

MUDANÇA DE FASE

CORRELAÇÕES DA EBULIÇÃO EM PISCINA

Excesso de temperatura: $\Delta T_e \equiv T_s - T_{sat}$

Ebulição nucleada:

$$q_s'' = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3$$

sendo σ a tensão superficial do fluido e valores de $C_{s,f}$ e n fornecidos na Tabela 10.1. Propriedades avaliadas à T_{sat} .

$$\text{Fluxo térmico crítico: } q_{\max}'' = C h_{fg} \rho_v \left[\frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4}$$

sendo $C = (\pi/24) = 0,131$ (constante de Zuber) para cilindros horizontais, esferas e muitas superfícies grandes aquecidas e $C = 0,149$ para placas horizontais grandes. Propriedades avaliadas à T_{sat} .

$$\text{Fluxo mínimo: } q_{\min}'' = C h_{fg} \rho_v \left[\frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4}$$

sendo $C = 0,09$. Propriedades avaliadas à T_{sat} .

Ebulição em filme em piscina:

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}_{conv} D}{k_v} = C \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v) h'_{fg} D^3}{v_v k_v (T_s - T_{sat})} \right]^{1/4}$$

sendo $C = 0,62$ para cilindros horizontais e $C = 0,67$ para esferas e:

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0,80 c_{p,v} (T_s - T_{sat})$$

Prop. do vapor à temperatura de filme.

No caso de $T_s \geq 300^\circ\text{C}$: $\bar{h}^{4/3} = \bar{h}_{conv}^{4/3} + \bar{h}_{rad} \bar{h}^{1/3}$.

$$\text{Se } \bar{h}_{rad} < \bar{h}_{conv}: \bar{h} = \bar{h}_{conv} + \frac{3}{4} \bar{h}_{rad}$$

$$\bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}}, \text{ sendo } \sigma \text{ a constante de Stefan-Boltzmann.}$$

EBULIÇÃO COM CONVECÇÃO FORÇADA

Ebulição com convecção forçada em esc. externo

$$\text{Baixa velocidade: } \frac{q_{\max}''}{\rho_v h_{fg} V} = \frac{1}{\pi} \left[1 + \left(\frac{4}{We} \right)^{1/3} \right]$$

$$\text{Alta velocidade: } \frac{q_{\max}''}{\rho_v h_{fg} V} = \frac{(\rho_l / \rho_v)^{3/4}}{169 \pi} + \frac{(\rho_l / \rho_v)^{1/2}}{19,2 \pi We_D^{1/3}}$$

$$\text{Número de Weber: } We \equiv \frac{\rho_v V^2 D}{\sigma}$$

Região de baixa velocidade se: $\frac{q_{\max}''}{\rho_v h_{fg} V} > \frac{0,275}{\pi} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2} + 1$; caso contrário, considera-se região de alta velocidade.

CONDENSAÇÃO EM FILME LAMINAR SOBRE PLACA VERTICAL

$$\text{Espessura da camada-limite: } \delta(x) = \left[\frac{4 k_l \mu_l (T_{sat} - T_s) x}{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h_{fg}} \right]^{1/4}$$

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}_L L}{k_l} = 0,943 \left[\frac{\rho_l g (\rho_l - \rho_v) h'_{fg} L^3}{\mu_l k_l (T_{sat} - T_s)} \right]^{1/4}$$

$$\text{Calor latente modificado: } h'_{fg} = h_{fg} + 0,68 c_{p,l} (T_{sat} - T_s)$$

Transf. de calor total: $q = \bar{h}_L A (T_{sat} - T_s)$

Taxa de condensação: $\dot{m} = \frac{q}{h'_{fg}} = \frac{\bar{h}_L A (T_{sat} - T_s)}{h'_{fg}}$

CONDENSAÇÃO EM FILME TURBULENTO

Número de Reynolds: $Re_\delta = \frac{4\dot{m}}{\mu_l b} = \frac{4\rho_l u_m \delta}{\mu_l}$

Região laminar sem ondulações:

$$\frac{\bar{h}_L (v_l^2 / g)^{1/3}}{k_l} = 1,47 Re_\delta^{-1/3}; \quad Re_\delta \leq 30$$

$$Re_\delta = 3,78 \left[\frac{k_l L (T_{sat} - T_s)}{\mu_l h'_{fg} (v_l^2 / g)^{1/3}} \right]^{3/4}; \quad Re_\delta \leq 30$$

Região laminar com ondulações:

$$\frac{\bar{h}_L (v_l^2 / g)^{1/3}}{k_l} = \frac{Re_\delta}{1,08 Re_\delta^{1,22} - 5,2}; \quad 30 \leq Re_\delta \leq 1800$$

$$Re_\delta = \left[\frac{3,70 k_l L (T_{sat} - T_s)}{\mu_l h'_{fg} (v_l^2 / g)^{1/3}} + 4,8 \right]^{0,82}; \quad 30 \leq Re_\delta \leq 1800$$

Região turbulenta:

$$\frac{\bar{h}_L (v_l^2 / g)^{1/3}}{k_l} = \frac{Re_\delta}{8750 + 58 Pr_l^{-0,5} (Re_\delta^{0,75} - 253)}; \quad Re_\delta \geq 1800$$

$$Re_\delta = \left[\frac{0,069 k_l L (T_{sat} - T_s)}{\mu_l h'_{fg} (v_l^2 / g)^{1/3}} Pr_l^{0,5} - 151 Pr_l^{0,5} + 253 \right]^{4/3}; \quad Re_\delta \geq 1800$$

Para todos os casos anteriores:

$$\bar{h}_L = \frac{Re_\delta \mu_l h'_{fg}}{4L(T_{sat} - T_s)}$$

CONDENSAÇÃO EM FILME SOBRE SISTEMAS RADIAIS

$$\text{Coeficiente convectivo: } \bar{h}_D = C \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l (T_{sat} - T_s) D} \right]^{1/4}$$

sendo $C = 0,826$ para esferas e $C = 0,729$ para tubos.

