

TRANSMISSÃO DE CALOR II

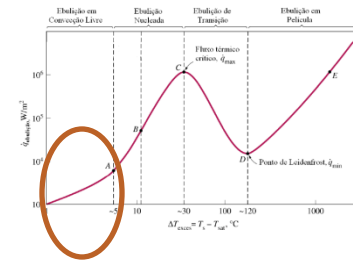
Prof. Eduardo C. M. Loureiro

EBULIÇÃO

CORRELAÇÕES DA EBULIÇÃO EM PISCINA

Os regimes de ebulição diferem consideravelmente e devem ser usadas correlações diferentes de transferência de calor para estes diferentes regimes.

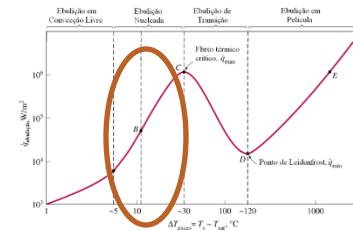
No regime de **ebulição em convecção natural**, o movimento do fluido é regido pelas correntes de convecção natural e as taxas de transferência de calor podem ser determinadas por meio das relações de convecção natural conhecidas (Transmissão de Calor I).



EBULIÇÃO

CORRELAÇÕES DA EBULIÇÃO EM PISCINA

A correlação mais utilizada para a taxa de transferência de calor no regime de **ebulição nucleada** foi proposta por Rohsenow :



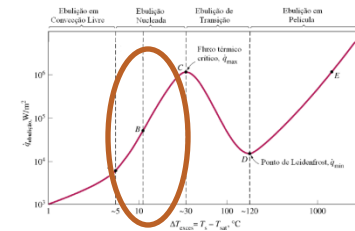
$$q_s'' = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3$$

onde $C_{s,f}$ é uma constante experimental que depende da combinação superfície-líquido;
e n é um expoente que depende do fluido.

A correlação de Rohsenow se aplica somente para superfícies limpas. Quando ela é aplicada para estimar o fluxo térmico, os erros podem chegar a $\pm 100\%$ (Incropera, 2007, pág. 399).

EBULIÇÃO

CORRELAÇÕES DA EBULIÇÃO EM PISCINA



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	0,0060	1,0
Água-platina	0,0130	1,0
N-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



EBULIÇÃO

CORRELAÇÕES DA EBULIÇÃO EM PISCINA

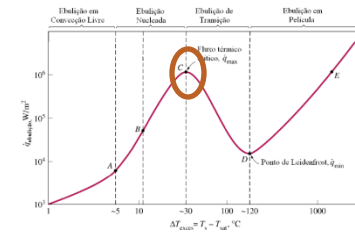
FLUXO TÉRMICO CRÍTICO

Podemos desejar operar um processo de ebulição em um ponto próximo a este ponto, mas devemos reconhecer o perigo de dissipar calor a uma taxa além desse limite. Kutateladze e Zuber obtiveram uma equação para a determinação deste fluxo térmico crítico:

$$q''_{\max} = Ch_{fg}\rho_v \left[\frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4}$$

Geometria	C
Cilindros horizontais e esferas	0,131
Placas horizontais grandes	0,149

A equação é usada quando o comprimento característico da superfície aquecida, L , é grande em relação ao diâmetro das bolhas, D_b .



EBULIÇÃO

CORRELAÇÕES DA EBULIÇÃO EM PISCINA

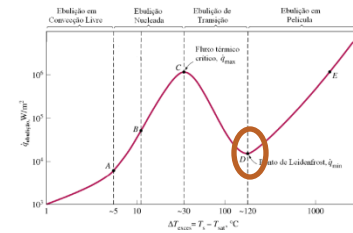
FLUXO TÉRMICO MÍNIMO

O fluxo térmico mínimo, ocorre no ponto de Leidenfrost e corresponde ao limite inferior para o fluxo de calor no regime de ebulição em película.

