


Classificação dos trocadores de vaporização

- *Trocadores de vaporização com circulação forçada.*
 - *Vaporização na carcaça*
 - vaporizador ou refeedor com bomba com ebulição isotérmica.
 - vaporizador ou refeedor com bomba ou intervalo de ebulição.
 - evaporador com circulação forçada ou refeedor com solução aquosa.
 - *Vaporização nos tubos*
 - vaporizador ou refeedor com bomba, com ou sem intervalo de ebulição.
 - evaporador com circulação forçada ou refeedor com circulação forçada.

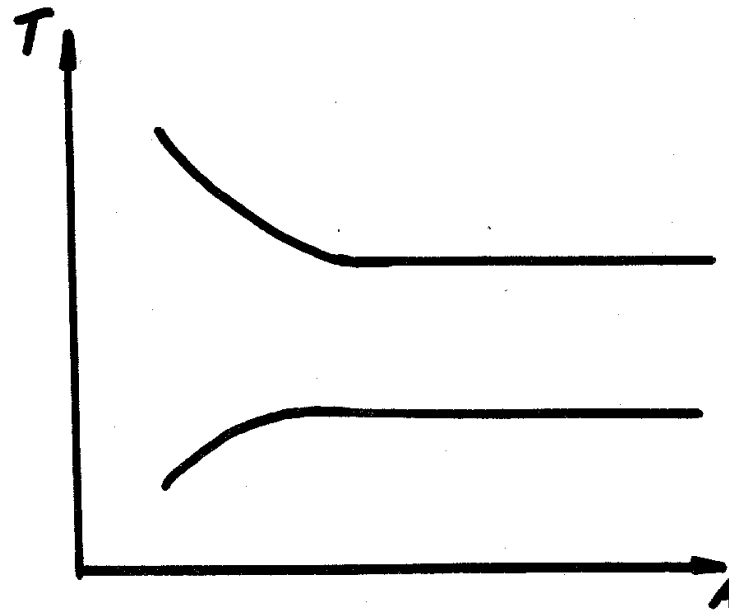


Classificação dos trocadores de vaporização

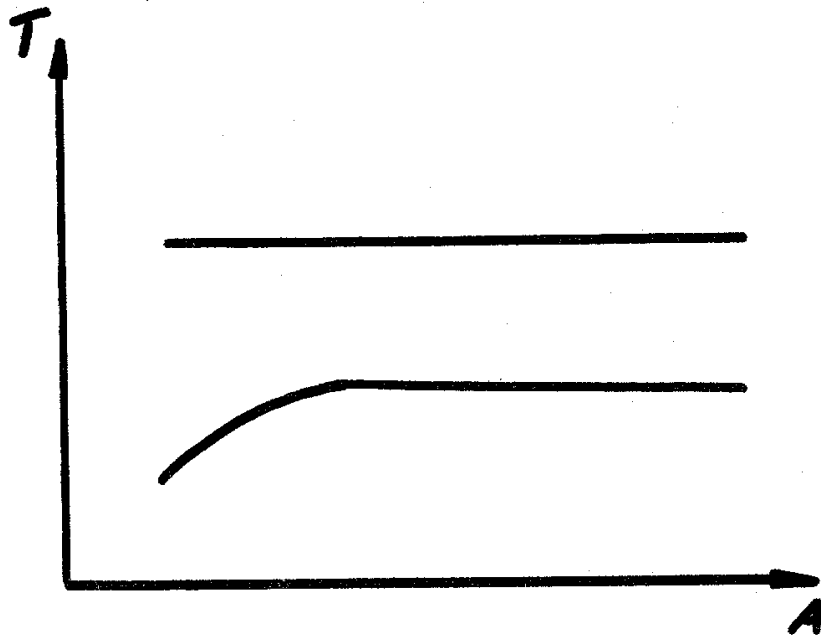
- *Trocadores de vaporização com circulação natural.*
 - *Vaporização na carcaça*
 - refeedor com retorta. (caldeira)
 - refrigerador-evaporador.
 - refeedor horizontal com termossifão.
 - refeedor com feixe na coluna.
 - *Vaporização nos tubos*
 - refeedor com termossifão vertical.
 - evaporador com tubo longo vertical.

