

onde:

- $v =$ volume específico
- $\dot{m} =$ vazão em massa (Kg/h)
- $C_p =$ calor específico
- $h_{lv} =$ calor latente de vaporização
- $U =$ coeficiente global de troca térmica
- $A =$ área de transmissão de calor
- $T =$ temperatura do fluido quente
- $t =$ temperatura do fluido frio

Índices:

- $q =$ fluido quente (meio aquecedor)
- $f =$ fluido frio (fluido que se evapora)
- $v =$ vapor
- $l =$ líquido
- $1 =$ entrada
- $2 =$ saída

8.4.3.2.2 Perda de carga nos tubos

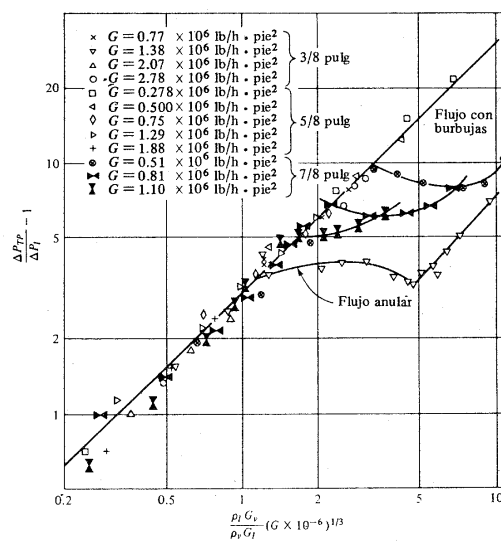
A perda de carga para o escoamento dentro de tubos pode ser determinada pela Equação 8.20 ou pela Figura 8.29, conforme Ösizik (1990) e Fraas (1965).

$$\frac{\Delta p_{tp}}{\Delta p_l} = 1 + \frac{3 \cdot \rho_l \cdot \rho_v}{\rho_l + \rho_v} (G \cdot 10^{-6})^{1/3} \quad (8.20)$$

onde:

- $\Delta p_{tp} =$ perda de carga para o fluxo de duas fases.
- $\Delta p_l =$ perda de carga para o fluxo de líquido.
- $\rho =$ massa específica.
- $G =$ vazão mássica (em lb/h.ft²)

Os índices l e v , referem-se ao líquido e ao vapor.



Correlación de la caída de presión en el régimen de flujo con burbujas. Los datos fueron obtenidos isotérmicamente con mezclas de aire-agua en tubos desde $\frac{3}{8}$ a $\frac{7}{8}$ de pulg de DI. (Tomada de Wallis [37].)

Figura 8.29 – Queda de pressão para escoamento bifásico no interior de tubos

Segundo Kern (1980), podem ser utilizadas as equações para Δp sem mudança de fase, utilizando-se a massa específica média entre o líquido na entrada e a mistura líquido-vapor na saída, sendo o número de Reynolds calculado nas condições de entrada.

NOTA: Como a formação de incrustações é grande nos vaporizadores quando utilizamos vaporização na carcaça, o feixe de tubos deve ser disposto segundo um passo quadrado para facilitar a limpeza.

Quando usamos vaporização nos tubos e vapor de água como fluido aquecedor no casco, podemos optar por um passo triangular.

