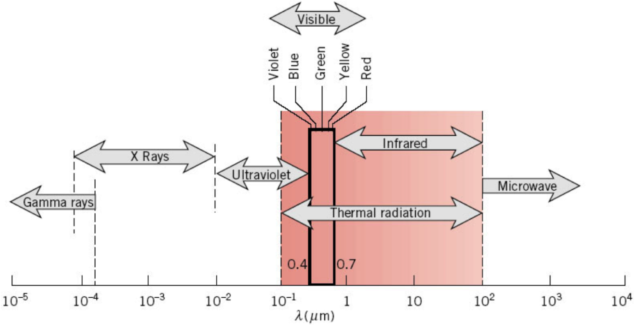
Radiação

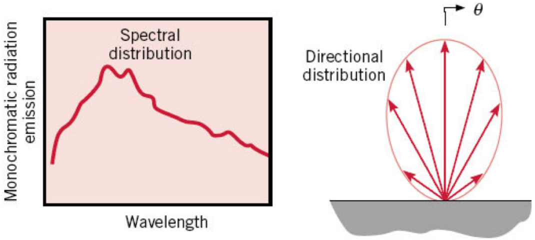
1 Conceitos fundamentais

- A radiação térmica é uma forma de transferência de calor que não necessita de um meio material para ocorrer.
- É resultado de oscilações ou transições dos elétrons.
- Em gases e sólidos semitransparentes é um fenômeno volumétrico; em corpos opacos é um fenômeno de superfície.
- Onda eletromagnética (ou fótons): $c = \lambda f$

- λ de interesse: $10^{-1}\,\mu\text{m} \leq \lambda \leq 10^{2}\,\mu\text{m}$.



- Tem natureza espectral (λ) e direcional.



2 Definições

2.1 Poder emissivo (hemisférico) total

Taxa na qual a radiação é emitida por unidade de área, em todos os comprimentos de onda e em todas as direções possíveis.

$$E = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda \qquad [E] = \mathrm{W/m^2}$$

2.2 Irradiação total

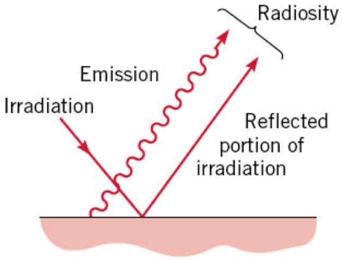
Taxa na qual radiação incide por unidade de área a partir de todas as direções e em todos λ.

$$G = \int_0^\infty G_\lambda(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda$$

2.3 Radiosidade total

Taxa na qual radiação deixa uma área unitária da superfície, em todas as direções e em todos λ.

$$J = \int_0^\infty J_\lambda(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda$$



3 Radiação de corpo negro

- Um corpo negro absorve toda radiação incidente, independente de λ e da direção.
- Para uma dada temperatura e λ, nenhuma superfície pode emitir mais energia que um corpo negro.
- A radiação emitida por um corpo negro independe da direção. É um emissor difuso.
- Cavidades com T uniforme podem ser aproximadas por corpo negro.

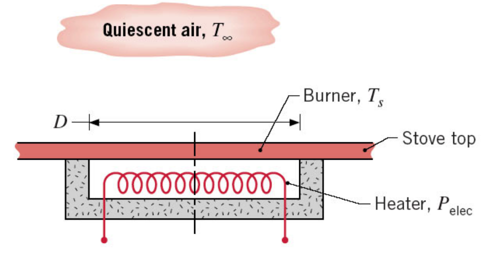
3.1 Lei de Stefan–Boltzmann

$$E_{cn} = \sigma T^4 \qquad \sigma = 5{,}670 \times 10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K^4)}$$

Exercício 1

A superfície escura do topo de um fogão de cerâmica pode ser aproximada por um corpo negro. Os“queimadores”, que estão integrados ao topo do fogão, são aquecidos por baixo por aquecedores de resistência elétrica. Considere um queimador com diâmetro $D = 200\,\mathrm{mm}$ operando com uma temperatura de superfície uniforme de $T_s = 250\,°\mathrm{C}$ em ar ambiente a $T_\infty = 20\,°\mathrm{C}$. Sem um pote ou panela sobre o queimador, quais são as taxas de perda térmica por radiação e por convecção no queimador? Sendo a eficiência associada à transferência de energia dos aquecedores para os queimadores de 90%, qual é a exigência de potência elétrica?

