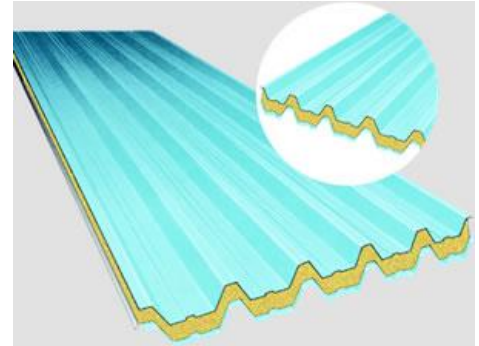


Exercícios de provas antigas.

1ª Questão (3,5 pontos) Um telhado plano metálico pode ser modelado inicialmente como uma placa plana, isolada na parte inferior e exposta à luz solar. Se o fluxo de calor irradiado pelo sol for 600 W/m^2 ($\alpha=1$), o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o telhado e o ar for de $12 \text{ W/m}^2\text{K}$ e a temperatura do ar for 27°C , determine a temperatura do telhado para os dois casos a seguir:



- (a) A perda de calor por radiação para o espaço é desprezível,
- (b) o telhado é negro ($\epsilon=1$) e emite radiação térmica para o espaço, que é considerado um corpo negro a 280 K .

2ª Questão (3,5 pontos) Estime o tempo necessário para a solidificação completa de uma peça cilíndrica de Alumínio fundida em uma coquilha de Aço refrigerada com água a 25°C e com uma vazão de 1 litro por segundo e temperatura de saída de 80°C . O cilindro tem dimensões 200 mm de diâmetro por 300 mm de altura. Toda a superfície da coquilha está a 25°C . A temperatura do ar encontra-se a 30°C e o coeficiente de convecção pode ser assumido como sendo $20 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. A troca térmica por radiação da coquilha com o ambiente pode ser desprezada. A temperatura de saída da água da coquilha é 80°C .

Dados: $\rho_{\text{água}}= 999 \text{ kg/m}^3$; $C_p \text{ água}= 4,18\text{kJ}/(\text{kgK})$;

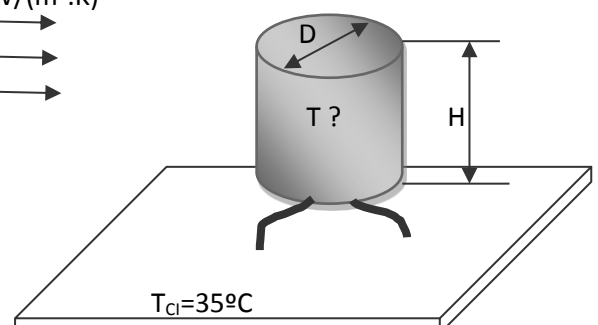
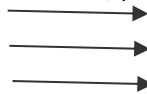
$\rho_{\text{Al}}= 933 \text{ kg/m}^3$; $C_p \text{ Al}= 606 \text{ kJ}/(\text{kgK})$; $h_{sl \text{ Al}}= 291 \text{ kJ/kg}$.

3ª Questão (3,0 pontos) Um capacitor eletrolítico com dimensões $H=25 \text{ mm}$ por $D=15 \text{ mm}$ esta montada em uma placa de CI mantida a 35°C .

Ar a temperatura de 25°C escoa sobre a superfície deste componente, exceto a sua base. O capacitor possui dois terminais elétricos ($k_{\text{cond}}=40\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) de seção circular com diâmetro de 1 mm e comprimento de 10 mm que conduzem calor por condução entre o componente e a placa de CI. Assuma o coeficiente de convecção como sendo 30

$T_{\text{ar}}=25^\circ\text{C}$

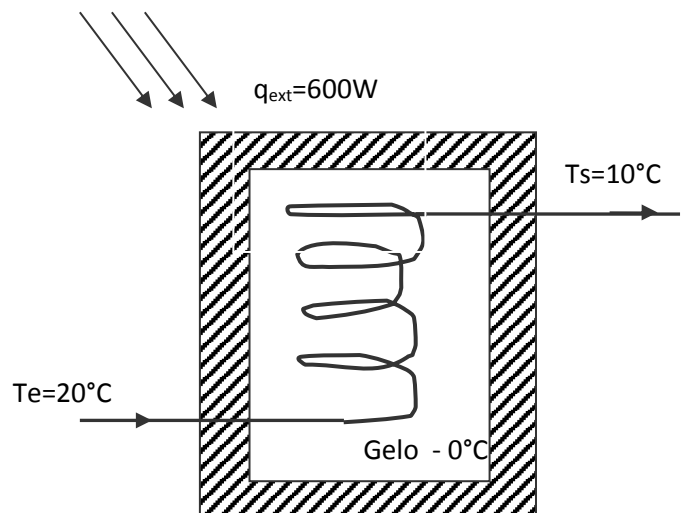
$h=30 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$



$W/(m^2.K)$, considere o capacitor isotérmico, despreze a troca térmica por radiação. Este capacitor dissipa uma potência elétrica de 300mW. Calcule a temperatura de trabalho deste capacitor. Despreze a troca térmica por convecção dos terminais elétricos com o ar. Despreze também a troca térmica pela base do capacitor.

4ª Questão (3,0 pontos) Um satélite de comunicação esférico, com 2 m de diâmetro, é colocado em órbita da Terra. Ele gera 1000 W de potência interna a partir de um pequeno gerador nuclear. Se a superfície do satélite apresentar uma emissividade de 0,3 e estiver protegida da radiação solar pela sombra da Terra, calcule sua temperatura superficial. Se caso o satélite receber um fluxo solar de $1300 W/m^2$ proveniente do Sol, qual seria sua nova temperatura. Considere o espaço a 0 K (zero Kelvin).

5ª Questão (3,5 pontos) Um sistema central de refrigeração utiliza um sistema de gelo para aumentar a eficiência do sistema e reduzir o custo do equipamento instalado. O sistema é composto por um reservatório de gelo gerado durante a noite, período que o sistema de climatização do centro comercial é menos solicitado. No horário de pico energético, o sistema de refrigeração faz passar o fluido de trabalho no interior deste sistema de gelo para trocar calor com o mesmo, visto que o sistema instalado no centro comercial não seria suficiente para atender a demanda neste horário. Numa análise inicial considere o sistema de gelo é constituído de um reservatório isolado com um material de condutividade térmica muito eficiente que minimiza a troca térmica com o ambiente. Estima-se uma carga térmica externa de 600 W. Supondo que o fluido de trabalho entra neste reservatório de gelo a $20^\circ C$ e sai a $10^\circ C$ com uma vazão de $0,03 m^3/s$, determine o volume deste reservatório para garantir gelo durante um período de 4 horas.



Propriedades:

Água: $v_f = 1,0 \times 10^{-3} m^3/kg$

$c_p = 4200 J/(kg.K)$

gelo: $\rho = 920 kg/m^3$

$c_p = 2040 J/(kg.K)$

$h_{s1} = 2.502 kJ/kg$

6ª Questão (3,5 pontos) Um aquecedor solar simples consiste de uma placa plana de vidro colocada em um reservatório raso preenchida com água, de forma que a água que a água esteja em contato com a placa de vidro sobre ela. A radiação solar passa através do vidro a uma taxa de $800 W/m^2$. A água está a uma temperatura de $50^\circ C$ e o ar ao seu redor a $20^\circ C$. Se os coeficientes de transferência de calor por convecção entre a água e o vidro e entre o vidro e o ar forem respectivamente $5W/(m^2 K)$ e $2 W/(m^2 K)$, determine o tempo necessário para transferir $500J$ por m^2 de superfície para a água do reservatório. A superfície inferior do reservatório pode ser considerada isolada perfeitamente.