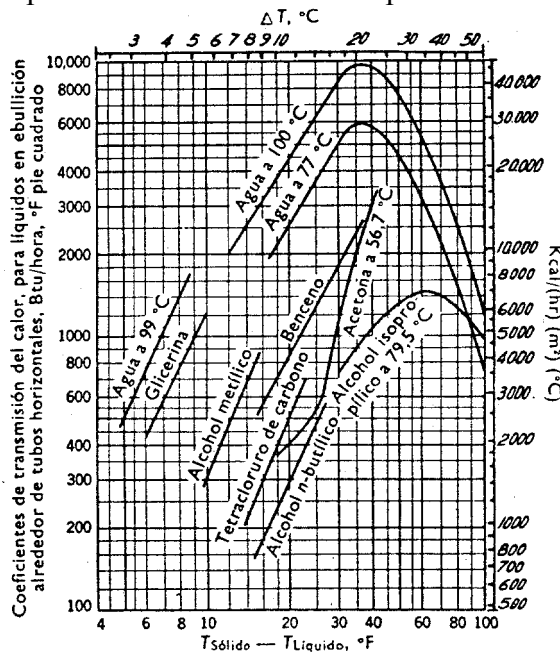
8.4.4 - TROCADORES DE VAPORIZAÇÃO COM CIRCULAÇÃO NATURAL

8.4.4.1 Vaporização na carcaça

8.4.4.1.1 Coeficientes de Película

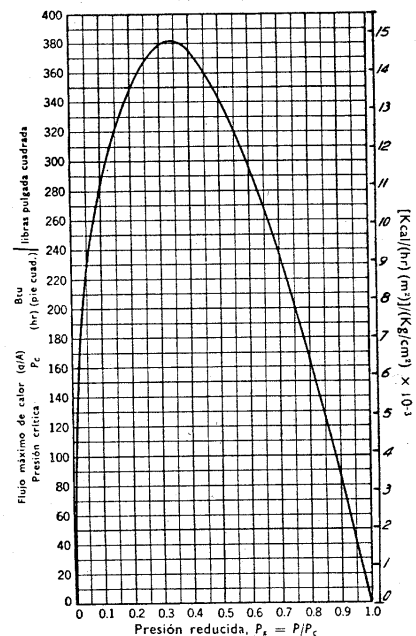
Nos equipamentos de vaporização com circulação natural, do tipo refervedor com retorta, há um espaço para expansão das bolhas no interior do casco, para isto recomenda-se que a linha superior dos tubos não ultrapasse 60% do diâmetro interno do casco; já nos refervedores com feixe horizontal atravessando a coluna e refervedores com termosifão horizontal, a expansão das bolhas ocorre em um espaço da coluna.

Quando vaporizamos uma porção de líquido nestes tipos de vaporizadores, a velocidade que flui sobre a superfície de transmissão de calor é muito pequena, de modo que o coeficiente de película da ebulição independe da velocidade e é fortemente influenciado pela diferença de temperatura entre a parede do tubo e a temperatura de saturação do fluido que entra em ebulição, o que caracteriza o regime de ebulição em vaso aberto (convecção natural ou ebulição nucleada) e os coeficientes de película podem ser determinados pelas equações da seção 8.3, ou pela Figura 8.30. Os fluxos máximos e as diferenças de temperaturas máximas também podem ser obtidos das Figuras 8.31, 8.32 e 8.33.



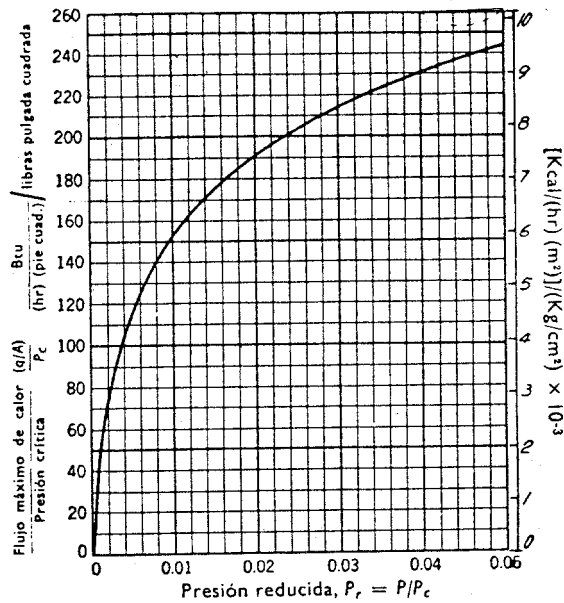
Coeficientes de transmissão del calor a líquidos en ebulición, representados en función del gradiente de temperatura entre la pared sólida y dichos líquidos. (8,31)

Figura 8.30 – Coeficientes de transferência de calor na ebulição



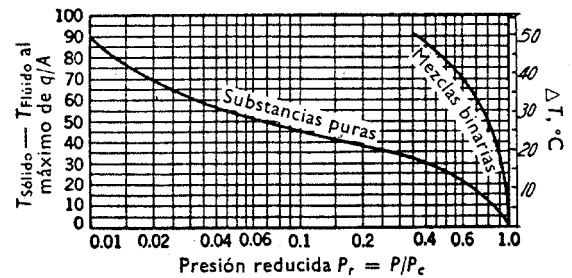
Representación gráfica de los valores del coeficiente entre el flujo máximo de calor (q/A) y la presión crítica, en función de la presión reducida. (8)

Figura 8.31 – Fluxo máximo de calor na ebulição



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. (2)

Figura 8.32 – Fluxo máximo de calor na ebulição



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

Figura 8.33 – Fluxo máximo de calor na ebulição

8.4.4.1.2 Perda de carga

A altura do líquido do fundo mantida numa coluna de destilação naturalmente preenche seu próprio nível no refeedor. Se o refeedor não for muito abaixo do líquido na coluna, existirá uma carga hidrostática desprezível para o escoamento do fluido proveniente da coluna para o refeedor e, portanto, a velocidade de circulação é relativamente pequena, de modo que a queda de pressão através do refeedor, bem como do tubo de conexão, pode ser considerada desprezível.

