



EVAPORADORES

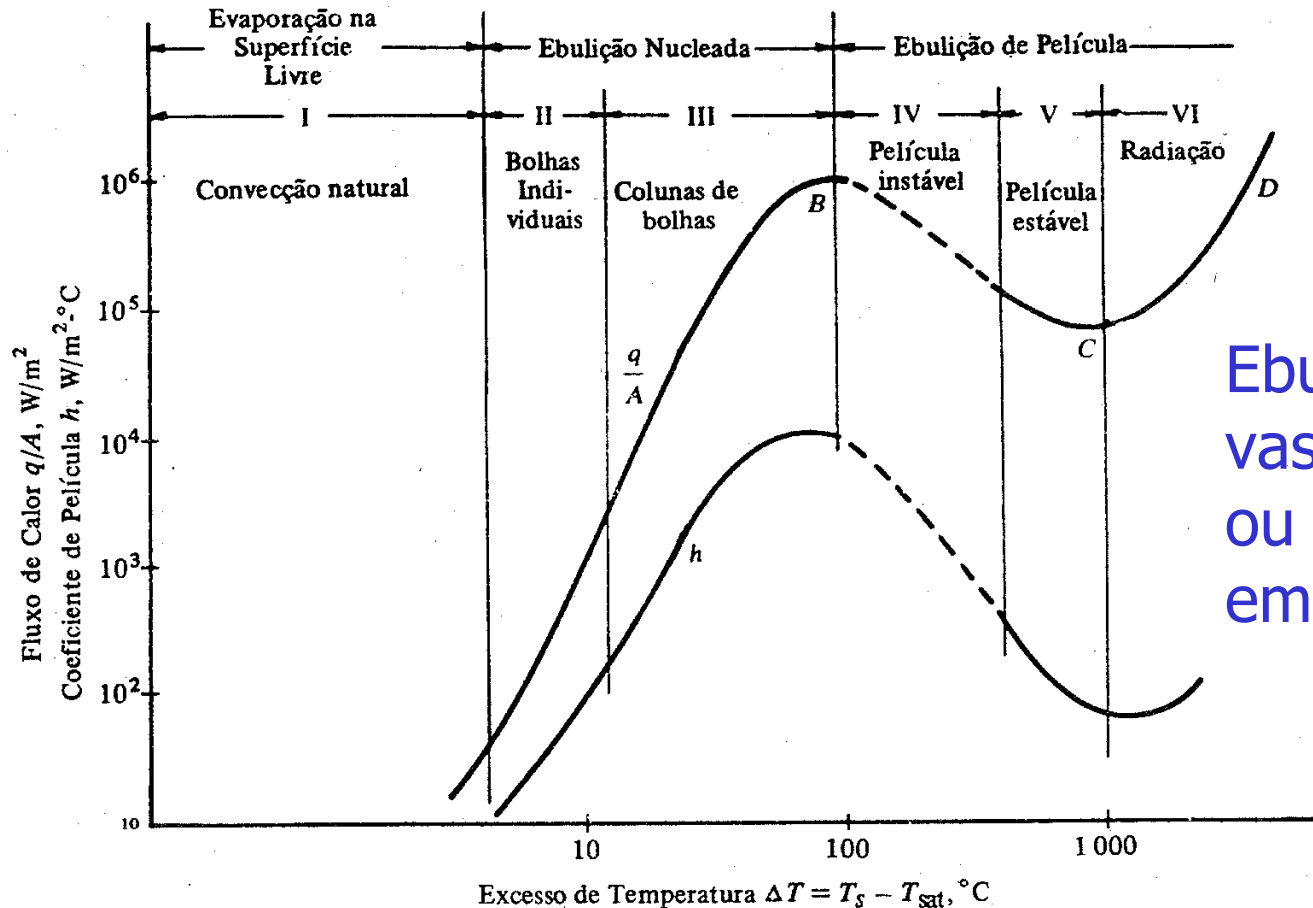
Este capítulo é uma introdução ao tema do projeto termo-hidráulico de trocadores de calor envolvendo a vaporização de substâncias puras.



INTRODUÇÃO

- Ciclos de geração de potência
- Ciclos de refrigeração
- Evaporadores químicos
- Custo
 - Área de troca térmica
 - Potência de bombeamento

TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA EBULIÇÃO

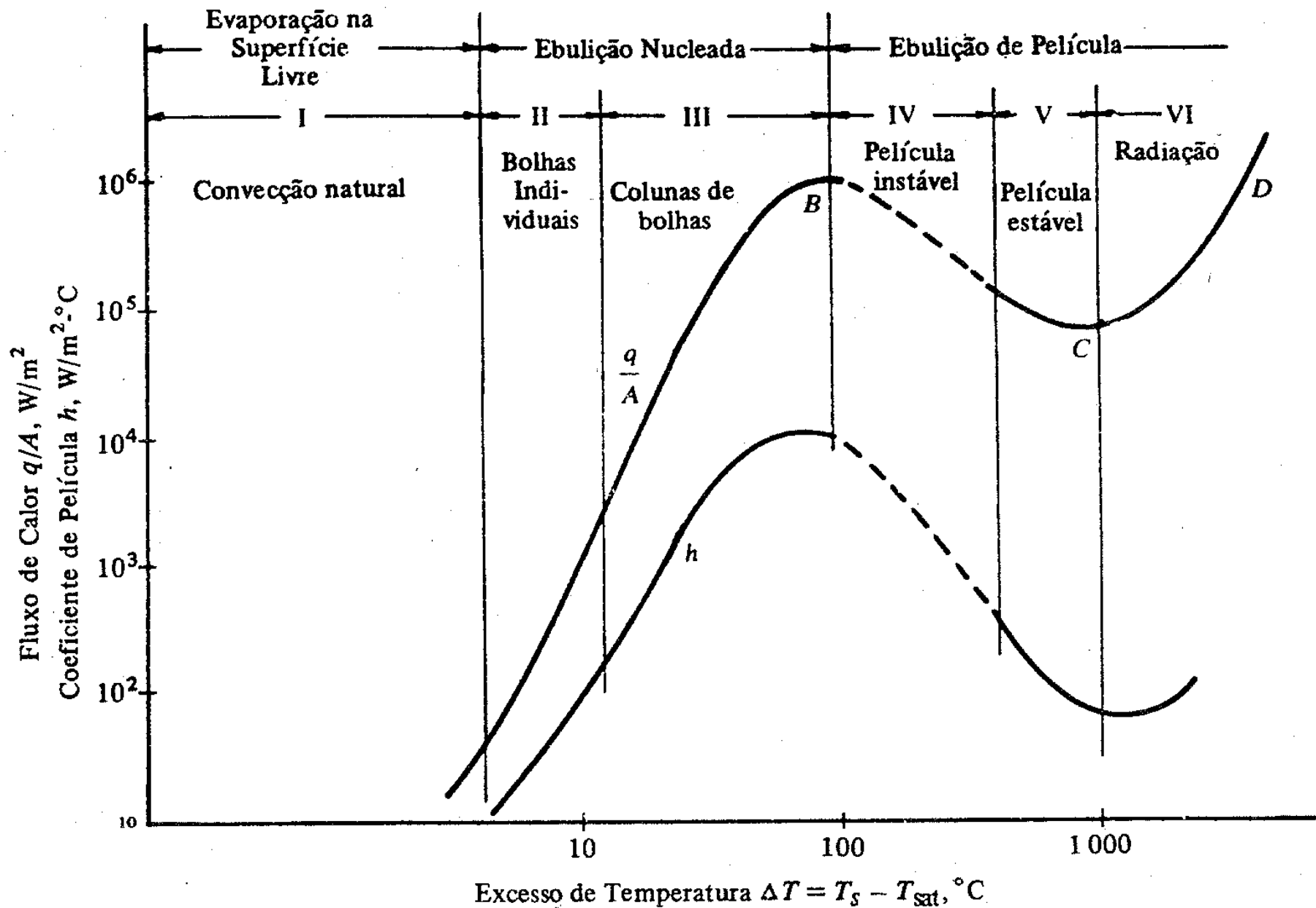


Ebulição em vaso aberto ou ebulição em piscina

Fio de aquecimento horizontal, Cromel C, 1,016 milímetros em água a 1 atm.

- **REGIÃO I** - O calor é transferido por convecção natural
- **REGIÃO II** - Esta região caracteriza o início da ebulição nucleada (bolhas individuais)
- **REGIÃO III** - Esta região caracteriza o início da ebulição nucleada (colunas de bolhas)
- **REGIÃO IV** - Ebulição em película (película instável)
- **REGIÃO V** - Ebulição em película (película estável)
- **REGIÃO VI** - Radiação

O **ponto B**, pico do fluxo de calor é chamado de **ponto crítico**



Fio de aquecimento horizontal, Cromel C, 1,016 milímetros em água a 1 atm.