Fileira vertical com N tubos horizontais:

$$\bar{h}_D = 0,729 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h'_{fg}}{N \mu_l (T_{sat} - T_s) D} \right]^{1/4}$$

CONDENSAÇÃO EM FILME NO INTERIOR DE TUBOS HORIZONTAIS

Para baixas velocidades, com $Re_{v,ent} = \left(\frac{\rho_v u_{m,v} D}{\mu_v} \right)_{ent} < 35.000$, pode-

se utilizar $\bar{h}_D = 0,555 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l (T_{sat} - T_s) D} \right]^{1/4}$ e, para este caso, deve-

se empregar $h'_{fg} = h_{fg} + \frac{3}{8} c_{p,l} (T_{sat} - T_s)$.

CONDENSAÇÃO EM GOTAS

$$\bar{h}_{cg} = 51.104 + 2.044 T_{sat} (^{\circ}C); \quad 22^{\circ}C \leq T_{sat} \leq 100^{\circ}C$$

$$\bar{h}_{cg} = 255.510; \quad T_{sat} \geq 100^{\circ}C$$

TROCADORES DE CALOR

COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSF. DE CALOR

Trocadores de calor aletados:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_f A_f} = \frac{1}{U_q A_q} = \frac{1}{(\eta_0 h A)_f} + \frac{R''_{d,f}}{(\eta_0 A)_f} + R_p + \frac{R''_{d,q}}{(\eta_0 A)_q} + \frac{1}{(\eta_0 h A)_q}$$

$q = \eta_0 h A (T_b - T_\infty)$, sendo A a área superficial total (aletas e base exposta), de modo que:

$$\eta_0 = 1 - \frac{A_a}{A} (1 - \eta_a), \text{ sendo } \eta_a \text{ a eficiência de uma aleta.}$$

Trocadores de calor não-aletados:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_e A_e} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R''_{d,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_e / D_i)}{2 \pi k L} + \frac{R''_{d,e}}{A_e} + \frac{1}{h_e A_e}$$

ANÁLISE DE TROCADORES DE CALOR – USO DA MÉDIA LOGARÍTMICA DAS TEMPERATURAS

$$q = \dot{m}_q c_{p,q} (T_{q,ent} - T_{q,sai}) = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,sai} - T_{f,ent})$$

$$q = U A \Delta T_{ml}$$

sendo:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

Trocador com escoamento em paralelo:

$$\Delta T_1 \equiv T_{q,1} - T_{f,1} = T_{q,ent} - T_{f,ent}$$

$$\Delta T_2 \equiv T_{q,2} - T_{f,2} = T_{q,sai} - T_{f,sai}$$

Trocador com escoamento em contracorrente:

$$\Delta T_1 \equiv T_{q,1} - T_{f,1} = T_{q,ent} - T_{f,sai}$$

$$\Delta T_2 \equiv T_{q,2} - T_{f,2} = T_{q,sai} - T_{f,ent}$$

ANÁLISE DE TROCADORES DE CALOR – MÉTODO DA EFETIVIDADE (NUT)

Capacitância térmica: $C = \dot{m} c_p$

Capacitância térmica mínima: $C_{\min} = \min(C_f, C_q)$

Taxa máxima de transf. de calor: $q_{\max} = C_{\min} (T_{q,ent} - T_{f,ent})$

$$\text{Efetividade: } \varepsilon \equiv \frac{q}{q_{\max}}$$

Número de unidades de transferência: $NUT \equiv \frac{U A}{C_{\min}}$

Relações entre NUT e ε podem ser obtidas nas Tabelas 11.3 e 11.4 ou Figuras 11.10 a 11.15.

RADIAÇÃO – PROCESSOS E PROPRIEDADES

RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Intensidade espectral de corpo negro:

$$I_{\lambda, cn}(\lambda, T) = \frac{2hc_o^2}{\lambda^5 [\exp(hc_o / \lambda kT) - 1]}$$

Constante de Planck: $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J · s

Constante de Boltzmann: $k = 1,381 \times 10^{-23}$ J/K

Velocidade da luz no vácuo: $c_o = 2,998 \times 10^8$ m/s

Distribuição de Planck:

$$E_{\lambda, cn}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda, cn}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]}$$

Primeira constante da radiação: $C_1 = 2\pi hc_o^2 = 3,742 \times 10^8$ W · $\mu\text{m}^4/\text{m}^2$

Segunda constante da radiação: $C_2 = (hc_o / k) = 1,439 \times 10^4$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$

Lei dos deslocamentos de Wien:

$$\lambda_{\max} T = C_3$$

Terceira constante da radiação: $C_3 = 2897,8$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$

Lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_{cn} = \sigma T^4$$

Constante de Stefan-Boltzmann: $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴

Absorção, Reflexão e Transmissão em superfícies reais

$$G_{\lambda} = G_{\lambda, ref} + G_{\lambda, abs} + G_{\lambda, tr}$$

$$\rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$$

TROCA DE RADIAÇÃO ENTRE SUPERFÍCIES

FATOR DE FORMA

$$\text{Integral do fator de forma: } F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_j dA_i$$

(Valores para alguns fatores de forma são dados através das Tabelas 13.1 e 13.2 e Figuras 13.4, 13.5 e 13.6.)

