FENÔMENO DE TRANSPORTE II: INTRODUÇÃO, MODOS DE TRANSFERÊNCIA E CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

PROF. GERÔNIMO

- O QUE É TRANSFERÊNCIA DE CALOR?

Transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura.

- O que é energia térmica?

Energia térmica está associada com a translação, rotação, vibração e estado dos átomos e moléculas que compreende a matéria.

A energia térmica representa o efeito acumulativo da atividade microscópica e está diretamente ligado a temperatura da matéria.

Não vamos confundir o significado de transferência de calor, temperatura e energia térmica.

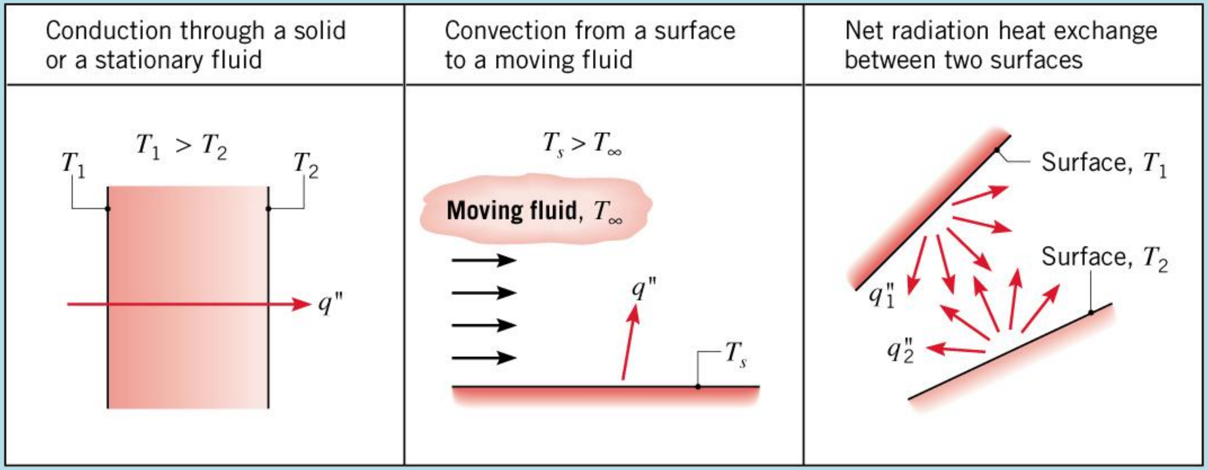
Notação	Significado	Símbolo	Unidade
Energia térmica*	Energia Associada ao comportamento microscópico da matérias	U or u	J or J/kg
Temperatura	É o meio de avaliar indiretamente a quantidade de energia térmica armazenada na matéria.	T	K or °C
Transferência de calor	Transporte de energia térmica devido a gradientes de temperatura.		
Calor	Quantidade de energia térmica transferido ao longo de um intervalo de tempo $\triangle t > 0$	Q	J
Taxa de calor	Energia térmica transferido por unidade de tempo	q	W
Fluxo de calor	Energia térmica transferido por unidade de área	q''	W/m^2

+

$U \rightarrow$ Energia térmica do sistema

$u \rightarrow$ energia térmica do sistema por unidade de massa

Modos de transferência de calor



Condução: Transferência de calor através da vibração molecular, a energia térmica é transportada molécula a molécula sem movimento relativo destas molécula, ou o mesmo, as moléculas permanecem fixadas em suas posições (sem mobilidade), neste caso é necessário o suporte material. Exp.: Meio pode ser um sólido ou um fluído estacionário.

Convecção: A transferência de calor se processa com movimentação molecular de um fluído sobre a superfície de um sólido. Exp. Fluídos em contato com uma parede.

Radiação: É a forma de energia térmica que se propaga mesmo no vácuo, através de ondas eletromagnéticas ou fótons. Neste caso não é necessário o suporte material.

