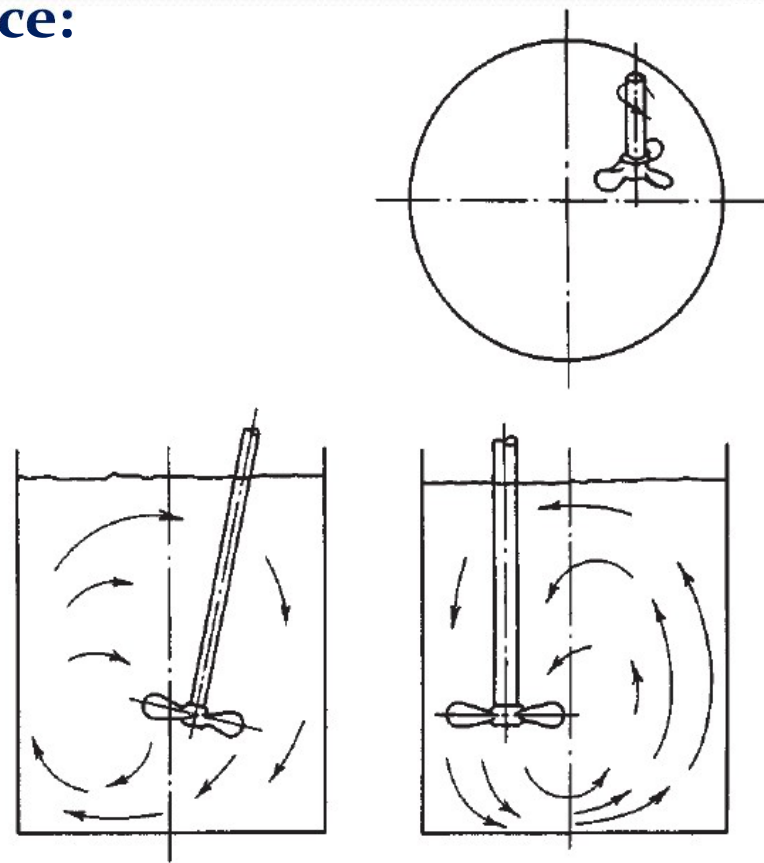
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Vórtices:



IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Métodos para evitar vórtice:
 - Em tanques pequenos:
eixo fora do centro



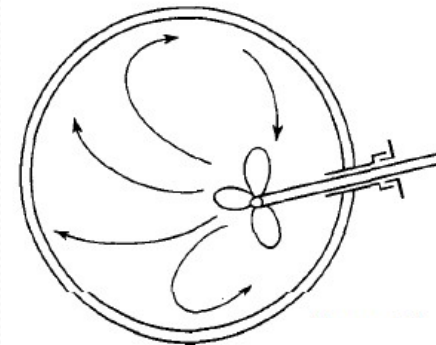
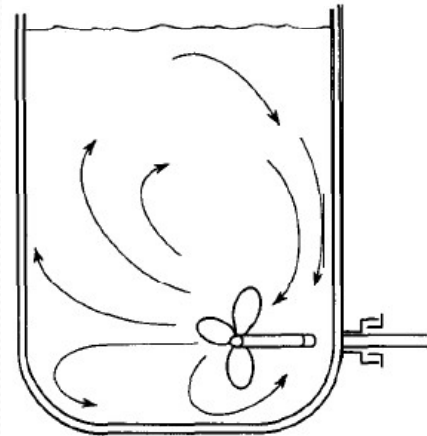
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Métodos para evitar vórtice:
 - Em tanques pequenos:
eixo fora do centro



IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Métodos para evitar vórtice:
 - Em tanques grandes:
entrada lateral do
agitador



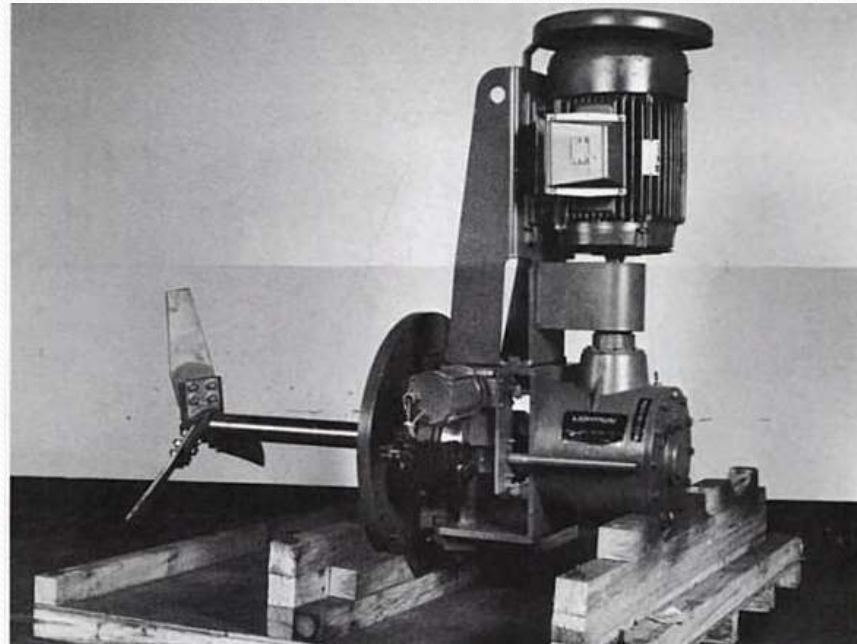
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Métodos para evitar vórtice:
 - Em tanques grandes:
entrada lateral do agitador



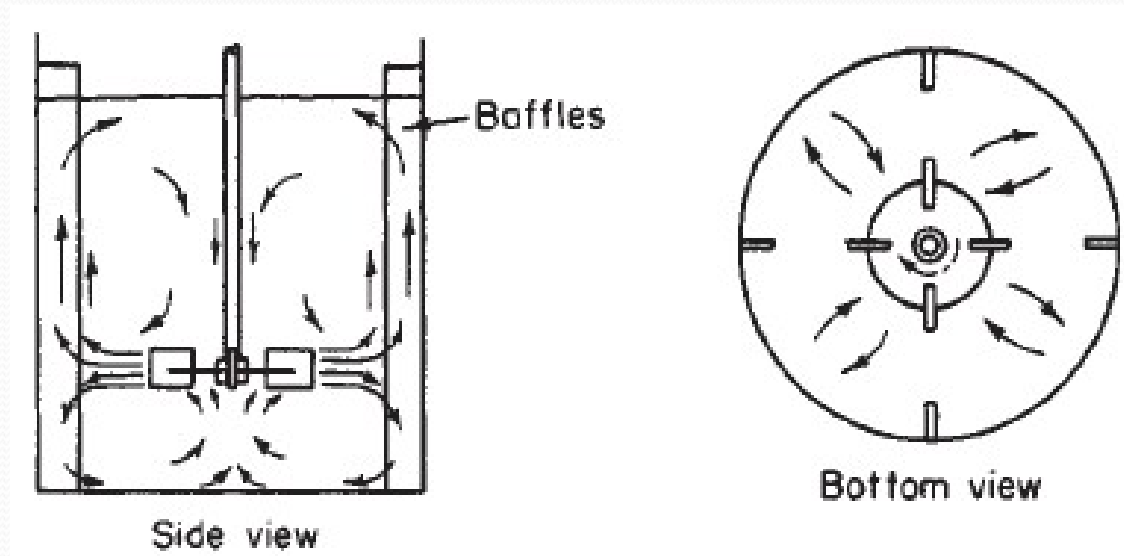
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Métodos para evitar vórtice:
 - Em tanques grandes:
entrada lateral do
agitador



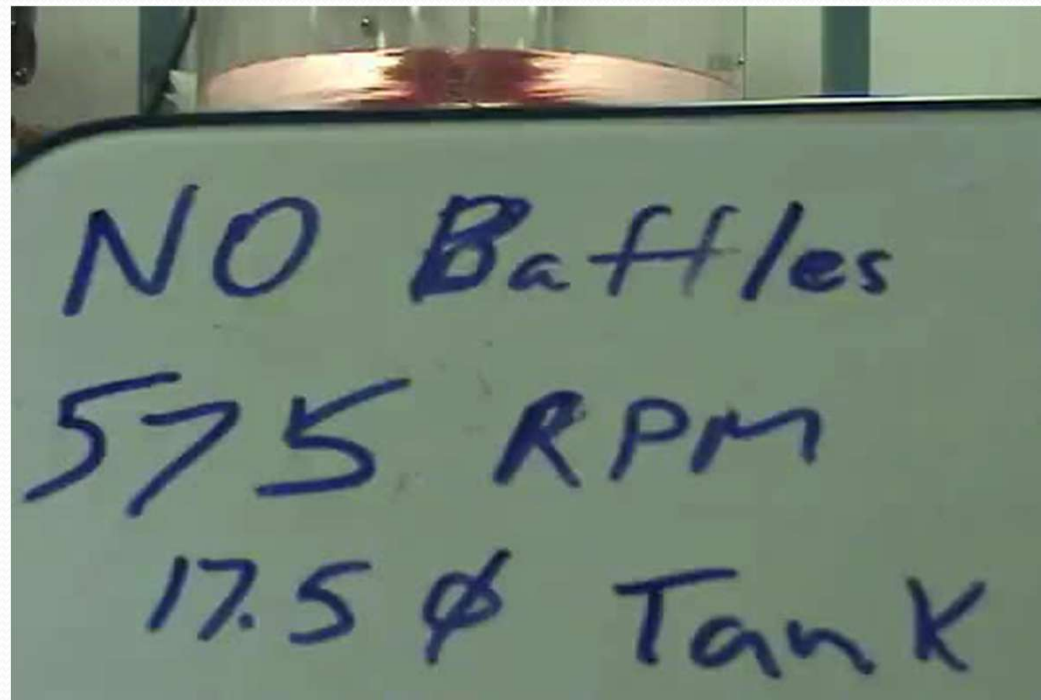
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Métodos para evitar vórtice:
 - Agitadores verticais: placas defletoras (chicanas)



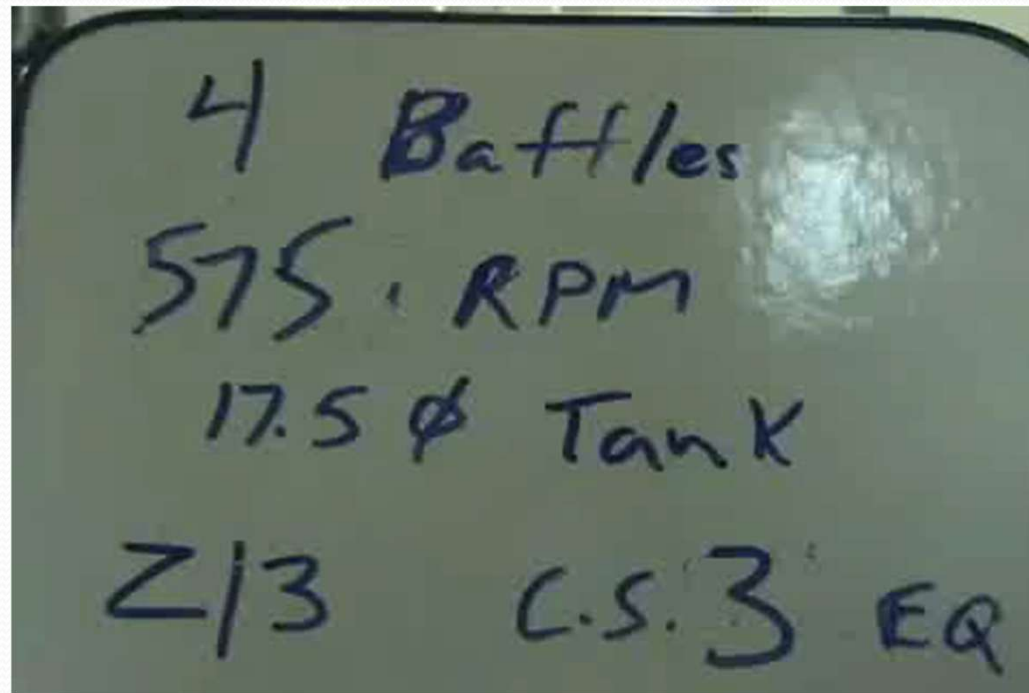
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Métodos para evitar vórtice:
 - Agitadores verticais: placas defletoras (chicanas)



IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- Métodos para evitar vórtice:
 - Agitadores verticais: placas defletoras (chicanas)



IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

- **Tipos de impulsores:**
 - **Pás**
 - **Turbinas**
 - **Propulsores (hélices)**

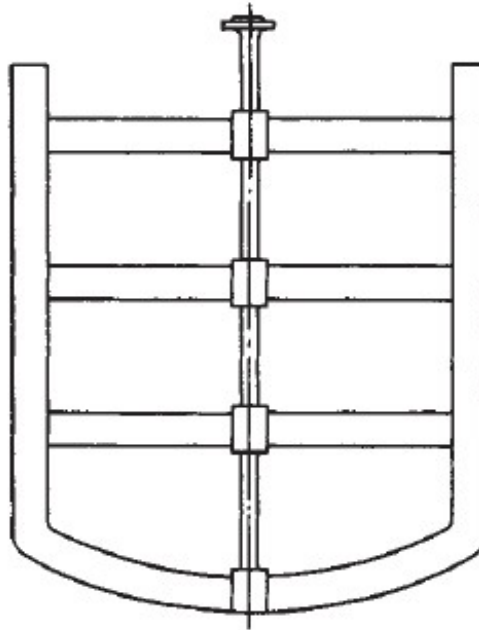
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

PÁS

- Uma ou várias pás, dispostas ao longo do eixo em um mesmo plano.
- Rotações baixas – baixa turbulência.
- Têm tamanho próximo ao diâmetro do tanque.
- Forte escoamento rotacional.
- Indicado para esvaziamento de tanques de suspensões.

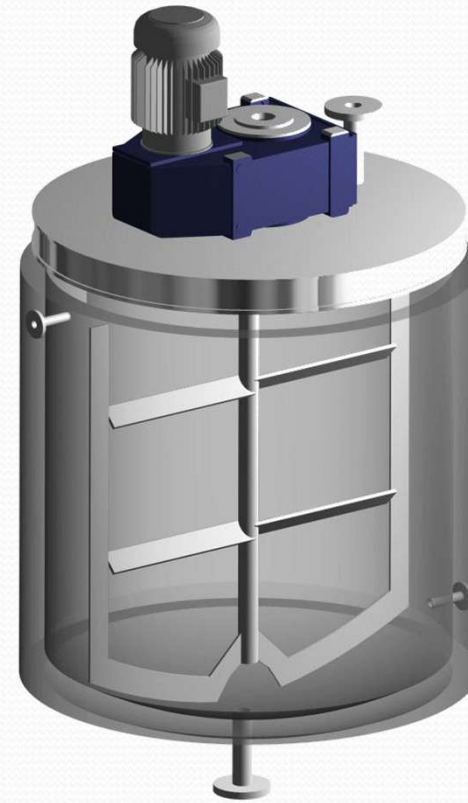
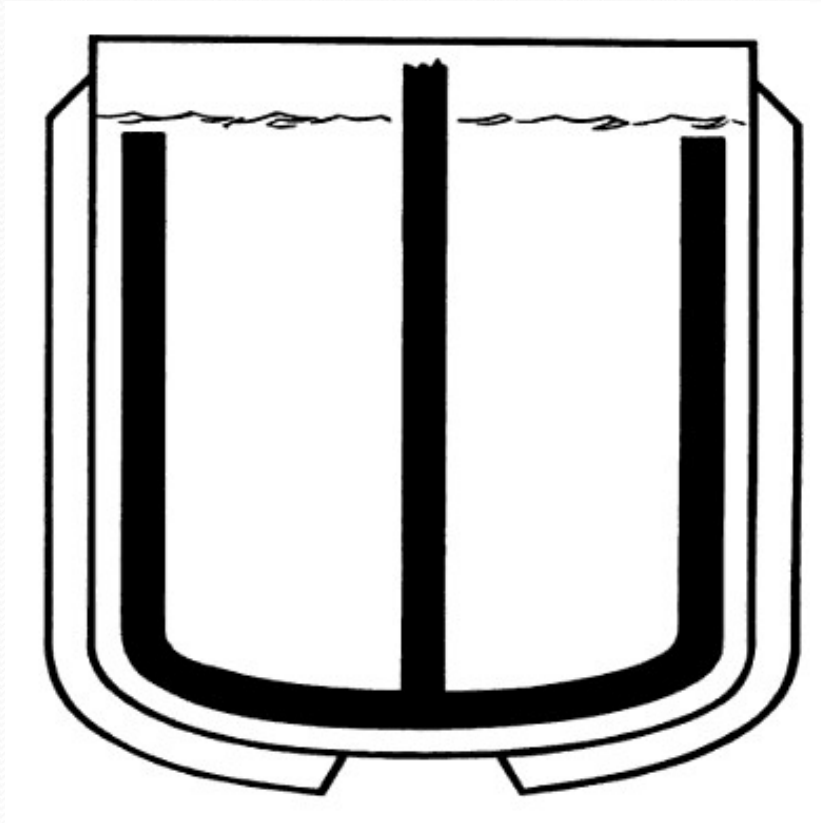
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

PÁS



IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

PÁS



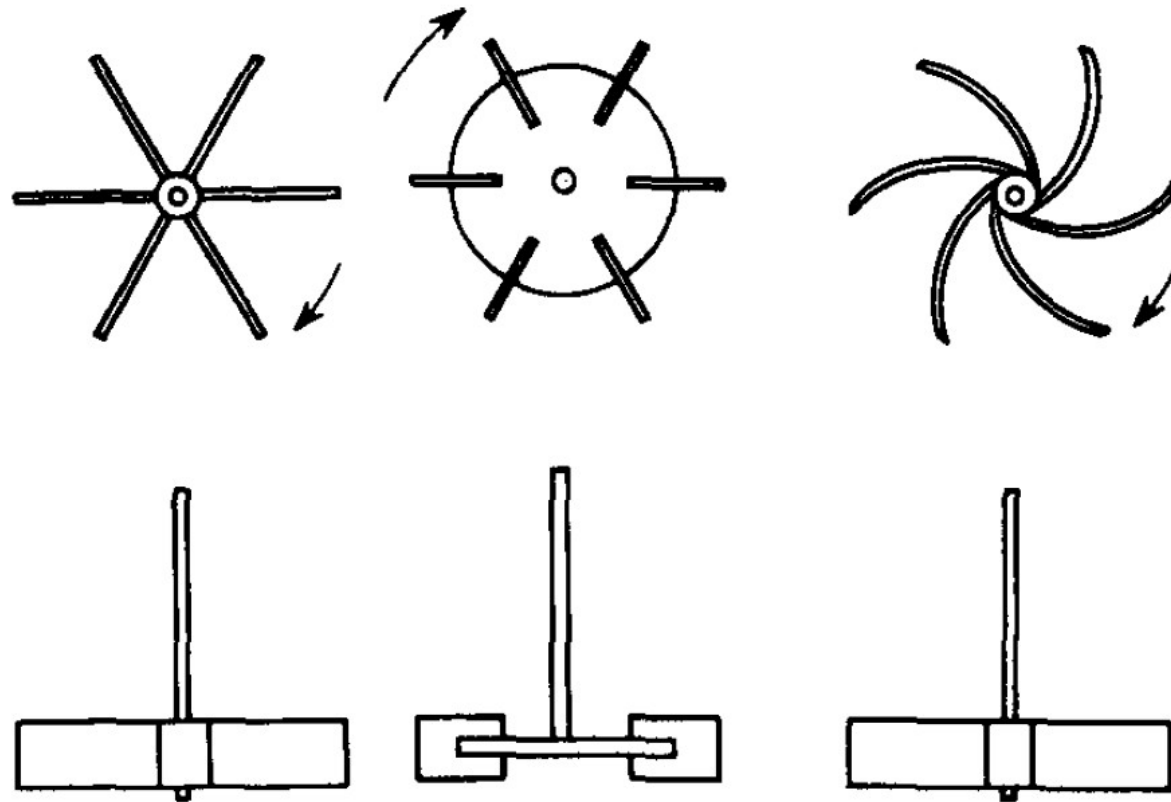
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

TURBINAS

- Combinação de múltiplas pás, anéis e discos.
- Rotações elevadas – turbulência elevada.
- Têm tamanho entre 0,3 e 0,5 vezes o diâmetro do tanque.
- Aspiram o líquido longitudinalmente e o impulsionam radialmente.
- Múltiplas aplicações, entre as quais, líquidos viscosos e suspensões.

IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

TURBINAS



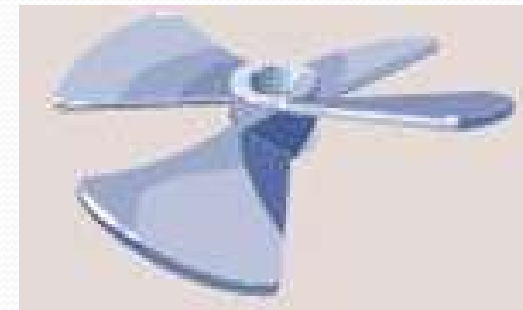
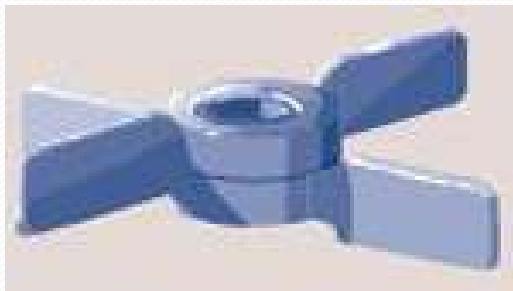
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

TURBINAS



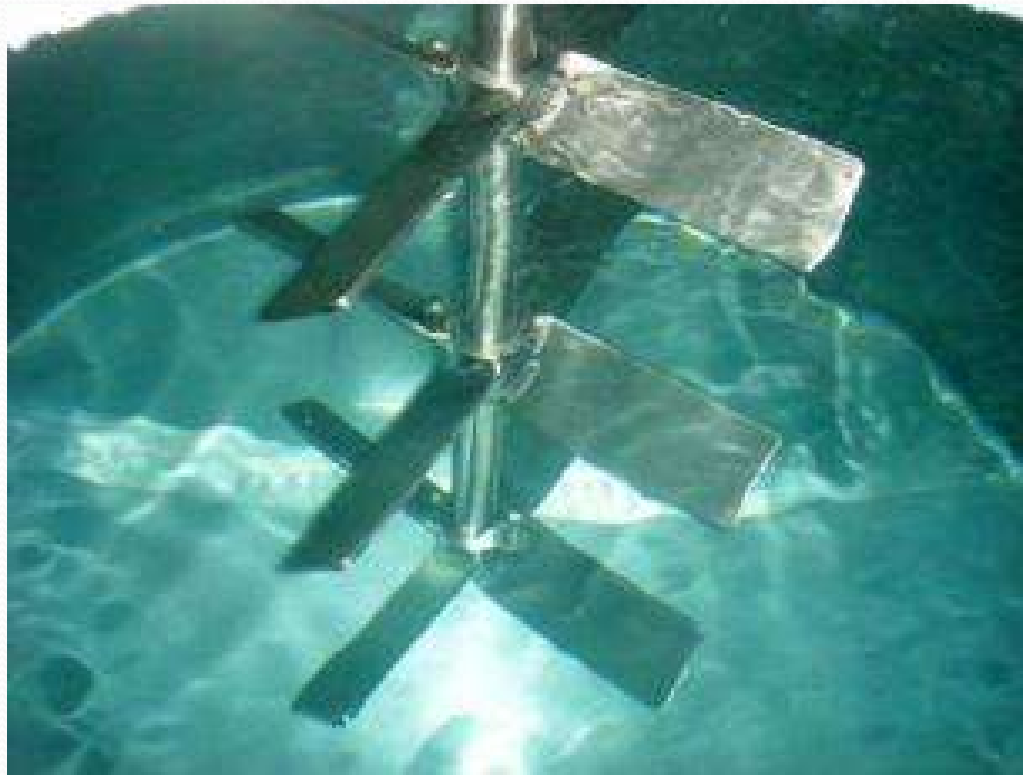
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