7ª Questão (3,0 pontos) Em uma instalação industrial um tubo de cobre, com 2,5 cm de diâmetro externo e 2 cm de diâmetro interno, transporta oxigênio líquido à -183°C com uma vazão de $0,04\text{ m}^3/\text{min}$. O ar ambiente está a 21°C e apresenta um ponto de orvalho de 10°C . Qual é a espessura do isolamento, com uma condutividade térmica de $0,02\text{ W/mK}$, necessária para evitar a condensação na sua parte externa, se $h_{\text{conv}}+h_{\text{rad}}=17\text{ W/m}^2\text{K}$ no exterior.

OBS: Deduza a formulação a partir da equação da energia em coordenadas cilíndricas. A apresentação da obtenção das equações é obrigatório.

8ª Questão (3,5 pontos) Em um evaporador do tipo roll-bond a formação de gelo prejudica a transferência de calor com o ambiente interno do refrigerador. Considere que o fluido refrigerante mantém a superfície do evaporador a -18°C e o ar no interior do gabinete é mantido em um lado do evaporador a 7°C e no outro a -12°C . A área superficial de um lado do evaporador é $0,8\text{ m}^2$ e o coeficiente de convecção médio é de $20\text{ W/(m}^2\text{K)}$.

- Se o descongelamento não for realizado periodicamente lentamente o gelo se acumulará na superfície do evaporador. Verifique o efeito de formação de gelo na capacidade de resfriamento do evaporador para as espessuras de 0, 3, 5 e 10 mm, considerando a condutividade térmica do gelo como sendo $0,4\text{ W/mK}$.
- O refrigerador é desligado após o mau funcionamento do processo de descongelamento e uma camada de 10 mm de espessura de gelo ter se formada de ambos os lados do evaporador. Se o evaporador estiver no ar ambiente, $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ e a convecção natural for $20\text{ W/m}^2\text{K}$, quanto tempo o gelo levará para fundir? A densidade do gelo pode ser considerada 700 kg/m^3 e o calor latente de fusão 334 kJ/kg .
- O efeito da formação de gelo na superfície do evaporador altera de que maneira o funcionamento do compressor do refrigerador? O que ocorrerá com o consumo de energia?

9ª Questão (3,5 pontos) Um teste comum realizado pelos fabricantes de aparelhos de refrigeração é o chamado "pull-down" que consiste em por a "carcaça" do produto a operar numa condição inversa a situação comum. Isto é, aquece-se o produto internamente através de uma resistência elétrica e se mantém o produto resfriado em uma câmara fria. O ensaio é realizado aquecendo-se o interior a 43°C com uma resistência elétrica e a temperatura externa é mantida a 5°C . Nesta condição foi medido para este produto uma potência de 30 W . Em um ensaio de consumo de energia no qual se mantém a temperatura interna média em 7° e a temperatura externa de 32°C foi obtido que este produto consome 200kJ por dia. Sabendo-se que o coeficiente de desempenho real (COP) é a relação à capacidade de refrigeração e o trabalho

elétrico despendido no processo (assumindo que não há perdas mecânicas no compressor) calcule este COP.

10) (5,0 pontos) Um elemento esférico de diâmetro 10 mm que está inicialmente a temperatura de 25°C. Esta esfera é submersa em um banho líquido que é mantido sempre a uma temperatura de 10% superior a temperatura (em °C) da esfera. Sendo $h=20\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ obtenha:

- A partir do balanço de energia a formulação geral para a evolução da temperatura com o tempo.
- Se a hipótese de capacitância global é válida para este problema.
- A temperatura da esfera após 10 min.
- A quantidade de calor absorvida pela esfera em 10 min.
- Esboce o gráfico da evolução da temperatura de esfera e do fluido com o tempo.

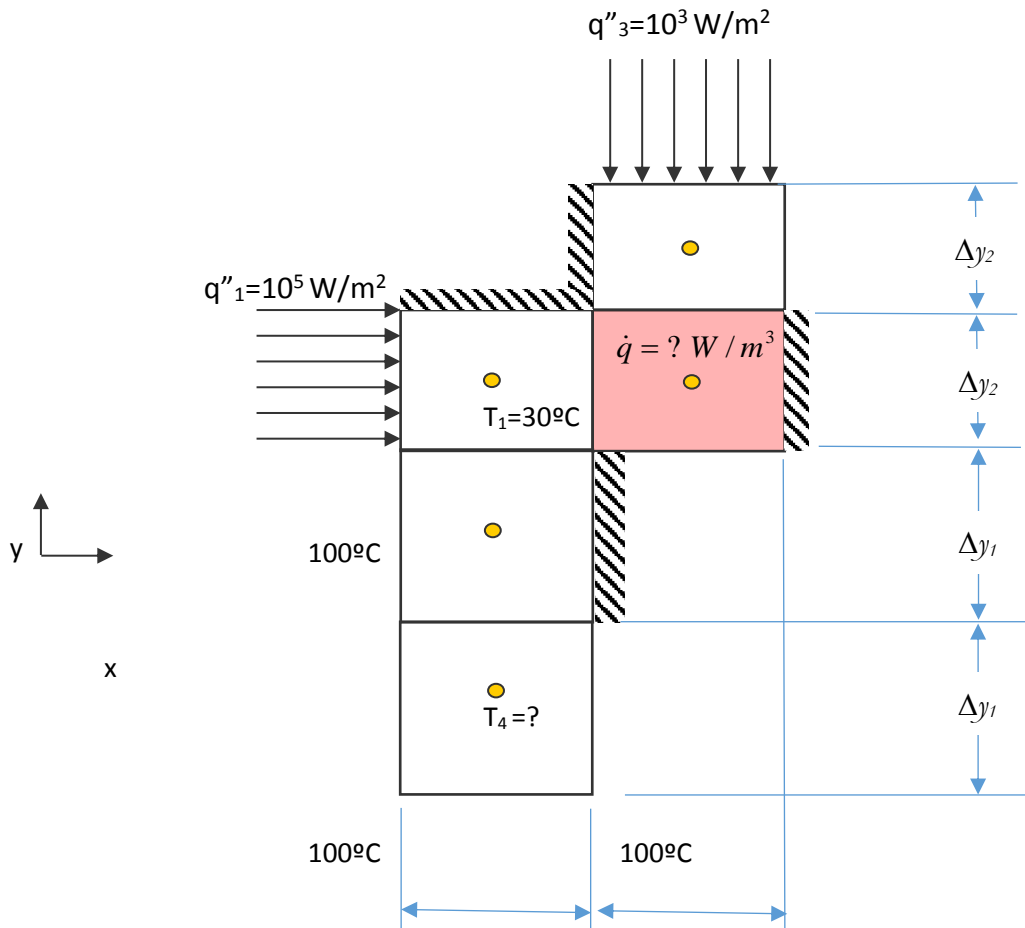
Propriedades da esfera: $\rho=7.895\text{ kg}/\text{m}^3$, $c_p= 0,4\text{kJ}/(\text{kgK})$ e $k= 61\text{ W}/(\text{mK})$

11) (5,0 pontos) Uma chapa de concreto de espessura 5 mm e de 1 m x 1 m em suas outras dimensões que está em processo de cura possui uma geração inicial de $\dot{q} = 10^4\text{W}/\text{m}^3$. Esta chapa é ventilada em seus dois lados por uma corrente de ar com $h=10\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. A chapa possui em toda a sua superfície um revestimento que proporciona uma resistência térmica igual a $R''=0,02\text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. A placa de concreto está inicialmente a 50°C e o ar é mantido a 20°C. Obtenha:

- Se esta taxa de geração se mantiver constante esta placa irá aquecer ou esfriar?
- A partir do balanço de energia a formulação geral para a evolução da temperatura com o tempo. Considerando que a taxa de geração de calor se mantém constante.
- Obtenha a temperatura da placa após 10 min. Considerando que a taxa de geração de calor se mantém constante.
- A quantidade de calor trocada pela placa em 10 min. Considerando que a taxa de geração de calor se mantém constante.
- A hipótese de capacitância global é válida para este problema.