Radiação que parte de uma superfície i e é interceptada por uma superfície j : $q_{i \rightarrow j} = F_{ij} A_i J_i$

Relações do fator de forma

Relação de reciprocidade: $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$

Regra do somatório: $\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1$

TROCAS TÉRMICAS ENTRE SUPERFÍCIES CINZAS, DIFUSAS E OPACAS EM UMA CAVIDADE

Resistência radiante superficial: $R = \frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i A_i}$

Resistência espacial ou geométrica: $R = \frac{1}{A_i F_{ij}}$

Taxa de transferência de radiação a partir de uma superfície i para N superfícies:

$$q_i = \frac{E_{cn,i} - J_i}{(1 - \epsilon_i) / \epsilon_i A_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{(A_i F_{ij})^{-1}}$$

Cavidade com duas superfícies (caso geral):

$$q_{12} = q_1 = -q_2 = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}}$$

Barreiras de radiação (N barreiras planas com emissividades iguais):

$$(q_{12})_N = \frac{1}{N+1} (q_{12})_0$$

sendo $(q_{12})_0$ a taxa de transferência de radiação na ausência de barreiras ($N = 0$).

Superfície rerradiante:

$$q_1 = -q_2 = \frac{E_{cn,1} - E_{cn,2}}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12} + [(1/A_1 F_{1R}) + (1/A_2 F_{2R})]^{-1}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}}$$

$$\frac{J_1 - J_R}{(1/A_1 F_{1R})} - \frac{J_R - J_2}{(1/A_2 F_{2R})} = 0$$

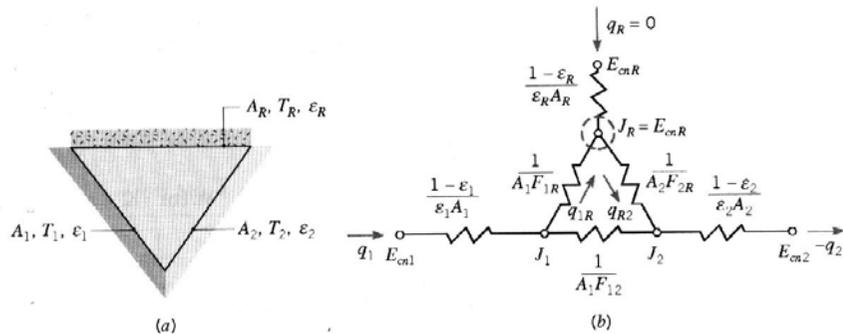


FIGURA 13.12 Uma cavidade com três superfícies com uma superfície rerradiante. (a) Esquema. (b) Representação em rede.

TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM MÚLTIPLOS MODOS

$$q_{i,ext} = q_{i,rad} + q_{i,conv} + q_{i,cond}$$

TABELA 13.2 Fatores de forma em geometrias tridimensionais [4]

Geometria	Relação
Retângulos Paralelos Alinhados (Figura 13.4)	$\bar{X} = X/L, \bar{Y} = Y/L$ $F_{ij} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} + \bar{X} (1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} + \bar{Y} (1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\}$
Discos Paralelos Coaxiais (Figura 13.5)	$R_i = r_i/L, R_j = r_j/L$ $S = 1 + \frac{1 + R_j^2}{R_i^2}$ $F_{ij} = \frac{1}{2} \{ S - [S^2 - 4(R_j/R_i)^2]^{1/2} \}$

(continua)

TABELA 13.2 Continuação

Geometria	Relação
Retângulos Perpendiculares com uma Aresta Comum (Figura 13.6)	$H = Z/X, W = Y/X$ $F_{ij} = \frac{1}{\pi W} \left(W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} - (H^2 + W^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}} + \frac{1}{4} \ln \left[\frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \left[\frac{W^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right]^{W^2} \times \left[\frac{H^2(1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2)(H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right] \right)$

TABELA 13.1 Fatores de forma em geometrias bidimensionais [4]

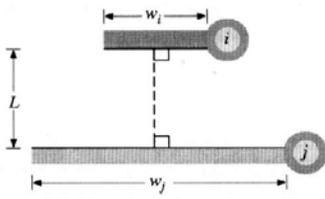
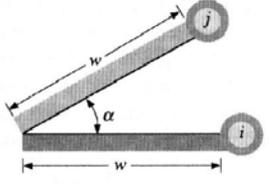
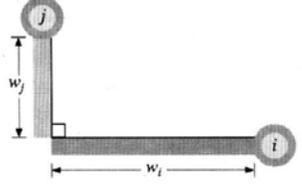
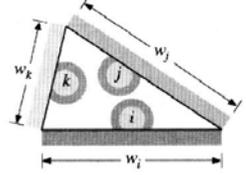
Geometria	Relação
<p>Placas Paralelas com Linhas Centrais Conectadas por uma Perpendicular</p> 	$F_{ij} = \frac{[(W_i + W_j)^2 + 4]^{1/2} - [(W_j - W_i)^2 + 4]^{1/2}}{2W_i}$ $W_i = w_i/L, W_j = w_j/L$
<p>Placas Planas Inclinadas com Igual Largura e uma Aresta Comum</p> 	$F_{ij} = 1 - \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)$
<p>Placas Perpendiculares com uma Aresta Comum</p> 	$F_{ij} = \frac{1 + (w_j/w_i) - [1 + (w_j/w_i)^2]^{1/2}}{2}$
<p>Cavidade com Três Lados</p> 	$F_{ij} = \frac{w_i + w_j - w_k}{2w_i}$