DIMENSIONAMENTO DE EVAPORADORES, VAPORIZADORES E REFERVEDORES

DIAGRAMAS ÁREA - TEMPERATURA

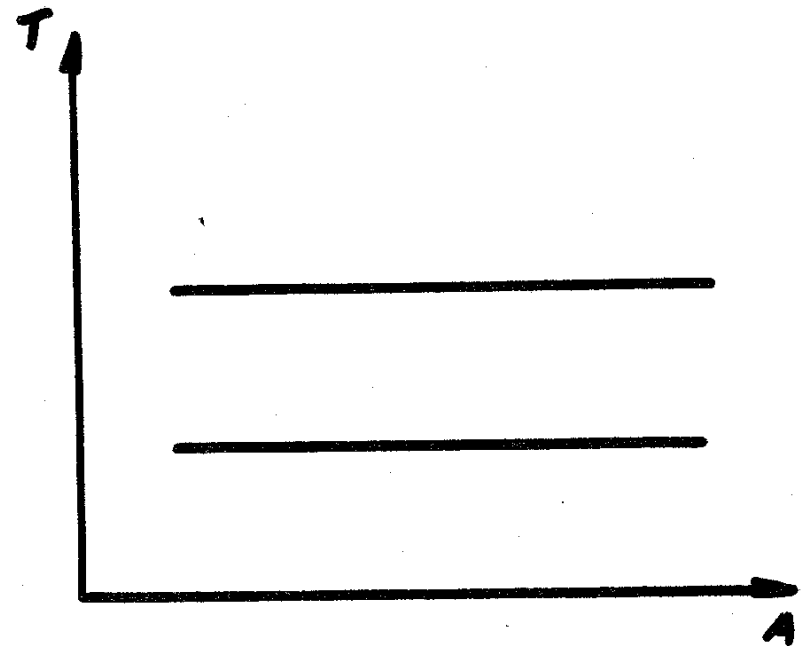


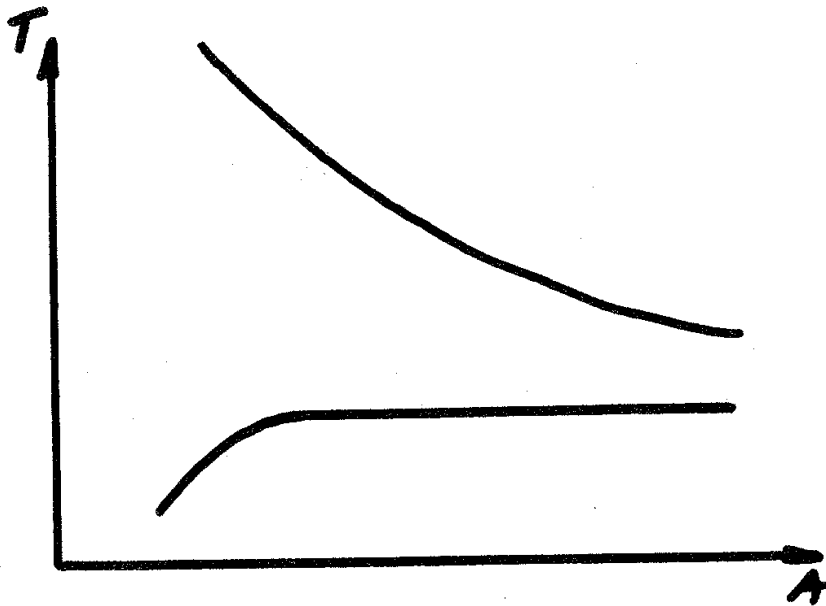
O fluido quente é superaquecido e o fluido frio entra abaixo de temperatura de saturação



O fluido quente vapor saturado e o fluido frio entra abaixo da temperatura de saturação

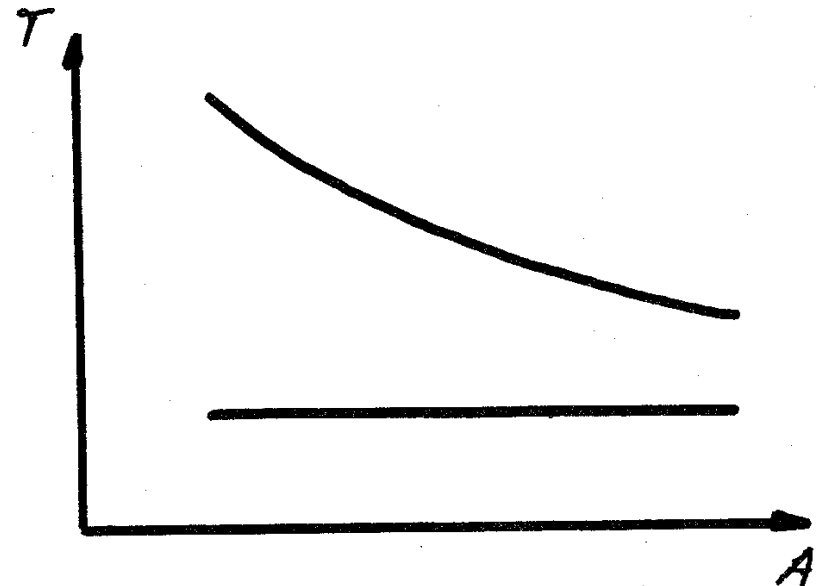
O fluido quente vapor saturado e o fluido frio entra na temperatura de saturação