CORRELAÇÕES EMPÍRICAS PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA EBULIÇÃO

EBULIÇÃO EM VASO ABERTO

Convecção livre (REGIME I)

Equação geral $Nu = C \cdot (Pr \cdot Gr)^a$

Convecção livre combinada com escoamento laminar no interior de um tubo horizontal

$$Nu = 1,86 \cdot \left(\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{D}{L} \right)^{1/3} \phi^{0,14} \frac{2,25(1 + 0,01 \cdot Gr^{1/3})}{\log(\text{Re})}$$

$$\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{D}{L} > 10$$

$$tm = \frac{t1 + t2}{2}$$

Convecção livre no exterior de tubo

$$h = 116 \cdot \left[\frac{K_f^3 \cdot \rho_f^2 \cdot C_f \cdot \beta \cdot \Delta t}{\mu_f \cdot D} \right]^{0,25}$$

$$T_f = \frac{T_p + T_\infty}{2}$$

$$\Delta T = T_p - T_\infty$$

Ebulição nucleada (REGIMES II e III)

$\Delta T_{crítico}$

Para o coeficiente de ebulição nucleada pode-se usar a equação de Mostinsk:

$$h = 0,00658 \cdot P_c^{0,69} \cdot \left(\frac{Q}{A} \right)^{0,7} \cdot \left[1,8 \cdot \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0,17} + 4 \cdot \left(\frac{P}{P_c} \right)^{1,2} + 10 \cdot \left(\frac{P}{P_c} \right)^{10} \right]$$

Pode também ser usada a equação de McNelly:

$$h = 0,225 \cdot \left(\frac{Q \cdot C_l}{A \cdot h_{lv}} \right)^{0,69} \cdot \left(\frac{144 \cdot P \cdot k_l}{\sigma} \right)^{0,31} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right)^{0,33}$$

Equação de Rohsenow:

$$h = \mu_l \cdot h_{lv} \sqrt{\frac{g \cdot (\rho_l - \rho_v)}{\sigma}} \left[\frac{C_l \cdot (T_p - T_{sat})^{2/3}}{h_{lv} \cdot Pr^s \cdot C_{sf}} \right]^3$$

Combinação fluido-superfície de aquecimento

C_{sf}

Água-cobre [11]†	0,013
Água-platina [12]	0,013
Água-latão [13]	0,0060
Água-cobre polido e esmeril [29]	0,0128
Água-aço inoxidável retificado e polido [29]	0,0080
Água-aço inoxidável atacado quimicamente [29]	0,0133
Água-aço inoxidável polido mecanicamente [29]	0,0132
Água-cobre polido a esmeril e tratado com parafina [29]	0,0147
Água-cobre entalhado [29]	0,0068
Água-aço inoxidável com Teflon [29]	0,0058
Tetracloroeto de carbono-cobre [11]	0,013
Tetracloroeto de carbono-cobre polido a esmeril [29]	0,0070
Benzeno-cromo [14]	0,010
Álcool <i>n</i> -butílico-cobre [11]	0,00305
Álcool etílico-cromo [14]	0,027
Álcool isopropílico-cobre [11]	0,00225
<i>n</i> -Pentano-cromo [14]	0,015
<i>n</i> -Pentano-cobre polido a esmeril [29]	0,0154
<i>n</i> -Pentano-níquel polido a esmeril [29]	0,0127
<i>n</i> -Pentano-cobre sobreposto [29]	0,0049
<i>n</i> -Pentano-cobre limpo a esmeril [29]	0,0074
35% K_2CO_3 – cobre [11]	0,0054
50% K_2CO_3 – cobre [11]	0,0027



Fluxo de calor máximo

O fluxo do calor máximo, (ponto B) pode ser estimado pela relação de Kutateladse-Zuber

$$\left[\frac{Q}{A} \right]_{max} = 0,18 \cdot \rho_v \cdot h_{lv} \cdot \left[\frac{\sigma \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \left[\frac{\rho_l}{\rho_l + \rho_v} \right]^{1/2}$$

Independientemente, Mostinsk apresentou uma equação

$$\frac{\left(\frac{Q}{A} \right)_{max}}{Pc} = 803 \cdot \left[\frac{P}{Pc} \right]^{0,35} \cdot \left[1 - \frac{P}{Pc} \right]^{0,9}$$

As equações anteriores aplicam-se a tubos simples ou a superfícies planas numa grande poça. Em feixes de tubos as equações são apenas aproximadas, e o projetista deve confiar na experiência. Palen e Small mostraram o efeito do tamanho do feixe de tubos sobre o fluxo de calor máximo

$$\left[\frac{Q}{A} \right]_{max} = 61,6 \cdot \frac{P}{Do\sqrt{N}} \cdot \rho_v \cdot h_{lv} \cdot \left[\frac{g \cdot \sigma \cdot (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4}$$

Ebulição em película (REGIMES IV, V VI)

- Do ponto de vista industrial, o regime de ebulição em transição e película estável é de pouco interesse; o equipamento projetado para operar na região de ebulição nucleada pode ser dimensionado com mais segurança e opera com resultados mais reprodutíveis.
- A ebulição em película é usada industrialmente apenas em circunstâncias onde isto for inevitável, por exemplo, quando gases liquefeitos como oxigênio ou hidrogênio estão em ebulição em temperaturas comuns (próximas da ambiente). A ebulição em película pode ocorrer também quando fluidos criogênicos são usados para resfriar motores de foguetes.
- Devido ao pouco interesse da ebulição em película em equipamentos industriais, não serão aqui representadas equações dos coeficientes de transmissão de calor, que podem ser encontradas na bibliografia apropriada.

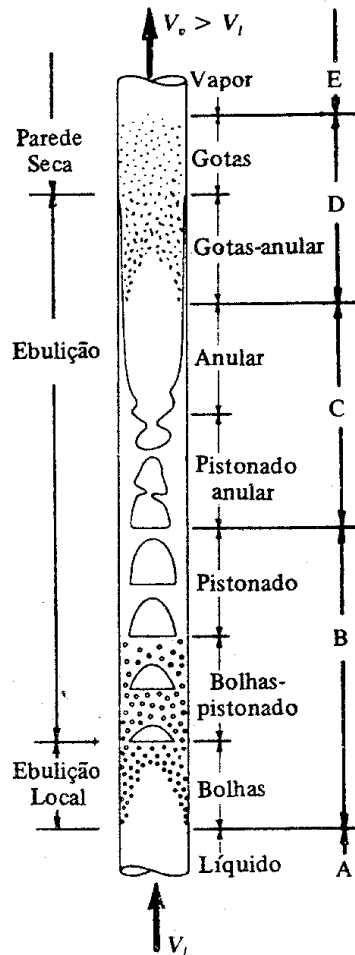
Relações simplificadas para transferência de calor na ebulição da água

CONFIGURAÇÃO	h ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Q/A (kW/m^2)
Superfície horizontal (em vaso aberto)	$h = 1042 \Delta T^{(1/3)}$ $h = 5,56 \Delta T^3$	$(Q/A) < 16$ $16 < (Q/A) < 240$
Superfície vertical (em vaso aberto)	$h = 537 \Delta T^{(1/3)}$ $h = 7,96 \Delta T^3$	$(Q/A) < 3$ $3 < (Q/A) < 63$
Interior de um tubo vertical	$h = 1305 \Delta T^{(1/3)}$ $h = 6,95 \Delta T^3$	$(Q/A) < 16$ $16 < (Q/A) < 240$

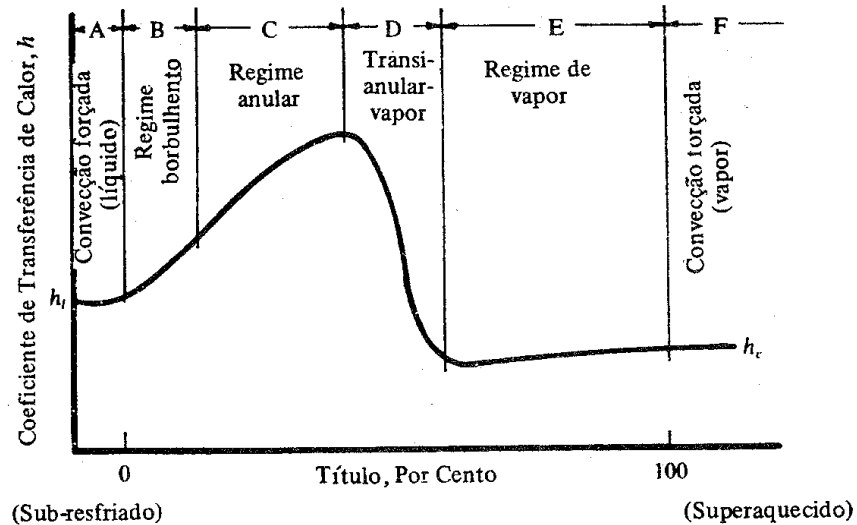
$$\Delta T = T_p - t_{sat} \text{ em } [^\circ C]$$