Propriedades do concreto: $\rho=2.000\text{ kg}/\text{m}^3$, $c_p= 1,2\text{kJ}/(\text{kgK})$ e $k= 2\text{ W}/(\text{mK})$

12) Para o problema ilustrado na figura, calcule por volumes finitos as temperaturas e a geração de calor no volume 2, apresentando as deduções. Desenhe 6 isothermas 6 linhas de fluxo de calor (2 por volume). Calcule o fluxo de calor horizontal entre o volume 1 e 2 e o fluxo de calor vertical entre o volume 4 e 5 indicando o sentido. Dados: $\Delta x=\Delta y_1 =2.\Delta y_2=\Delta z=1\text{m}$, $k= 100\text{ W}/(\text{mK})$



13) (4,0 pontos) Um elemento radioativo em formato esférico de diâmetro 100 mm que está inicialmente a uma temperatura de 600°C e ainda apresenta uma geração volumétrica de 10^5 W/m^3 . A esfera é submersa em um banho líquido a $T_\infty = 100^\circ\text{C}$ e $h_1 = 40 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ durante 1 min e na sequência em outro banho a $T_\infty = 50^\circ\text{C}$ e $h_2 = 10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ durante 3 min. Calcule a temperatura desta esfera ao final deste período (4 min). Obtenha as equações a partir do balanço de energia. A hipótese de capacitância global é válida nestes casos? Esboce um gráfico da variação da temperatura com o tempo da esfera.

Propriedades da esfera: $\rho = 7.895 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 0,4 \text{ kJ/(kgK)}$ e $k = 61 \text{ W/(mK)}$

Uma esfera de aço inoxidável de diâmetro de 100 mm que está inicialmente a uma temperatura de 150°C. Ela apresenta uma geração volumétrica de 10^4 W/m^3 . Esta esfera é submersa em um banho de óleo a $T_\infty = 100^\circ\text{C}$. Considerando $h_{\text{óleo}} = 30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ obtenha e responda:

- As equações a partir do balanço de energia para o modelamento transiente.
- Em função da geração de energia a esfera irá se aquecer ou esfriar?
- Quanto tempo levará para a temperatura da esfera variar 10°C?
- A hipótese de capacitância global é válida nestes casos?

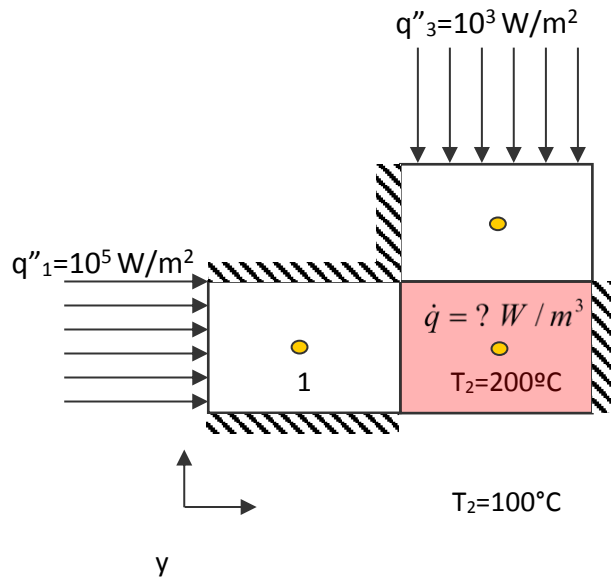
Propriedades da esfera: $\rho = 7.895 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 0,4 \text{ kJ/(kgK)}$ e $k = 61 \text{ W/(mK)}$

Volume da esfera: $V = (4/3) \pi R^3$, onde R é o raio da esfera.

Área da esfera: $A = 4 \pi R^2$.

14) (6,0 pontos)

Para o problema ilustrado na figura, calcule por volumes finitos as temperaturas T_1 e T_3 e a geração de calor no volume 2, apresentando as deduções. Desenhe 6 isothermas e 6 linhas de fluxo de calor (2 por volume). Calcule o fluxo de calor horizontal entre o volume 1 e 2 e o fluxo de calor vertical entre o volume 3 e 2 indicando o sentido. Dados: $\Delta x = 2, \Delta y = \Delta z = 1\text{m}$, $k = 100\text{ W/mK}$.



15) (5,0 pontos) O diretor da empresa em que você trabalha pede que você faça um estudo de um processo contínuo de tratamento térmico de esferas de aço [$\rho = 7900\text{ kg/m}^3$, $c_p = 640\text{ J/(kg.K)}$, $k = 30\text{ W/(m.K)}$] para rolamentos. O diâmetro é de 6 mm e é aquecida fazendo passar através de um forno no qual as paredes são mantidas a uma temperatura de T_∞ correspondente à temperatura dos gases de combustão que escoam através do forno.

- Para um coeficiente de convecção uniforme de $h = 100\text{ W/(m}^2.\text{K)}$ e $T_\infty = 1500^\circ\text{C}$ e um fluxo líquido de radiação proveniente das paredes de $q_{\text{rad}}'' = 2000\text{ W/m}^2$, determine o comprimento do forno necessário para aquecer as esferas de 20°C até 600°C se a velocidade da esteira que leva as esferas é de $0,5\text{ m/s}$.
- Quando de energia é necessário para aquecer uma esfera?
- Após o aquecimento as esferas são mergulhadas em água a uma temperatura de 50°C e $h = 200\text{ W/m}^2.\text{K}$. Se o comprimento do tanque de água é de 16 m , qual é a temperatura final da esfera (considere a velocidade da esteira de $0,5\text{ m/s}$).
- Se em um instante de tempo se encontram 1000 esferas dentro do tanque, quanto de energia deve ser removido do tanque para manter a água em 50°C .

16 (5,0 pontos) Um fio de 10 mm de diâmetro e de 1 m de comprimento dissipa calor a uma taxa de 10^4 W/m^3 em função da passagem de uma corrente elétrica. Este cilindro está inserido em um meio que, em uma consideração extrema, pode ser considerada como um isolante perfeito. Através de refrigeração, suas extremidades são mantidas a 20°C e 40°C , cada face. A condutividade térmica é $k = 40\text{ W/mK}$. Calcule, demonstrando todos os passos:

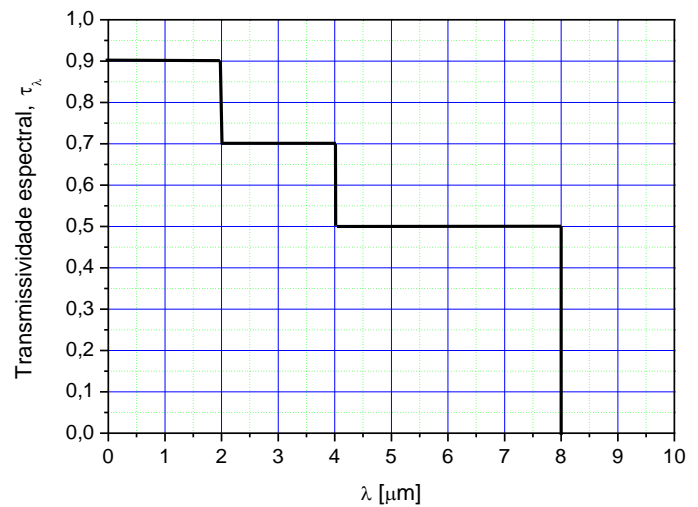
- Utilizando volumes finitos as temperaturas em 3 elementos.
- Os fluxos de calor nas extremidades e centro da barra.
- Esquematize as isothermas e linhas de fluxo de calor.