TURBINAS



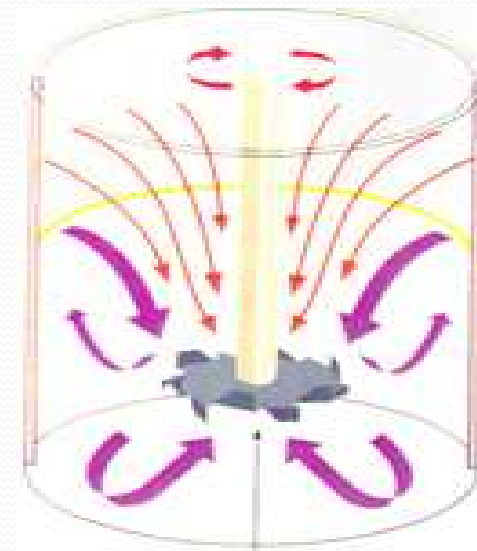
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

TURBINAS



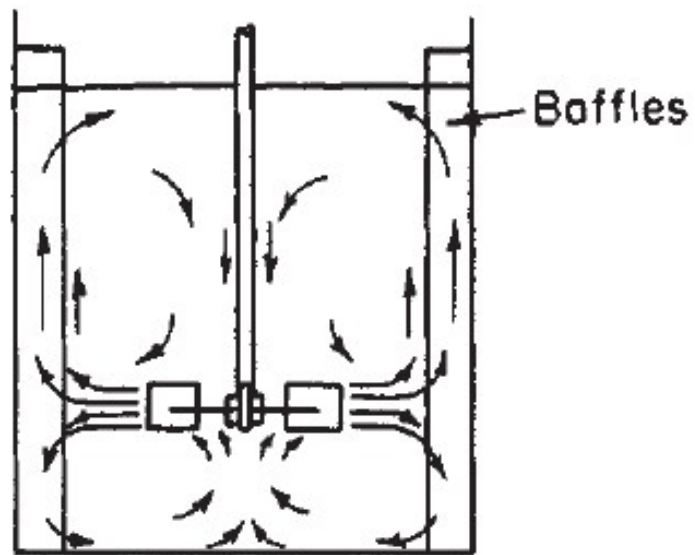
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

TURBINAS

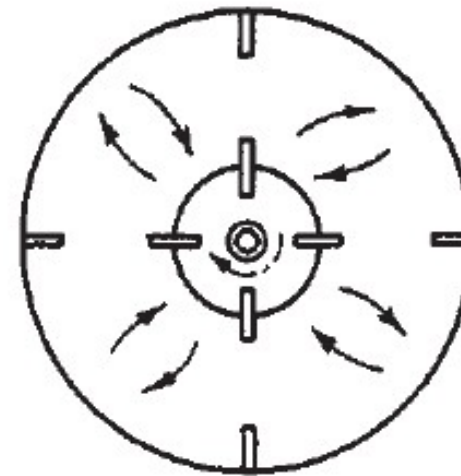


IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

TURBINAS



Side view



Bottom view

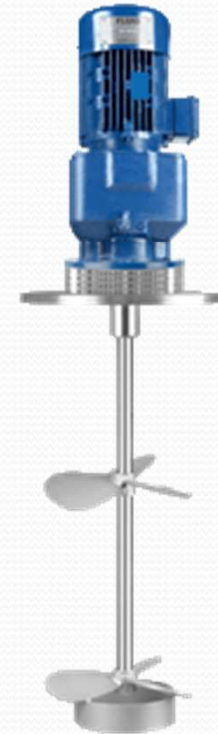
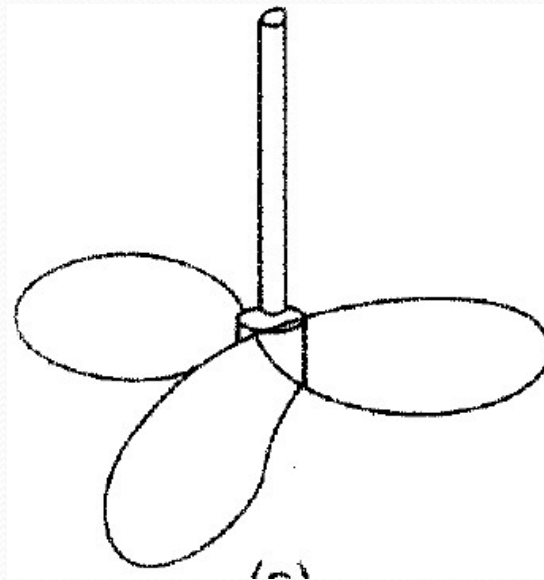
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

PROPULSORES

- Hélices, 2 a 4 pás.
- Assemelham-se ao propulsor de embarcações.
- Rotações elevadas – turbulência elevada.
- Têm tamanho aproximadamente de 0,3 vezes o diâmetro do tanque.
- Aspiram o líquido longitudinalmente e o impulsionam também longitudinalmente.
- Múltiplas aplicações.

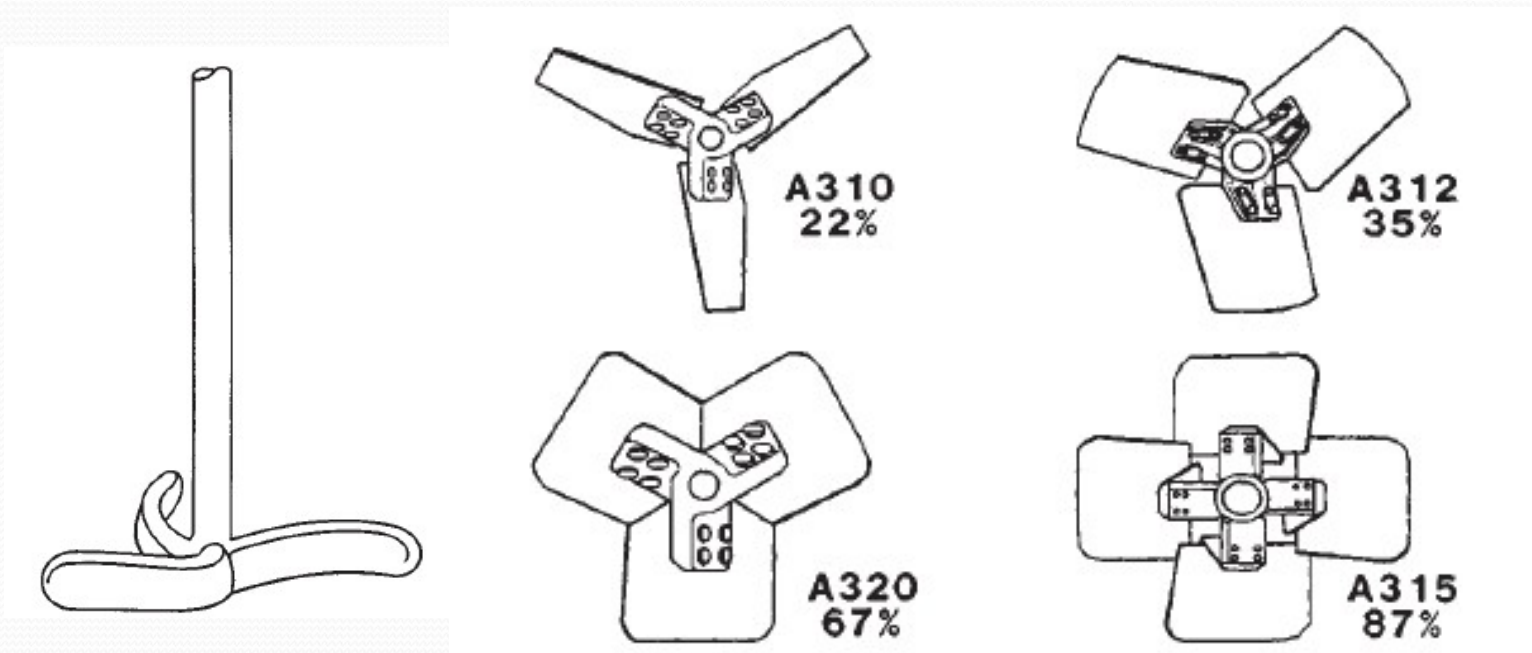
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

PROPULSORES



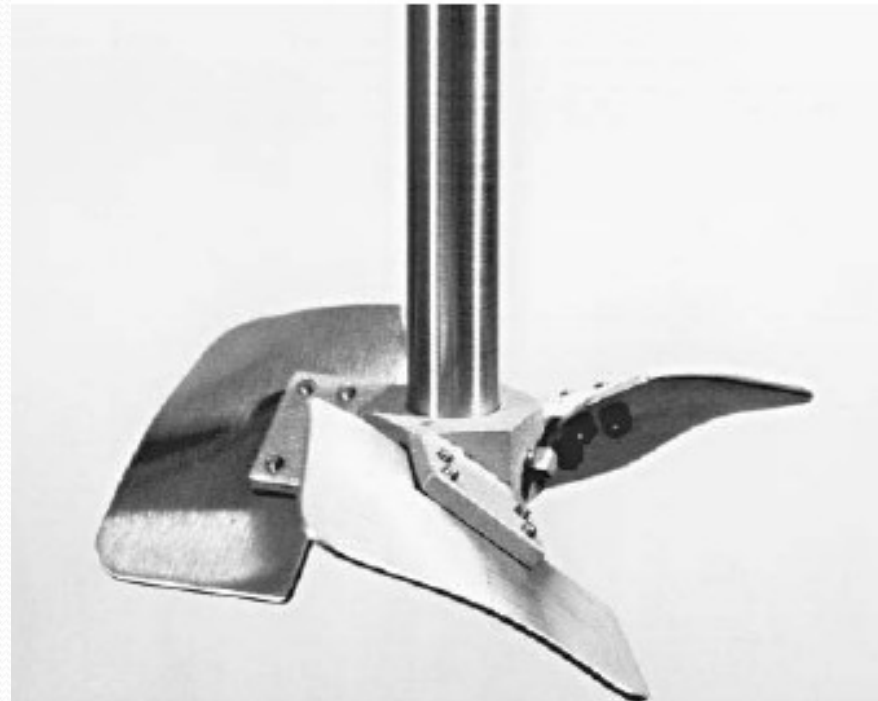
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