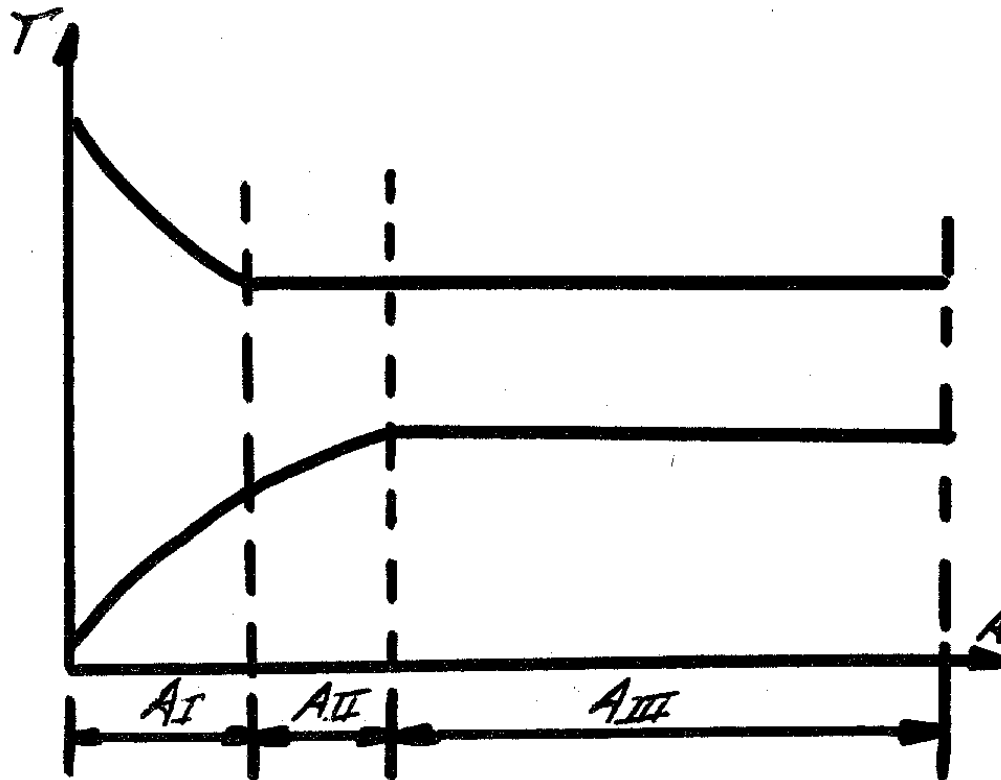
O fluido quente é não condensável (gases quentes, por exemplo) e o fluido frio entra abaixo da temperatura de saturação

O fluido quente é não condensável e o fluido frio entra saturado



Quando a solução entra no evaporador a uma temperatura abaixo da temperatura de saturação ou o fluido quente é vapor superaquecido, é necessário dividir a área da carcaça em zonas sucessivas.

- AI = Resfriamento do vapor e aquecimento da solução.
- AII = Condensação do vapor e aquecimento da solução.
- AIII = Condensação do vapor e ebulição da solução.





LIMITAÇÕES PARA O FLUXO DE CALOR MÁXIMO

■ *Fluxo*

- O fluxo máximo permitido para um vaporizador e um refeedor com circulação forçada vaporizando líquidos orgânicos é de 20.000 $BTU/h.ft^2$ e, por circulação natural é 12.000 $BTU/h.ft^2$;
- O fluxo máximo permitido para a vaporização da água ou de uma solução aquosa com baixa concentração através de circulação natural ou forçada é de 30.000 $BTU/h.ft^2$;

LIMITAÇÕES PARA O FLUXO DE CALOR MÁXIMO

■ *Coeficiente Pelicular*

- O coeficiente pelicular máximo de vaporização permitido para a vaporização com circulação natural ou com circulação forçada para líquidos orgânicos vale $300 \text{ BTU/h.ft}^2.\text{°F}$;
- O coeficiente pelicular máximo de vaporização para a circulação natural ou para a circulação forçada da água em soluções aquosas de baixa concentração vale $1.000 \text{ BTU/h.ft}^2.\text{°F}$.