Modos de Transferência de Calor

Condução:

Lei de Fourier para condução:

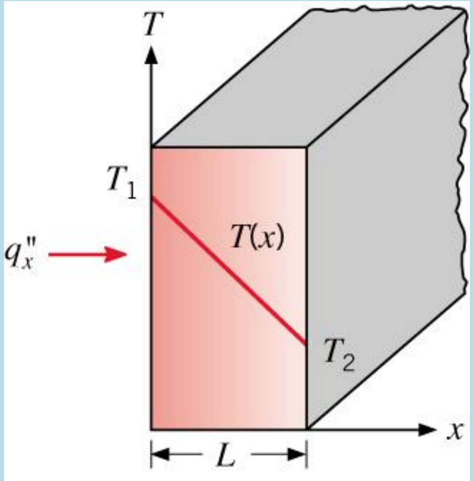
$$\vec{q}'' = -k\underbrace{\vec{\nabla} T}$$

Fluxo de calor $\mathrm{W/m^2}$

Condutividade térmica $\mathrm{W/m \cdot K}$

Gradiente de temperatura $\mathrm{°C/m \ or \ K/m}$

Aplicação unidimensional (x) , Seção transversal constante para parede plana e condutividade térmica constante.



$$q''_x = -k\frac{dT}{dx} = -k\frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$q''_x = k\frac{T_1 - T_2}{L}$$

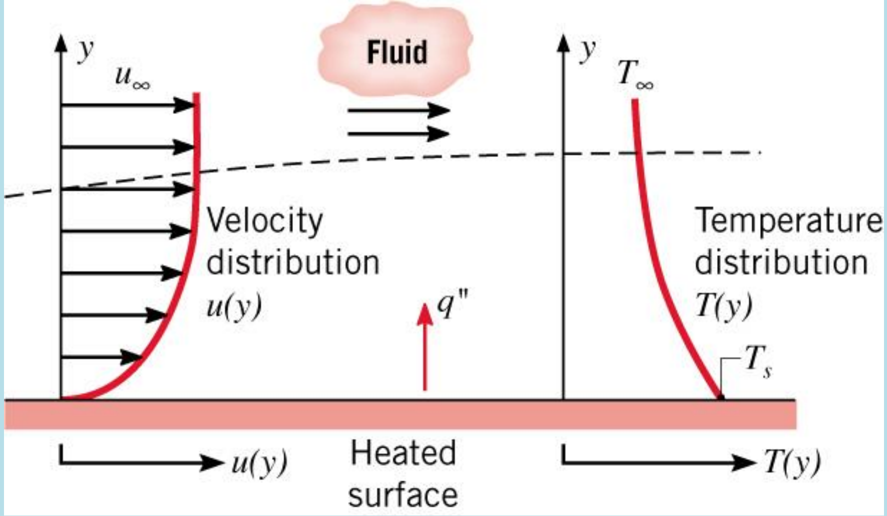
Taxa de Calor (W):

$$q_x = q''_x \cdot A$$

Modos de Transferência de Calor

Convecção:

O Fluxo de convecção ao longo de uma superfície está relacionado a desenvolvimento da velocidade dentro da camada limite.



Lei de resfriamento de Newton.

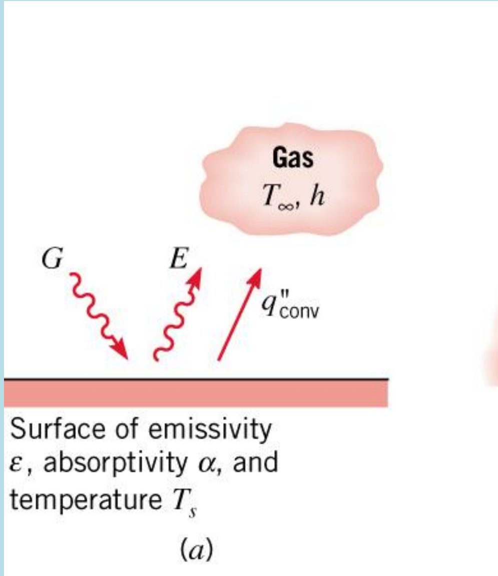
$$q'' = \mathrm{h}\left(T_s - T_\infty\right) = \frac{q}{\mathrm{A}}$$

$$q = \mathrm{Ah}\left(T_s - T_\infty\right)$$

$\mathrm{h}:$ Coeficiente de convecção $(\mathrm{W/m^2 \cdot K})$

Radiação

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não nula.
A emissão pode ser apresentada nas superfície sólidas, líquidas e gasosas.
Porem as onda eletromagnéticas se propagam mais facilmente no vácuo.