PROPULSORES



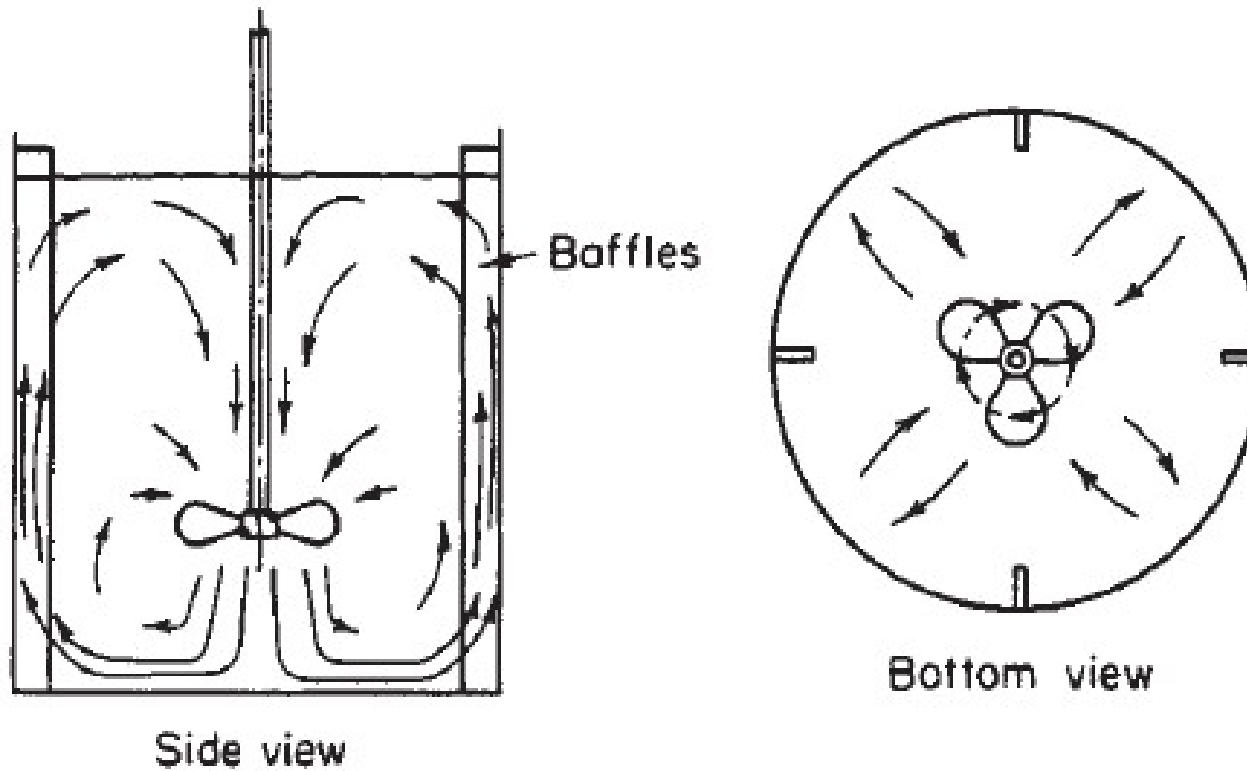
IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

PROPULSORES



IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

PROPULSORES



IMPULSORES PARA LÍQUIDOS

PROPULSORES



USP



Experimento 4

Destilação

EQUILÍBRIO LÍQUIDO-VAPOR

MISTURA DE LÍQUIDOS

A Ebulição de misturas de líquidos não ocorre em temperatura constante. Ocorre em uma faixa de temperaturas.

Ponto de Bolha – Temperatura em que se forma a primeira bolha de vapor, quando se aquece uma mistura de líquidos.

Ponto de Orvalho – Temperatura em que se forma a primeira gota de líquido quando se resfria uma mistura de gases.

Ponto de Bolha e Ponto de Orvalho dependem da pressão total e da composição da mistura.

EQUILÍBRIO LÍQUIDO-VAPOR

VOLATILIDADE

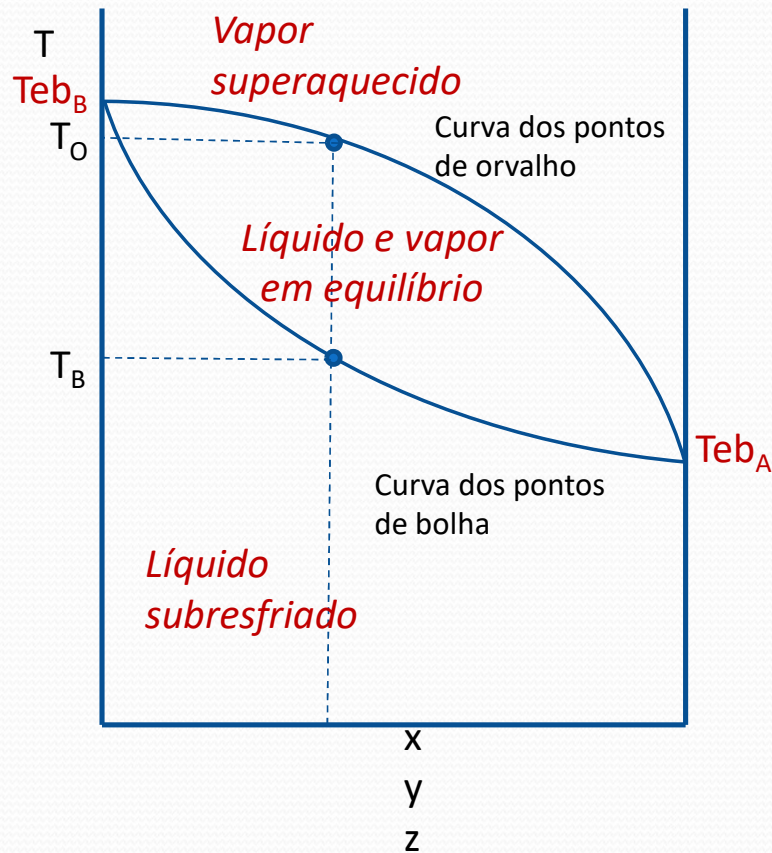
Volatilidade é a facilidade das moléculas de um líquido passarem para a fase vapor (vaporização).

Na comparação entre duas substâncias, a mais volátil apresenta:

- menor temperatura de ebulição;**
- maior pressão de vapor na mesma temperatura.**

MISTURA BINÁRIA DE LÍQUIDOS

Diagrama de temperaturas no equilíbrio líquido-vapor



z ... Fração molar da substância mais volátil na mistura

x ... Fração molar da substância mais volátil na fase líquido

y ... Fração molar da substância mais volátil na fase vapor

T ... Temperatura de equilíbrio líquido vapor

T_0 ... Temperatura de orvalho

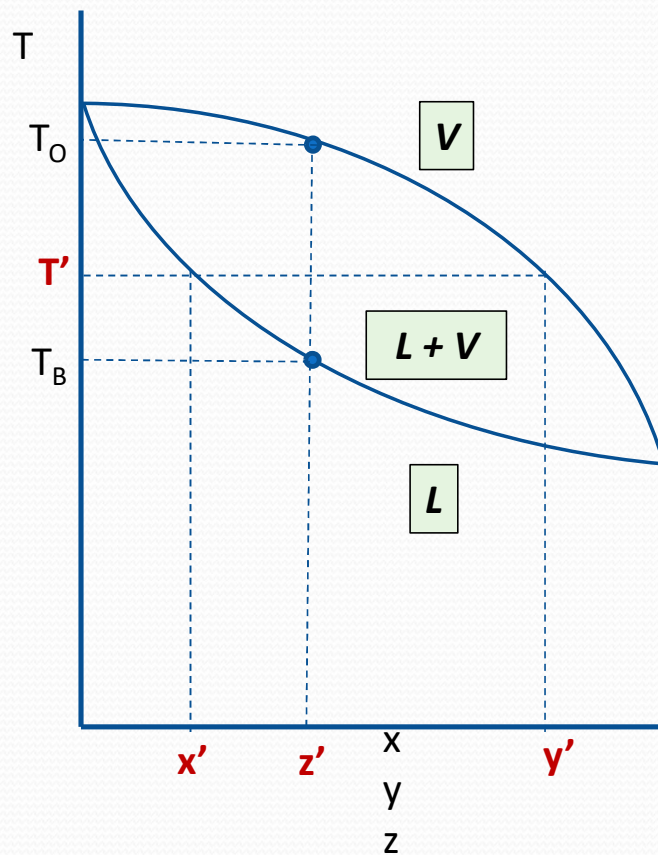
T_B ... Temperatura de bolha

T_{eb_A} ... Temperatura de ebulição da substância mais volátil

T_{eb_B} ... Temperatura de ebulição da substância menos volátil

MISTURA BINÁRIA DE LÍQUIDOS

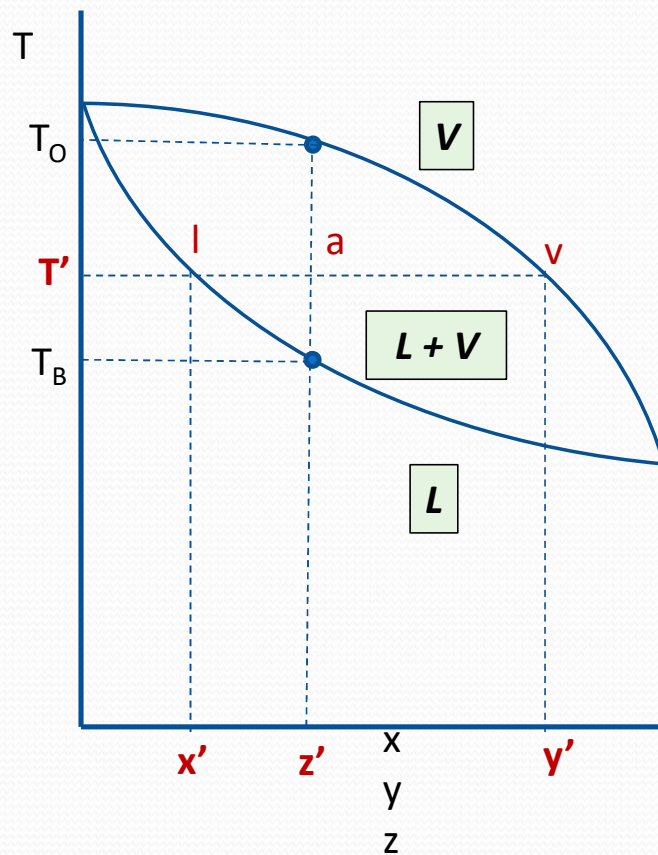
Diagrama de temperaturas no equilíbrio líquido-vapor



Para uma mistura de composição inicial z' , quando se atinge o equilíbrio líquido-vapor na temperatura T' , formam-se duas fases distintas: a fase Vapor que terá a composição y' (mais rica no componente mais volátil do que a mistura inicial, ou seja, $y' > z'$) e a fase Líquido que terá a composição x' (mais pobre no componente mais volátil do que a mistura inicial, ou seja, $x' < z'$).

MISTURA BINÁRIA DE LÍQUIDOS

Regra da Alavanca



$$\frac{n_{liq}}{n_{vap}} = \frac{\bar{a}v}{\bar{l}a}$$

$$n_{liq} = \frac{\bar{a}v}{\bar{l}v}$$

$$n_{vap} = \frac{\bar{l}a}{\bar{l}v}$$

DESTILAÇÃO

Separação de constituintes de uma mistura baseada na diferença de volatilidade entre eles.