TROCADORES DE VAPORIZAÇÃO COM CIRCULAÇÃO FORCADA

- **Coefficientes de película**

- Em vaporizadores de circulação forçada onde não ocorre a formação de vapor no trocador de calor, isto é, o vapor é liberado apenas no tambor, o coeficiente de transmissão de calor pode ser calculado da mesma maneira que na transmissão de calor sem mudança de fase, quer o fluido a ser vaporizado esteja nos tubos ou na carcaça.

- Quando ocorre vaporização no interior do trocador, o coeficiente da película é consideravelmente afetado, neste caso, temos duas situações:

- *Vaporização na carcaça*

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

- *Vaporização nos tubos*

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

■ Perda de carga

■ *Perda de carga no casco*

- Na ausência de correlações específicas, obtemos resultados razoavelmente bons quando empregamos as equações para perda de carga sem mudança de fase, utilizando a massa específica média entre a entrada e a saída

$$v_{\text{méd}} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$\rho_{\text{méd}} = \frac{2 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$$

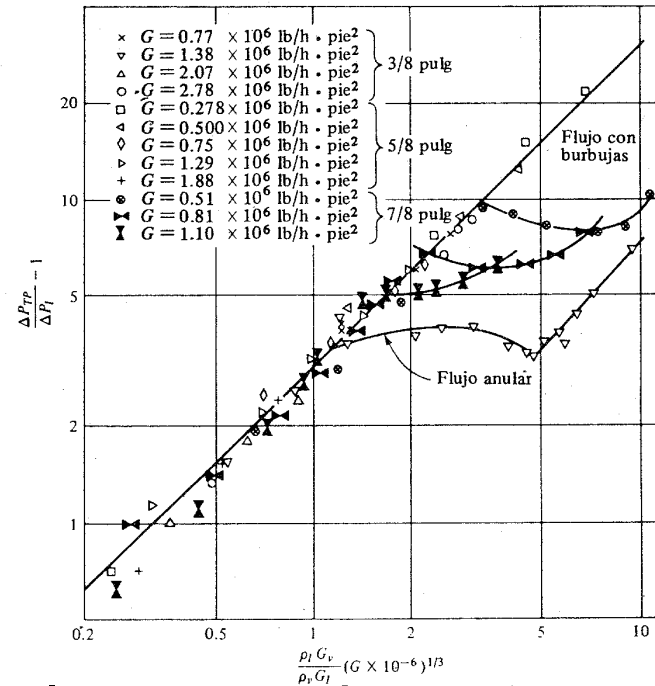
A perda de aceleração é considerada como sendo igual a duas cargas cinéticas ($\Delta p = 2 \cdot V^2/2g$), e quando usamos o método aproximado para a determinação de $\rho_{\text{méd}}$, ela pode ser desconsiderada, bem como as perdas nos bocais

■ Perda de carga

■ *Perda de carga nos tubos*

- A perda de carga para o escoamento dentro de tubos

$$\frac{\Delta p_{tp}}{\Delta p_l} = 1 + \frac{3 \cdot \rho_l \cdot \rho_v}{\rho_l + \rho_v} (G \cdot 10^{-6})^{1/3}$$



- Obtemos resultados razoavelmente bons quando empregamos as equações para perda de carga sem mudança de fase, utilizando a massa específica média entre a entrada e a saída

TROCADORES DE VAPORIZAÇÃO COM CIRCULAÇÃO NATURAL

- **Vaporização na carcaça**
 - *Coeficientes de Película*

Regime de ebulição em vaso aberto (convecção natural ou ebulição nucleada).