17° Questão: (3,5 pontos) A emissividade de uma superfície revestida de óxido de alumínio pode ser aproximada como 0,15 para a radiação em comprimento de onda menores que $5\text{ }\mu\text{m}$ e 0,9 para a radiação em comprimento de onda superiores a $5\text{ }\mu\text{m}$. Determinar a emissividade média desta superfície para 5800K e 300K

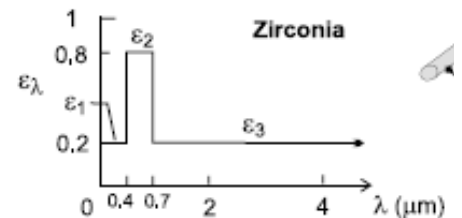
18° Questão: (3,0 pontos) Qual é a temperatura de um corpo negro em que 95% da energia emitida estejam compreendidos no espectro de comprimento de onda $\lambda = 0$ até $5 \mu\text{m}$?

19° Questão: (3,5 pontos) Para um filamento de uma lâmpada incandescente de diâmetro 1 mm e 5 mm de comprimento, calcule:

- A fração de energia emitida pelo filamento no visível ($0,4$ a $0,7 \mu\text{m}$) se a lâmpada está a 2700°C .
- A potência emitida pela lâmpada (após o bulbo) se a transmissividade do bulbo for dado pela figura ao lado.
- O que acontece com a diferença de energia emitida entre o filamento e após o bulbo?



20° Questão (questão de final, com conteúdo misturados): Um coletor solar fotovoltaico transforma o fluxo solar incidente diretamente em energia elétrica em função de propriedades eletrofísicas do cristal silício. Entretanto estes painéis reduzem sua eficiência com o aumento de sua temperatura e promover a ventilação para a remoção do calor contribui para o aumento da eficiência. Desta forma o coletor é instalado em uma cobertura no qual a remoção de calor por convecção e radiação em sua superfície externa, além de possuir um fluxo de em sua superfície inferior com uma vazão de $0,1 \text{ kg/s}$. Considerando o coeficiente de convecção externo $h_e = 20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e o interno como sendo $h_i = 30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, e que a incidência solar é de $500 \text{ W}/\text{m}^2$ calcule:



- O fluxo de energia absorvido do fluxo solar.
- Considerando $T_\infty = T_{\text{viz}} = 20^\circ\text{C}$ calcule a temperatura de equilíbrio da placa fotovoltaica, tendo ar escoando a $0,1 \text{ kg/s}$ pela sua parte inferior.
- Considerando que ar entra também a 20°C , com uma vazão de $0,1 \text{ kg/s}$ calcule a temperatura de saída do ar.
- Se não houver mais remoção de calor pela parte inferior e somente ocorrer remoção por convecção e radiação em sua parte superior, calcule a temperatura de equilíbrio desta placa.

Formulário: Formulário:

$$q_{\text{rad}} = \epsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad q_{\text{cond}} = kA \frac{(T_a - T_b)}{L}, \quad q_{\text{conv}} = hA(T_s - T_\infty) \quad q_{\text{latente}} = \dot{m}h$$

$$q_{\text{sensível}} = mc_p \frac{dT}{dt} \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4) \quad q'' = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{Expansão de Taylor} \quad f_{x+dx} = f_x + \frac{df}{dx} dx$$

Balço de Energia: $\dot{E}_e - \dot{E}_s + \dot{E}_g = \dot{E}_{ac} = \rho V c \frac{dT}{dt}$ **Coef. global em paralelo:** $\frac{1}{h_{total}} = \frac{1}{h_r} + \frac{1}{h_{com}}$;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \qquad q'' = -k \frac{\partial T}{\partial n}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + g''' = \rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Expansão de Fourier : $q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx$

$$\beta i = \frac{h L_c}{k} \begin{cases} \text{parede plana } L_c = \frac{L}{2} \\ \text{cilindro } L_c = \frac{R}{2} \\ \text{esfera } L_c = \frac{R}{3} \end{cases}$$

Balço de Energia: $\dot{E}_e - \dot{E}_s + \dot{E}_g = \dot{E}_{ac} = \rho V c \frac{dT}{dt}$

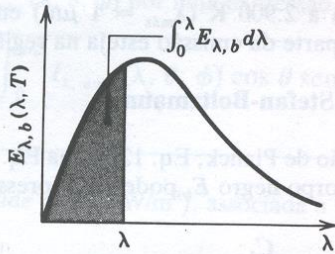


Fig. 12.14 Emissão de radiação por um corpo negro na banda espectral entre 0 e λ .

Outras funções do corpo negro estão presentes na terceira e na quarta colunas da Tabela 12.1. A terceira coluna facilita o cálculo da intensidade espectral num certo comprimento de onda e numa certa temperatura. Em lugar de se calcular essa grandeza pela Eq. 12.25, pode-se achá-la pela simples multiplicação do valor tabelado $I_{\lambda,b}/\sigma T^5$ por σT^5 . A quarta coluna se usa para se ter uma estimativa rápida da razão entre a intensidade espectral em qualquer comprimento de onda e a intensidade espectral no $\lambda_{\text{máx}}$.

Tabela 12.1 Funções da radiação do corpo negro^a

λT ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)	$F_{(0 \rightarrow \lambda)}$	$I_{\lambda,b}(\lambda, T)/\sigma T^5$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{sr}$) ⁻¹	$\frac{I_{\lambda,b}(\lambda, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda_{\text{máx}}, T)}$
200	0,000000	$0,375034 \times 10^{-27}$	0,000000
400	0,000000	$0,490335 \times 10^{-13}$	0,000000
600	0,000000	$0,104046 \times 10^{-8}$	0,000014
800	0,000016	$0,991126 \times 10^{-7}$	0,001372
1.000	0,000321	$0,118505 \times 10^{-5}$	0,016406
1.200	0,002134	$0,523927 \times 10^{-5}$	0,072534
1.400	0,007790	$0,134411 \times 10^{-4}$	0,186082
1.600	0,019718	0,249130	0,344904
1.800	0,039341	0,375568	0,519949
2.000	0,066728	0,493432	0,683123
2.200	0,100888	$0,589649 \times 10^{-4}$	0,816329
2.400	0,140256	0,658866	0,912155
2.600	0,183120	0,701292	0,970891
2.800	0,227897	0,720239	0,997123
2.898	0,250108	$0,722318 \times 10^{-4}$	1,000000
3.000	0,273232	$0,720254 \times 10^{-4}$	0,997143
3.200	0,318102	0,705974	0,977373
3.400	0,361735	0,681544	0,943551
3.600	0,403607	0,650396	0,900429
3.800	0,443382	0,615225	0,851737
4.000	0,480877	0,578064	0,800291
4.200	0,516014	$0,540394 \times 10^{-4}$	0,748139
4.400	0,548796	0,503253	0,696720
4.600	0,579280	0,467343	0,647004
4.800	0,607559	0,433109	0,599610
5.000	0,633747	0,400813	0,554898
5.200	0,658970	$0,370580 \times 10^{-4}$	0,513043
5.400	0,680360	0,342445	0,474092
5.600	0,701046	0,316376	0,438002
5.800	0,720158	0,292301	0,404671
6.000	0,737818	0,270121	0,373965
6.200	0,754140	$0,249723 \times 10^{-4}$	0,345724
6.400	0,769234	0,230985	0,319783
6.600	0,783199	0,213786	0,295973
6.800	0,796129	0,198008	0,274128
7.000	0,808109	0,183534	0,254090
7.200	0,819217	$0,170256 \times 10^{-4}$	0,235708
7.400	0,829527	0,158073	0,218842
7.600	0,839102	0,146891	0,203360
7.800	0,848005	0,136621	0,189143
8.000	0,856288	0,127185	0,176079
8.500	0,874608	$0,106772 \times 10^{-4}$	0,147819
9.000	0,890029	$0,901463 \times 10^{-5}$	0,124801
9.500	0,903085	0,765338	0,105956