$$h_p = h_{P_1} \cdot \left[\frac{P}{P_1} \right]^{0,4}$$

EBULIÇÃO EM CONVECÇÃO FORÇADA

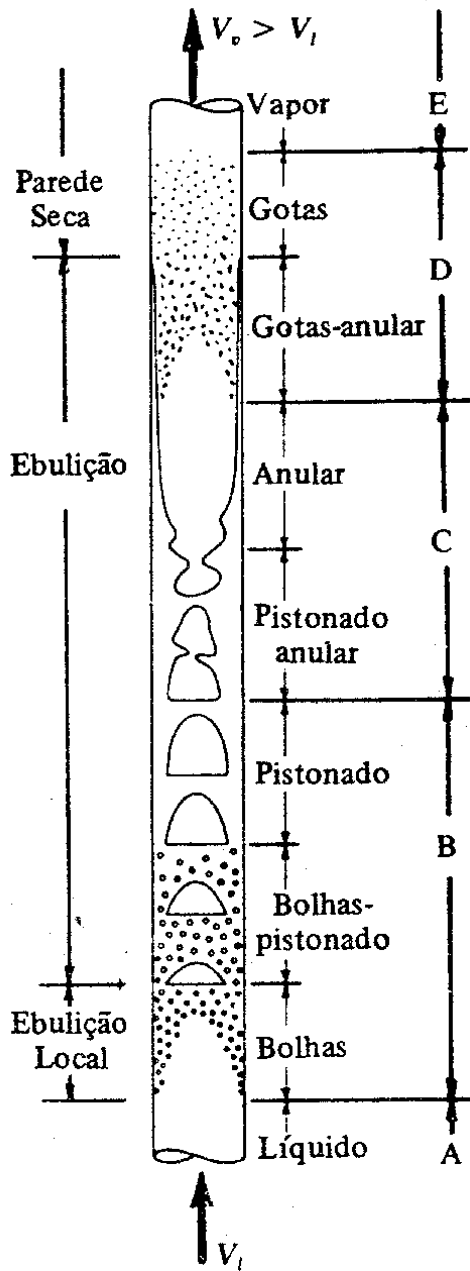


(a)

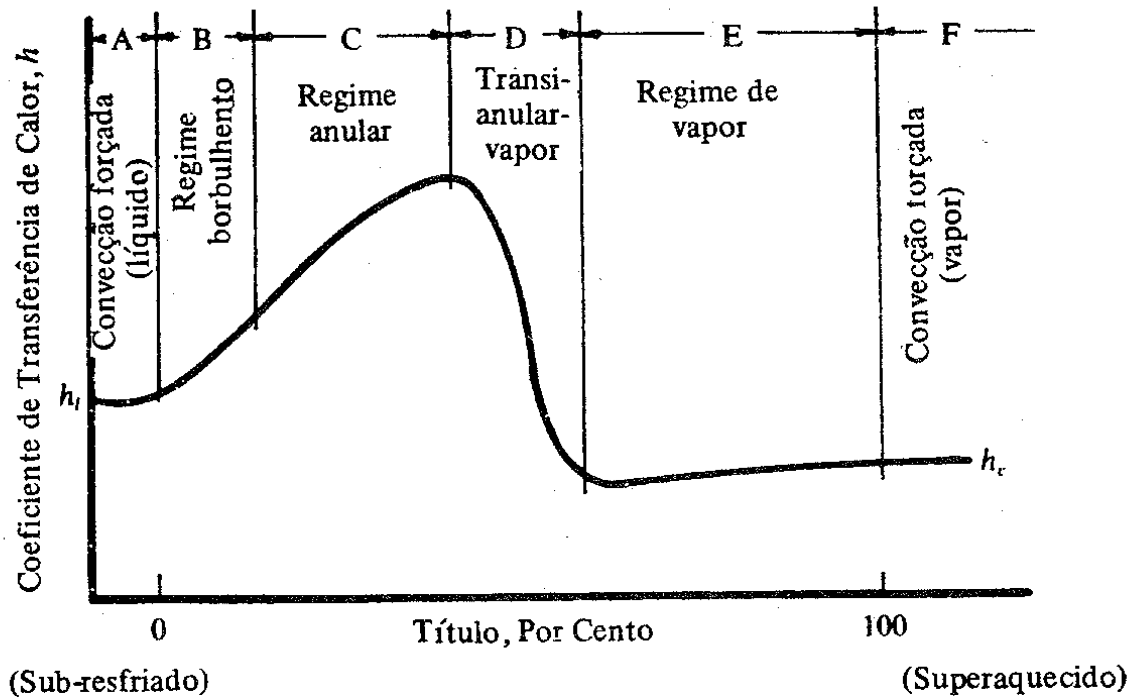


(b)

- **TRECHO A** – Convecção forçada sem mudança de fase (líquido)
- **TRECHO B** - Regime borbulhento
- **TRECHO C** – Regime anular
- **TRECHO D** – Regime de transição anular para neblina
- **TRECHO E** – Regime de neblina
- **TRECHO F** – Convecção forçada sem mudança de fase (vapor)



(a)



(b)

CORRELAÇÕES EMPÍRICAS PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA EBULIÇÃO

Ebulição no interior de tubos

$$\frac{h \cdot D}{k_l} = 0,06 \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,28} \cdot \left(\frac{D \cdot G \cdot x}{\mu_l} \right)^{0,87} \cdot Pr_l^{0,4}$$

Método simplificado (para o trecho B)

$$\left[\frac{Q}{A} \right]_{total} = \left[\frac{Q}{A} \right]_{convecção} + \left[\frac{Q}{A} \right]_{ebulição}$$

Holman (1983), recomenda no cálculo do efeito da convecção forçada

$$Nu = 0,019 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

Segundo Boarts e Badger (Perry, 1980)

$$Nu = 0,0278 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

Relações simplificadas para ebulição da água em convecção forçada

$$h = 2,54 \Delta T^3 \cdot e^{(p/1,551)}$$

onde: $\Delta T = T_p - T_{sat}$, em $^{\circ}C$

p é a pressão em MN/m^2 (meganewtons por metro quadrado)

h é dado em $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$.

$$5 \text{ atm} < p < 170 \text{ atm}$$

$$0,5 \text{ MN}/m^2 < p < 17,3 \text{ MN}/m^2$$




CLASSIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE VAPORIZAÇÃO

- Trocador de vaporização
- Vaporizador com caldeira



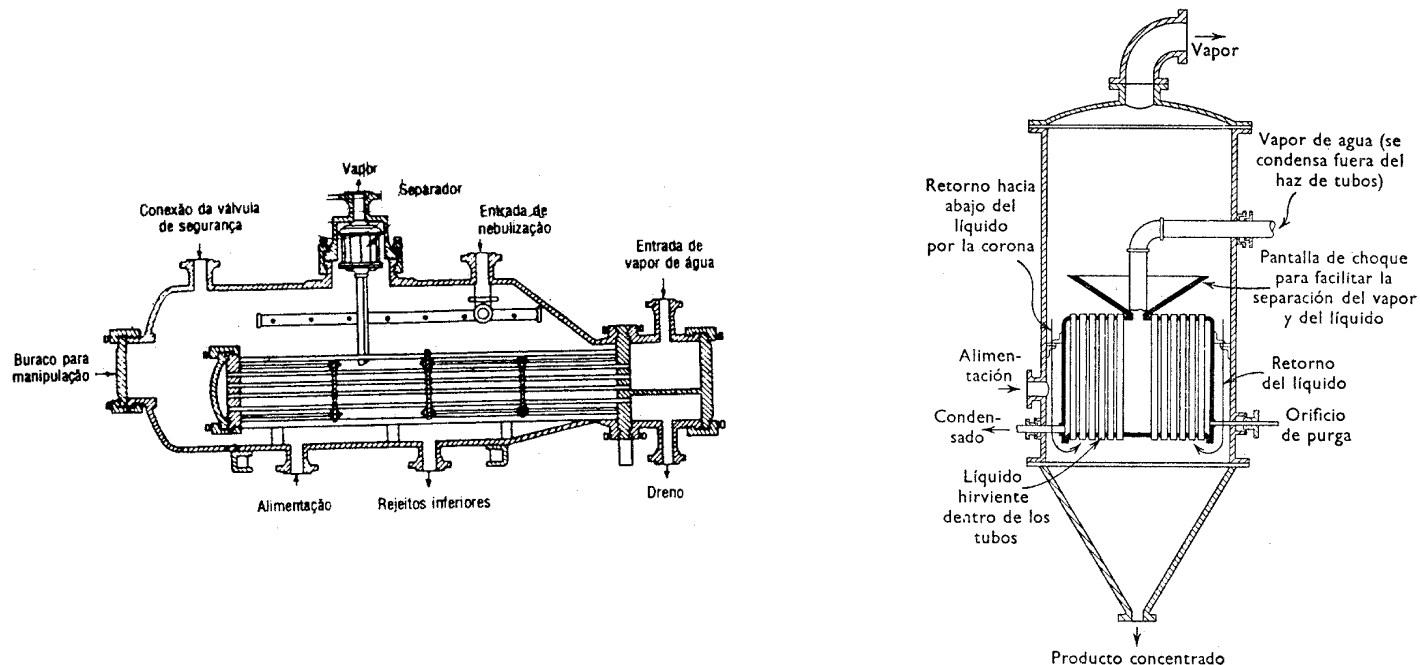
Um trocador de vaporização, de acordo com sua utilização recebe as seguintes denominações:

- **EVAPORADOR** - Quando for usado para água ou para uma solução aquosa
- **REFERVEDOR** - Quando for usado para suprir as necessidades de calor no fundo de uma coluna de destilação, quer o vapor seja da água ou de qualquer outro líquido

- 
-
- **VAPORIZADOR** - Quando não é utilizado para a formação de vapor de água e não é parte do processo de destilação

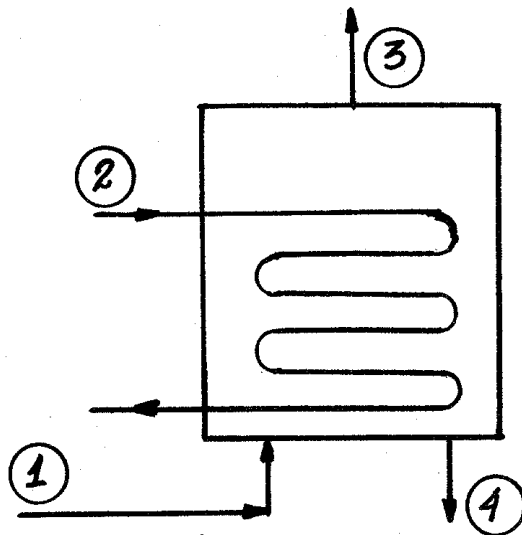
EVAPORADORES

- Evaporadores de planta de potência
- Evaporadores químicos

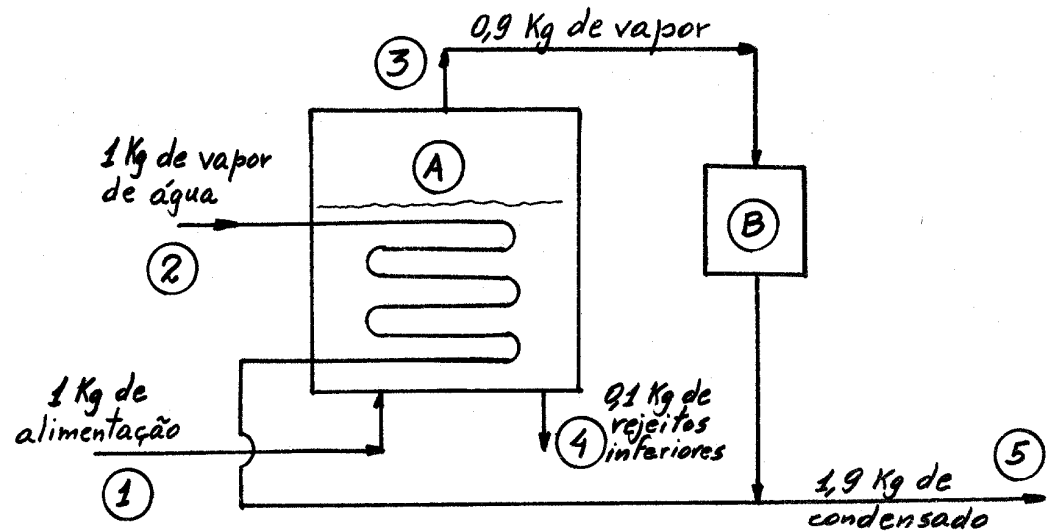


Evaporadores de planta de potência

- ▶ Incrustações
- ▶ Rejeitos inferiores

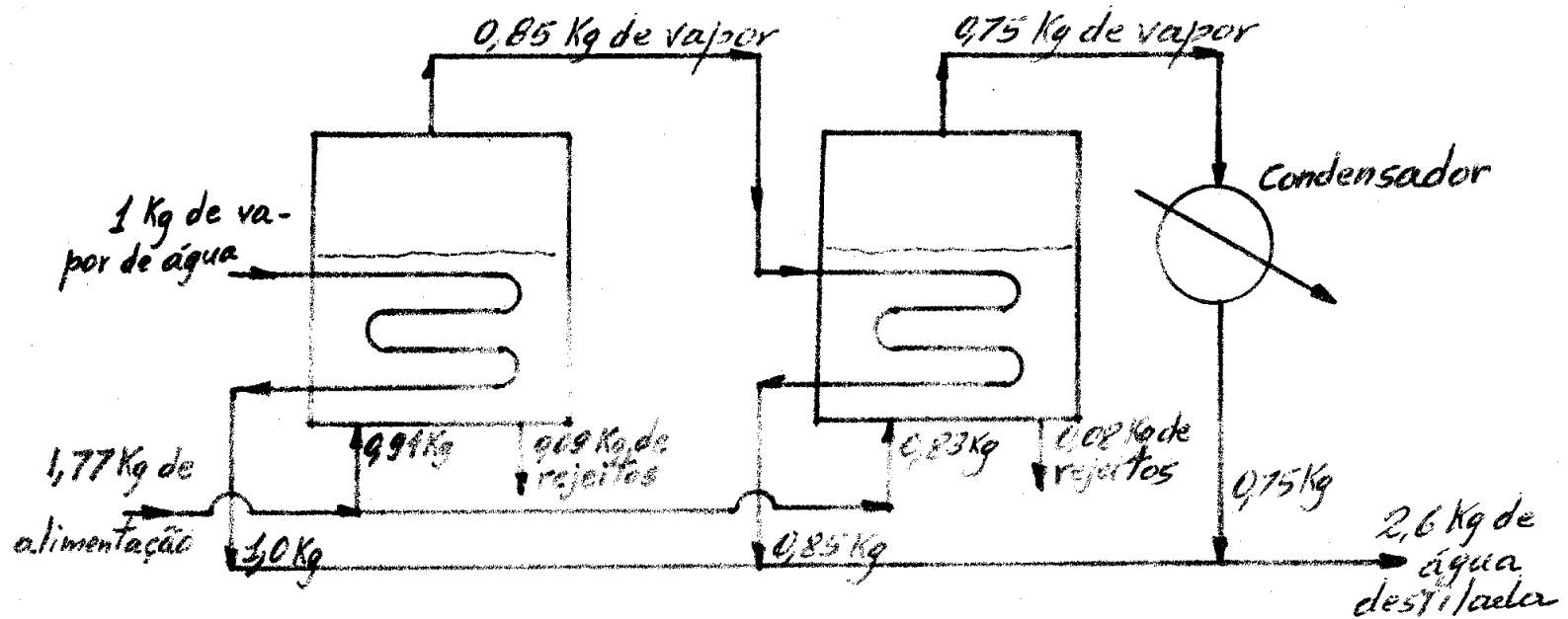


Esquema de um evaporador de planta de potência



Esquema de um evaporador de planta de potência em conjunto com um condensador

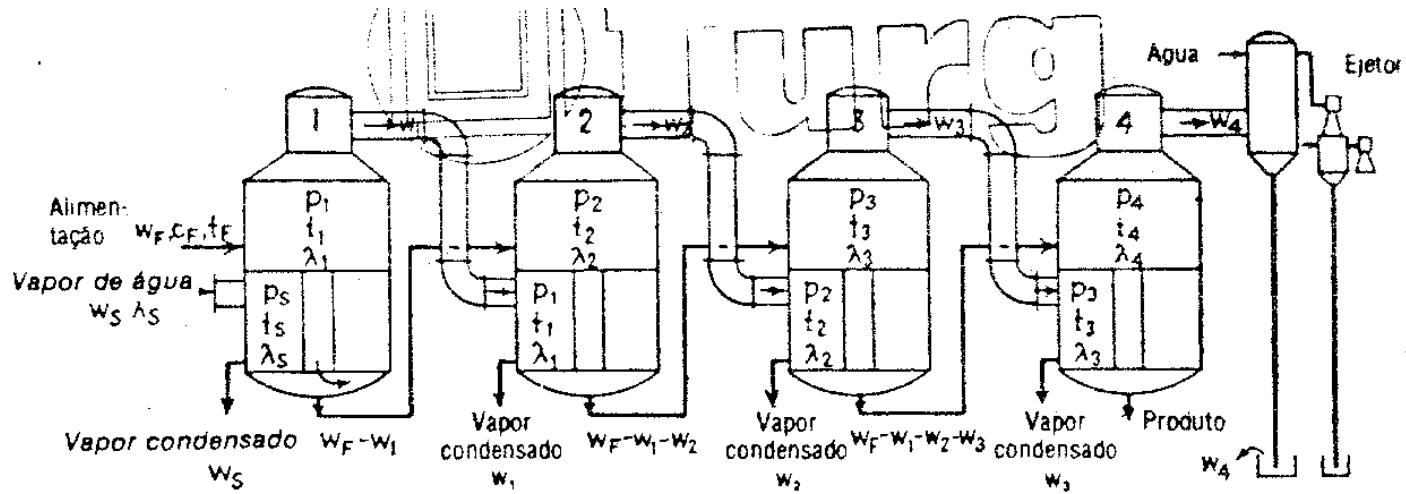
Evaporação de múltiplos efeitos ou estágios