Métodos:

1. Destilação simples:

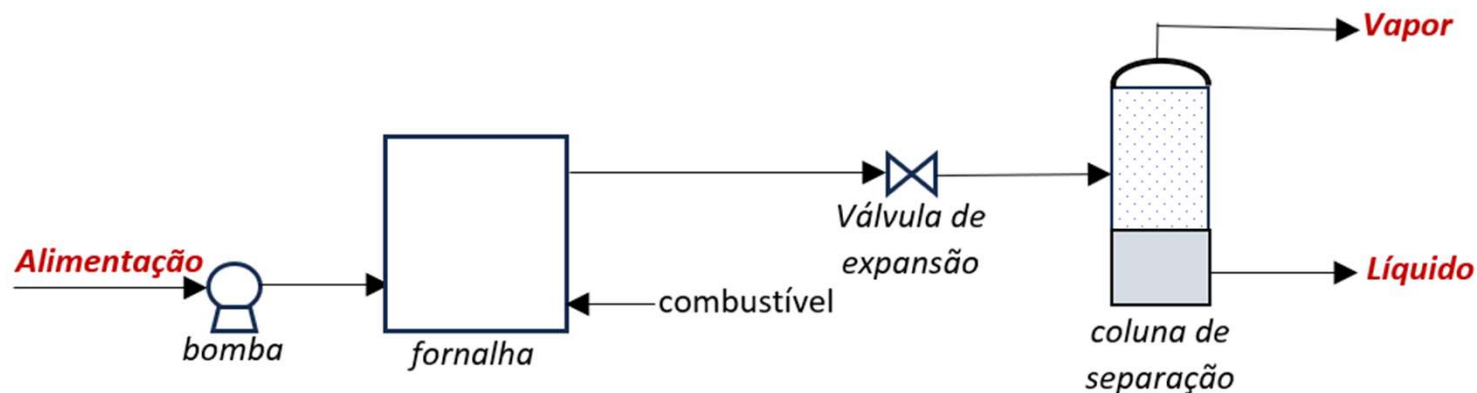
- Destilação Flash
- Destilação Diferencial

2. Complexo:

- Destilação com retificação

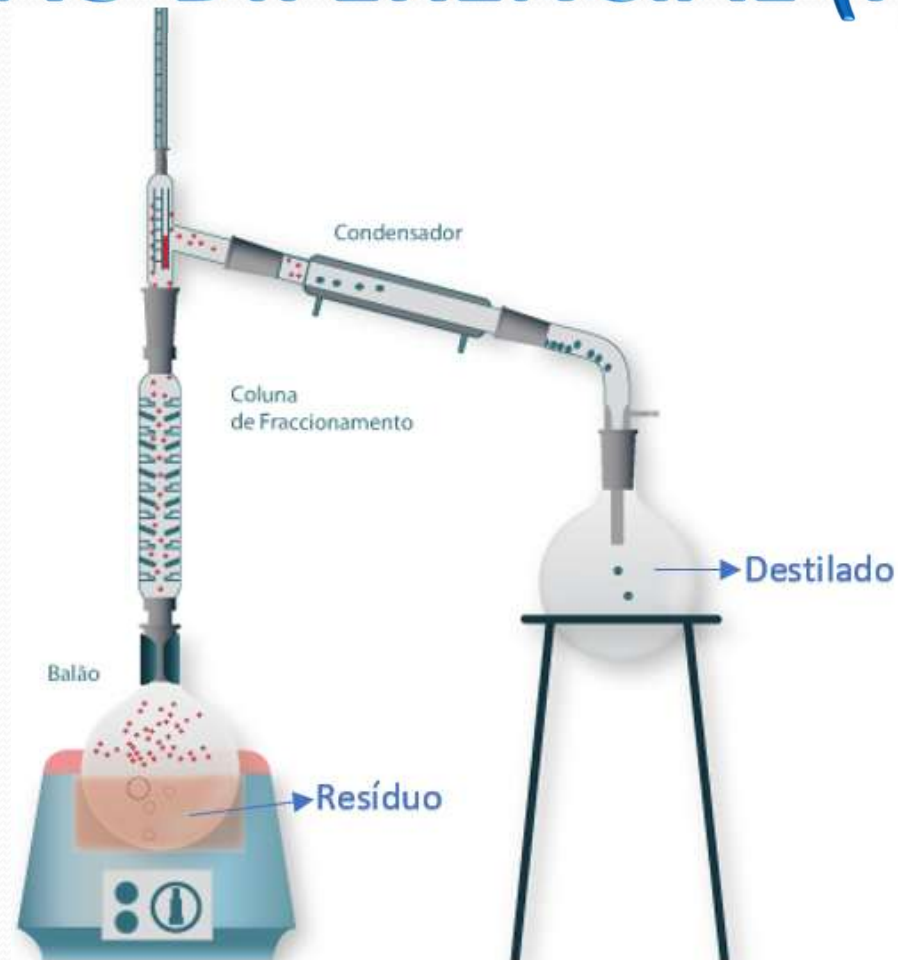
DESTILAÇÃO FLASH

Consiste em aquecer a mistura a uma temperatura constante, intermediária entre a do início e do final da ebulição, até o estabelecimento do equilíbrio. A pressão é reduzida através de uma válvula de expansão, separando-se em duas fases: líquido e vapor.



A alimentação é feita a uma dada temperatura (T_0) e pressão (p_0). A bomba aumenta a pressão do líquido (p_1). Na fornalha, a temperatura é aumentada (T_1). Na válvula de expansão a pressão é reduzida (p_2), separando-se as frações vapor e líquido.

DESTILAÇÃO DIFERENCIAL (RAYLEIGH)

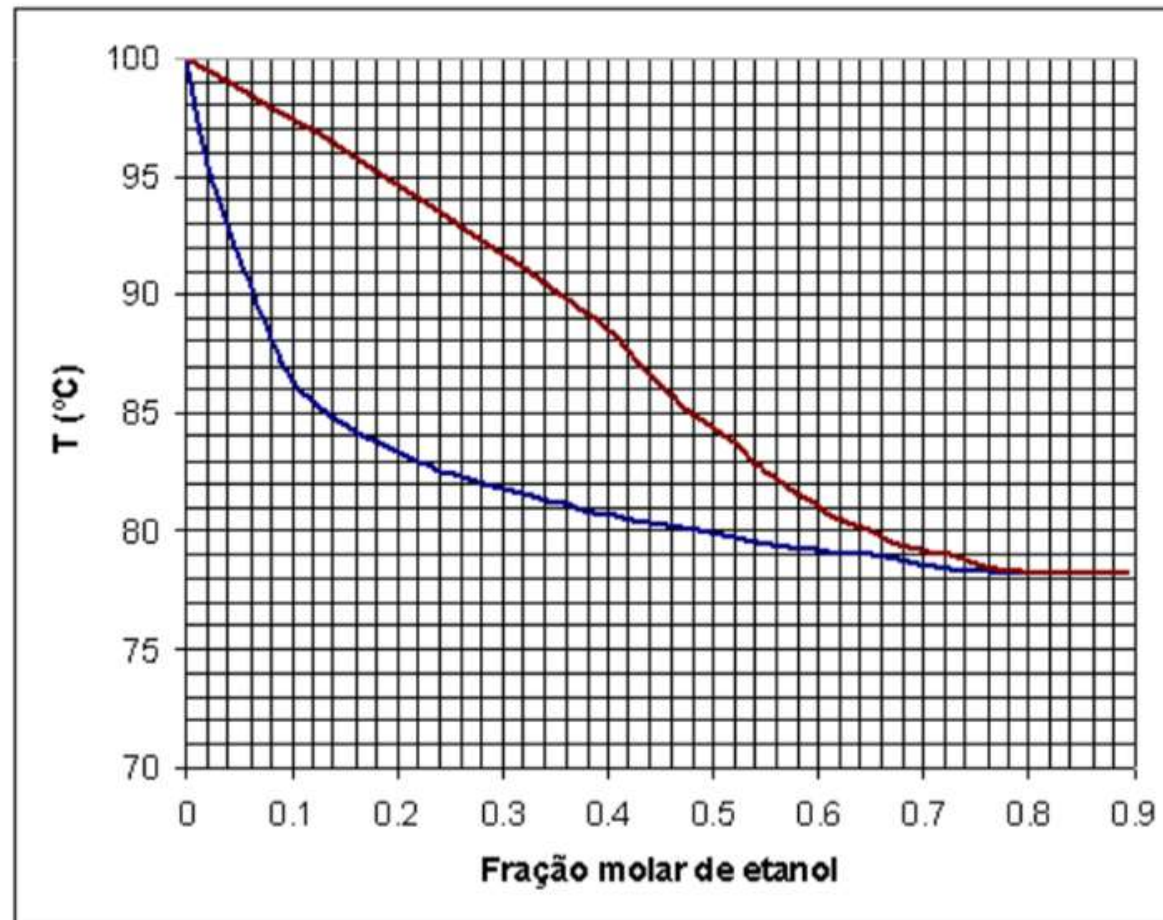


DESTILAÇÃO DIFERENCIAL (RAYLEIGH)

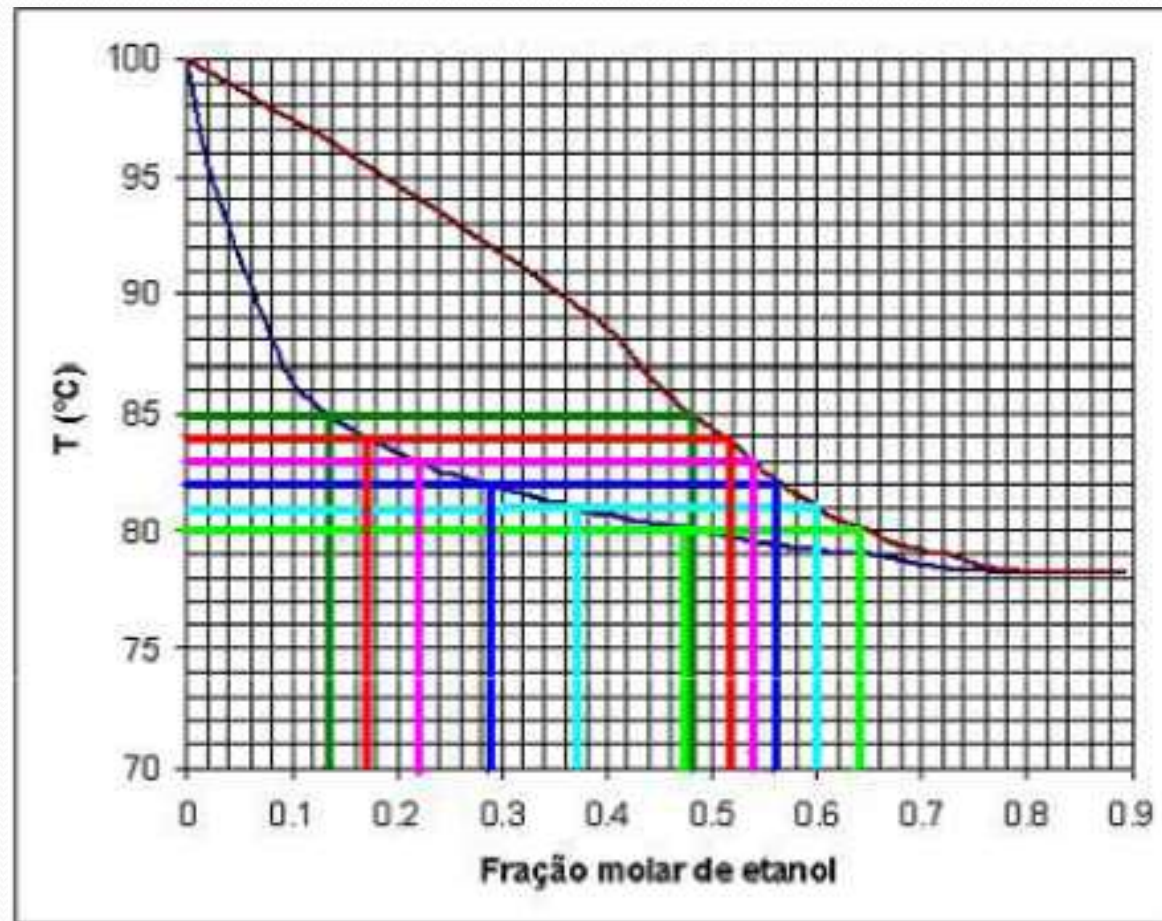
- Mistura líquida é alimentada no destilador e aquecida até o ponto de bolha e então submetida a uma evaporação lenta.
- O vapor produzido é mais rico no componente mais volátil em relação à composição inicial da mistura.
- O vapor produzido é logo removido, condensado e coletado como destilado.
- A primeira porção é mais rica nos componentes mais voláteis.
- Durante a operação o vapor vai se tornando mais pobre nos componentes mais voláteis. Como a composição do líquido se altera ao longo do tempo a temperatura aumenta lentamente.