Zuber desenvolveu a seguinte expressão para uma placa grande horizontal, onde as propriedades são avaliadas na temperatura de saturação:

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

A constante $C = 0,09$, determinada experimentalmente proporciona uma precisão de 50% para a maioria dos fluidos a pressões moderadas.



EBULIÇÃO

CORRELAÇÕES DA EBULIÇÃO EM PISCINA

EBULIÇÃO EM FILME EM PISCINA

Para excessos de temperatura além do ponto de Leidenfrost, um filme contínuo de vapor cobre a superfície sólida e não há contato entra a fase líquida e a superfície aquecida. Como as condições do processo são semelhantes à condensação em filme laminar é comum basear as correlações para ebulição em filme em resultados obtidos da teoria da condensação.

Para ebulição em filme sobre uma esfera ou cilindro de diâmetro D , tem-se:

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

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

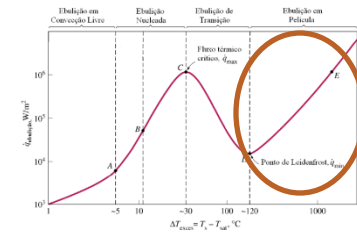
O calor latente corrigido pode ser aproximado por

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0,8c_{p,v}(T_s - T_{sat})$$

As propriedades do vapor são avaliadas para a temperatura de filme

$$T_f = \frac{T_s + T_{sat}}{2}$$

A massa específica do líquido é avaliada na temperatura de saturação.



EBULIÇÃO

CORRELAÇÕES DA EBULIÇÃO EM PISCINA

EBULIÇÃO EM FILME EM PISCINA

Em temperaturas superficiais elevadas ($T_s > 300^\circ\text{C}$) a transferência de calor por radiação através do filme de vapor se torna significativa. Bromley propôs a seguinte equação para o cálculo do coeficiente de transferência de calor total:

$$\bar{h}^{4/3} = \bar{h}_{conv}^{4/3} + \bar{h}_{rad} \bar{h}^{1/3}$$

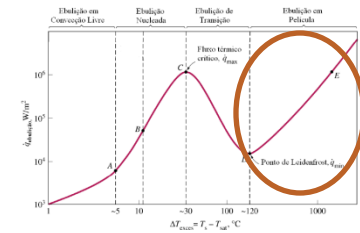
Se $\bar{h}_{rad} < \bar{h}_{conv}$ um forma mais simples pode ser usada:

$$\bar{h} = \bar{h}_{conv} + \frac{3}{4} \bar{h}_{rad}$$

O coeficiente radiante efetivo é determinado por:

$$\bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}}$$

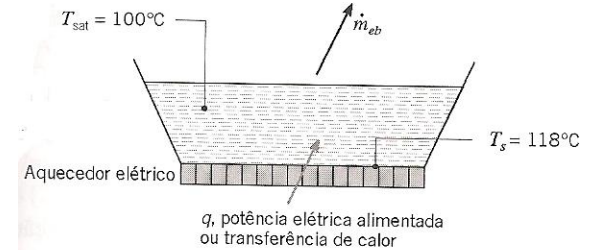
Onde ε é a emissividade do sólido e σ é a constante de Stefan-Boltzman.



EBULIÇÃO

EXEMPLO

O fundo de uma panela de cobre, com 0,3m de diâmetro, é mantido a 118°C por um aquecedor elétrico. Estime a potência necessária para ferver água nessa panela. Qual é a taxa de evaporação? Calcule o fluxo térmico crítico.



