

Transmissão de Calor – Introdução

P.J. Oliveira

Departamento Engenharia Electromecânica, UBI,
Setembro 2014

Termodinâmica: ciência que estuda a energia, a interacção entre energia e matéria, e os processos de conversão entre as diferentes formas de transferência de energia, sobretudo o calor Q e o trabalho W . Relaciona a quantidades de energia transferidas através da fronteira de um sistema (Q e W) com a variação de energia dentro do sistema. Assenta sobretudo em dois princípios. A 1ª Lei diz que a energia se conserva e a 2ª Lei impõe restrições sobre a direcção de transferência do calor (quente para frio). Matematicamente:

1ª Lei, processo finito: $\Delta U = Q + W$; processo diferencial: $dU = \delta Q + \delta W$ [J]

(Nota: variação de energia interna, $\Delta U = U_2 - U_1$)

2ª Lei, processo finito: $\Delta S \geq \sum_r Q_r / T_r$; processo diferencial: $dS \geq \delta Q_r / T_r$ [J/K]

(Nota: sinal igual, para processo reversível; maior que, para processo irreversível)

(Nota: Q_r e T_r , calor e temperatura do reservatório r ; $Q = \sum_r Q_r$)

Transmissão de Calor: ciência que estuda as transferências de energia sob forma de calor, estando interessada não só na quantidade de calor que é transferida (Q , [J]), mas também na taxa temporal a que essa transferência decorre (\dot{Q} , [W]). Assim, num problema de transmissão de calor o tempo é uma variável importante, distinguindo-se a situação em que uma determinada quantidade de calor se transfere num intervalo de tempo curto daquela em que o mesmo calor demora mais tempo a transferir-se.

Na termodinâmica (clássica) os sistemas em estudo estão em equilíbrio (só assim se podem definir as propriedades de estado do sistema).

Na transmissão de calor os sistemas em estudo estão inerentemente em desequilíbrio: a temperatura tem de variar no espaço para que haja transferência de calor.

Uma forma simplista de distinguir estas duas ciências é considerar que na Termodinâmica o sistema em estudo pode ser visto essencialmente como uma caixa preta (não é preciso saber os pormenores do que está dentro do sistema); na Transmissão de Calor é preciso caracterizar exactamente o sistema (por exemplo, na transferência de calor através de uma parede, precisamos saber exactamente a constituição dos materiais que compõem a parede, e as espessuras de cada camada).

Nas aplicações práticas de Transmissão de Calor pode haver dois objectivos:

1. Maximizar a taxa de transferência de calor (permutadores de calor mais eficientes; superfícies de troca de calor com alhetas; etc.);
2. Minimizar a taxa de transferência de calor (isolamento térmico).

Podem distinguir-se três **modos de transferência de calor**, que muitas vezes aparecem misturados, mas que são descritos separadamente de seguida:

1. **Condução**
2. **Convecção**
3. **Radiação**

1. Condução

Transferência de energia resultante de fenómenos difusivos devidos à propagação de vibrações moleculares, ou outros movimentos a nível atómico, quando moléculas vizinhas interagem entre elas. Este mecanismo requer uma interpretação atómica/molecular da constituição da matéria (apesar da condução de calor em si ser analisada como um fenómeno macroscópico). Incluem-se nas interações acima referidas, as seguintes: a migração de electrões livres, nos metais (que são também bons condutores de electricidade); as vibrações de baixa frequência (fonões) das estruturas reticulares, nos cristais puros (por exemplo, no diamante); os choques aleatórios entre moléculas, nos gases. A condução ocorre no seio de qualquer material, mas é mais intensa nos materiais sólidos, diminuindo de intensidade nos líquidos, e ainda mais nos gasosos (o que se entende, considerando as respectivas estruturas moleculares).