$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T_s^4$$

E : Poder de emissividade $\left(\mathrm{W/m^2}\right)$

ε : Emissividade da superfície $(0 \le \varepsilon \le 1)$

E_b : Potência emissiva do blackbody (Emissor perfeito)

σ : Contante de Stefan-Boltzmann $\left(5.67\times10^{-8}\mathrm{W/m^2\cdot K^4}\right)$

Absorção de energia devido à irradiação :

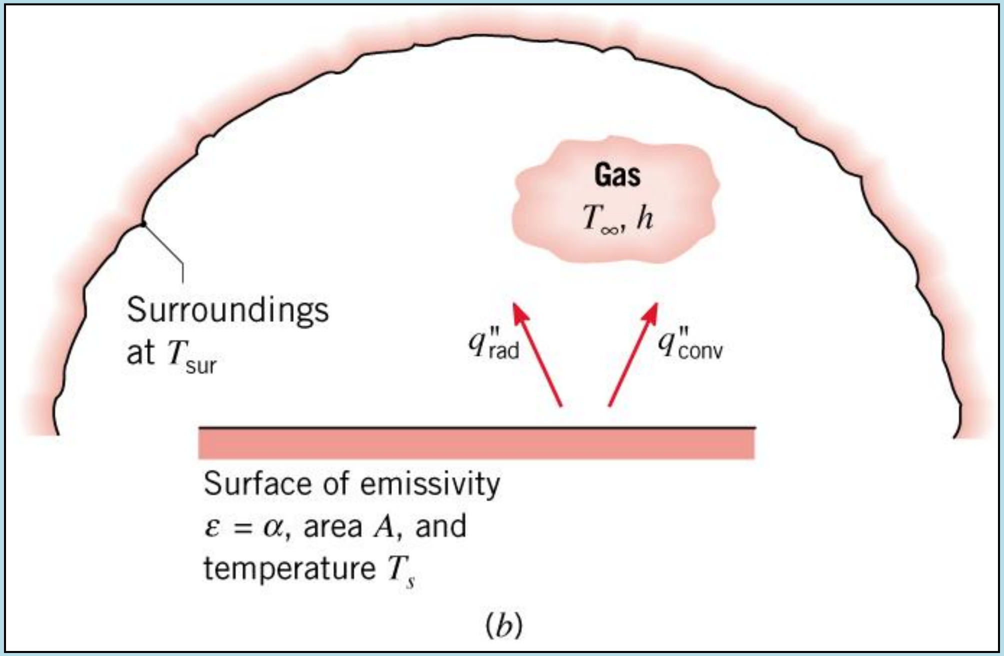
$$G_{abs} = \alpha G$$

G_{abs} : Radiação incidente absorvida $(\mathrm{W/m^2})$

α : Absorvidade da superfície $(0 \le \alpha \le 1)$

G : Irradiação $\left(\mathrm{W/m^2}\right)$

Irradiação: Caso especial de uma pequena superfície exposta a uma superfície maior. T(viz.)



$$G = G_{sur} = \sigma T_{sur}^4$$

Se $\alpha = \varepsilon$, O fluxo de calor da radiação na superfície trocado com o meio é:

$$q''_{rad} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon\sigma\left(T_s^4 - T_{Viz}^4\right)$$

Existem muitas aplicações nas quais é conveniente expressar a troca líquida de calor por radiação através de uma expressão na forma:

$$q''_{rad} = \mathrm{h}_r \left(T_s - T_{viz} \right)$$

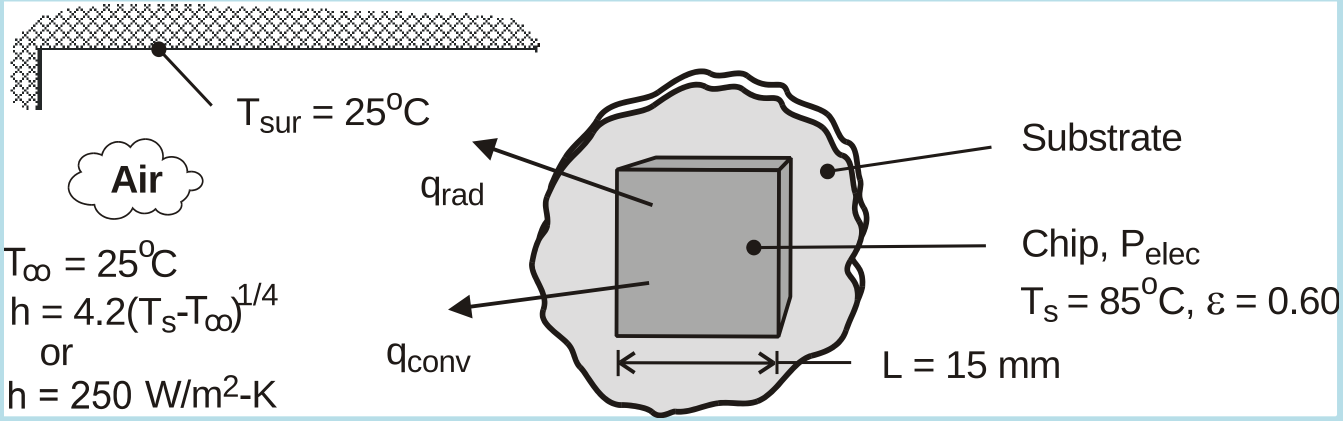
h_r: Coeficiente de transferência de calor por radiação $\left(\mathrm{W/m^2 \cdot K} \right)$

$$\mathrm{h}_r = \varepsilon\sigma \left(T_s + T_{viz} \right)\left(T_s^2 + T_{viz}^2 \right)$$

Se combinarmos convecção e radiação temos:

$$q'' = q''_{conv} + q''_{rad} = h\left(T_s - T_\infty \right) + h_r \left(T_s - T_{sur} \right)$$

1) Chips, com L = 15 mm de lado, são montados em um substrato que se encontra Instalado em uma câmera cujas paredes e o ar interior são mantidos à temperatura de $T_{viz} = T_{\infty} = 25$ °C. Os chips têm uma emissividade $\varepsilon = 0{,}60$ e a Temperatura máxima permitida de $T_s = 85$ °C.



a) Se o calor é descartado pelo chip por radiação e convecção natural, qual a potência operacional máxima de cada chip? O coeficiente convectivo depende da diferença entre as temperaturas do chip e o ar e pode ser aproximada por h = c = $(T_s - T_\infty)^{1/4}$, onde c = 4,2 W/(m^2.K$^{5/4}$).

Solução:

$$P_{elec} = q_{conv} + q_{rad} = \mathrm{h}A\left(T_s - T_\infty\right) + \varepsilon A\sigma\left(T_s^4 - T_{sur}^4\right)$$

$$A = L^2 = \left(0.015\mathrm{m}\right)^2 = 2.25\times10^{-4}\mathrm{m}^2$$

$$q_{conv} = CA\left(T_s - T_\infty\right)^{5/4} = 4.2\,\mathrm{W/m^2 \cdot K^{5/4}}\left(2.25\times10^{-4}\mathrm{m^2}\right)\left(60\mathrm{K}\right)^{5/4} = 0.158\mathrm{W}$$

$$q_{rad} = 0.60\left(2.25\times10^{-4}\mathrm{m^2}\right)5.67\times10^{-8}\mathrm{W/m^2 \cdot K^4}\left(358^4 - 298^4\right)\mathrm{K^4} = 0.065\mathrm{W}$$

$$P_{elec} = 0.158\mathrm{W} + 0.065\mathrm{W} = 0.223\mathrm{W}$$

b) Se um ventilador for usado para manter o ar no interior da câmara em movimento e a transferência de calor for forçada com h = 250 W/(m^2/K), qual será a potência operacional máxima.

$$q_{conv} = \mathrm{h}A\left(T_s - T_\infty\right) = 250\mathrm{W/m^2 \cdot K^4}\left(2.25\times10^{-4}\mathrm{m^2}\right)\left(60\mathrm{K}\right) = 3.375\mathrm{W}$$

$$P_{elec} = 3.375\mathrm{W} + 0.065\mathrm{W} = 3.44\mathrm{W}$$

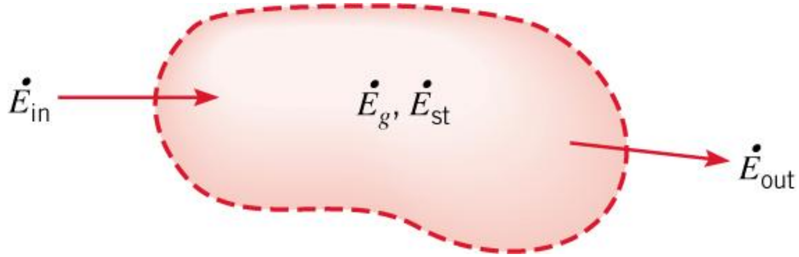
Resumos das equações e os tipos de transferência de calor.