TABELA 13.1 Continuação

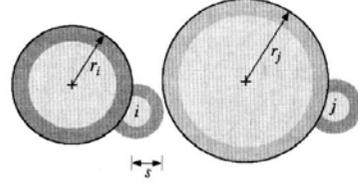
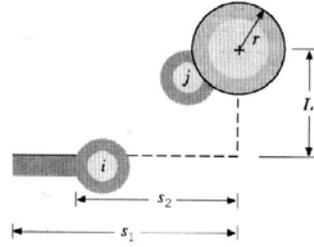
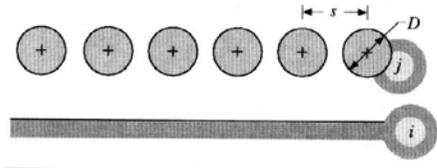
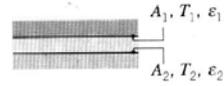
Geometria	Relação
<p>Cilindros Paralelos com Raios Diferentes</p> 	$F_{ij} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \pi + [C^2 - (R + 1)^2]^{1/2} - [C^2 - (R - 1)^2]^{1/2} + (R - 1) \cos^{-1} \left[\left(\frac{R}{C} \right) - \left(\frac{1}{C} \right) \right] - (R + 1) \cos^{-1} \left[\left(\frac{R}{C} \right) + \left(\frac{1}{C} \right) \right] \right\}$ $R = r_j/r_i, S = s/r_i$ $C = 1 + R + S$
<p>Cilindro e Retângulo Paralelo</p> 	$F_{ij} = \frac{r}{s_1 - s_2} \left[\tan^{-1} \frac{s_1}{L} - \tan^{-1} \frac{s_2}{L} \right]$
<p>Placa Infinita e Linha de Cilindros</p> 	$F_{ij} = 1 - \left[1 - \left(\frac{D}{s} \right)^2 \right]^{1/2} + \left(\frac{D}{s} \right) \tan^{-1} \left[\left(\frac{s^2 - D^2}{D^2} \right)^{1/2} \right]$

TABELA 13.3 Cavernas especiais com duas superfícies cinza e difusas

Planos Paralelos Grandes (Infinitos)

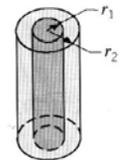


$$A_1 = A_2 = A$$

$$F_{12} = 1$$

$$q_{12} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (13.19)$$

Cilindros Concêntricos Longos (Infinitos)



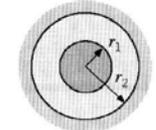
$$A_1 = \pi r_1 L$$

$$A_2 = \pi r_2 L$$

$$F_{12} = 1$$

$$q_{12} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (13.20)$$

Esféricas Concêntricas



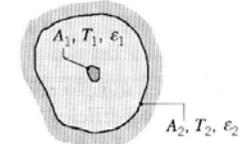
$$A_1 = \pi r_1^2$$

$$A_2 = \pi r_2^2$$

$$F_{12} = 1$$

$$q_{12} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} \quad (13.21)$$

Pequeno Objeto Convexo em uma Grande Caverna



$$\frac{A_1}{A_2} \approx 0$$

$$F_{12} = 1$$

$$q_{12} = \sigma A_1 \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (13.22)$$

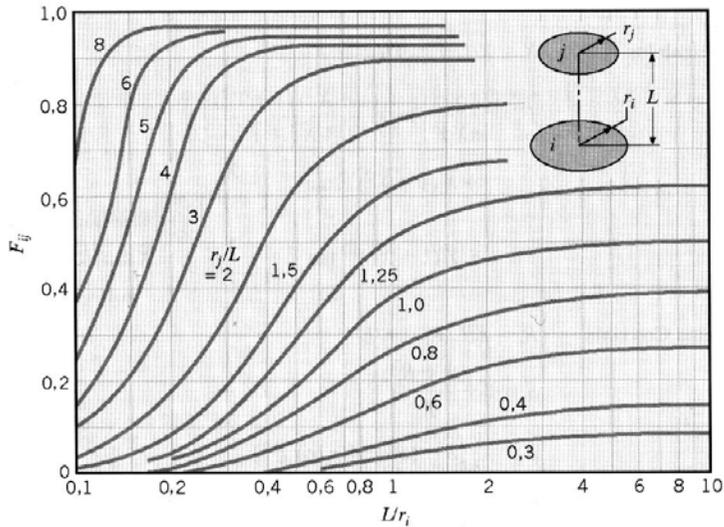


FIGURA 13.5 Fatores de forma para discos paralelos coaxiais.

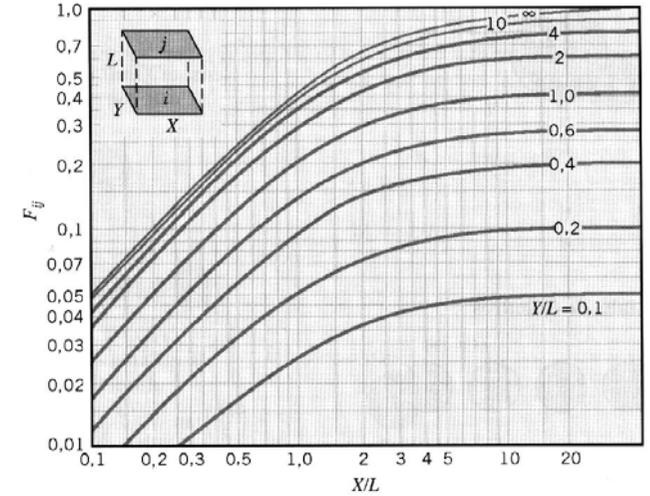


FIGURA 13.4 Fatores de forma para retângulos paralelos alinhados.