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:

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

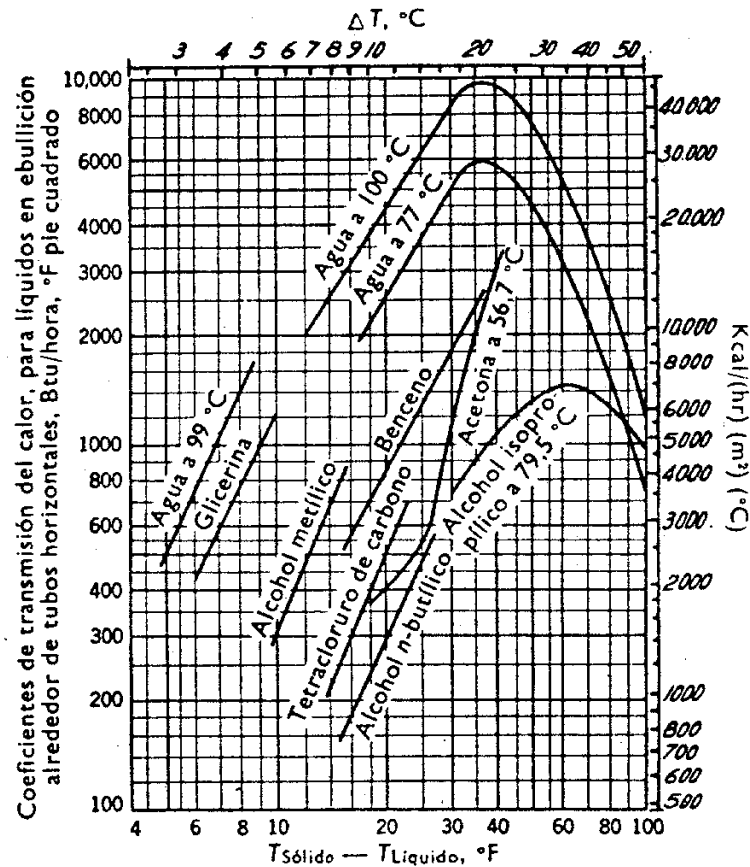
Pode também ser usada a equação de McNelly:

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

Equação de Rohsenow:

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

Coeficientes de transferênci de calor



Coeficientes de transmisión del calor a líquidos en ebullición, representados en función del gradiente de temperatura entre la pared sólida y dichos líquidos. (2, 8, 31)



Fluxo de calor máximo

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

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

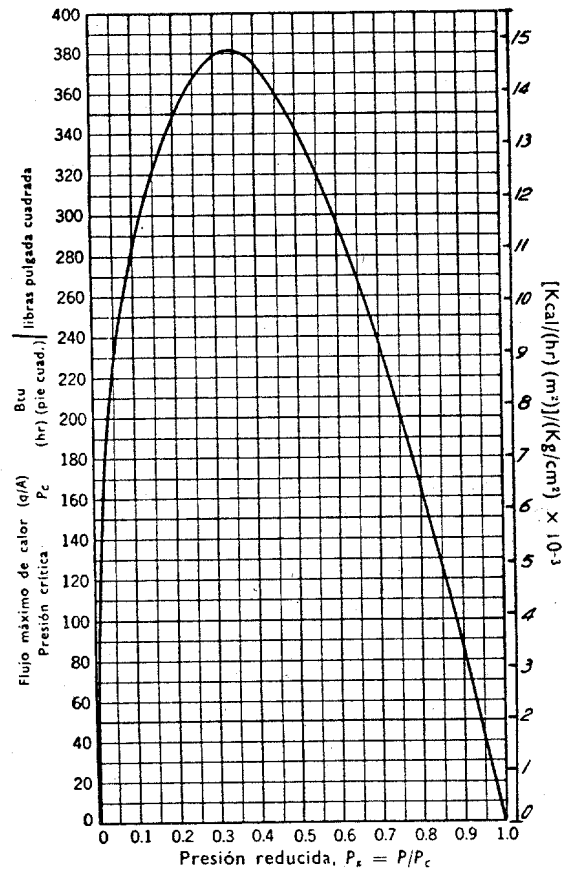
Independientemente, Mostinsk apresentou uma equação

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

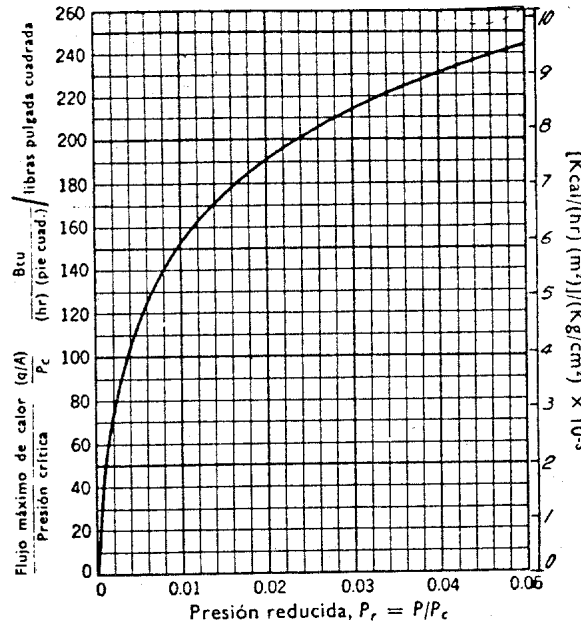
As equações anteriores aplicam-se a tubos simples ou a superfícies planas numa grande poça. Em feixes de tubos as equações são apenas aproximadas, e o projetista deve confiar na experiência. Palen e Small mostraram o efeito do tamanho do feixe de tubos sobre o fluxo de calor máximo