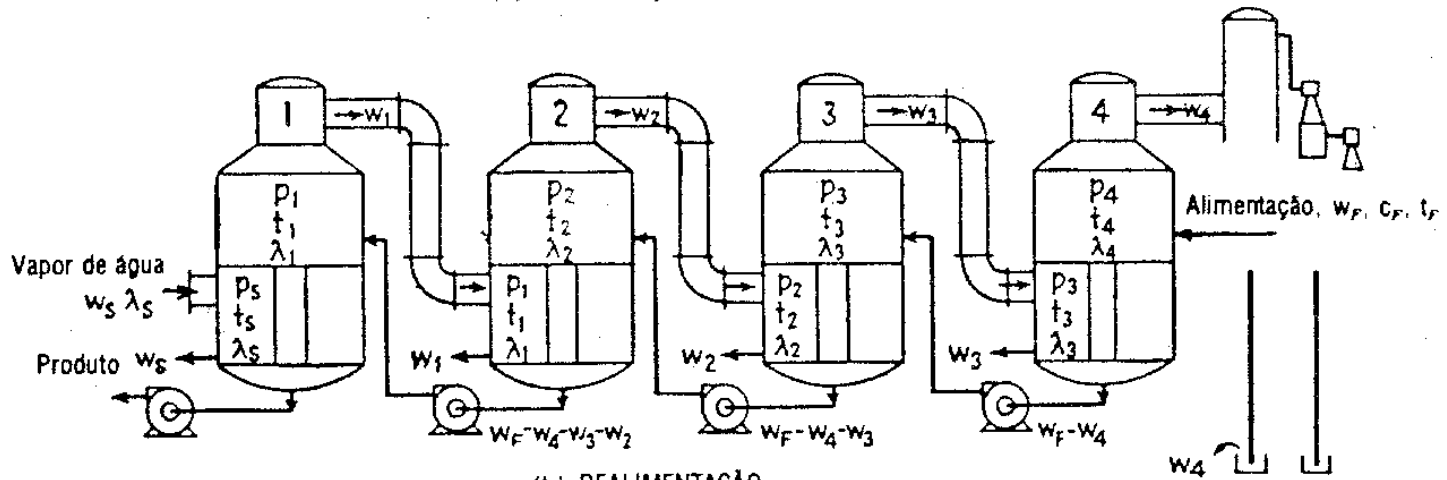


Evaporadores químicos

- Os evaporadores químicos são equipamentos que tem por finalidade concentrar uma solução aquosa diluída
- Enquanto que no evaporador de planta de potência a porção não evaporada constitui o resíduo, no evaporador químico ela constitui o produto