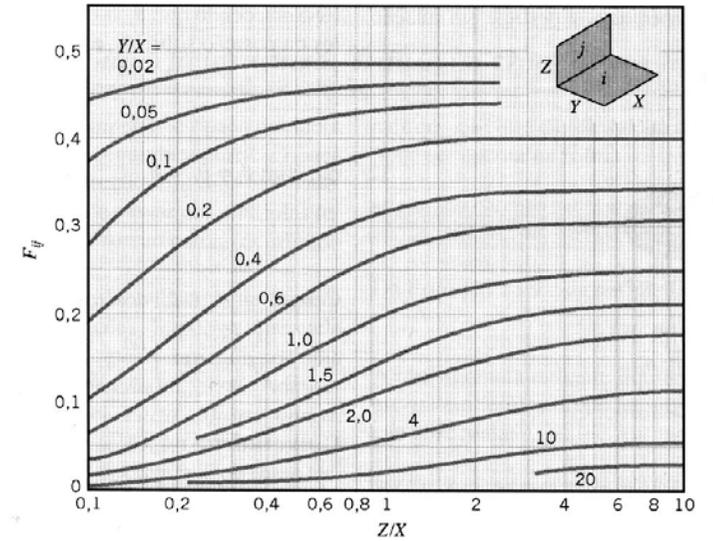


FIGURA 13.6 Fatores de forma para retângulos perpendiculares com uma aresta comum.

TABELA 10.1 Valores de $C_{s,f}$ para várias combinações superfície-fluido [5-7]

Combinação superfície-fluido	$C_{s,f}$	n
Água-cobre		
Riscada	0,0068	1,0
Polida	0,0128	1,0
Água-aço inoxidável		
Atacada quimicamente	0,0133	1,0
Polida mecanicamente	0,0132	1,0
Esmerilhada e polida	0,0080	1,0
Água-latão	0,0060	1,0
Água-níquel	0,006	1,0
Água-platina	0,0130	1,0
<i>n</i> -Pentano-cobre		
Polida	0,0154	1,7
Esmerilhada	0,0049	1,7
Benzeno-cromo	0,0101	1,7
Álcool etílico-cromo	0,0027	1,7

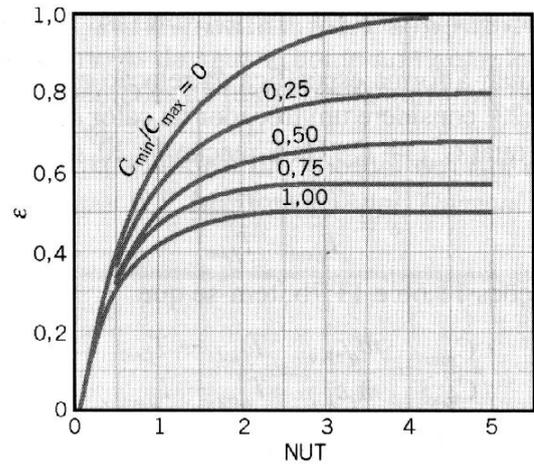


FIGURA 11.10 Efetividade de um trocador de calor com configuração paralela (Equação 11.28).

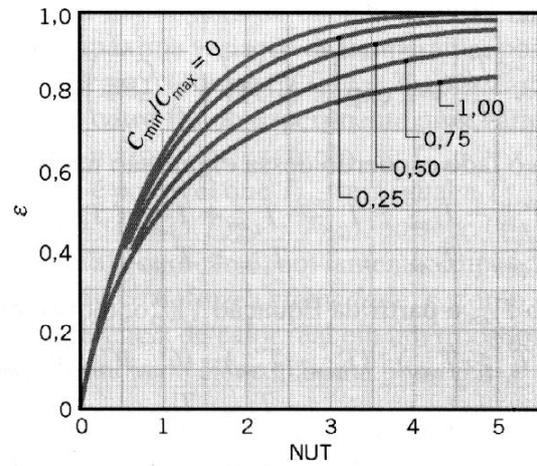
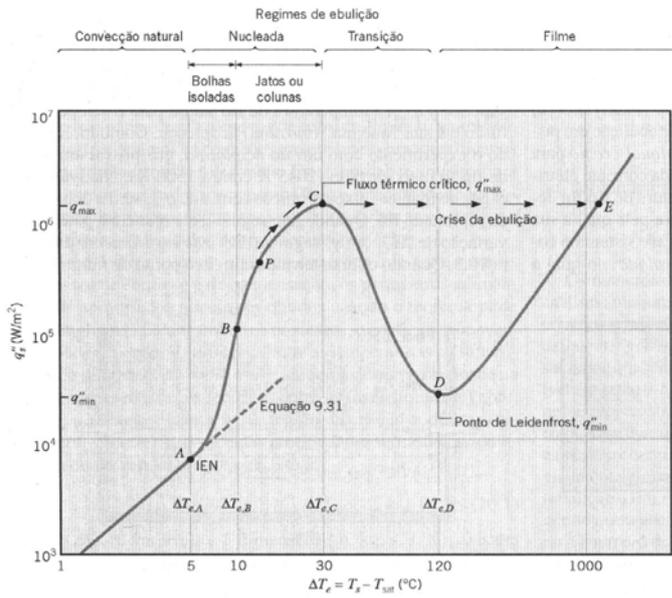


FIGURA 11.11 Efetividade de um trocador de calor com configuração contracorrente (Equação 11.29).