CONSIDERAÇÕES:

Regime estacionário

Água à pressão atmosférica

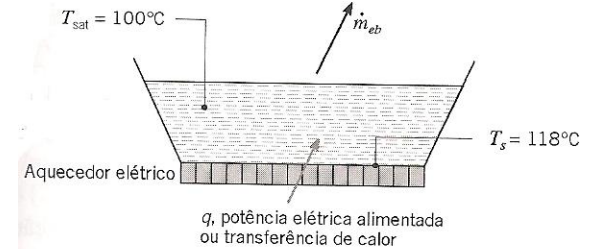
Água a temperatura uniforme = 100°C

Superfície da base da panela grande e de cobre polido

Perda térmica desprezível do aquecedor para a vizinhança



EBULIÇÃO



EXEMPLO

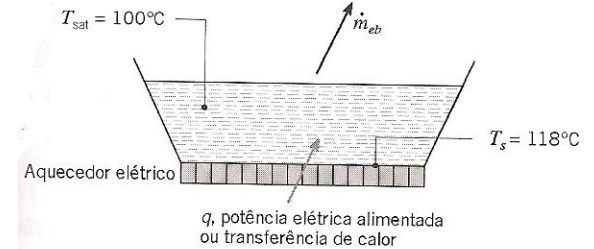
O fundo de uma panela de cobre, com 0,3m de diâmetro, é mantido a 118°C por um aquecedor elétrico. Estime a potência necessária para ferver água nessa panela. Qual é a taxa de evaporação? Calcule o fluxo térmico crítico.

Para água à pressão atmosférica, a temperatura de saturação é de 100°C.

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_{fg} (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg · K))		Viscosidade, (N · s/m ²)		Condutividade Térmica (W/(m · K))		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma \cdot 10^6$ (N/m)	Coeficiente de Expansão, $\beta_s \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperatura, T (K)
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_f	Pr_g			
273.15	0,00611	1,000	206,3	2502	4,217	1,854	1750	8,02	569	18,2	12,99	0,815	75,5	-68,05	273,15
275	0,00697	1,000	181,7	2497	4,211	1,855	1652	8,09	574	18,3	12,22	0,817	75,3	-32,74	275
280	0,00990	1,000	130,4	2485	4,198	1,858	1422	8,29	582	18,6	10,26	0,825	74,8	46,04	280
285	0,01387	1,000	99,4	2473	4,189	1,861	1225	8,49	590	18,9	8,81	0,833	74,3	114,1	285
290	0,01917	1,001	69,7	2461	4,184	1,864	1080	8,69	598	19,3	7,56	0,841	73,7	174,0	290
295	0,02617	1,002	51,94	2449	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	2438	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	2426	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	2414	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	2402	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	2390	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	2378	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	2366	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	2354	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	2342	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	2329	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	2317	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	2304	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	2291	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	2278	4,209	1,999	306	11,69	677	24,1	1,91	0,969	60,5	707,1	365
370	0,9048	1,041	1,861	2265	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	2257	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	2252	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	2239	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	2225	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	2212	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	2183	4,256	2,158	217	13,05	688	27,2	1,34	1,033	53,6	896	400

EBULIÇÃO



EXEMPLO

O fundo de uma panela de cobre, com 0,3m de diâmetro, é mantido a 118°C por um aquecedor elétrico. Estime a potência necessária para ferver água nessa panela. Qual é a taxa de evaporação? Calcule o fluxo térmico crítico.

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_{fg} (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg · K))		Viscosidade, (N · s/m ²)		Condutividade Térmica (W/(m · K))		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma \cdot 10^6$ (N/m)	Coeficiente de Expansão, $\beta_s \cdot 10^6$ (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			
273.15	0,00611	1,000	206,3	2502	4,217	1,854	1750	8,02	569	18,2	12,99	0,815	75,5	-68,05	273,15
275	0,00697	1,000	181,7	2497	4,211	1,855	1652	8,09	574	18,3	12,22	0,817	75,3	-32,74	275
280	0,00990	1,000	130,4	2485	4,198	1,858	1422	8,29	582	18,6	10,26	0,825	74,8	46,04	280
285	0,01387	1,000	99,4	2473	4,189	1,861	1225	8,49	590	18,9	8,81	0,833	74,3	114,1	285
290	0,01917	1,001	69,7	2461	4,184	1,864	1080	8,69	598	19,3	7,56	0,841	73,7	174,0	290
295	0,02617	1,002	51,94	2449	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	2438	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	2426	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	2414	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	2402	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	2390	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	2378	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	2366	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	2354	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	2342	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	2329	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	2317	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	2304	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	2291	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	2278	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	2265	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	2257	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	2252	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	2239	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	2225	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	2212	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	2183	4,256	2,158	217	13,05	688	27,2	1,34	1,033	53,6	896	400