Tabela 12.1 Funções da radiação do corpo negro^a

λT ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)	$F_{(0 \rightarrow \lambda)}$	$I_{\lambda,b}(\lambda, T)/\sigma T^5$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{sr}$) ⁻¹
10.000	0,914199	0,653279
10.500	0,923710	0,560522
11.000	0,931890	$0,483321 \times 10^{-5}$
11.500	0,939959	0,418725
12.000	0,945098	0,364394
13.000	0,955139	0,279457
14.000	0,962898	0,217641
15.000	0,969981	$0,171866 \times 10^{-5}$
16.000	0,973814	0,137429
18.000	0,980860	$0,908240 \times 10^{-6}$
20.000	0,985602	0,623310
25.000	0,992215	0,276474
30.000	0,995340	$0,140469 \times 10^{-6}$
40.000	0,997967	$0,473891 \times 10^{-7}$
50.000	0,998953	0,201605
75.000	0,999713	$0,418597 \times 10^{-8}$
100.000	0,999905	0,135752

^aAs constantes de radiação usadas para gerar estas funções do corpo negro são:
 $C_1 = 3,7420 \times 10^8 \text{ W} \mu\text{m}^4/\text{m}^2$
 $C_2 = 1,4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$
 $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

Coef. global de transferência de calor:

$$\frac{1}{h_{\text{total}}} = R'' + \frac{1}{h_{\text{conv}}};$$

$$E_{\lambda} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda$$

$$E_{\lambda} = \pi I_{\lambda,e}$$

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{dq}{dA_1 \cos \theta d\omega d\lambda}$$

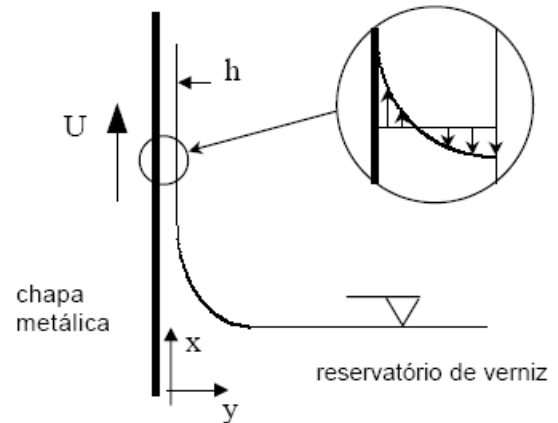
$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi$$

$$\varepsilon, \alpha, \tau = \frac{(\varepsilon, \alpha, \tau)_1 \int_0^{\lambda_1} E_{\lambda,b} d\lambda}{E_b} + \frac{(\varepsilon, \alpha, \tau)_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda,b} d\lambda}{E_b}$$

Questões para a 2ª prova de referentes aos caps. 6 e 7.

1) Considere como alternativa de proteção superficial o processo de revestimento contínuo por uma camada de verniz. O verniz se encontra em um reservatório, e a chapa é continuamente colocada em contato com o mesmo, conforme indicado esquematicamente na figura.

a) **(2,0 pontos)** Determine a velocidade U de forma a garantir uma espessura de verniz $h = 0,5$ mm. Despreze a tensão de cisalhamento na superfície livre do filme. Observe também que, distante da superfície livre do reservatório, parte do filme de verniz é arrastado pela chapa em movimento e parte cai pela ação da gravidade, resultando em uma vazão local nula e em uma espessura de filme constante, conforme mostrado no detalhe da figura.



b) **(2,0 pontos)** Se a chapa metálica estiver a uma temperatura de 50 °C e o ar a uma temperatura de 20 °C, considerando um coeficiente de convecção médio de 20 (W/m^2K), determine o perfil de temperatura.. Qual será a temperatura superficial (em contato com o ar) do verniz?

c) **(2,0 pontos)** Determine qual é o fluxo mássico de verniz evaporado para o mesmo coeficiente de convecção.

Dados / Informações Adicionais

Conservação da quantidade do movimento para a direção x em regime permanente:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \rho g$$

ρ e μ constantes

Tensão de cisalhamento: $\tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$

Propriedades do verniz:

$k = 0,14$ W/mK, $\mu = 0,04$ Pa.s, $\alpha = 65,3 \times 10^{-6}$ m²/s

$v_l = 0,001007$ m³/kg, $v_v = 22,93$ m³/kg; $h_{lv} = 2414$ kJ/kg

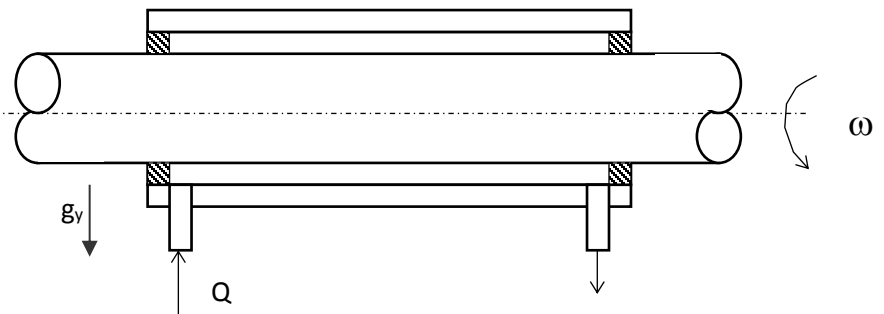
$D_{AB} = 0,26 \times 10^{-4}$ m²/s

Ar $k = 0,0263$ W/(mK); $\alpha = 22,5 \times 10^{-6}$ m²/s; $\nu = 15,89 \times 10^{-6}$ m²/s; $Pr = 0,707$

2) Um corpo de forma irregular tem uma dimensão característica $L=1$ m e é mantido a uma temperatura uniforme na superfície $T_s=400$ K. Quando colocado no ar atmosférico a uma temperatura $T_\infty=300$ K e movendo-se com velocidade $V=100$ m/s, o fluxo de calor médio da superfície para o ar é 20.000 W/m². Se um segundo corpo de mesma forma, mas com dimensão característica $L=5$ m, é mantido à temperatura da superfície $T_s=400$ K e colocado no ar atmosférico a $T_\infty=300$ K, qual será o valor do coeficiente de convecção médio se a velocidade do ar é de $V=20$ m/s?

3) Um óleo (viscoso) escoa entre o mancal e o eixo com a ajuda de uma bomba na conexão de entrada.

A partir das equações gerais do formulário em anexo, estabeleça as equações simplificadas para a solução deste problema, enunciando as hipóteses simplificadoras bem como justificando o motivo da simplificação dos termos. Considere que o escoamento rotacional pode ser desacoplado do escoamento na direção do fluxo.



Supondo que o óleo tem viscosidade de $\mu=1 \times 10^{-1}$ Ns/m² e condutividade $k=0,15$ W/mK e o diâmetro do eixo é de 50 mm com uma folga de 0,1 mm entre o mancal e o eixo e rotação de 10.000 rpm. Se a largura do mancal é de 250 mm determine:

- A dissipação viscosa no lubrificante
- A taxa de transferência pelo mancal sendo que não há perda de calor pelo eixo.
- Se sensores acoplados ao mancal indicarem que sua temperatura média é de 40°C, determine a temperatura do eixo.
- A vazão de óleo resultante se a bomba fornece uma pressão de 3 atm na conexão de entrada (0,5 pontos adicionais na prova).