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

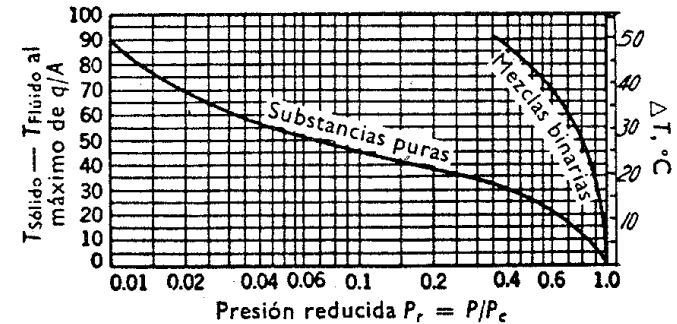
Flujo de calor máximo



Representación gráfica de los valores del cociente entre el flujo máximo de calor (q/A) y la presión crítica, en función de la presión reducida. (8)



Representación gráfica de los valores del cociente entre el flujo máximo de calor y la presión crítica, en función de la presión reducida, en la zona de bajas presiones. (4)



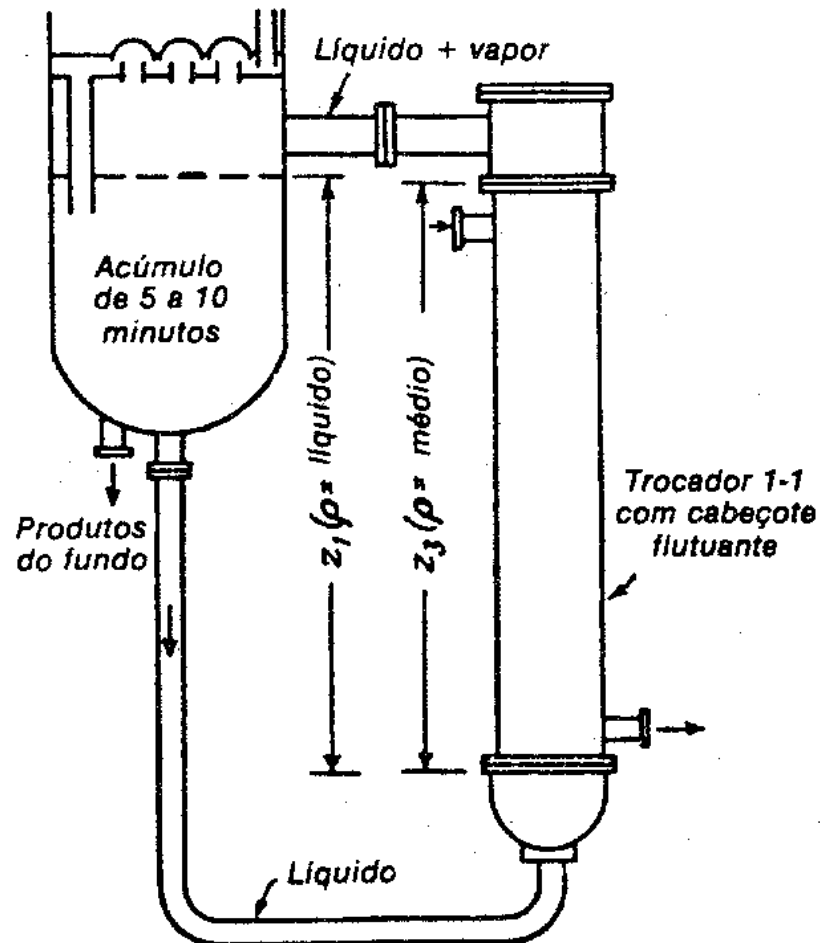
Diferencias de temperaturas correspondientes al flujo máximo de calor, expresadas en función de la presión reducida. (3)



VAPORIZAÇÃO NOS TUBOS

- Razões de Recirculação
 - Queda de pressão por atrito através da tubulação de entrada.
 - Queda de pressão por atrito através do refervedor.
 - Perda de expansão ou de aceleração provocada pela vaporização no refervedor.
 - Pressão estática de uma coluna da mistura líquido-vapor (Z_3) no refervedor
 - Queda de pressão devida ao atrito na tubulação de saída.