Solução:



Queimador é um corpo negro

Radiação: $q_{\text{rad}} = A_s E_{cn} = A_s \sigma T^4 = \frac{\pi \times 0{,}2^2}{4} \times 5{,}67 \times 10^{-8} \times 523^4 = 133{,}3\,\text{W}$

Convecção natural – placa plana horizontal, superfície quente para cima

$$T_f = \frac{20 + 250}{2} = 135\,°\text{C} = 408\,\text{K}$$

Propriedades do ar a 408 K:

$$k_f = 0{,}0344\,\mathrm{W/(m\cdot K)} \quad \nu = 27{,}37\times10^{-6}\,\mathrm{m^2/s} \qquad Pr = 0{,}689$$
$$\alpha = 39{,}7\times10^{-6}\,\mathrm{m^2/s} \quad \beta = 1/T_f = 2{,}45\times10^{-3}\,\mathrm{K^{-1}}$$

$$L = \frac{A_s}{P} = \frac{\cancel{\pi} D^{\cancel{2}}}{4}\frac{1}{\cancel{\pi}\cancel{D}} = \frac{D}{4} = 0{,}05\,\mathrm{m}$$

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} = 6{,}35\times10^5$$

$$\overline{Nu}_L = 0{,}54 Ra^{1/4} \quad \Rightarrow \quad \bar{h} = \frac{k_f}{L}0{,}54 Ra^{1/4} = 10{,}5\,\mathrm{W/(m^2\cdot K)}$$

$$q_{\mathrm{conv}} = \bar{h}A_s(T_s - T_\infty) = 75{,}8\,\mathrm{W}$$

Potência elétrica consumida: $P_{\mathrm{el}} = \frac{q_{\mathrm{rad}}+q_{\mathrm{cond}}}{\eta} = \frac{133{,}3+75{,}8}{0{,}9} = 232{,}3\,\mathrm{W}$

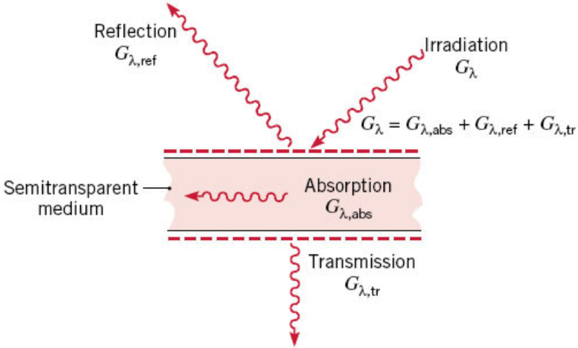
---

4 Superfícies reais

4.1 Emissividade total hemisférica

$$\varepsilon(T) \equiv E(T)/E_{cn}(T) \quad \Rightarrow \quad E(T) = \varepsilon E_{cn}(T)$$

4.2 Absorção, Reflexão e transmissão



Absortividade:

$$\alpha_\lambda(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,\mathrm{abs}}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \qquad \alpha \equiv \frac{G_{\mathrm{abs}}}{G}$$

Refletividade:

$$\rho_\lambda(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,\mathrm{ref}}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \qquad \rho \equiv \frac{G_{\mathrm{ref}}}{G}$$

Transmissividade:

$$\tau_\lambda(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,\mathrm{tr}}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \qquad \tau \equiv \frac{G_{\mathrm{tr}}}{G}$$

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

Meio opaco $\Rightarrow\ \tau = 0$.

Exercício 2

Duas superfícies pequenas, A e B, estão localizadas no interior de um recipiente isotérmico a uma temperatura uniforme. O recipiente proporciona uma irradiação de $6300\,\mathrm{W/m^2}$ em cada uma das superfícies, e as superfícies A e B absorvem a radiação incidente nas taxas de $5600\,\mathrm{W/m^2}$ e $630\,\mathrm{W/m^2}$, respectivamente. Considere condições após o transcorrer de um longo período de tempo.