DESTILAÇÃO DIFERENCIAL (RAYLEIGH)

DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO – ETANOL-ÁGUA

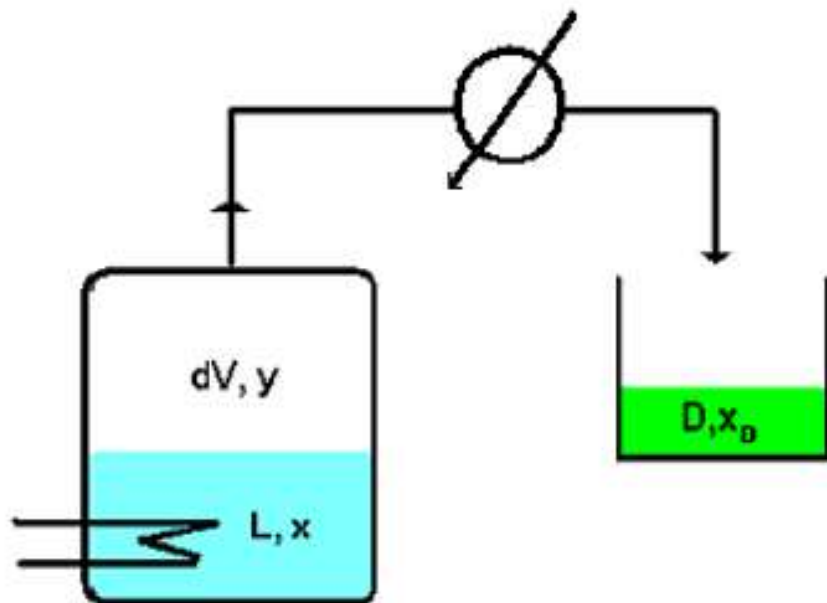


DESTILAÇÃO DIFERENCIAL (RAYLEIGH)



DESTILAÇÃO DIFERENCIAL (RAYLEIGH)

- MISTURAS BINÁRIAS



BALANÇO MATERIAL GLOBAL
VOLUME DE CONTROLE → LÍQUIDO NO DESTILADOR

Entra – Sai = Acumula

Entra = 0

Sai = dV

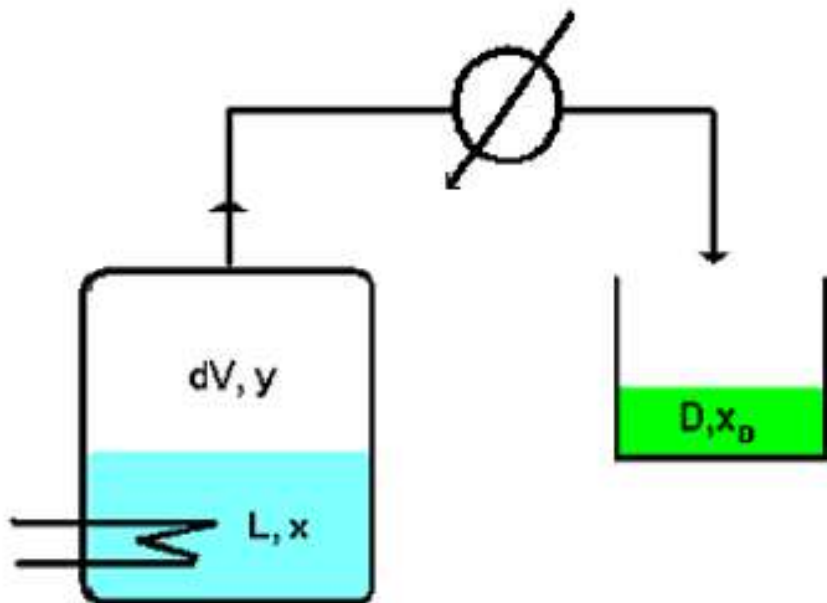
Acumula = $-dL$

LOGO:

$dV = dL(1)$

DESTILAÇÃO DIFERENCIAL (RAYLEIGH)

- MISTURAS BINÁRIAS



BALANÇO MATERIAL GLOBAL
VOLUME DE CONTROLE → LÍQUIDO NO DESTILADOR

Entra – Sai = Acumula

Entra = 0

Sai = dV

Acumula = $-dL$

LOGO:

$dV = dL$ (1)

PARTINDO DAS EQUAÇÕES 1 ($dV = dL$) E 2 ($y dV = L dx + x dL$), OBTÉM-SE:

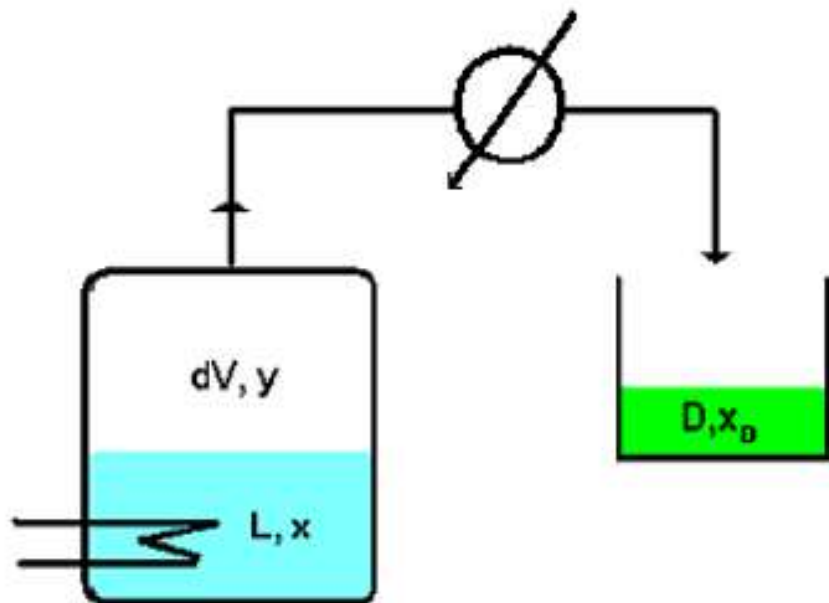
$$\int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \int_{x_0}^x \frac{dx}{y - x}$$

INTEGRANDO O LADO ESQUERDO DA EQUAÇÃO E REARRANJANDO:

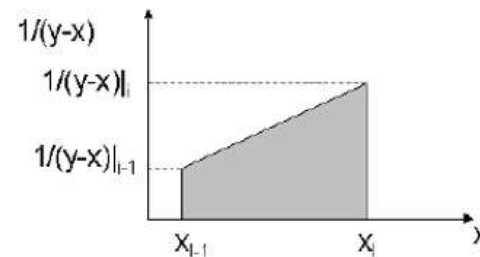
$$\ln\left(\frac{L_0}{L}\right) = \int_x^{x_0} \frac{dx}{y - x}$$

DESTILAÇÃO DIFERENCIAL (RAYLEIGH)

- MISTURAS BINÁRIAS



A INTEGRAL DO LADO DIREITO DA EQUAÇÃO PODE SER INTEGRADA UTILIZANDO MÉTODOS NUMÉRICOS, COMO POR EXEMPLO O MÉTODO DOS TRAPÉZIOS.

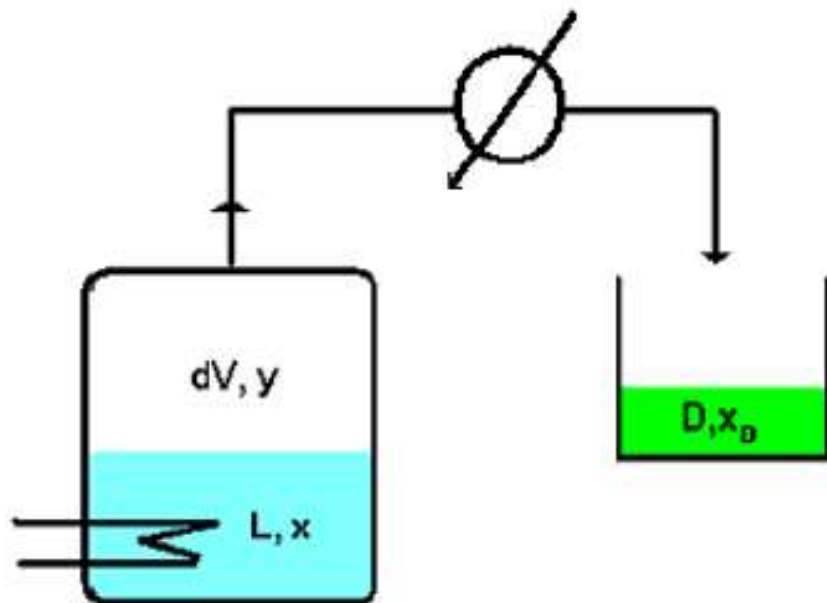


$$\int_x^{x_0} \frac{dx}{y-x} = \sum_{i=1}^n \frac{\left(\frac{1}{y-x}|_i + \frac{1}{y-x}|_{i-1} \right) (x_{i-1} - x_i)}{2}$$

n = NÚMERO DE INTERVALOS UTILIZADOS NA INTEGRAÇÃO

DESTILAÇÃO DIFERENCIAL (RAYLEIGH)

- MISTURAS BINÁRIAS



CASO PARTICULAR: VOLATILIDADE APROXIMADAMENTE CONSTANTE:
 $\alpha = [y(1-x)] / [x(1-y)] \rightarrow y = \alpha x / [1 + (\alpha - 1)]$

DESTA FORMA:

$$\ln\left(\frac{L_0}{L}\right) = \frac{1}{\alpha - 1} \ln\left(\frac{x_0(1-x)}{1-x_0}\right) + \ln\left(\frac{1-x}{1-x_0}\right) \quad \text{OU} \quad \frac{L}{L_0} = \left[\frac{x}{x_0} \left(\frac{1-x_0}{1-x}\right)^\alpha\right]^{\frac{1}{\alpha-1}}$$

OU AINDA:

$$\ln\left(\frac{L_0 x_0}{L x}\right) = \alpha \ln\left(\frac{L_0(1-x_0)}{L(1-x)}\right)$$

PARA MISTURA DE MULTICOMPONENTES IDEAL PODE-SE RELACIONAR L , L_0 DE DOIS ELEMENTOS QUALQUER (i E j) E A RESPECTIVA VOLATILIDADE RELATIVA:

$$\ln\left(\frac{L_0 x_{0j}}{L x_j}\right) = \alpha_{i,j} \ln\left(\frac{L_0 x_{0i}}{L x_i}\right)$$

DESTILAÇÃO DIFERENCIAL (RAYLEIGH)

EXEMPLO

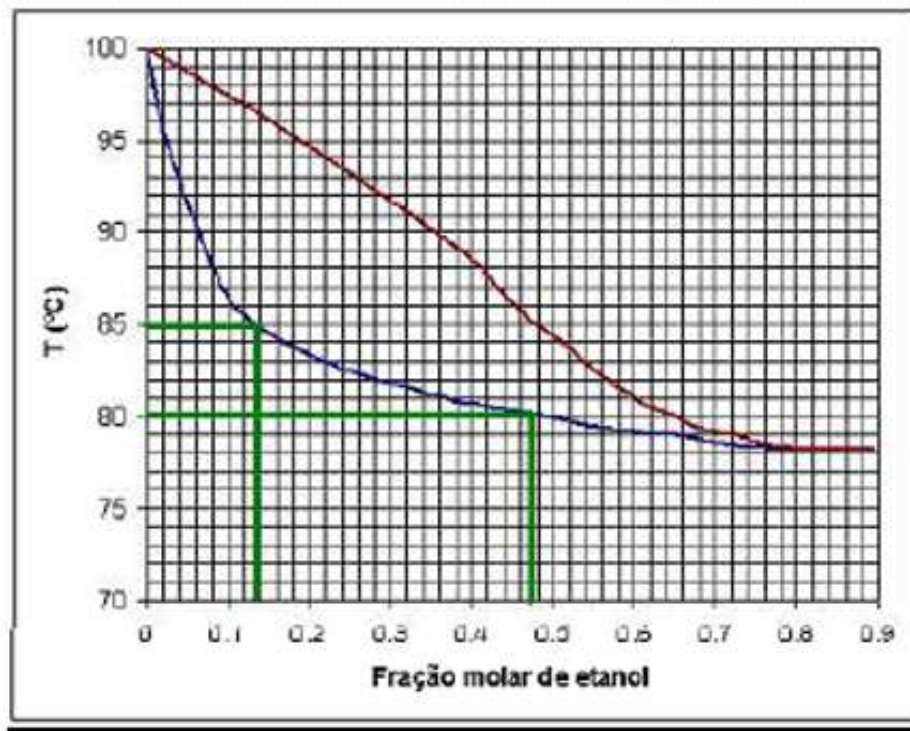
Deseja-se concentrar o etanol de uma mistura contendo, praticamente, etanol e água. Sabendo-se que a temperatura de ebulição da mistura inicial é de 80°C e que o corte da destilação foi realizado a 85°C , estime a fração molar de etanol na mistura inicial (x_0), no resíduo (x) e no destilado (x_D).