Mode	Mechanism(s)	Rate Equation	Equation Number	Transport Property or Coefficient
Conduction	Diffusion of energy due to random molecular motion	$q''_x\ (\mathrm{W/m^2}) = -k\dfrac{dT}{dx}$	(1.1)	$k\ (\mathrm{W/m \cdot K})$
Convection	Diffusion of energy due to random molecular motion plus energy transfer due to bulk motion (advection)	$q''(\mathrm{W/m^2}) = h(T_s - T_\infty)$	(1.3a)	$h\ (\mathrm{W/m^2 \cdot K})$
Radiation	Energy transfer by electromagnetic waves	$q''(\mathrm{W/m^2}) = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4)$ or $q(\mathrm{W}) = h_r A(T_s - T_{sur})$	(1.7) (1.8)	ε $h_r\ (\mathrm{W/m^2 \cdot K})$

Conservação da energia

- Conservação da energia em um volume de controle.
- Da primeira lei da Termodinâmica temos:

$$\Delta E_{acu}^{tot} = Q - W$$



sendo

$\Delta E_{acu}^{tot} \rightarrow$ Variação da energia total acumulada no sistema.

$Q \rightarrow$ O valor líquido do calor transferido.

$W \rightarrow$ O valor líquido do trabalho efetuado pelo sistema.

$\mathrm{E}_{g} \rightarrow$ Taxa de geração de energia.

- A <u>taxa</u> de aumento da quantidade de energia térmica e mecânica acumulada (armazenada) em um volume de controle deve ser igual à <u>taxa</u> na qual as energias térmica e mecânica entram no volume de controle, menos a <u>taxa</u> na qual as energias térmica e mecânica deixam o volume de controle, mais a <u>taxa</u> a qual a energia térmica é gerada no interior do volume de controle.

$$\Delta E_{acum} = E_{ent} - E_{sai} + E_g$$

$$\dot{E}_{acum} \equiv \frac{dE_{acum}}{dt} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} + \dot{E}_g \qquad \left[{}^{J}\!/_{s}, W \right]$$

- E_g = Energia elétrica, química ou nuclear.
- Os termos relativos à entrada e saída de energia são <u>*fenômenos de superfícies*</u> . Relacionados a superfície de controle que é proporcional a área superficial. Em situação onde a vazão mássica atravessa a fronteira do sistema com pressão e produzindo trabalho, temos:

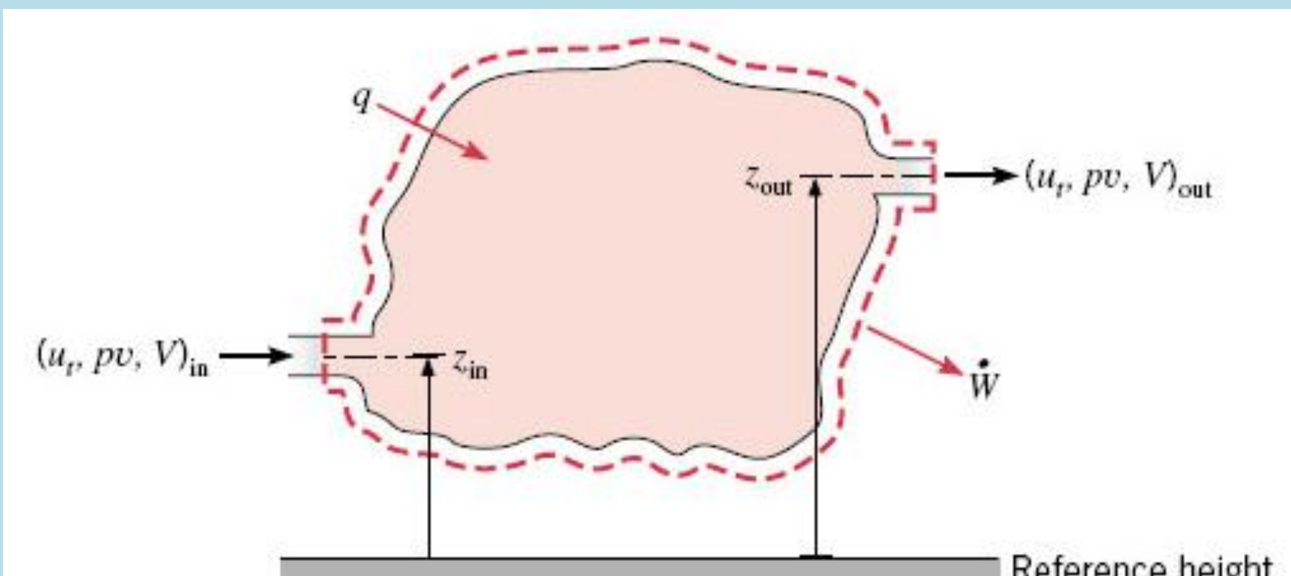
$$\dot{m}(u_t + pv + 1/2V^2 + gz)$$

u_t = é a energia térmica por unidade de massa

➢ Balanço de Energia para um Volume de Controle.

$$\begin{bmatrix}\text{Taxa temporal de}\\ \text{variação da energia}\\ \text{contida no interior do}\\ \text{volume de controle}\\ \text{no instante t}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\text{Taxa líquida na}\\ \text{qual a enegia está}\\ \text{sendo transferida}\\ \text{para dentro por}\\ \text{tranferência de}\\ \text{calor no instante t}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\text{Taxa líquida na}\\ \text{qual a energia}\\ \text{está sendo}\\ \text{transferida para}\\ \text{fora por trabalho}\\ \text{no instante t}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\text{Taxa líquida da}\\ \text{energia tranferida}\\ \text{para o volume de}\\ \text{controle}\\ \text{juntamente com}\\ \text{fluxo de massa}\end{bmatrix}$$

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_{entrada} \dot{m}_{entrada}\left(u_t + pv + \frac{V_e^2}{2} + gz_e\right) - \sum_{saída} \dot{m}_{saída}\left(u_t + pv + \frac{V_s^2}{2} + gz_s\right)$$



- Para regime estacionário, temos: ($dE_{acum}/dt = 0$).
- $c_p = c_v = c$ (líquido incompressível)
- Variação da energia sensível por unidade de massa será:

$$(u_{t,ent} - u_{t,sai}) = c(T_{ent} - T_{sai})$$

- A não ser que a queda de pressão seja extremamente grande, a diferença nos termos de trabalho de escoamento é desprezível.

$$(pv_{ent}) - (pv_{sai}) = 0$$

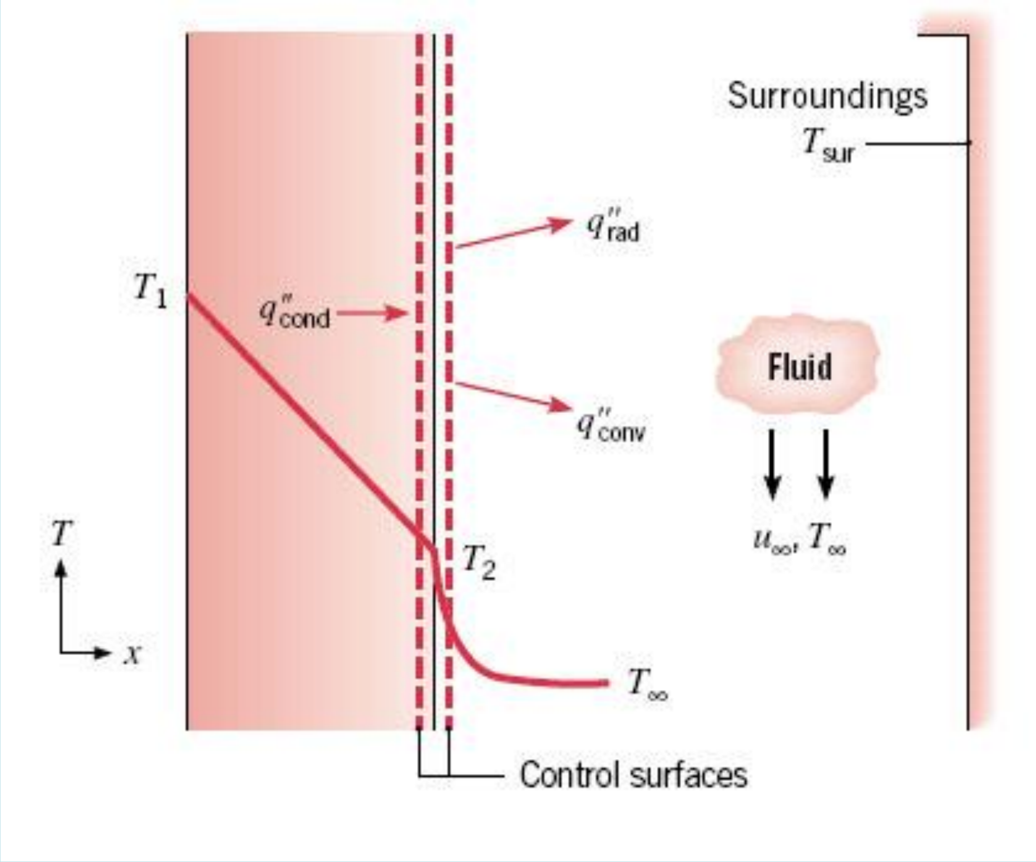
- Trabalho pelo sistema desprezível, temos:

$$\boxed{q = \dot{m} c_p (T_{ent} - T_{sai})}$$

Balanço de Energia em uma Superfície

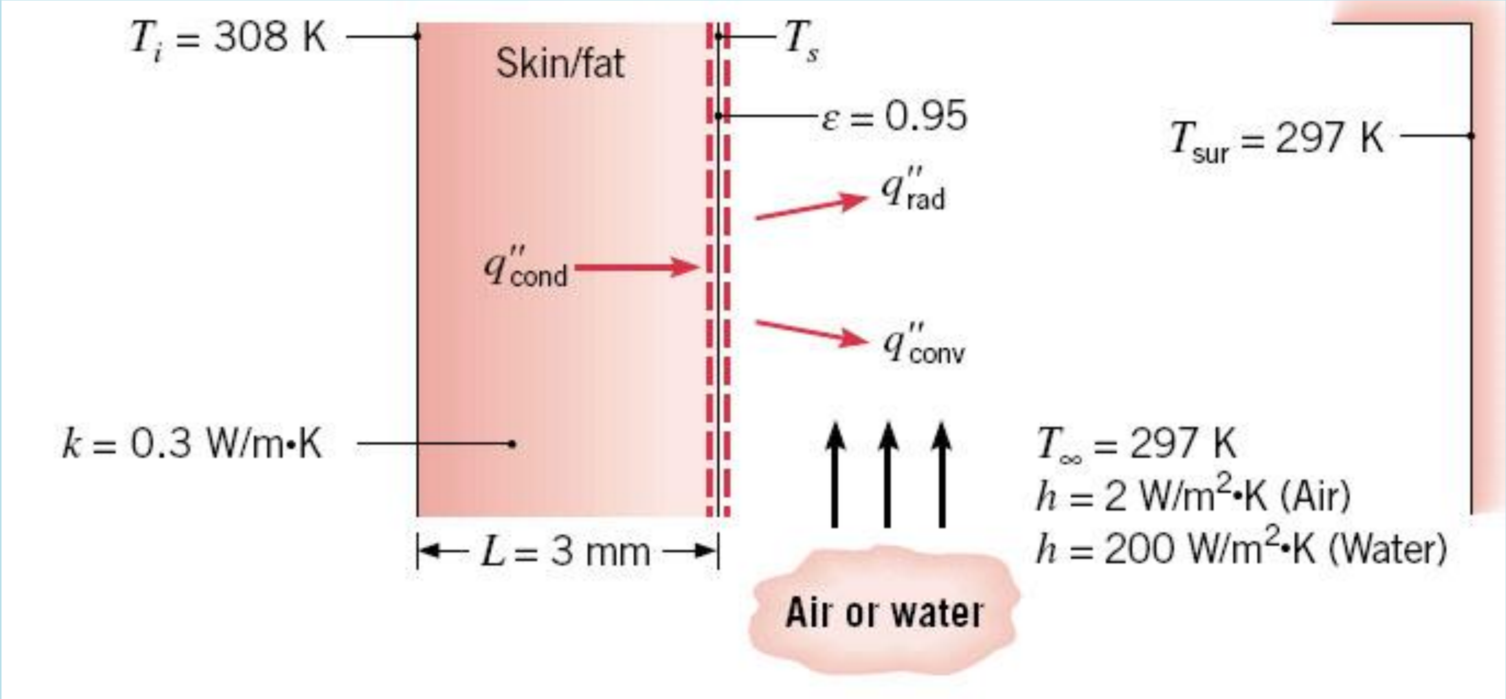
- Regime estacionário.
- Convecção, condução e radiação, temos:

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = 0$$
$$q''_{cond} - q''_{conv} - q''_{rad} = 0$$



- Exercícios: Humanos são capazes de controlar suas taxas de produção de calor e de perda de calor para manter aproximadamente constante a sua temperatura corporal de T_c = 37 °C sob uma ampla faixa de condições ambientais. Esse processo é chamado de *termorregulação*. Com a perspectiva de calcular a transferência de calor entre um corpo humano e sua vizinhança, focamos em uma camada de pele e gordura, com sua superfície externa exposta ao ambiente e sua superfície interna a uma temperatura um pouco abaixo da temperatura corporal, T_i = 35 °C = 308 K. Considere uma pessoa com uma camada de pele/gordura com espessura L = 3 mm e com condutividade térmica efetiva k = 0,3 W/(m.K). A pessoa tem uma área superficial de 1,8 m^2 e está vestindo roupa de banho. A emissividade da pele é ε = 0,95.
- a) Estando a pessoa no ar em repouso a T_∞ = 297 K, qual é a temperatura superficial da pele e a taxa de perde de calor para o ambiente? A transferência de calor por convecção para o ar é caracterizada por um coeficiente de convecção natural h = 2 W/(m^2.K).
- b) Estando a pessoa imersa em água a T_∞ = 297 K, qual é a temperatura superficial da pele e a taxa de perda de calor? A transferência de calor para a água é caracterizada por um coeficiente de convecção h = 200 W/(m^2.K).

- Solução



- Regime estacionário.
- Transf. de calor por condução por condução unidimensional através da camada pele/gordura.
- Condutividade térmica uniforme.
- Troca por radicação entre a superfície da pele e a vizinhança equacionada como troca entre uma superfície pequena e um amplo envoltório na temperatura do ar.
- Água líquida opaca para a radiação.
- Roupa de banho não afeta a perda de calor do corpo.
- Radiação solar desprezível.
- Na parte (b) corpo completamente imerso na água.

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = 0$$

$$q''_{cond} - q''_{conv} - q''_{rad} = 0$$

$$k\frac{T_i - T_s}{L} = h(T_s - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4)$$

O fluxo térmico por radiação pode ser escrito pela equação que tem o coeficiente de transf. de calor por radiação.

$$k\frac{T_i - T_s}{L} = h(T_s - T_\infty) + h_r(T_s - T_{viz})$$

$$T_s = \frac{\frac{kT_i}{L} + (h + h_r)T_\infty}{\frac{k}{L} + (h + h_r)}$$

$$h_r \equiv \varepsilon\sigma(T_s + T_{viz})(T_s^2 - T_{viz}^2)$$

Calculando o h_r = 5,9 W/(m^2.K).

calculando o T_s = 307,2 K.

A taxa de calor será:

$$q_s = kA\frac{T_i - T_s}{L} = \text{ 146 W}$$

2 – Como a água líquida é opaca para a radiação térmica, a perda de calor na superfície da pele ocorre somente por convecção. Vamos usar as mesmas expressões anteriores com h_r = 0.

$$T_s = \frac{\dfrac{0,3\ \mathrm{W/(m.K)} \times 308K}{3\times10^{-3}m} + 200\ \mathrm{W/(m^2.K)} \times 297K}{\dfrac{0,3\ \mathrm{W/(m.K)}}{3\times10^{-3}m} + 200\ \mathrm{W/(m^2.K)}} = 300,7K$$

e

$$q_s = kA\frac{T_i - T_s}{L} = 0,3\ \mathrm{W/(m.K)} \times 1,8\ \mathrm{m^2} \times \frac{(308 - 300,7)K}{3\times10^{-3}\mathrm{m}} = 1320\ \mathrm{W}$$