4) Foi proposto um experimento que consiste em uma tubulação no interior da qual se fez escoar água a 25°C e 1 m/s. Inseriu-se no centro da tubulação um corpo-de-prova feito de ácido benzóico durante uma hora. Sabendo que o número de Schmidt é 740 e que a solubilidade do ácido benzóico, ρ_∞ , na água é $3,0 \times 10^{-3}$ g/cm³, determine:

- o raio final do corpo-de-prova, assumindo-o esférico de raio inicial a 0,5 cm

b) o raio final do corpo-de-prova, assumindo-o cilíndrico de raio inicial a 0,5 cm o qual foi disposto perpendicularmente ao escoamento.

Dados: massa específica do ácido benzóico $1,316 \text{ g/cm}^3$ e sua difusividade mássica é $0,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

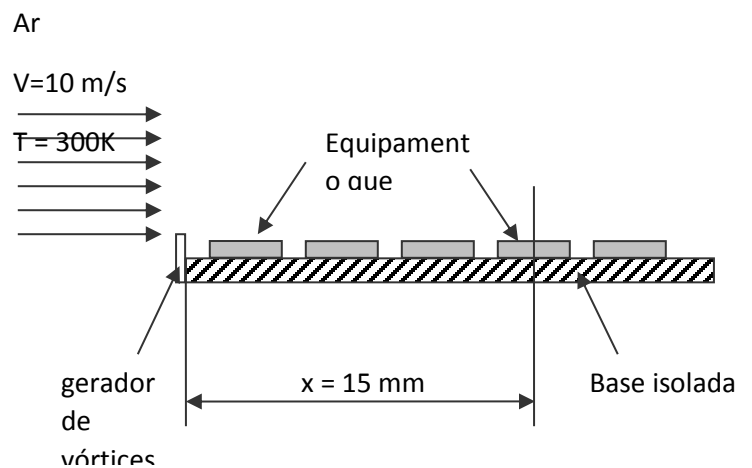
5) Em uma piscina foi determinada que a taxa de evaporação através da medida da variação do seu nível. Em um dia de verão a 35°C e com umidade relativa de 40 % foi determinado que a piscina reduz de profundidade em uma taxa de 0,1 mm/h. Determine qual é a taxa na qual a massa é perdida devido à evaporação por unidade de área superficial. Qual é o coeficiente de transferência de massa por convecção?

Dados: Vapor de água a 35°C : $\rho_g=0.0336 \text{ kg/m}^3$; Água líquida a 35°C : $\rho_g=995 \text{ kg/m}^3$.

6) Considerando ar a 27°C , pressão atmosférica ao nível do mar e propriedades listadas abaixo, escoando paralelamente e isotermicamente sobre uma placa plana, de comprimento 1 m, com uma velocidade de 10 m/s. Faça um gráfico do coeficiente local de transferência de calor com a posição x sobre a placa, mínimo 5 pontos. Obtenha o valor do coeficiente médio. Se a placa estiver a 50°C obtenha a distribuição do fluxo de calor q'' (mínimo 5 pontos) e calcule também o taxa total transferida de calor pela placa por metro de largura da placa.

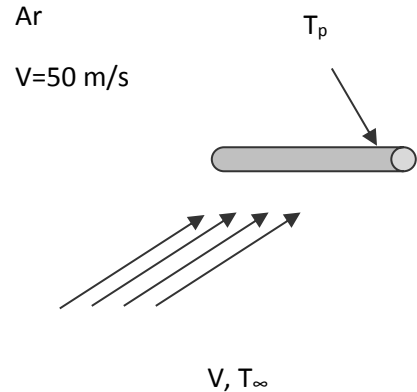
Dados do ar: $\nu=15,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $k=0,0263 \text{ W}/(\text{mK})$, $Pr=0,707$

7) Utiliza-se um fluxo de ar para resfriar equipamentos que dissipam 40 mW numa superfície de 4 mm por 4 mm, conforme figura. Para melhorar a transferência de calor são utilizados geradores de vórtices no início da placa para transformar o escoamento turbulento. Determine a temperatura superficial do 4º equipamento numa posição situada a 15 mm da borda frontal da placa.



Dados p/ar: $k=0,0274 \text{ W}/(\text{mK})$, $\nu=17,40 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $Pr=0,705$

8) Um fio fino, com diâmetro de $3,93 \times 10^{-5}$ m é posicionado transversalmente num fluxo de ar a 1 atm e 25°C , com uma velocidade de 50 m/s. Uma corrente elétrica passa através do fio, aquecendo a sua superfície a 50°C . Calcule a transferência de calor existente por unidade de comprimento. compare as correlações existentes para este caso, considerando para uma correlação $C=0,683$ e $m=0,466$ e $n=1/3$ (Tab. 7.2)



Propriedades:

Ar ($T = 310$ K): $k=0,02704$ W/(mK); $\nu=16,7 \times 10^{-6}$ m²/s;
 $Pr=0,706$

Formulário:

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \quad q_{\text{latente}} = \dot{m} h \quad q_{\text{sensível}} = m c_p \frac{dT}{dt} \quad q_{\text{cond}} = k A \frac{(T_a - T_b)}{L}$$

$$q_{\text{conv}} = h A (T_s - T_\infty) \quad \tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \quad \frac{dp}{dh} = \rho g \quad \text{Torque: } d\Gamma = r dF \quad \text{Potência} = F \cdot v \text{ ou } F \cdot \omega$$

$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz \quad \phi = \frac{P_A}{P_{A,\text{sat}}} \text{ (umidade relativa - hip. gás ideal)} \quad \phi = \frac{P_A}{P_{A,\text{sat}}} \text{ (umidade relativa - hip. gás ideal)}$$

$$PV = mRT \quad N_A'' = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial y} \quad h_m = \frac{-D_{AB} \partial C_A / \partial y|_{y=0}}{C_{A,S} - C_{A,\infty}} \quad n_A'' = -D_{AB} \frac{\partial \rho_A}{\partial y} \quad h_m = \frac{-D_{AB} \partial \rho_A / \partial y|_{y=0}}{\rho_{A,S} - \rho_{A,\infty}} \quad Le = \frac{Sc}{Pr}$$

$$Nu = \frac{hL}{k_f} \quad Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}} \quad \frac{Nu}{Pr^n} = \frac{Sh}{Sc^n}, \text{ ou } \frac{h}{h_m} = \frac{k}{D_{AB} Le^n} = \rho c_p Le^{1-n}, n \approx 1/3 \quad \bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g_x$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g_y$$

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} + \dot{q}$$

$$u \frac{\partial C_A}{\partial x} + v \frac{\partial C_A}{\partial y} = D_{AB} \left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \right) + \dot{N}_A$$

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu} \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$$

Correlações para escoamento externo PLACA PLANA: $Re_c = 5 \times 10^5$ Transição laminar/turbulento

Laminar, T_f	$\delta = 5x Re_x^{-1/2}$
Laminar, T_f	$\delta_t = \delta Pr^{-1/3}$
Laminar local, T_f , $0.6 < Pr < 50$	$Nu = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$
Laminar médio, T_f , $0.6 < Pr < 50$	$\overline{Nu}_x = 0.664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$
Turbulento local, T_f , $Re_x < 10^8$, $0.6 < Pr < 60$	$Nu_x = 0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$
Turbulento	$\delta = 0,37x Re_x^{-1/5}$
Mistura média, T_f , $Re_x < 10^8$, $0.6 < Pr < 60$	$\overline{Nu}_L = (0.037 Re_L^{4/5} - 871) Pr^{1/3}$
CILINDRO com escoamento cruzado, $Re_D Pr > 0.2$	$\overline{Nu}_D = \frac{\overline{h}_D D}{k} = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$
ESFERA com condições média, $T_\infty 3.5 < Re_D < 4 \times 10^4$, $0.71 < Pr < 380$, $1 < (\mu/\mu_s) < 3.2$	$\overline{Nu}_D = 2 + \left[0.4 Re_D^{1/2} + 0.06 Re_D^{2/3}\right] Pr^{0.4} (\mu/\mu_s)^{1/4}$

OBS: quando a analogia de transferência de calor e massa for aplicável, as correlações correspondentes de transferência de massa podem ser obtidas trocando-se **Nu** e **Pr** por **Sh** e **Sc**, respectivamente.