$$\rho_l = \frac{1}{v_e} = \frac{1}{1,044 \times 10^{-3}} = 957,9 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_g = \frac{1}{v_g} = \frac{1}{1,679} = 0,5956 \text{ kg/m}^3$$

$$h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}$$

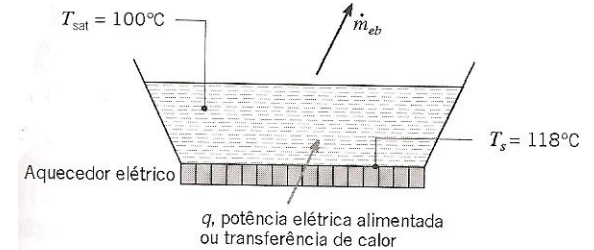
$$c_{p,l} = 4,217 \text{ kJ/kgK}$$

$$\mu_l = 279 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$$

$$Pr_l = 1,76$$

$$\sigma = 58,9 \times 10^{-3} \text{ N/m}$$

EBULIÇÃO

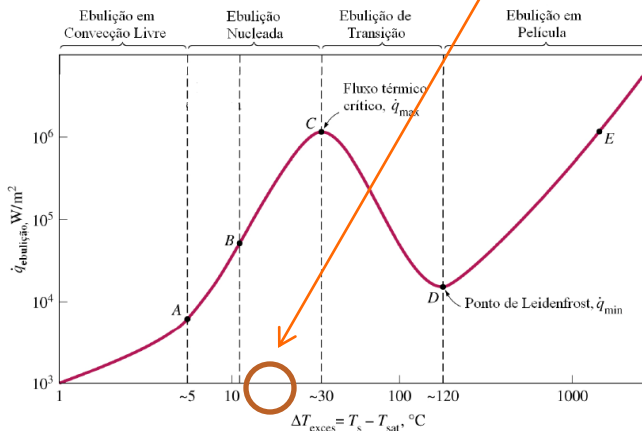


EXEMPLO

O fundo de uma panela de cobre, com 0,3m de diâmetro, é mantido a 118°C por um aquecedor elétrico. Estime a potência necessária para ferver água nessa panela. Qual é a taxa de evaporação? Calcule o fluxo térmico crítico.

Excesso de temperatura: $\Delta T_e = T_s - T_{sat} = 118 - 100 = 18^\circ C$

De acordo com a curva de ebulição ocorre ebulição nucleada e a correlação indicada é a de Rohsenow:



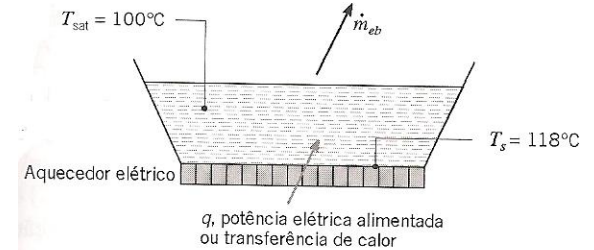
$$q_s'' = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3$$



EBULIÇÃO

EXEMPLO

O fundo de uma panela de cobre, com 0,3m de diâmetro, é mantido a 118°C por um aquecedor elétrico. Estime a potência necessária para ferver água nessa panela. Qual é a taxa de evaporação? Calcule o fluxo térmico crítico.



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	0,0060	1,0
Água-platina	0,0130	1,0
N-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

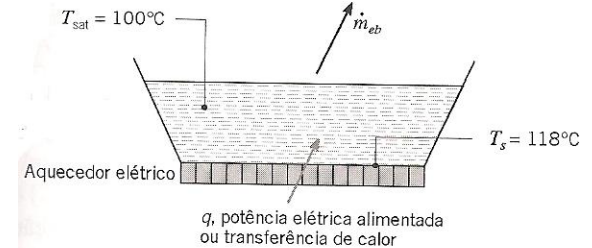
$$q_s'' = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} \text{Pr}_l^n} \right)^3$$

Os valores de $C_{s,f}$ e de n são obtidos da tabela de dados experimentais.

