

# Aulas 3 e 4 - Introdução a transferência de calor

Prof. Dr. Caio<sup>1</sup>, Prof. Akira<sup>2</sup>

---

---

## 1. Mecanismos de transferência de calor

De acordo com [1]:

*Transferência de calor (ou calor) é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço.*

5 Dessa forma, as formas para a transferência de calor são:

- **Condução:** transferência em sólidos (predomina) e fluídos estacionários (parcela pequena) devido ao movimento aleatório de partículas. Em outras palavras, trata-se da transferência de energia de partículas em um estado mais energético para um estado de menor energia. A condução pode ser descrita pela Lei de Fourier:

$$q = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

em que  $q$  é a taxa de transferência de calor (dada em  $W$ ),  $k$  é a condutividade térmica (normalmente dada em  $[W/mK]$ ),  $A$  é a área de condução e  $\frac{dT}{dx}$  se refere a variação de temperatura num espessura infinitesimal  $dx$ . Podemos também relacionar a taxa de transferência de calor com o fluxo de calor por:

$$q'' = \frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dx}. \quad (2)$$

A figura 1 ilustra o processo de transferência de calor por condução modelado pela Lei de Fourier.

---

<sup>1</sup>caiofrs@insper.edu.br.

<sup>2</sup>pauloafe@insper.edu.br.

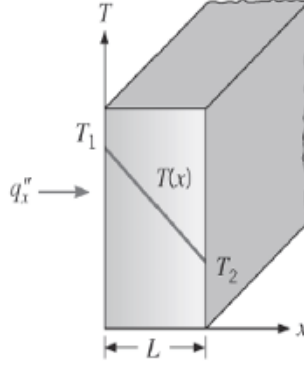


Figura 1: Condução em um sólidos. Fonte: [1]

- **Convecção:** transferência devido ao efeito combinado do movimento global (advecção) e aleatório (difusão) do fluido. Mais especificamente, trata-se do efeito combinado da condução na superfície e do movimento de massa. O modelo que usaremos para descrever a convecção é a Lei de Resfriamento de Newton, dada por

$$q = hA(T_s - T_\infty), \quad (3)$$

onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $[W/(m^2K)]$ ),  $T_s$  é a temperatura da superfície e  $T_\infty$  é a temperatura a longe. A constante  $h$  não é uma propriedade do material mas está relacionado ao escoamento. Novamente, podemos escrever

$$q'' = h(T_s - T_\infty). \quad (4)$$

Ainda podemos classificar a convecção como forçada (causada por meios externos), natural (causadas por variações de temperatura no fluido) e mista. A figura 2 ilustra o processo convectivo.

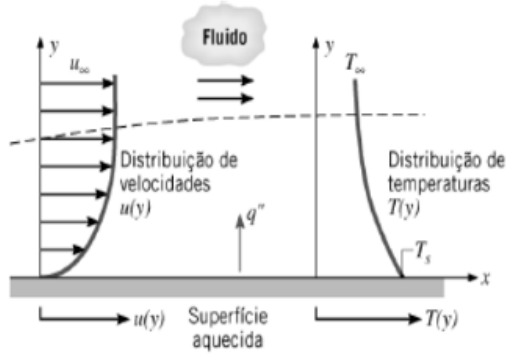


Figura 2: Processo convectivo. Fonte: [1]

- **Radiação:** energia emitida pela matéria devido a mudanças na configuração de seus elétrons e transportadas por ondas eletromagnéticas. Toda matéria a uma temperatura não nula emite energia por radiação. A transferência de calor por radiação entre uma superfície e um fluido, caracteriza-se pela saída de energia devido à emissão

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4, \quad (5)$$

onde  $E$  é o poder emissivo,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$  é a constante de Boltzmann e  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  é a emissividade da superfície, e pela absorção de energia devido à irradiação

$$G_{abs} = \alpha G, \quad (6)$$

onde  $G_{abs}$  é a taxa de energia radiante absorvida por unidade de área da superfície (dada em  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ),  $0 \leq \alpha \leq 1$  é a absortividade e  $G$  é a irradiação (dada em  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ). A figura 3 mostra o processo de radiação em que uma superfície troca calor com o ambiente.