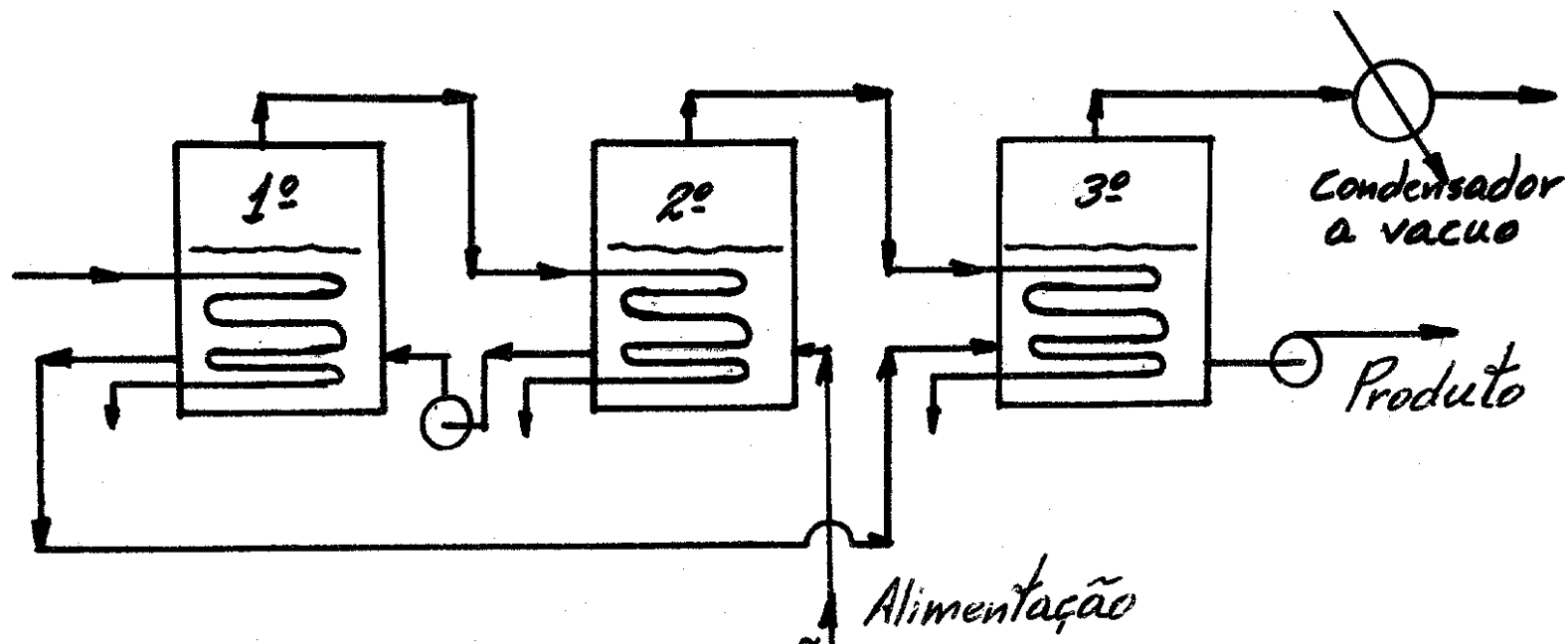


(a) ALIMENTAÇÃO FRONTAL



(b) REALIMENTAÇÃO

1 Evaporador químico com quatro estágios de operação dispostos para alimentação frontal e realimentação.

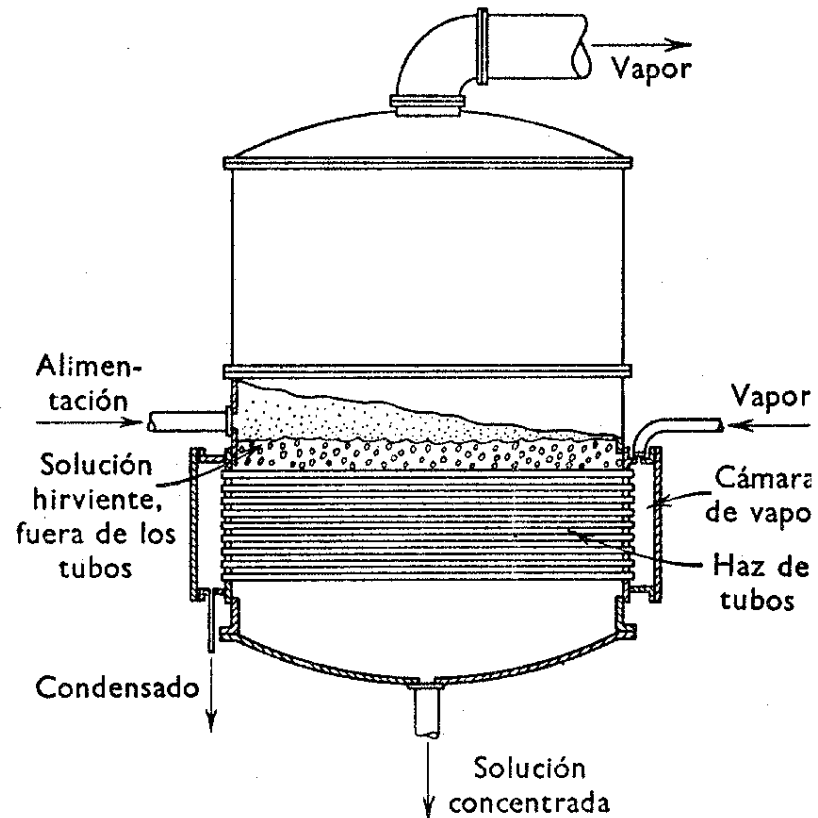


Alimentação mista

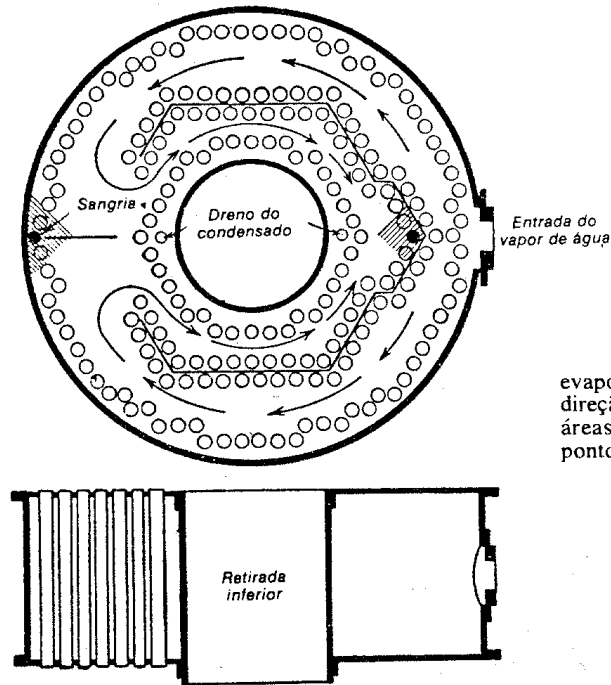
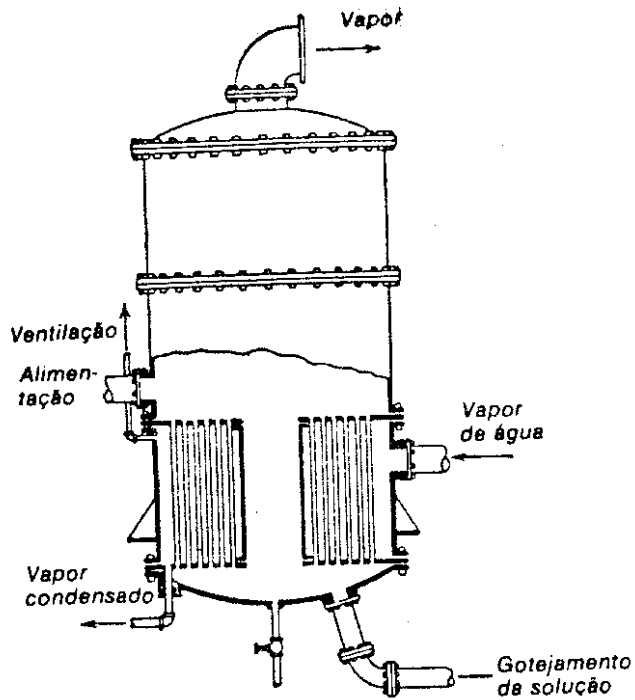
Tipos de evaporadores químicos

Evaporadores químicos con circulación natural

Evaporador de tubos horizontales



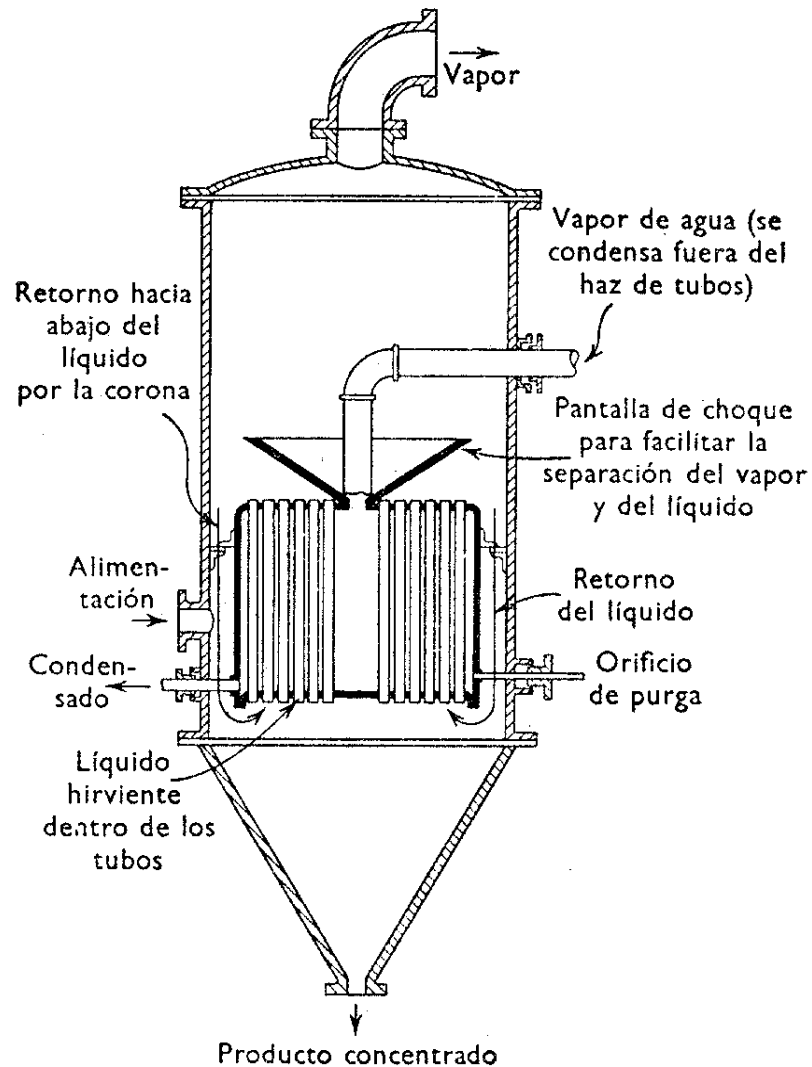
Evaporador de tubos verticais tipo calandra



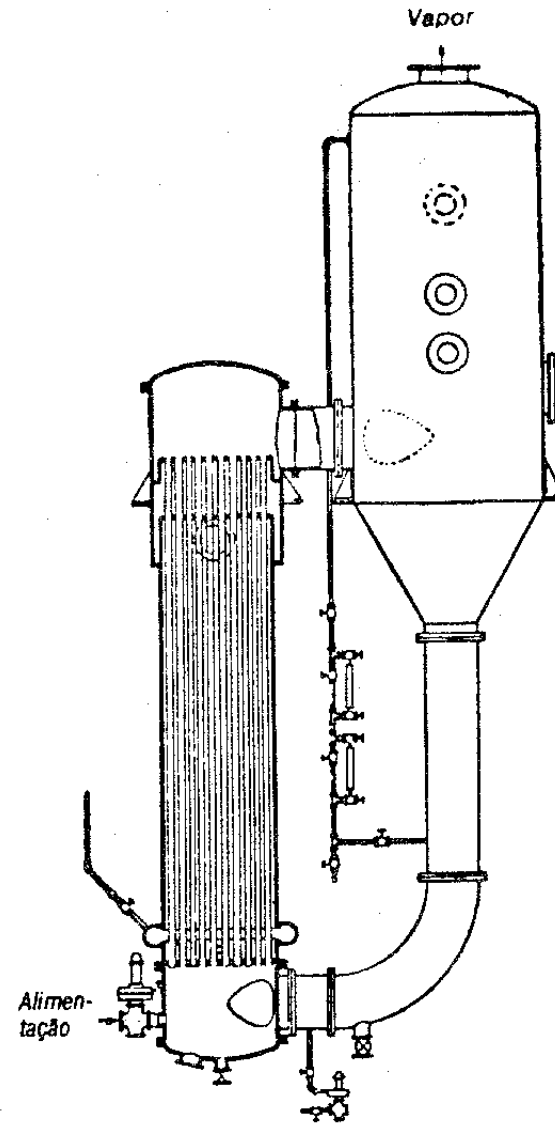
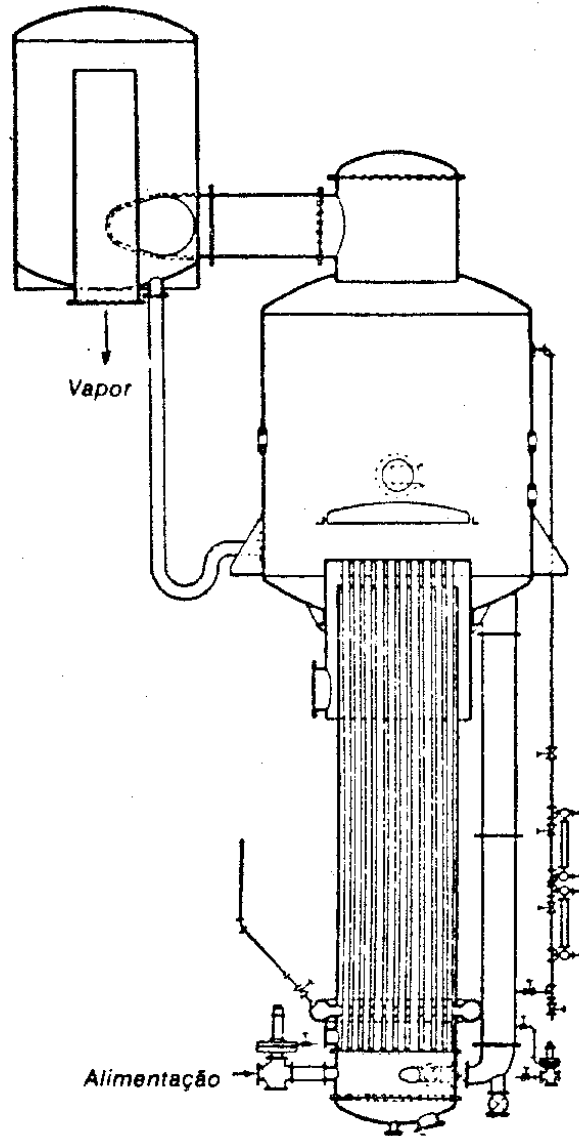
Disposição típica das chicanas num evaporador tipo *calandra*. As setas indicam a direção do escoamento do vapor de água. As áreas hachuradas indicam a localização dos pontos de sangria dos não-condensáveis.