Refervedor com termossifão vertical conectado a uma torre

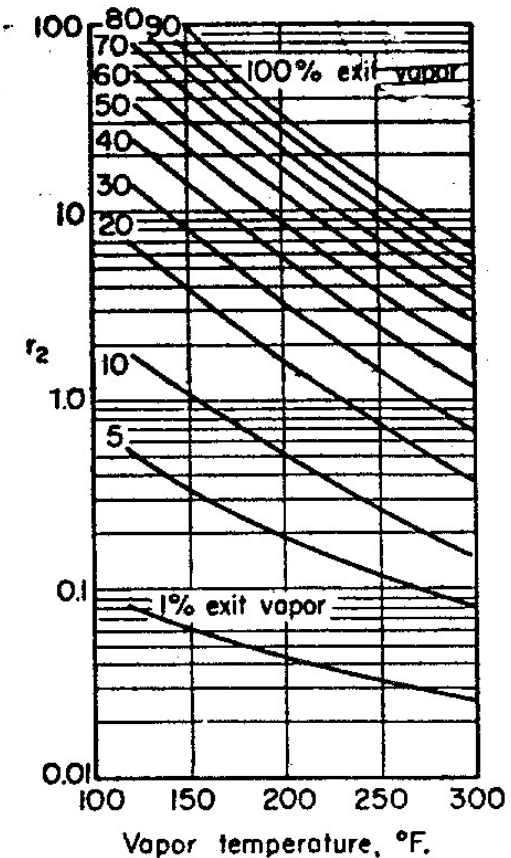


Perda de expansão ou de aceleração provocada pela vaporização no refeedador

$$\Delta p = \frac{r_2 \cdot G^2}{144 \cdot g}$$

Uma equação alternativa

$$\Delta p = \frac{G^2}{144 \cdot g \cdot \rho_{med}}$$



Acceleration losses in boiling flow.

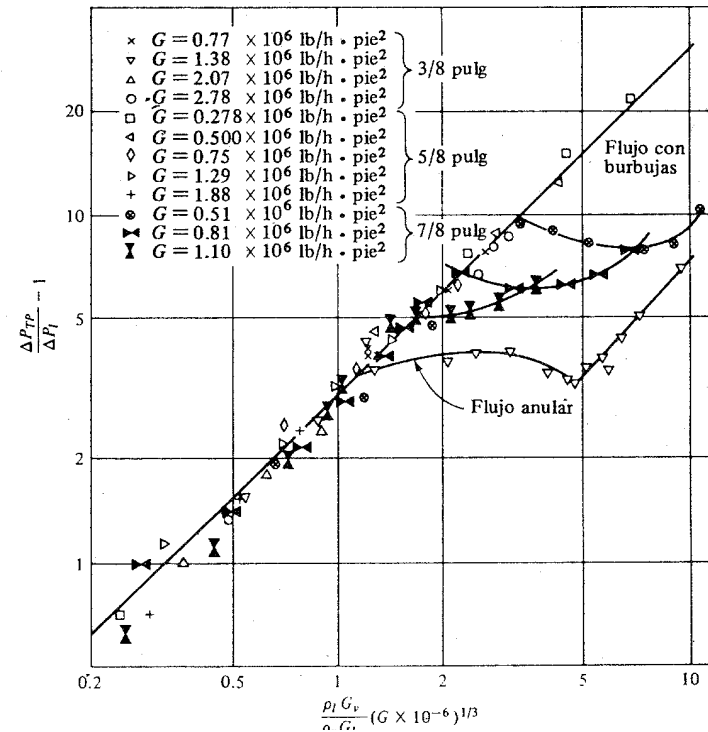
Peso de uma coluna com uma mistura de líquido e vapor

$$Z_3 \cdot \rho_{med} = \int_0^L \frac{dx}{v} = \int_0^L \frac{dx}{v_1 + (v_2 - v_1) \cdot (x / L)}$$

$$\frac{Z_3 \cdot \rho_{med}}{144} = \frac{L}{144 \cdot (v_2 - v_1)} \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

Queda de pressão devido ao atrito através do refervedor

$$\frac{\Delta p_{tp}}{\Delta p_l} = 1 + \frac{3 \cdot \rho_l \cdot \rho_v}{\rho_l + \rho_v} (G \cdot 10^{-6})^{1/3}$$