- A) Considere para a estimativa as condições operacionais de destilação diferencial.
- B) Compare x_D com o valor médio de y .

Dado: Diagrama T versus fração molar de etanol

DESTILAÇÃO DIFERENCIAL (RAYLEIGH)

A) Solução:



A fração molar inicial (x_0) e no resíduo (x) podem ser obtidas diretamente no diagrama temperatura versus composição.

$$x_0 = 0,47$$

$$x = 0,14$$

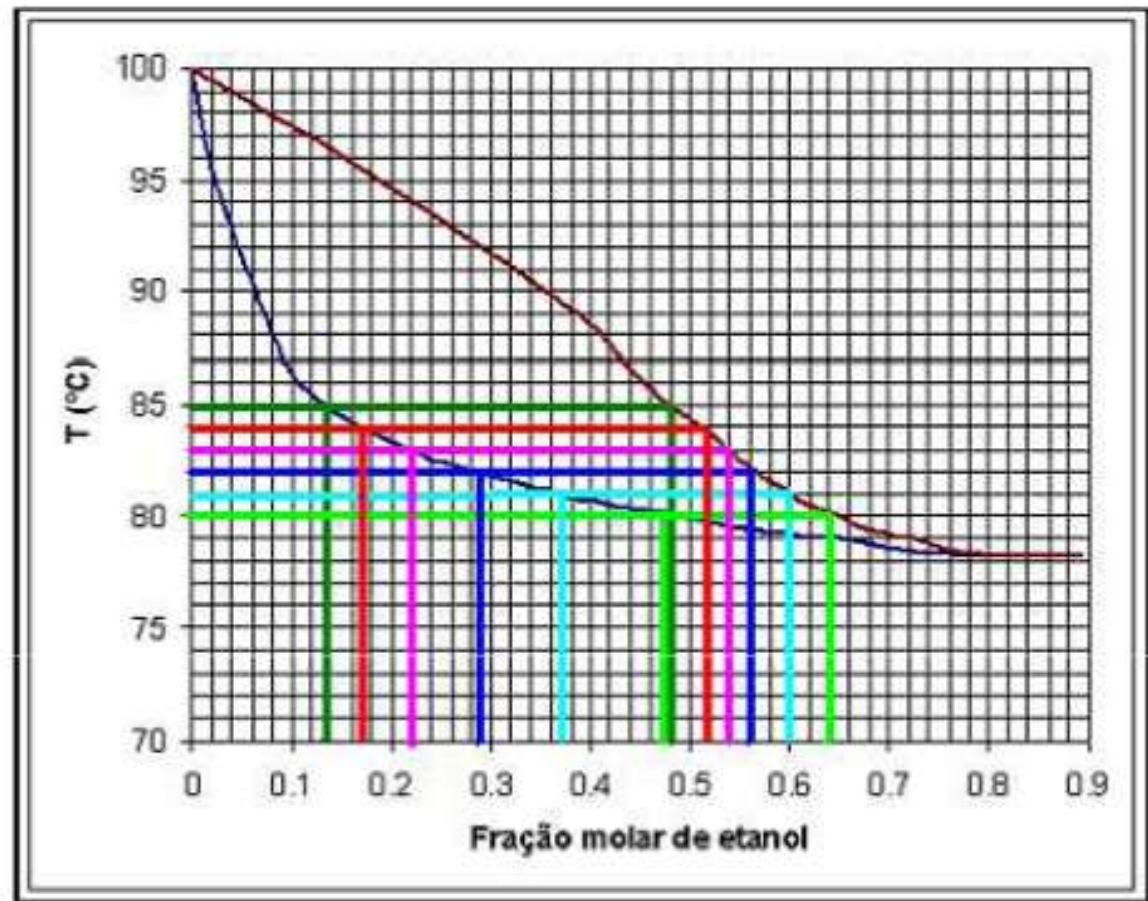
DESTILAÇÃO DIFERENCIAL (RAYLEIGH)

Deteminação de x_D :

$$\ln\left(\frac{L_0}{L}\right) = \int_x^{x_0} \frac{dx}{y-x}$$

Do diagrama:

T	x	y
80	0,47	0,64
81	0,37	0,60
82	0,29	0,56
83	0,22	0,54
84	0,17	0,52
85	0,14	0,48



DESTILAÇÃO DIFERENCIAL (RAYLEIGH)

CALCULOS: $\ln\left(\frac{L_0}{L}\right) = \int_x^{x_0} \frac{dx}{y-x}$

T	x	y	1/(y-x)	A	
80.00	0.47	0.64	5.88		
81.00	0.37	0.60	4.35	$(4.35+5.88)*(0.47-0.37)/2=$	0.51
82.00	0.29	0.56	3.70	$(3.7+4.35)*(0.37-0.29)/2=$	0.32
83.00	0.22	0.54	3.13	$(3.13+3.7)*(0.29-0.22)/2=$	0.24
84.00	0.17	0.52	2.86	$(2.86+3.13)*(0.22-0.17)/2=$	0.15
85.00	0.14	0.48	2.94	$(2.94+2.86)*(0.17-0.14)/2=$	0.09
				soma=	1.31

$\ln(L_0/L) = 1,31 \rightarrow L_0=3,7L$

BALANÇO MATERIAL GLOBAL: $L_0=L+D \rightarrow D=2.7L$

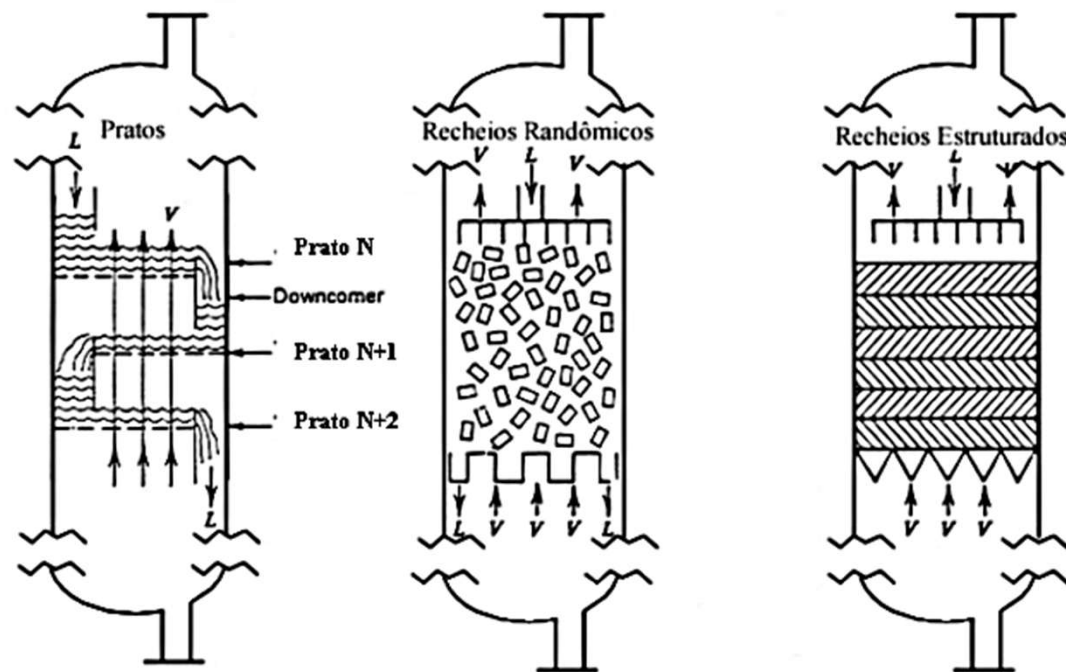
BALANÇO MATERIAL PARA O ETANOL:

$L_0x_0=Lx+Dx_D \rightarrow 3,7*L*0.47=L*0.14+2.7*L*x_D$

$x_D=0,59 \rightarrow$ valor médio de y = 0,56

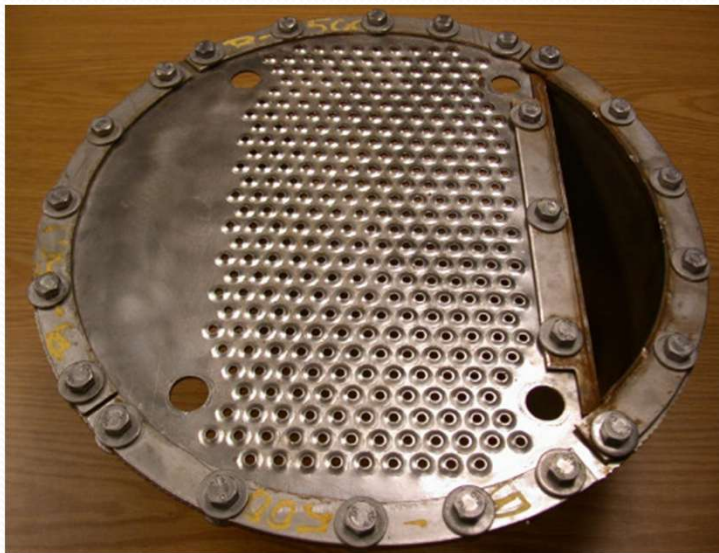
DESTILAÇÃO COM RETIFICAÇÃO

- Consiste em uma torre alimentada no fundo por um fluxo de gases e no topo por um fluxo de líquido.
- Ocorrem escoamentos em contracorrente, líquido descendente e vapor ascendente.
- Existem dois tipos de coluna: de “pratos” e “com enchimentos (recheios)”.



DESTILAÇÃO COM RETIFICAÇÃO

- Consiste em uma torre alimentada no fundo por um fluxo de gases e no topo por um fluxo de líquido.
- Ocorrem escoamentos em contracorrente, líquido descendente e vapor ascendente.
- Existem dois tipos de coluna: de “pratos” e “com enchimentos”.



DESTILAÇÃO COM RETIFICAÇÃO

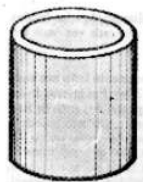
- Consiste em uma torre alimentada no fundo por um fluxo de gases e no topo por um fluxo de líquido.
- Ocorrem escoamentos em contracorrente, líquido descendente e vapor ascendente.
- Existem dois tipos de coluna: de “pratos” e “com enchimentos”.



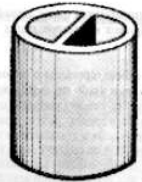
DESTILAÇÃO COM RETIFICAÇÃO

- Consiste em uma torre alimentada no fundo por um fluxo de gases e no topo por um fluxo de líquido.
- Ocorrem escoamentos em contracorrente, líquido descendente e vapor ascendente.
- Existem dois tipos de coluna: de “pratos” e “com enchimentos”.