Evaporador com recipiente fechado tipo *calandra*.

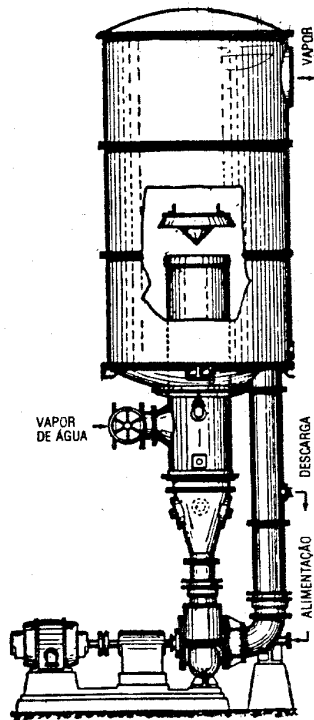
Evaporador de tubo vertical con cesta



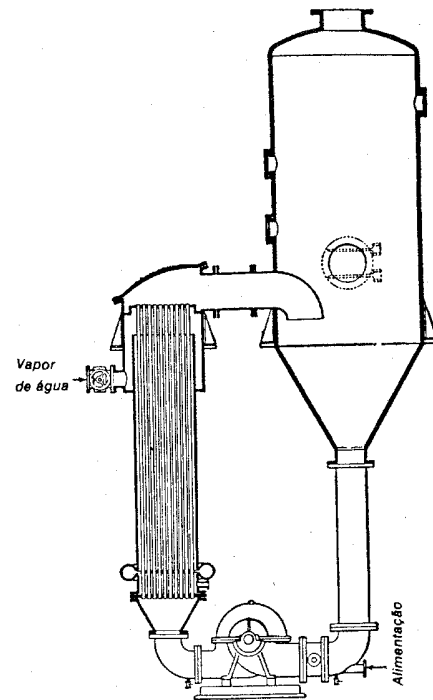
Evaporador de tubos longos



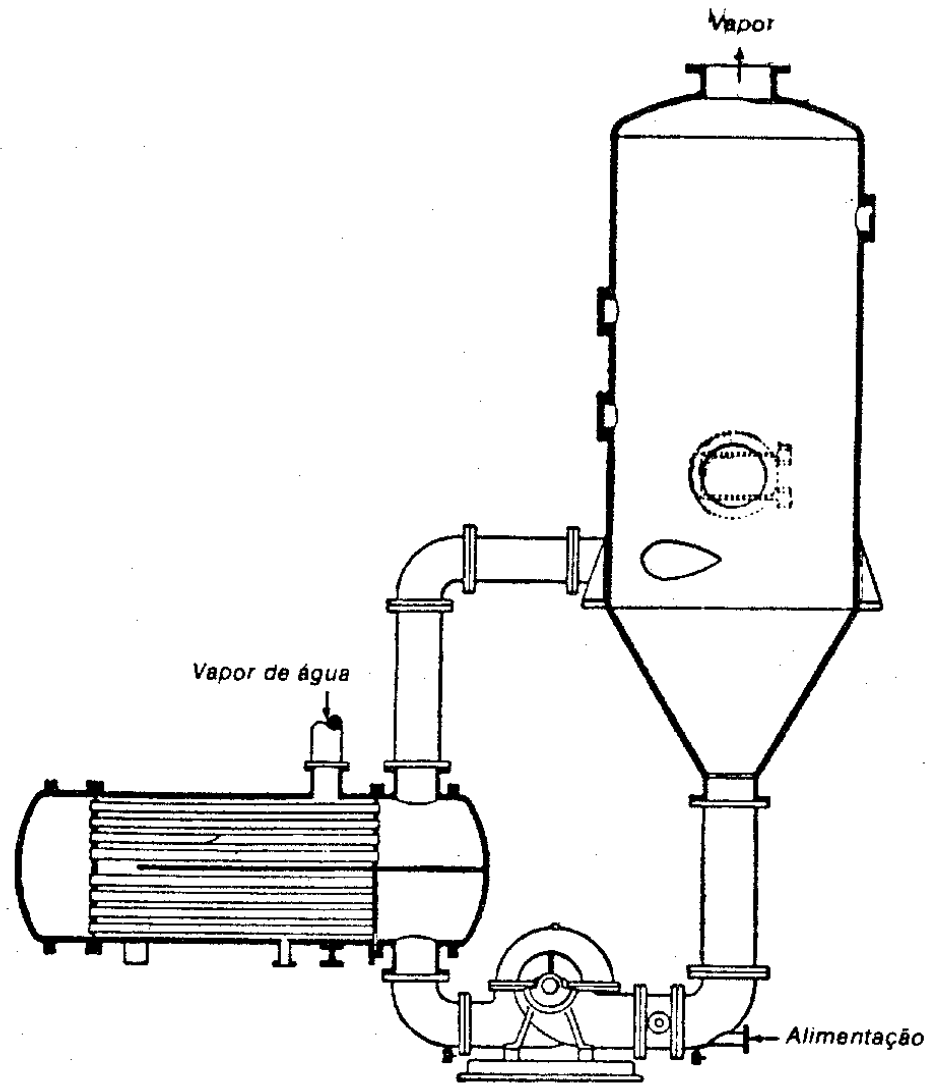
Evaporadores químicos com circulação forçada



Evaporador de circulação forçada com elemento aquecedor interno vertical



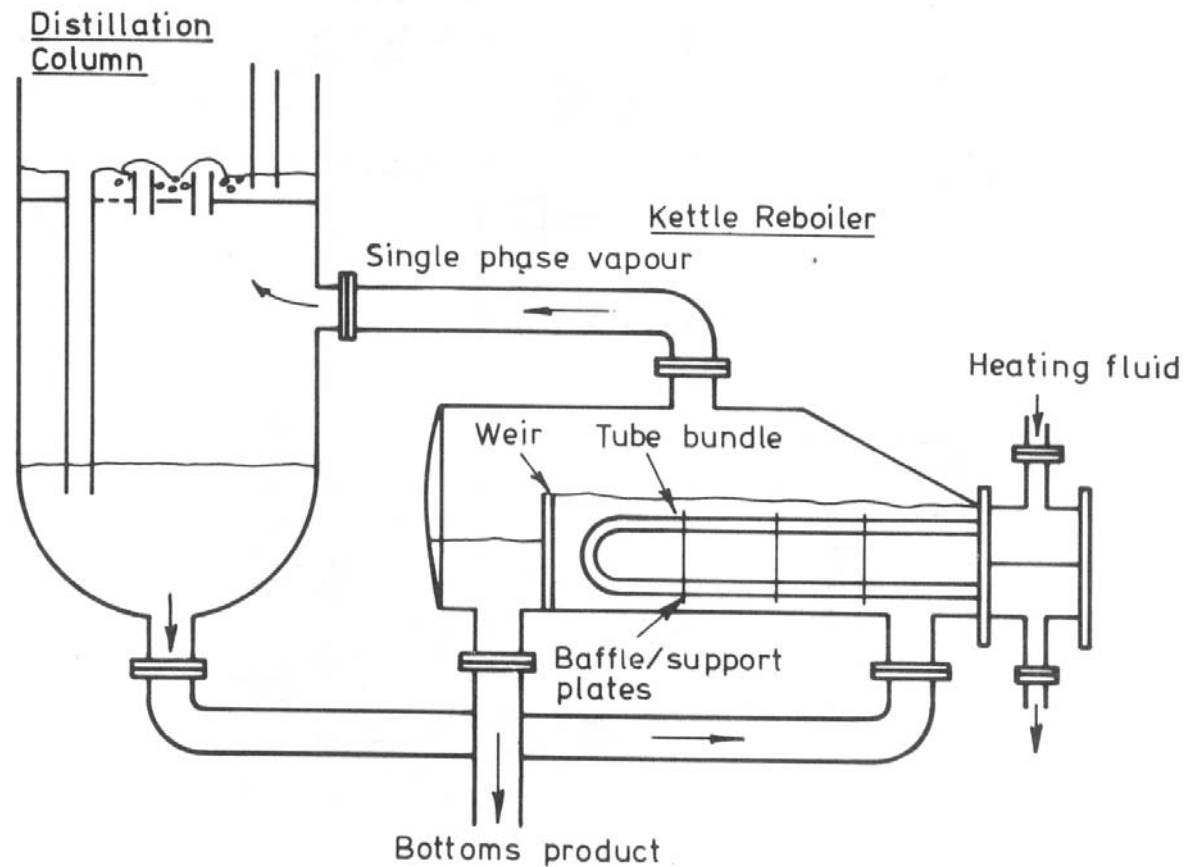
Evaporador de circulação forçada com elemento aquecedor externo vertical