- Também podemos empregar as equações para perda de carga sem mudança de fase, utilizando a massa específica média entre a entrada e a saída



Coeficiente de película

Como a velocidade de circulação do líquido tem considerável influência na transmissão de calor, a menos que ela seja excessivamente baixa, considera-se o efeito combinado da convecção forçada com a ebulição

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

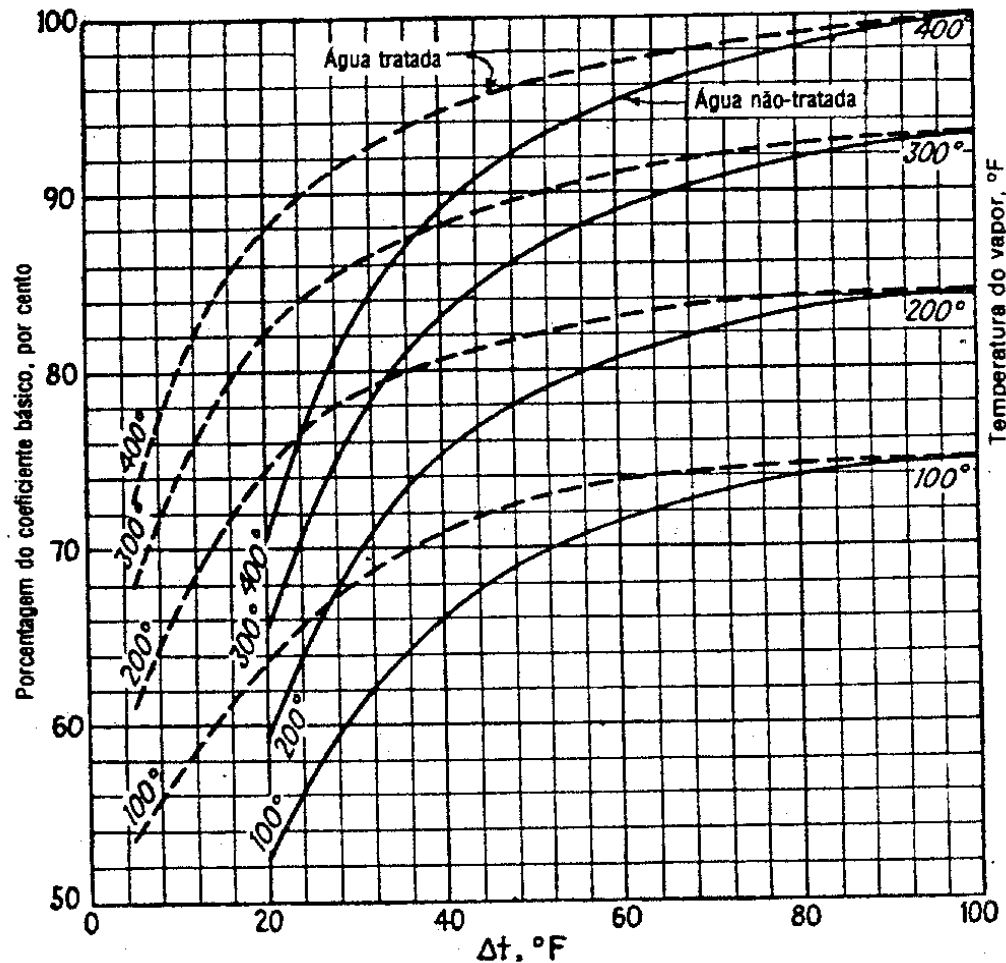


EVAPORADORES DE PLANTA DE POTÊNCIA

A taxa de transmissão de calor em evaporadores de planta de potência não é tratada na base de coeficientes peliculares individuais, por causa da rapidez da formação da incrustação e da natureza da resistência da incrustação.

Um valor de $700 \text{ BTU/h.ft}^2.\text{°F}$ é uma média razoável para o vapor básico de U

EVAPORADORES DE PLANTA DE POTÊNCIA



Coeficientes de evaporação para a água



EVAPORADORES QUÍMICOS

Nos evaporadores químicos, que tem por finalidade concentrar uma solução pela remoção da água solvente, devido a variação das propriedades da solução com a concentração, torna-se difícil a determinação de coeficientes peliculares individuais, principalmente quando há sólidos dissolvidos. Por esta razão, esta classe de evaporadores é calculada com base em coeficientes globais determinados experimentalmente.