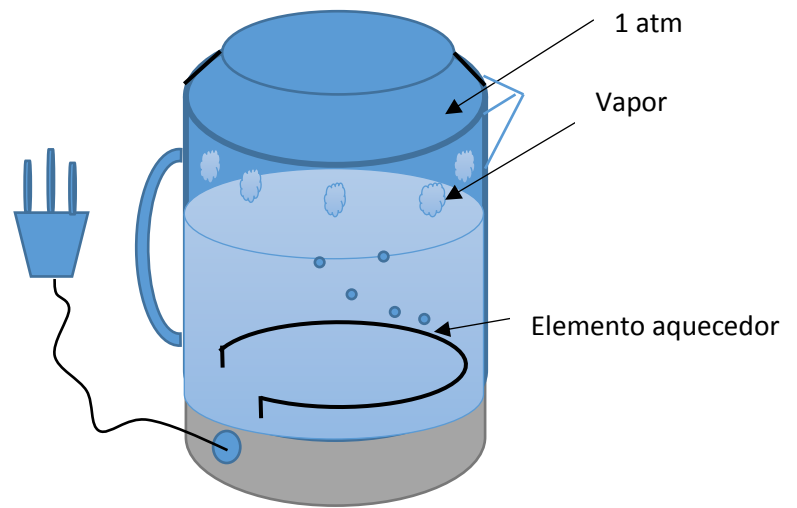
QUESTÕES P3

1) (4,0 pontos) Água é fervida ao nível do mar em uma cafeteira equipada com elemento de aquecimento elétrico por imersão, conforme a figura, feito de aço inoxidável polido mecanicamente, ($C_{s,f}=0,0060$), com 30 cm de comprimento e 0,4cm de diâmetro. A cafeteira contém inicialmente 1 litro de água a 14°C. Depois de começar a ferver, observa-se que a metade da água evapora em 32 min.

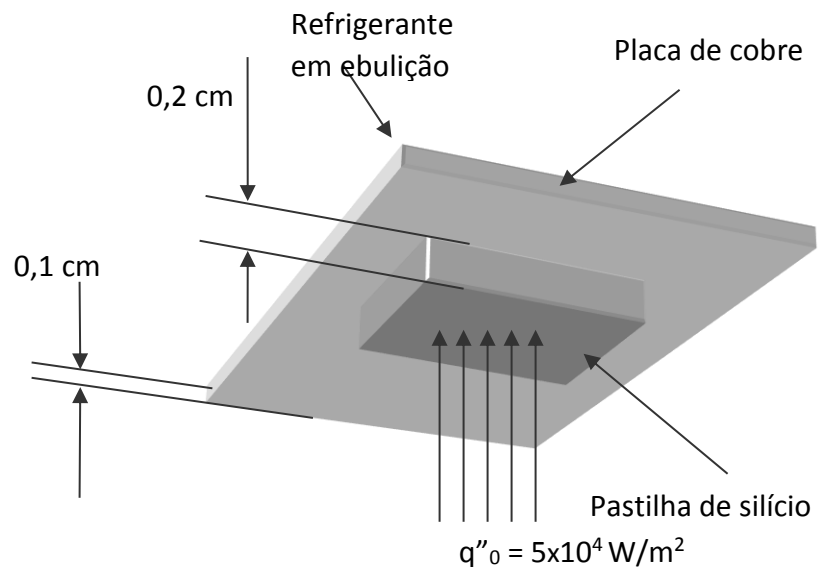
- (1,5 ponto) Determine a potência do elemento de aquecimento elétrico imerso na água e a sua temperatura de operação.
- (1,5 ponto) Qual o tipo de ebulição que está ocorrendo?
- (1,0 ponto) Quanto tempo ela levará para entrar em ebulição?

Dados p/água a 1 atm: LÍQUIDO $\rho_l=962$ kg/m³, $c_{p,l}=4,211$ kJ/(kgK), $\mu_l=277 \times 10^{-6}$ Ns/m², $Pr_l=1,75$; $h_{fg}= 2250$ kJ/kg, $\sigma= 58,8 \times 10^{-3}$ N/m;

VAPOR: $\rho_v=0,60$ kg/m³



2) As preocupações com o meio ambiente motivaram recentemente pesquisas para a substituição dos refrigerantes do tipo clorofluorocarbono (CFC). Foi planejado um experimento para determinar a aplicação de uma substituição desse tipo. Uma pastilha de silício é conectada no fundo de uma placa de cobre fina ($k_{Cu} = 399$ W/mK), como mostrado no desenho. A pastilha tem 0,2 cm de espessura e condutividade térmica de 125 W/(m.K). A placa de cobre tem 0,1 cm de espessura e não existe resistência de contato entre as duas. O conjunto deve ser resfriado através da ebulição de um refrigerante líquido saturado sobre a superfície do cobre. O circuito eletrônico no fundo da pastilha gera calor com um fluxo uniforme de $q''_0=5 \times 10^4$ W/m². Suponha que as laterais e o fundo



da pastilha estejam isolados. Calcule a temperatura, no estado estacionário, na superfície do cobre e no fundo da pastilha, bem como o fluxo de calor máximo na ebulição em vaso, supondo que o coeficiente de ebulição seja, $C_{s,f}=0,0049$. As propriedades físicas deste novo refrigerante são:

Dados: $\rho_l=1620 \text{ kg/m}^3$, $c_{p,l}=1,1 \text{ kJ/(kgK)}$, $\mu_l=4.4 \times 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$, $Pr_l=9.0$; $h_{fg}= 84 \text{ kJ/kg}$, $\sigma= 0.081 \text{ N/m}$; $\rho_v=13,4 \text{ kg/m}^3$, $T_{sat}=60^\circ\text{C}$.

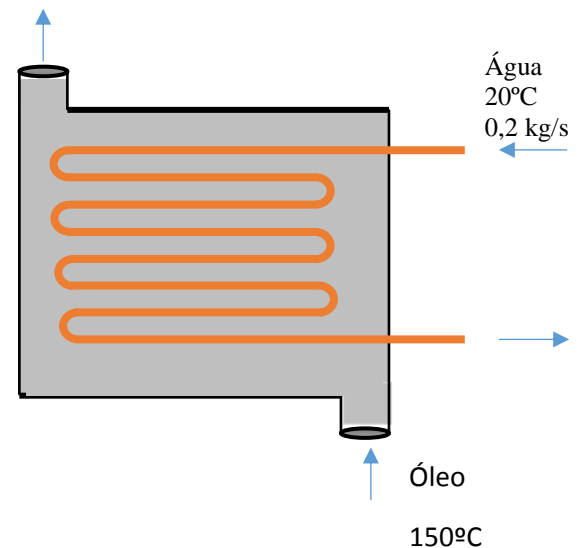
3) (5,0 Pontos) Um trocador de calor casco e tubo com um passe no casco e 20 nos tubos utiliza água quente no lado dos tubos para aquecer água no lado do casco. Um único tubo de cobre tem diâmetros internos e externo de 20 e 24 mm e um comprimento por passe de 3 m. A água entra a 87°C e $0,2 \text{ kg/s}$ e sai a 27°C . As temperaturas de entrada e saída do óleo são de 7°C e 37°C . - Determine:

- (1,5 pontos) O coeficiente de convecção interna e externa do tubo.
- (1,0 pontos) O coeficiente global de transferência de calor $\times A$, UA .
- (1,5 pontos) Determine a efetividade e o NUT deste trocador.
- (1,0 pontos) Este trocador poderia operar com correntes paralelas?