Evaporador de circulação forçada com elemento aquecedor externo horizontal

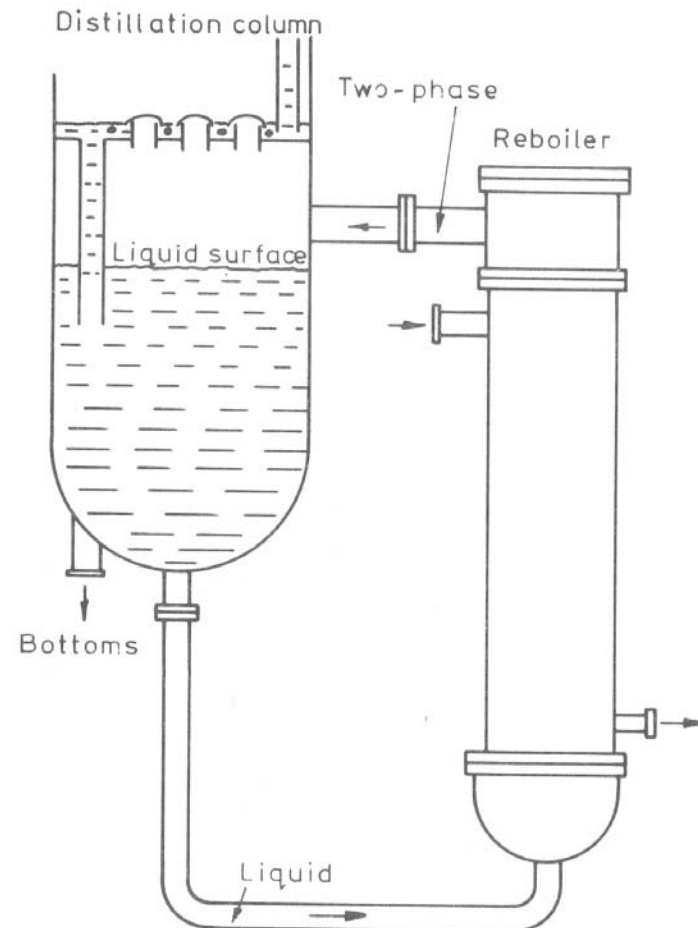
REFERVEDORES

Refervedor
tipo caldeira



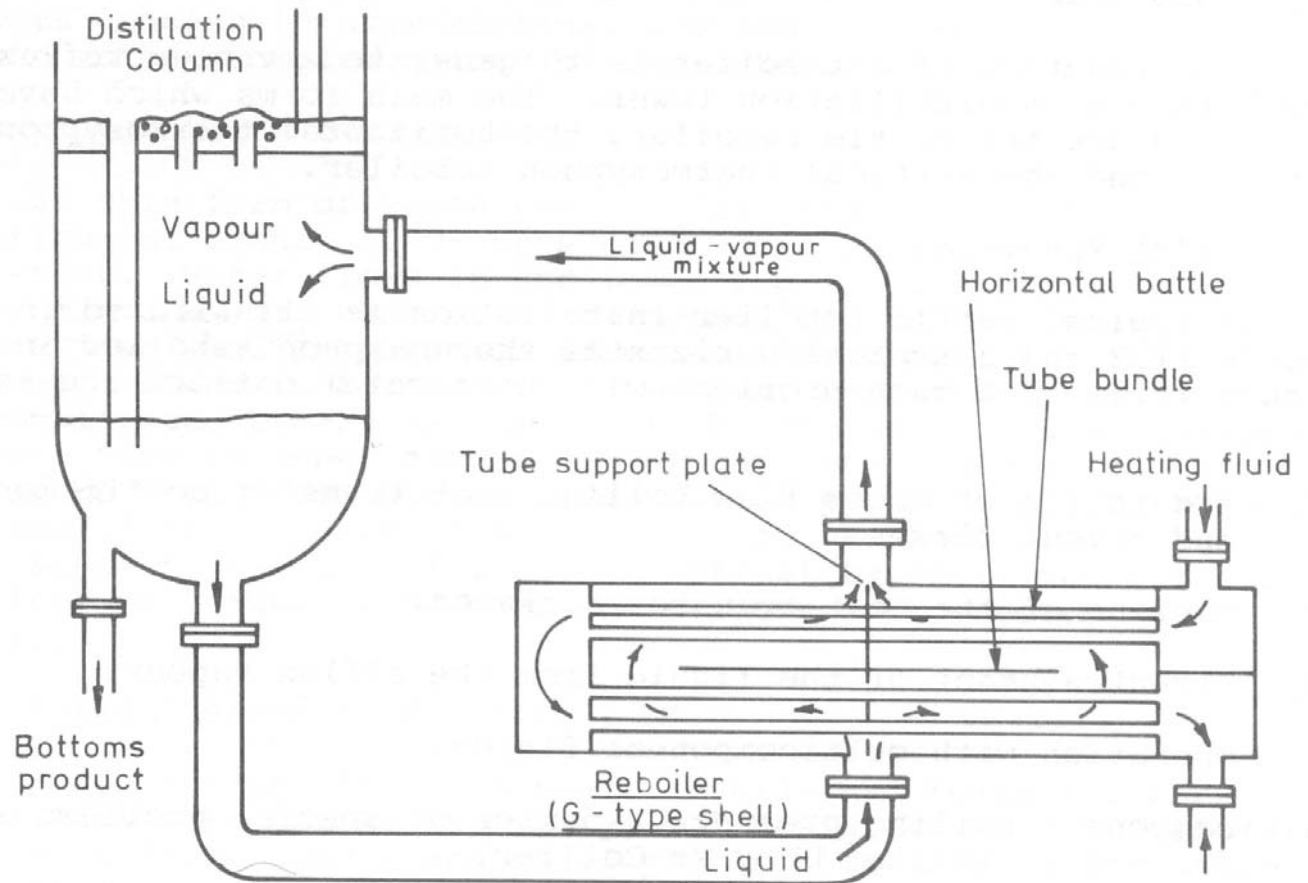
REFERVEDORES

Refervedor
tipo
termossifão
vertical



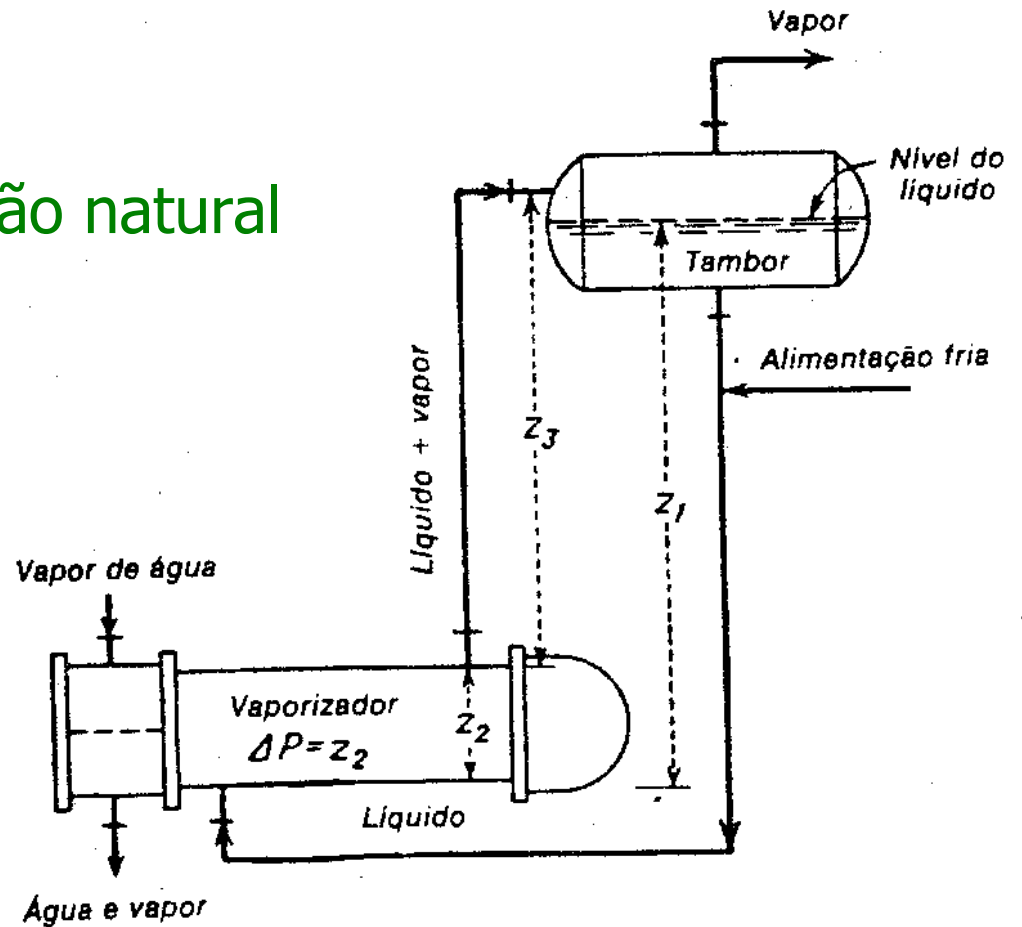
REFERVEDORES

Refervedor
tipo
termossifão
horizontal



VAPORIZADORES

Vaporizador com circulação natural



VAPORIZADORES

Vaporizador com circulação forçada