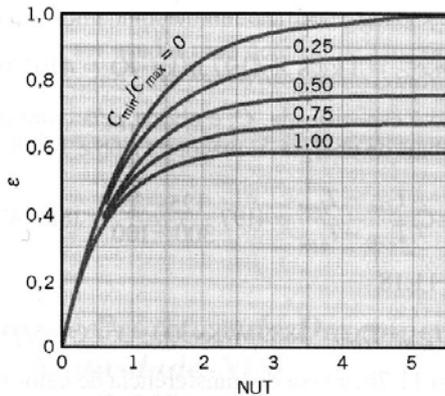
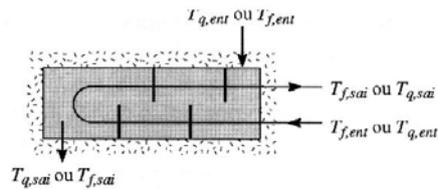


FIGURA 11.12 Efetividade de um trocador de calor casco e tubos com um passe no casco e qualquer múltiplo de dois passes nos tubos (dois, quatro, etc. passes nos tubos) (Equação 11.30).

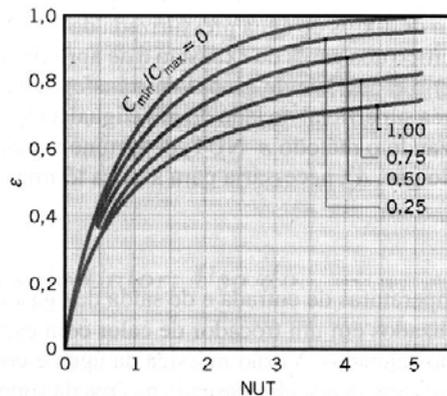
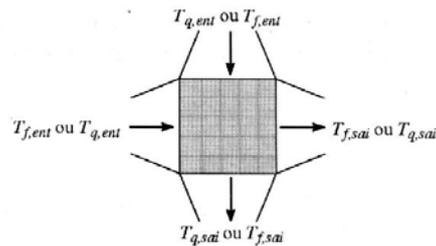


FIGURA 11.14 Efetividade de um trocador de calor de escoamento cruzado com um passe, com os dois fluidos não-misturados (Equação 11.32).

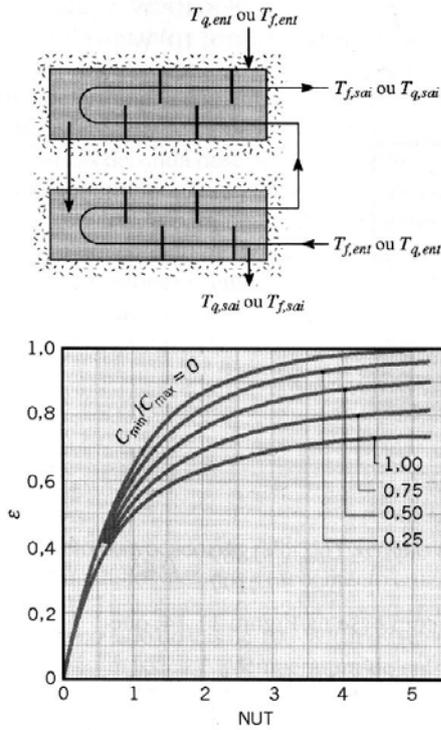


FIGURA 11.13 Efetividade de um trocador de calor casco e tubos com dois passes no casco e qualquer múltiplo de quatro passes nos tubos (quatro, oito, etc. passes nos tubos) (Equação 11.31 com $n = 2$).

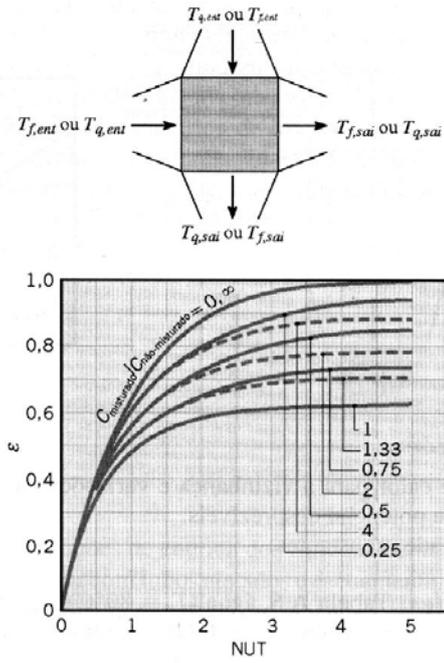


FIGURA 11.15 Efetividade de um trocador de calor de escoamento cruzado com um fluido misturado e o outro não-misturado (Equações 11.33 e 11.34).