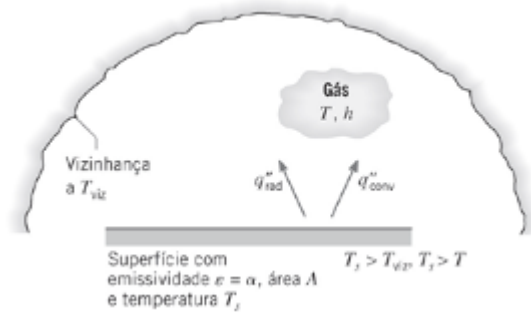


Figura 3: Processo de radiação. Fonte: [1]

Quando a superfície está exposta a uma vizinhança com dimensões consideravelmente maiores, podemos reescrever a equação 6 como:

$$G = \sigma T_{viz}^4, \quad (7)$$

ou seja, como se o ambiente se comportasse como um corpo negro. Nessas condições podemos escrever o fluxo líquido de radiação para uma superfície:

$$q''_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4), \quad (8)$$

em que  $\xi$  é a emissividade da superfície e  $0 \leq \xi \leq 1$ . A emissividade está relacionada com o fato do corpo não emitir tanta energia como o corpo negro por radiação.

Importante ressaltar que condução e convecção necessitam de meios materiais porém a radiação não.

## 2. Balanço energético

Da aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica, temos que a energia acumulada em um determinado volume de controle em um intervalo de tempo, deve ser igual a diferença da energia que entra e que sai deste volume. No entanto, para o estudo de transferência de calor é mais interessante focar nas energias

térmica e mecânica e, a Primeira Lei nos dá a quantidade de energia total envolvida no processo (inclui-se a energia interna). Por exemplo, energia química e elétrica não são interessantes para análise dos processos de transferência que serão analisados. Portanto, vamos considerar que estes outros tipos de energia geram energia térmica e mecânica. Dessa forma, a aplicação da Primeira Lei resulta no seguinte balanço:

$$E_{acumulada} = E_{entra} - E_{sai} - E_{gerada}. \quad (9)$$

Podemos escrever a equação 9 em termos de taxa:

$$\dot{E}_{acumulada} = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sai} - \dot{E}_{gerada}. \quad (10)$$

Escolhendo-se as superfícies do corpo em estudo como volume de controle, a energia acumulada e gerada acabam por se tornar irrelevantes. Logo,

$$E_{entra} - E_{sai} = 0. \quad (11)$$

### 3. Exercícios

Estes exercícios foram retirados de [1].

- 25 **Exercício 1.** *Um circuito integrado (chip) quadrado de silício ( $k = 150/mK$ ) possui lados com  $w = 5mm$  e espessura com  $t = 1mm$ . O circuito é montado em um substrato de tal forma que suas superfícies laterais e inferior estão isoladas termicamente, enquanto a superfície superior encontra-se exposta a um refrigerante. Se  $4W$  estão sendo dissipados nos circuitos montados na superfície*
- 30 *inferior do (chip), qual é a diferença entre as temperaturas das superfícies inferior e superior no estado estacionário?*

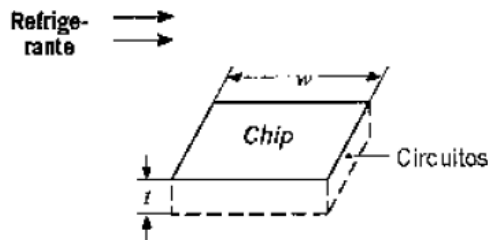


Figura 4: Circuito integrado. Fonte: [1]