Dados $p/\text{água}$: $\rho=990,1 \text{ kg/m}^3$, $c_p=4,184 \text{ kJ/(kgK)}$, $\nu=0,602 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $Pr=3,15$; $k=0,650 \text{ W/(mK)}$
 $p/\text{óleo}$ $\rho=852 \text{ kg/m}^3$, $c_p=2,130 \text{ kJ/(kgK)}$, $\nu=3,794 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $Pr=499,3$; $k=0,138 \text{ W/(mK)}$

$$NUT = \frac{1}{C_r - 1} \ln \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1} \right), \quad C_r = C_{min} / C_{max} \quad UA = [(h_i^{-1} A_i^{-1} + h_e^{-1} A_e^{-1})^{-1}]^{-1}$$

4) (6,0 pontos) Óleo deve ser resfriado com água em um trocador de calor com 1 passe no casco e 8 passes nos tubos. Os tubos têm paredes finas de cobre de diâmetro de 1,4 cm. O comprimento de cada passe de tubo no trocador é de 5 m, e o coeficiente global de transferência de calor é $310 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. A água escoa através dos tubos a uma taxa de $0,2 \text{ kg/s}$, e o óleo escoa através do casco a uma taxa de $0,3 \text{ kg/s}$. Água e óleo entram com temperatura de 20°C e 150°C , respectivamente.



- (1,0 ponto) Determine a taxa de transferência de calor no trocador de calor.
- (1,0 ponto) As temperaturas de saída da água e do óleo.
- (1,5 pontos) O coeficiente médio de transferência de calor por convecção internamente ao tubo de cobre.
- (1,5 pontos) Se este trocador for aproximado por um paralelepípedo de $L=5\text{m} \times H=1\text{m} \times W=1\text{m}$, considerando que a troca térmica na parte inferior é nula, estime a perda de calor para o ambiente a $T_\infty=20^\circ\text{C}$ e que toda a superfície do trocador se mantém a $T_{sup}=(150^\circ\text{C}+T_{\text{óleo,s}})/2$.
- (1,0 ponto) O fato de haver troca de calor com o ambiente piora ou melhora o trocador? Fundamente a sua resposta.

Dados do óleo: $k=0,144 \text{ W/(m.K)}$, $\mu=0,210 \text{ Ns/m}^2$, $Pr=2870$; $c_p= 2300 \text{ J/(kg.K)}$

Dados do ar: $\nu=16,4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $k=0,02814 \text{ W/(m.K)}$, $Pr=0,703$; $\rho=1,1774 \text{ kg/m}^3$, $c_p=1006 \text{ kJ/(kgK)}$

Dados p/água: $k=0,643 \text{ W/(m.K)}$, $\nu=0,861 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $Pr=3,56$; $c_p= 4180 \text{ J/(kg.K)}$; $\rho_l=980 \text{ kg/m}^3$

$$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + C_r + \sqrt{1 + C_r^2} \frac{1 + \exp[-NUT\sqrt{1 + C_r^2}]}{1 - \exp[-NUT\sqrt{1 + C_r^2}]} \right\}^{-1}$$

Formulário

$$q_{rad} = \varepsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$$

$$q_{latente} = \dot{m} h \quad q_{sensível} = m c_p \frac{dT}{dt}$$

$$q_{cond} = kA \frac{(T_a - T_b)}{L} \quad q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad \phi = \frac{P_A}{P_{A,sat}} (\text{umidade relativa} - \text{hip. gás ideal}) \quad PV = mRT$$

$$N_A'' = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial y} \quad h_m = \frac{-D_{AB} \partial C_A / \partial y|_{y=0}}{C_{A,s} - C_{A,\infty}} \quad n_A'' = -D_{AB} \frac{\partial \rho_A}{\partial y} \quad h_m = \frac{-D_{AB} \partial \rho_A / \partial y|_{y=0}}{\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}} \quad Le = \frac{Sc}{Pr} \quad Nu = \frac{hL}{k_f}$$

$$Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}} \quad Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$$

$$\frac{Nu}{Pr^n} = \frac{Sh}{Sc^n}, \text{ ou } \frac{h}{h_m} = \frac{k}{D_{AB} Le^n} = \rho c_p Le^{1-n}, n \approx 1/3 \quad \bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \quad T_m = \frac{\int \rho u c_v T dA}{m c_v} \quad Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Correlações para escoamento em tubo circular $Re_c = 2.300$ Transição laminar/turbulento

Laminar, plenamente desenvolvido	$f = 64/Re_D$
Laminar, plenamente desenvolvido, q_s'' uniforme, $Pr \geq 0,6$	$Nu_D = 4,36$
Laminar, plenamente desenvolvido, T_s uniforme, $Pr \geq 0,6$	$Nu_D = 3,66$
Laminar, comprimento térmico de entrada ($Pr \gg 1$ ou comprimento inicial não aquecido), T_s uniforme	$\bar{Nu}_D = 3,66 + \frac{0,0668(D/L) Re_D Pr}{1 + 0,04[(D/L) Re_D Pr]^{2/3}}$
Laminar, comprimento de entrada combinado, T_s uniforme	$\bar{Nu}_D = 1,86 \left(\frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$
Turbulento, plenamente desenvolvido, $3000 < Re_D < 5 \times 10^6$	$f = (0,790 \ln Re_D - 1,64)^{-2}$
Turbulento, plenamente desenvolvido, $0,6 < Pr < 5 \times 10^6$	$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n$, $n=0,3$ (resfriamento)

N=0,4 (aquecimento)

OBS: quando a analogia de transferência de calor e massa for aplicável, as correlações correspondentes de transferência de massa podem ser obtidas trocando-se **Nu** e **Pr** por **Sh** e **Sc**, respectivamente.

Correlações para convecção livre: $Ra_c = 10^9$ Transição laminar/turbulento $Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\nu}$ $\beta = 1/T$ [K] (gás ideal)

Correlação de placa Vertical (laminar e turbulento): $\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$

Correlação de placa Horizontal

Superfície superior de uma placa quente ou Superfície inferior de uma placa fria

$$\begin{cases} Nu = 0,54 Ra_L^{1/4} & 10^4 \leq Ra \leq 10^7 \\ Nu = 0,15 Ra_L^{1/3} & 10^7 \leq Ra \leq 10^{11} \end{cases}$$

Superfície inferior de uma placa quente ou Superfície superior de uma placa fria

$$Nu = 0,27 Ra_L^{1/4} \quad 10^5 \leq Ra \leq 10^{11}$$

Correlação de cilindro horizontal: $\overline{Nu}_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387Ra_D^{1/6}}{\left[1 + (0,559/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 ; Ra_D < 10^{12}$

mudança de fase: $q_s'' = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3 ; n = 1$ para a água; $\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$

;

$$q_{\max}'' = \frac{\pi}{24} \rho_v h_{fg} \left[\frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \left(\frac{(\rho_l + \rho_v)}{\rho_l} \right)^{1/2}$$

Método

NUT:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} = \frac{C_h(T_{h,e} - T_{h,s})}{C_{\min}(T_{h,e} - T_{c,e})} = \frac{C_c(T_{c,s} - T_{c,e})}{C_{\min}(T_{h,e} - T_{c,e})}; \quad NUT = \frac{UA}{C_{\min}}$$