TABELA 11.3 Relações da efetividade de trocadores de calor [5]

Configuração do Escoamento	Relação
Tubos concêntricos (bitubulares)	
Escoamento paralelo	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C_r)]}{1 + C_r} \quad (11.28a)$
Escoamento contracorrente	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NUT(1 - C_r)]} \quad (C_r < 1)$
	$\varepsilon = \frac{NUT}{1 + NUT} \quad (C_r = 1) \quad (11.29a)$
Casco e tubos	
Um passe no casco (2, 4, ... passes nos tubos)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp[-(NUT)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-(NUT)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1} \quad (11.30a)$
n Passes no casco ($2n, 4n, \dots$ passes nos tubos)	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1} \quad (11.31a)$
Escoamento cruzado (passe único)	
Dois fluidos não-misturados	$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\frac{1}{C_r} \right) (NUT)^{0,22} \{ \exp[-C_r(NUT)^{0,78}] - 1 \} \right] \quad (11.32)$
C_{max} (misturado), C_{min} (não-misturado)	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp \{ -C_r [1 - \exp(-NUT)] \}) \quad (11.33a)$
C_{min} (misturado), C_{max} (não-misturado)	$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1} \{ 1 - \exp[-C_r(NUT)] \}) \quad (11.34a)$
Todos os trocadores ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-NUT) \quad (11.35a)$

TABELA 11.4 Relações do NUT de trocadores de calor

Configuração do Escoamento	Relação
Tubos concêntricos (bitubulares)	
Escoamento paralelo	$\text{NUT} = -\frac{\ln[1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r} \quad (11.28b)$
Escoamento contracorrente	$\text{NUT} = \frac{1}{C_r - 1} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1}\right) \quad (C_r < 1)$
	$\text{NUT} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (C_r = 1) \quad (11.29b)$
Casco e tubos	
Um passe no casco (2, 4, ... passes nos tubos)	$(\text{NUT})_1 = -(1 + C_r^2)^{-1/2} \ln\left(\frac{E - 1}{E + 1}\right) \quad (11.30b)$
	$E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}} \quad (11.30c)$
n Passes no casco ($2n, 4n, \dots$ passes nos tubos)	Use as Equações 11.30b e 11.30c com
	$\varepsilon_1 = \frac{F - 1}{F - C_r} \quad F = \left(\frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1}\right)^{1/n} \quad \text{NUT} = n(\text{NUT})_1 \quad (11.31b, c, d)$
Escoamento cruzado (passe único)	
C_{\max} (misturado), C_{\min} (não-misturado)	$\text{NUT} = -\ln\left[1 + \left(\frac{1}{C_r}\right) \ln(1 - \varepsilon C_r)\right] \quad (11.33b)$
C_{\min} (misturado), C_{\max} (não-misturado)	$\text{NUT} = -\left(\frac{1}{C_r}\right) \ln[C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1] \quad (11.34b)$
Todos os trocadores ($C_r = 0$)	$\text{NUT} = -\ln(1 - \varepsilon) \quad (11.35b)$

TABELA A.6 Propriedades Termofísicas da Água Saturada^a

Temperatura, T (K)	Pressão, P (bar) ^b	Volume Específico (m ³ /kg)		Calor de Vaporização h_{1v} (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/kg · K)		Viscosidade (N · s/m ²)		Condutividade Térmica (W/m · K)		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma_s \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de $\beta_f \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperatura, T (K)
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,l}$	$c_{p,g}$	$\mu_l \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_l \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_f	Pr_g			
273,15	0,00611	1,000	206,3	2.502	4,217	1,854	1.750	8,02	569	18,2	12,99	0,815	75,5	-68,05	273,15
275	0,00697	1,000	181,7	2.497	4,211	1,855	1.652	8,09	574	18,3	12,22	0,817	75,3	-32,74	275
280	0,00990	1,000	130,4	2.485	4,198	1,858	1.422	8,29	582	18,6	10,26	0,825	74,8	46,04	280
285	0,01387	1,000	99,4	2.473	4,189	1,861	1.225	8,49	590	18,9	8,81	0,833	74,3	114,1	285
290	0,01917	1,001	69,7	2.461	4,184	1,864	1.080	8,69	598	19,3	7,56	0,841	73,7	174,0	290
295	0,02617	1,002	51,94	2.449	4,181	1,868	959	8,89	606	19,5	6,62	0,849	72,7	227,5	295
300	0,03531	1,003	39,13	2.438	4,179	1,872	855	9,09	613	19,6	5,83	0,857	71,7	276,1	300
305	0,04712	1,005	29,74	2.426	4,178	1,877	769	9,29	620	20,1	5,20	0,865	70,9	320,6	305
310	0,06221	1,007	22,93	2.414	4,178	1,882	695	9,49	628	20,4	4,62	0,873	70,0	361,9	310
315	0,08132	1,009	17,82	2.402	4,179	1,888	631	9,69	634	20,7	4,16	0,883	69,2	400,4	315
320	0,1053	1,011	13,98	2.390	4,180	1,895	577	9,89	640	21,0	3,77	0,894	68,3	436,7	320
325	0,1351	1,013	11,06	2.378	4,182	1,903	528	10,09	645	21,3	3,42	0,901	67,5	471,2	325
330	0,1719	1,016	8,82	2.366	4,184	1,911	489	10,29	650	21,7	3,15	0,908	66,6	504,0	330
335	0,2167	1,018	7,09	2.354	4,186	1,920	453	10,49	656	22,0	2,88	0,916	65,8	535,5	335
340	0,2713	1,021	5,74	2.342	4,188	1,930	420	10,69	660	22,3	2,66	0,925	64,9	566,0	340
345	0,3372	1,024	4,683	2.329	4,191	1,941	389	10,89	668	22,6	2,45	0,933	64,1	595,4	345
350	0,4163	1,027	3,846	2.317	4,195	1,954	365	11,09	668	23,0	2,29	0,942	63,2	624,2	350
355	0,5100	1,030	3,180	2.304	4,199	1,968	343	11,29	671	23,3	2,14	0,951	62,3	652,3	355
360	0,6209	1,034	2,645	2.291	4,203	1,983	324	11,49	674	23,7	2,02	0,960	61,4	697,9	360
365	0,7514	1,038	2,212	2.278	4,209	1,999	306	11,69	677	24,1	1,91	0,969	60,5	707,1	365
370	0,9040	1,041	1,861	2.265	4,214	2,017	289	11,89	679	24,5	1,80	0,978	59,5	728,7	370
373,15	1,0133	1,044	1,679	2.257	4,217	2,029	279	12,02	680	24,8	1,76	0,984	58,9	750,1	373,15
375	1,0815	1,045	1,574	2.252	4,220	2,036	274	12,09	681	24,9	1,70	0,987	58,6	761	375
380	1,2869	1,049	1,337	2.239	4,226	2,057	260	12,29	683	25,4	1,61	0,999	57,6	788	380
385	1,5233	1,053	1,142	2.225	4,232	2,080	248	12,49	685	25,8	1,53	1,004	56,6	814	385
390	1,794	1,058	0,980	2.212	4,239	2,104	237	12,69	686	26,3	1,47	1,013	55,6	841	390
400	2,455	1,067	0,731	2.183	4,256	2,158	217	13,05	688	27,2	1,34	1,033	53,6	896	400
410	3,302	1,077	0,553	2.153	4,278	2,221	200	13,42	688	28,2	1,24	1,054	51,5	952	410
420	4,370	1,088	0,425	2.123	4,302	2,291	185	13,79	688	29,8	1,16	1,075	49,4	1.010	420
430	5,699	1,099	0,331	2.091	4,331	2,369	173	14,14	685	30,4	1,09	1,10	47,2		430