**Exercício 2.** Um procedimento comum para medir a velocidades de correntes de ar envolve a inserção de um fio aquecido eletricamente (chamado de anemômetro de fio quente) no escoamento do ar, com eixo do fio orientado perpendicularmente à direção do escoamento. Considera-se que a energia elétrica dissipada no fio seja transferida para o ar por convecção forçada. Consequentemente, para uma corrente elétrica especificada, a temperatura do fio depende do coeficiente de convecção, o qual por sua vez depende da velocidade do ar. Considere um fio com comprimento  $L = 20\text{mm}$  e diâmetro  $D = 0.5\text{mm}$ , para o qual foi determinada uma calibração na forma  $V = 6.25 \times 10^{-5} h^2$ . A velocidade  $V$  e o coeficiente de convecção  $h$  têm unidades de  $\text{m/s}$  e  $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ , respectivamente. Em uma aplicação envolvendo ar numa temperatura  $T_\infty = 26^\circ\text{C}$ , a temperatura superficial do anemômetro é mantida a  $T_s = 75^\circ\text{C}$ , com uma diferença de potencial de  $5\text{V}$  e uma corrente elétrica de  $0.1\text{A}$ . Qual é a velocidade do ar?

**Exercício 3.** Uma tubulação industrial aérea de vapor d'água não isolada termicamente, com  $25\text{m}$  de comprimento e  $100\text{mm}$  de diâmetro, atravessa uma construção cujas paredes e o ar ambiente estão a  $25^\circ\text{C}$ . Vapor pressurizado mantém uma temperatura superficial na tubulação de  $150^\circ\text{C}$  e o coeficiente associado a convecção natural é de  $h = 10\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ . A emissividade da superfície é de  $\varepsilon = 0.8$ .

1. Qual é a taxa de perda de calor na linha de vapor?

2. Sendo o vapor gerado em uma caldeira de fogo direto, operando com uma eficiência de  $\eta = 0.90$ ; e o gás natural cotado a  $C_g = 0.02$  dólar por MJ, qual é o custo anual da perda de calor na linha?

55

**Exercício 4.** Um resistor elétrico está conectado a uma bateria conforme mostrado na figura 5. Após um curto período em condições transientes, o resistor atinge uma temperatura de equilíbrio de  $95^\circ\text{C}$ , aproximadamente uniforme. A bateria e os fios condutores, permanecem à temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$ . Despreze a resistência elétrica dos fios condutores.

60

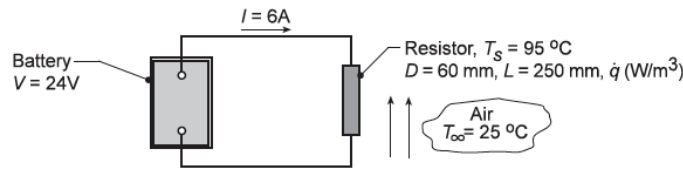


Figura 5: Esquema do circuito elétrico. Fonte: [1]

1. Considere o resistor como um sistema ao redor do qual uma superfície de controle é posicionada e a equação 10 é aplicada. Determine os valores correspondentes de  $\dot{E}_{gerada}$ ,  $\dot{E}_{entra}$ ,  $\dot{E}_{sai}$  e  $\dot{E}_{acumulada}$  em W. Se uma superfície de controle for colocada ao redor de todo o sistema, quais são os valores de  $\dot{E}_{gerada}$ ,  $\dot{E}_{entra}$ ,  $\dot{E}_{sai}$  e  $\dot{E}_{acumulada}$ ?
2. Se energia elétrica for dissipada uniformemente no interior do resistor, que é um cilindro com diâmetro  $D = 60\text{mm}$  e comprimento  $L = 250\text{mm}$ , qual é a taxa de geração de calor volumétrica,  $\dot{q}$  em  $\text{W/m}^3$ ?
3. Desprezando a radiação a partir do resistor, qual é o coeficiente convectivo?

65

70

## Referências

- [1] F. P. Incropera, P. DeWitt, Bergamn, Lavine, Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, LTC, 2008.