8.4.4.2 VAPORIZAÇÃO NOS TUBOS

Os vaporizadores dessa classe são unidades verticais que operam com uma carga hidrostática relativamente grande e uma baixa queda de pressão. Por esta razão a vaporização, em geral, ocorre nos tubos de um trocador com uma passagem, o que possibilita uma taxa de recirculação mais elevada do que a que ocorre comumente em unidades horizontais com vaporização na carcaça. Os três principais tipos de equipamentos que empregam este dispositivo são: evaporador vertical de tubo longo, refeedor vertical com termosifão e gerador de vapor de água não aquecido por chama.

8.4.4.2.1 Razões de Reciclagem

A razão de reciclagem, ou razão de recirculação, é atingida quando a soma das resistências do circuito de vaporização for igual a força motriz hidrodinâmica sobre o fluido vaporizante. Observando o termosifão vertical da Figura 8.34, existem cinco resistências principais:

1. Queda de pressão por atrito através da tubulação de entrada.
2. Queda de pressão por atrito através do refeedor.
3. Perda de expansão ou de aceleração provocada pela vaporização no refeedor.
4. Pressão estática de uma coluna da mistura líquido-vapor (Z_3) no refeedor
5. Queda de pressão devida ao atrito na tubulação de saída.

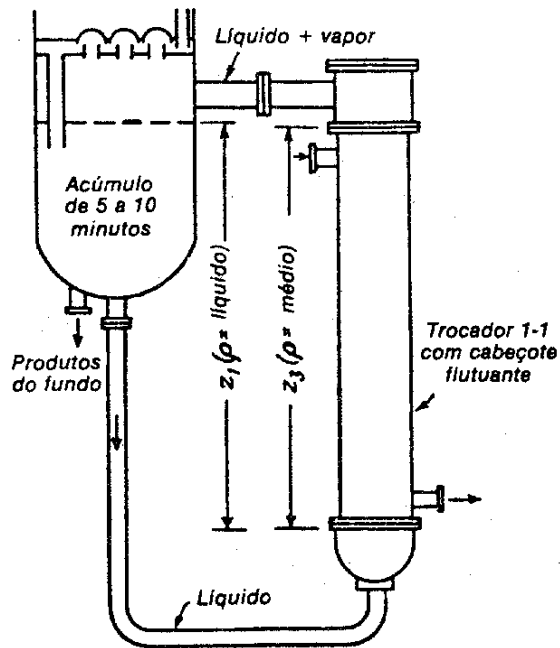


Figura 8.34 – Refervedor com termosifão vertical conectado a uma torre

8.4.4.2 Perda de expansão ou de aceleração provocada pela vaporização no refervedor.

É determinada pela Equação 8.21, onde r_2 é o fator obtido na figura 8.35,

$$\Delta p = \frac{r_2 \cdot G^2}{144 \cdot g} \quad (8.21)$$

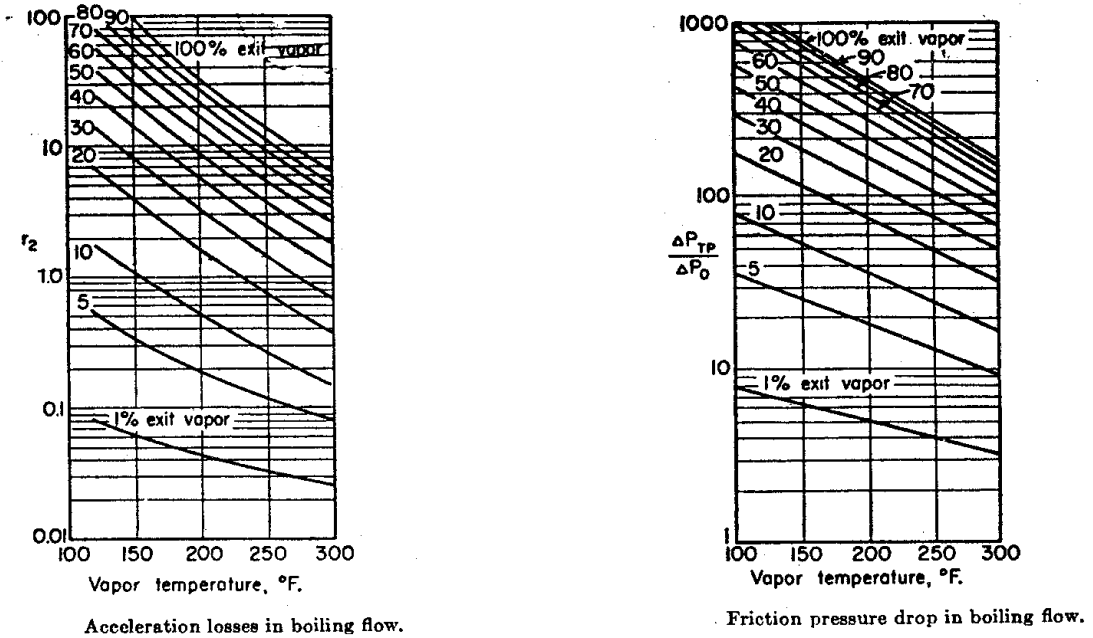


Figura 8.35 – Perda de carga na ebulição

onde:

- r_2 = fator obtido na Figura 8.35
- G = vazão mássica em $lb/s.ft^2$.
- g = aceleração da gravidade = $32,2 ft/s^2$.

OBS: A figura é válida somente para a água, mas pode ser usada para líquidos cujas propriedades não difiram consideravelmente da água.

Uma equação alternativa é sugerida por Kern (1980), que considera a perda de expansão devida a vaporização, igual a duas cargas cinéticas baseadas na média entre a densidade relativa da entrada e da saída, e expressa por:

$$\Delta p = \frac{G^2}{144 \cdot g \cdot \rho_{med}} \quad (8.22)$$

Quando a razão de recirculação é muito grande e a pressão de operação é elevada, a diferença de densidade entre a entrada e a saída é pequena e em consequência, a perda de expansão é desprezível.

8.4.4.2.3 Peso de uma coluna com uma mistura de líquido e vapor

É de difícil determinação quando desejamos grande precisão, mas para quase todos os casos práticos de engenharia, podemos supor uma variação linear da densidade relativa entre a entrada e a saída, o que permite obter por integração de:

$$Z_3 \cdot \rho_{med} = \int_0^L \frac{dx}{v} = \int_0^L \frac{dx}{v_1 + (v_2 - v_1)(x/L)} \quad (8.23)$$

a expressão 8.23, é dividida por 144, para obter a carga em lb/in²:

$$Z_3 \cdot \rho_{med} = \frac{L}{(v_2 - v_1)} \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \quad (8.24)$$

onde:

L = comprimento da coluna em *ft*.

v_1 = volume específico do líquido na entrada, em *ft*³/*lb*.

v_2 = volume específico da mistura líquido-vapor na saída em *ft*³/*lb*.

8.4.4.2.4 Queda de pressão devido ao atrito através do refeedor.

Pode-se ser determinada conforme descrito na seção 8.5.3.2.2, ou para o caso da água, ou líquidos com propriedades semelhantes as da água, a Figura 8.29 pode substituir a Equação 8.20. Na Figura 8.29, ΔP_{tp} é a queda de pressão do escoamento bifásico e ΔP_o é a queda de pressão se o escoamento fosse somente de líquido, nas condições de início da ebulição.

8.4.4.2.5 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, e é recomendado o uso da Equação 8.14.

8.4.5 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.

A Figura 8.36 apresenta as porcentagens de um coeficiente global médio, tomado como base, em função de ΔT , que é a diferença entre a temperatura de saturação do vapor de água aquecedor e a temperatura de saturação do lado da carcaça.

O valor básico do coeficiente global varia na indústria por causa dos problemas especiais surgidos pela análise química da água e pela competição entre os fabricantes.

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

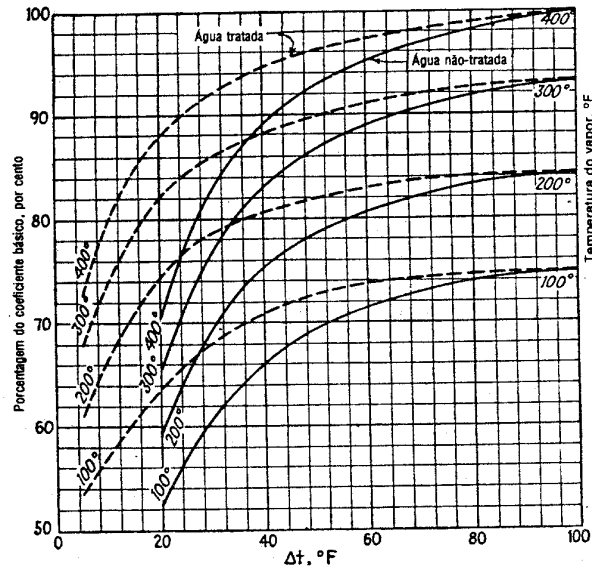


Figura 8.36 – Coeficientes de evaporação para a água

8.4.6 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. Os valores dos coeficientes globais de transmissão de calor são apresentados no apêndice. Perry (1980) apresenta algumas equações para a determinação de U , específicas para certas situações.