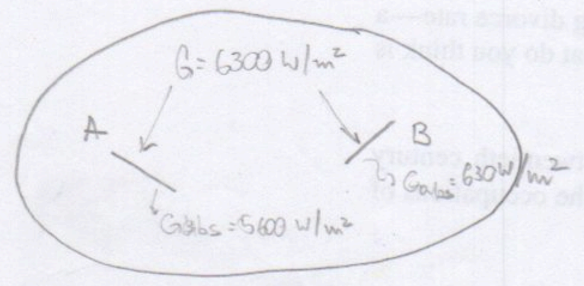
a) Quais são os fluxos térmicos líquidos para cada superfície? Quais são as suas temperaturas?

b) Determine a absortividade de cada superfície.

c) Quais são os poderes emissivos de cada superfície?

d) Determine a emissividade de cada superfície.

Solução:



a) Após um longo período, atinge-se o equilíbrio térmico. Fluxo térmico líquido é nulo e as temperaturas são iguais, $T_{s,A} = T_{s,B} = T_{s,\text{cav}}$.

A cavidade se comporta como um corpo negro,

$$G = E_{cn} = \sigma T^4 \quad \Rightarrow \quad T = \sqrt[4]{\frac{G}{\sigma}} = 577{,}4\,\text{K}$$

b) $\alpha = \dfrac{G_{\text{abs}}}{G} \quad \Rightarrow \quad \alpha_A = 0{,}89; \quad \alpha_B = 0{,}10.$

c) Fluxo térmico líquido = 0.

$$G = G_{\text{ref}} + E \quad \Rightarrow \quad G_{\text{abs}} + \cancel{G_{\text{ref}}} = \cancel{G_{\text{ref}}} + E \quad \Rightarrow \quad E = G_{\text{abs}}$$

$$E_A = 5600\,\text{W/m}^2; \quad E_B = 630\,\text{W/m}^2.$$

d) $\varepsilon = \dfrac{E(T)}{E_{cn}(T)} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_A = 0{,}89; \quad \varepsilon_B = 0{,}10.$

4.3 Lei de Kirchhoff

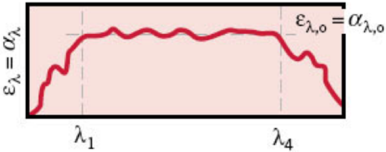
$$\varepsilon = \alpha$$

Válida quando:

1. A irradiação corresponde à emissão de um corpo negro com temperatura superficial T $[G = E_{cn}(T)]$;

ou

2. A superfície é <u>cinza</u>, ou seja, ε_λ e α_λ são independentes de λ, e difusa.



Quando uma pequena superfície está trocando calor por radiação com uma grande vizinhança, a vizinhança se comporta como um corpo negro e vale a lei de Kirchhoff. O fluxo radiante líquido é dado por:

$$q''_{\text{rad}} = G - J = G - E - G_{\text{ref}} = G_{\text{abs}} + \cancel{G_{\text{ref}}} - E - \cancel{G_{\text{ref}}}$$

$$q''_{\text{rad}} = \alpha G - \varepsilon E_{cn}$$

Porém, a irradiação vem da emissão da vizinhança (corpo negro),

$$G = E_{cn}(T_{\text{viz}}) = \sigma T_{\text{viz}}^4$$

Pela lei de Kirchhoff, $\varepsilon = \alpha$, e temos

$$\boxed{q''_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T_{\text{viz}}^4 - T_s^4)}$$

Exercício 3

Um termopar cuja superfície é difusa e cinza, possuindo uma emissividade de 0,6, indica uma temperatura de 180 °C quando é utilizado para medir a temperatura de um gás que escoa através de um grande duto cujas paredes possuem uma emissividade de 0,5 e uma temperatura uniforme de 450 °C. Se o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o termopar e a corrente de gás for de $\bar{h} = 125\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$ e as perdas por condução pelo termopar forem desprezíveis, determine a temperatura do gás.

<u>**Solução**</u>**:**

Termopar – superfície cinza ($\varepsilon = \alpha$). Gás não participa da radiação.

$$q''_{\mathrm{rad}} + q''_{\mathrm{conv}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon\sigma(T_{\mathrm{viz}}^4 - T_s^4) + \bar{h}(T_\infty - T_s) = 0$$

$$T_\infty = -\frac{\varepsilon\sigma}{\bar{h}}(T_{\mathrm{viz}}^4 - T_s^4) + T_s = -\frac{0{,}6 \times 5{,}67 \times 10^{-8}}{125}(723^4 - 453^4) + 453$$

$$T_\infty = 390\,\mathrm{K} = 117\,^\circ\mathrm{C}$$