TABELA A.6 Continuação

Temperatura, T (K)	Pressão, p (bar) ^b	Volume Específico (m ³ /kg)		Calor de Vaporização, h_{fg} (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg · K))		Viscosidade, (N · s/m ²)		Condutividade Térmica (W/(m · K))		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma_e \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de Expansão, $\beta_e \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperatura, T (K)
		$v_e \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,e}$	$c_{p,g}$	$\mu_e \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_e \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_e	Pr_g			
440	7,333	1,110	0,261	2059	4,36	2,46	162	14,50	682	31,7	1,04	1,12	45,1	—	440
450	9,319	1,123	0,208	2024	4,40	2,56	152	14,85	678	33,1	0,99	1,14	42,9	—	450
460	11,71	1,137	0,167	1989	4,44	2,68	143	15,19	673	34,6	0,95	1,17	40,7	—	460
470	14,55	1,152	0,136	1951	4,48	2,79	136	15,54	667	36,3	0,92	1,20	38,5	—	470
480	17,90	1,167	0,111	1912	4,53	2,94	129	15,88	660	38,1	0,89	1,23	36,2	—	480
490	21,83	1,184	0,0922	1870	4,59	3,10	124	16,23	651	40,1	0,87	1,25	33,9	—	490
500	26,40	1,203	0,0766	1825	4,66	3,27	118	16,59	642	42,3	0,86	1,28	31,6	—	500
510	31,66	1,222	0,0631	1779	4,74	3,47	113	16,95	631	44,7	0,85	1,31	29,3	—	510
520	37,70	1,244	0,0525	1730	4,84	3,70	108	17,33	621	47,5	0,84	1,35	26,9	—	520
530	44,58	1,268	0,0445	1679	4,95	3,96	104	17,72	608	50,6	0,85	1,39	24,5	—	530
540	52,38	1,294	0,0375	1622	5,08	4,27	101	18,1	594	54,0	0,86	1,43	22,1	—	540
550	61,19	1,323	0,0317	1564	5,24	4,64	97	18,6	580	58,3	0,87	1,47	19,7	—	550
560	71,08	1,355	0,0269	1499	5,43	5,09	94	19,1	563	63,7	0,90	1,52	17,3	—	560
570	82,16	1,392	0,0228	1429	5,68	5,67	91	19,7	548	76,7	0,94	1,59	15,0	—	570
580	94,51	1,433	0,0193	1353	6,00	6,40	88	20,4	528	76,7	0,99	1,68	12,8	—	580
590	108,3	1,482	0,0163	1274	6,41	7,35	84	21,5	513	84,1	1,05	1,84	10,5	—	590
600	123,5	1,541	0,0137	1176	7,00	8,75	81	22,7	497	92,9	1,14	2,15	8,4	—	600
610	137,3	1,612	0,0115	1068	7,85	11,1	77	24,1	467	103	1,30	2,60	6,3	—	610
620	159,1	1,705	0,0094	941	9,35	15,4	72	25,9	444	114	1,52	3,46	4,5	—	620
625	169,1	1,778	0,0085	858	10,6	18,3	70	27,0	430	121	1,65	4,20	3,5	—	625
630	179,7	1,856	0,0075	781	12,6	22,1	67	28,0	412	130	2,0	4,8	2,6	—	630
635	190,9	1,935	0,0066	683	16,4	27,6	64	30,0	392	141	2,7	6,0	1,5	—	635
640	202,7	2,075	0,0057	560	26	42	59	32,0	367	155	4,2	9,6	0,8	—	640
645	215,2	2,351	0,0045	361	90	—	54	37,0	331	178	12	26	0,1	—	645
647,3 ^c	221,2	3,170	0,0032	0	∞	∞	45	45,0	238	238	∞	∞	0,0	—	647,3 ^c

Temperatura crítica.