Recheios Randômicos Tradicionais



Anel de Raschig



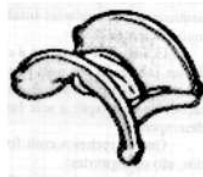
Anel de Lessing



Anel Particionado



Sela de Berl



Sela Intalox



Anel Pall

Randômicos Modernos



IMTP



Super Intalox



Nutter



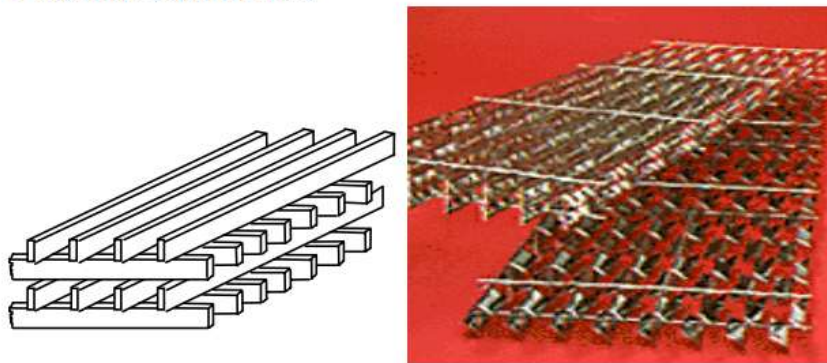
I-Ring

DESTILAÇÃO COM RETIFICAÇÃO

- Consiste em uma torre alimentada no fundo por um fluxo de gases e no topo por um fluxo de líquido.
- Ocorrem escoamentos em contracorrente, líquido descendente e vapor ascendente.
- Existem dois tipos de coluna: de “pratos” e “com enchimentos”.

Grades

- ΔP 0,3-0,4 mmHg/HETP
- Vazões 50-100% superiores aos pratos
- Grandes diâmetros



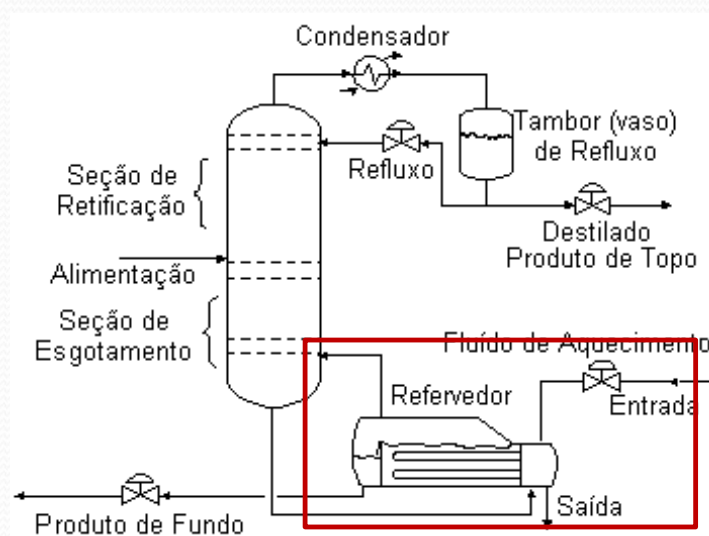
Recheios Estruturados de Alta Eficiência



Recheios BX da Sulzer

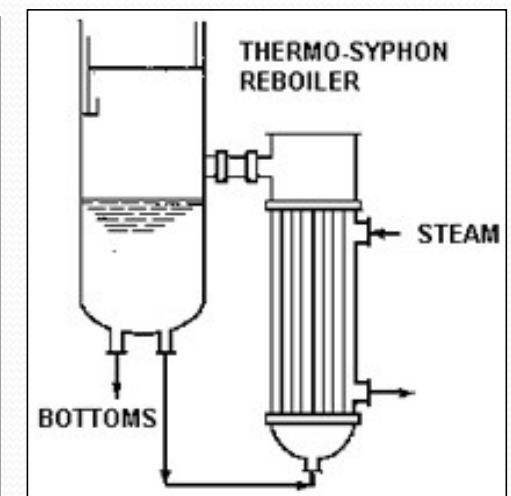
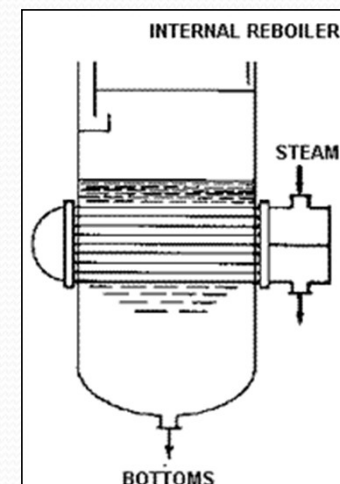
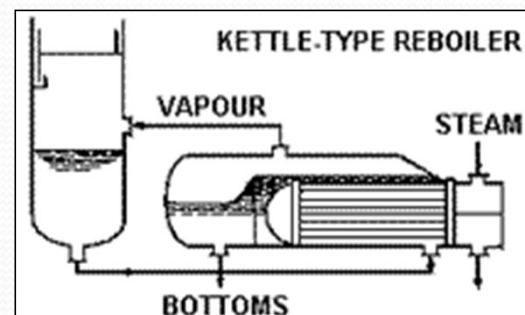
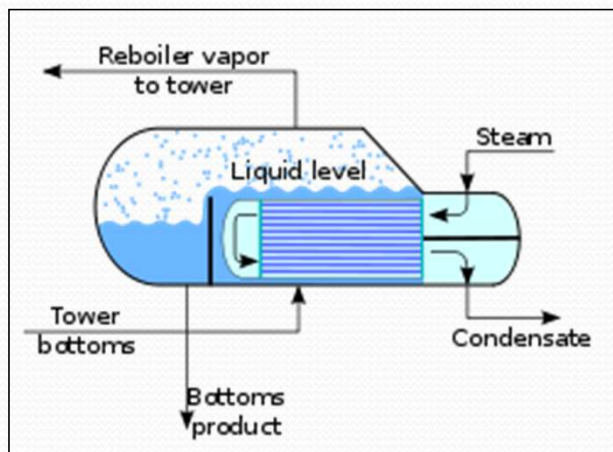
DESTILAÇÃO COM RETIFICAÇÃO

- Consiste em uma torre alimentada no fundo por um fluxo de gases e no topo por um fluxo de líquido.
- Ocorrem escoamentos em contracorrente, líquido descendente e vapor ascendente.
- Existem dois tipos de coluna: de “pratos” e “com enchimentos”.
- Na base da coluna existe uma caldeira ou refulvedor ou “reboiler”, que recebe o líquido (mistura) que sai da coluna, reaquece e evapora parcialmente. O vapor produzido é reintroduzido na coluna e vai constituir o fluxo ascendente. O líquido residual é retirado como **produto de fundo**.



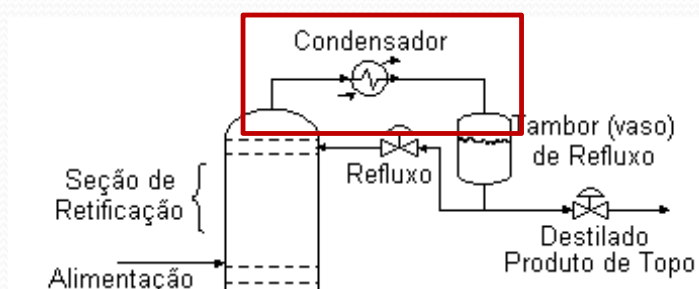
DESTILAÇÃO COM RETIFICAÇÃO

- Consiste em uma torre alimentada no fundo por um fluxo de gases e no topo por um fluxo de líquido.
- Ocorrem escoamentos em contracorrente, líquido descendente e vapor ascendente.
- Existem dois tipos de coluna: de “pratos” e “com enchimentos”.
- Na base da coluna existe uma caldeira ou refeedor ou “reboiler”, que recebe o líquido (mistura) que sai da coluna, reaquece e evapora parcialmente. O vapor produzido é reintroduzido na coluna e vai constituir o fluxo ascendente. O líquido residual é retirado como **produto de fundo**.

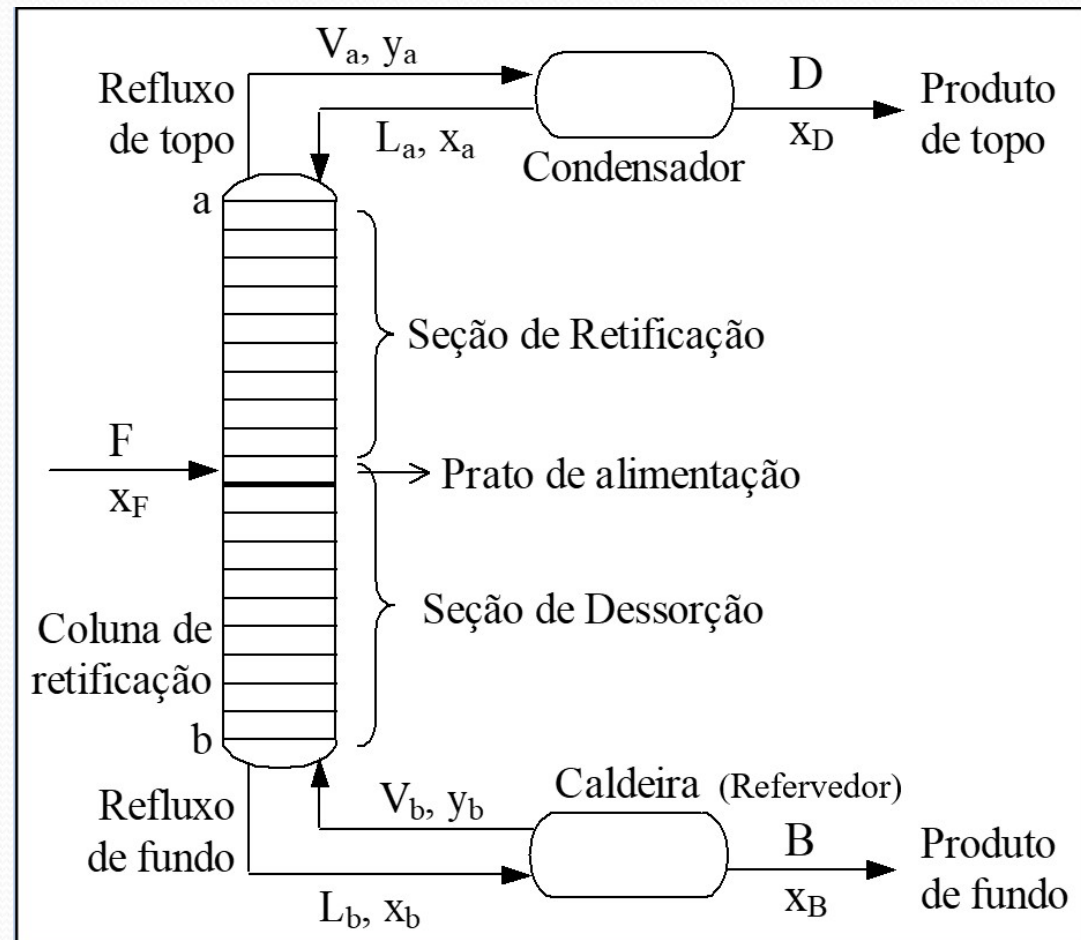


DESTILAÇÃO COM RETIFICAÇÃO

- Consiste em uma torre alimentada no fundo por um fluxo de gases e no topo por um fluxo de líquido.
- Ocorrem escoamentos em contracorrente, líquido descendente e vapor ascendente.
- Existem dois tipos de coluna: de “pratos” e “com enchimentos”.
- Na base da coluna existe uma caldeira ou refeedor ou “reboiler”, que recebe o líquido (mistura) que sai da coluna, reaquece e evapora parcialmente. O vapor produzido é reintroduzido na coluna e vai constituir o fluxo ascendente. O líquido residual é retirado como **produto de fundo**.
- No topo da coluna existe um trocador de calor onde todo o vapor (mistura) que sai da coluna sofre condensação, sendo que parte do condensado retorna para a coluna para constituir o fluxo descendente e parte do condensado é retirado como **produto de topo**.



DESTILAÇÃO COM RETIFICAÇÃO



DESTILAÇÃO COM RETIFICAÇÃO