EBULIÇÃO

EXEMPLO

O fundo de uma panela de cobre, com 0,3m de diâmetro, é mantido a 118°C por um aquecedor elétrico. Estime a potência necessária para ferver água nessa panela. Qual é a taxa de evaporação? Calcule o fluxo térmico crítico.



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

Substituindo os valores:

$$q_s'' = 279 \times 10^{-6} \times 2257 \times 10^3 \left[\frac{9,8(957,9 - 0,5956)}{58,9 \times 10^{-3}} \right]^{1/2} \times \left[\frac{4,217 \times 10^3 \times 18}{0,0128 \times 2257 \times 10^3 \times 1,76} \right]^3 = 836 \frac{kW}{m^2}$$

A taxa de transferência de calor na ebulição é:

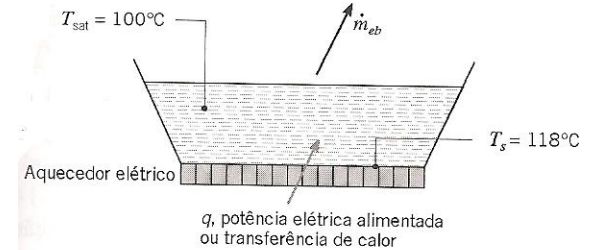
$$q_s = q_s'' \times A = q_s'' \times \frac{\pi D^2}{4} = 8,36 \times 10^5 \times \frac{\pi (0,3)^2}{4} = 59,1 kW$$

Que é a potência necessária para ferver a água nas condições do problema.

EBULIÇÃO

EXEMPLO

O fundo de uma panela de cobre, com 0,3m de diâmetro, é mantido a 118°C por um aquecedor elétrico. Estime a potência necessária para ferver água nessa panela. Qual é a taxa de evaporação? Calcule o fluxo térmico crítico.



Em regime permanente, toda adição de calor na panela irá resultar na evaporação da água.

$$q_s = \dot{m}_{eb} h_{fg}$$



Taxa na qual a água evapora da superfície livre. Então:

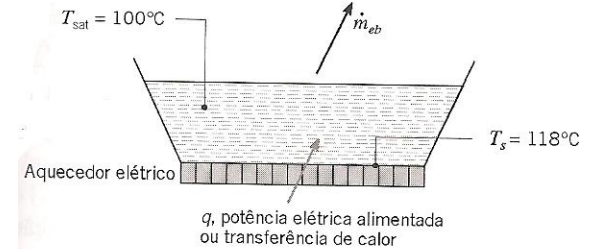
$$\dot{m}_{eb} = \frac{q_s}{h_{fg}} = \frac{5,91 \times 10^4 \text{ W}}{2257 \times 10^3 \text{ J/kg}} = 0,0262 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$



EBULIÇÃO

EXEMPLO

O fundo de uma panela de cobre, com 0,3m de diâmetro, é mantido a 118°C por um aquecedor elétrico. Estime a potência necessária para ferver água nessa panela. Qual é a taxa de evaporação? Calcule o fluxo térmico crítico.



A equação para o fluxo térmico crítico é:

$$q''_{\max} = Ch_{fg} \rho_v \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4}$$

$$q''_{\max} = 0,149 \times 2257 \times 10^3 \times 0,5956 \times \left[\frac{58,9 \times 10^{-3} \times 9,8 \times (957,9 - 0,5956)}{0,5956^2} \right]^{1/4} = 1,26 \frac{MW}{m^2}$$

Note que o fluxo térmico crítico representa o fluxo térmico máximo para a ebulição de água à pressão atmosférica normal. Portanto a operação do aquecedor está abaixo da condição crítica.