Para que haja condução de calor tem de existir uma diferença de temperaturas, e o fluxo de calor obedece à **lei de Fourier**:

$$\dot{Q} = kA \frac{\Delta T}{L} \quad [\text{W}] \quad \text{ou, em termos locais:} \quad \vec{q} = -k \vec{\nabla} T \quad [\text{W/m}^2]$$

\dot{Q} - taxa de transferência de calor (potência térmica) [W];

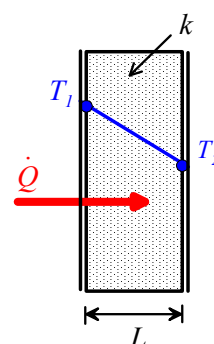
k - condutibilidade térmica [W/m K];

A - área da superfície transversal através da qual se dá a transferência de calor [m²];

$\Delta T = T_1 - T_2$ - diferença entre as temperaturas aplicadas a cada face [K];

L - distância entre as duas superfícies, ou espessura do meio [m];

\vec{q} - vector fluxo de calor, cuja magnitude é designada $\dot{q} = \dot{Q} / A$ [W/m²].



A condutibilidade térmica é uma propriedade física do material, definida como a quantidade de energia térmica transferida por unidade de área e por unidade de tempo, devido à condução de calor através de uma fatia de material com espessura unitária, quando se aplica uma diferença de temperatura de 1°C entre cada face.

Tabela 1 – Condutibilidades Térmicas Típicas

| Material | k [W/m.K] | c_p [J/kg.K] | ρ [kg/m ³] |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|--------------------------------|
| Diamante | 2300 | 509 | 3500 |
| Prata | 429 | 235 | 10 500 |
| Cobre | 401 | 385 | 8933 |
| Ouro | 317 | 129 | 19 300 |
| Alumínio | 237 | 903 | 2702 |
| Ferro | 80.2 | 447 | 7870 |
| Mercúrio (l) | 8.54 | 139 | 13 562 |
| Vidro | 0.78 | 750 | 2500 |
| Tijolo | 0.72 | 835 | 1920 |
| Água (l) | 0.613 | 4177 | 997 |
| Pele (humana) | 0.37 | | |
| Madeira (carvalho) | 0.17 | 2385 | 545 |
| Hélio (g) | 0.152 | 5197 | 0.163 |
| Borracha (mole) | 0.13 | 2010 | 1100 |
| Fibra vidro | 0.043 | 835 | 16 |
| Ar (g) | 0.026 | 1005 | 1.177 |
| Poliuretano (espuma rígida) | 0.026 | 1045 | 70 |
| Superisolante | 2×10^{-5} | | |

2. Convecção

Transporte de energia devido ao movimento (macroscópico) do meio. Ocorre dentro de fluidos (líquidos ou gases) que se deformam e cujos elementos (macroscópicos) de fluido se movem relativamente uns aos outros, segundo um determinado campo de velocidades \vec{v} [m/s]. O fluxo convectivo da energia interna é expresso localmente como:

$$\vec{q}_c = \rho \vec{v} u \quad [\text{W/m}^2]$$

em que:

ρ [kg/m³] - massa volúmica do fluido;

u [J/kg] - energia interna específica;

U [J] - energia interna [J], com $u = U / m$.

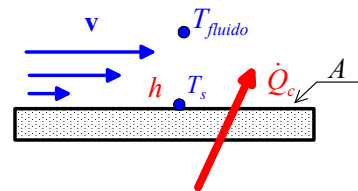
Um problema com convecção é mais complicado do que um problema que envolva unicamente condução de calor, pois requer o conhecimento do campo de velocidades (que pode depender, por sua vez, do campo de temperaturas): mecânica dos fluidos. As equações diferenciais fundamentais que governam o transporte convectivo são muito mais complicadas do que a equação que governa o transporte por condução. Por isso recorre-se frequentemente a expressões empíricas que fornecem o coeficiente de transmissão de calor por convecção, h , definido pela Lei de Newton:

Lei de Newton do arrefecimento: $\dot{Q}_c = Ah(T_s - T_\infty)$ [W]

h - coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m² K], ou coeficiente convectivo (por vezes indica-se h_c para ficar claro que é devido à convecção); depende da geometria e das propriedades do fluido.

T_s - temperatura da superfície [K];

T_∞ - temperatura do fluido longe da superfície [K].



Muitas vezes a convecção é entendida como uma forma de transferência de calor mista, entre uma parede sólida e um fluido circundante, com condução de calor através do sólido até à interface sólido/fluido, seguida por condução, ainda, entre a superfície e a lâmina de fluido estagnado adjacente (não havendo movimento, é condução através do fluido), e finalmente convecção por movimento relativo entre elementos (porções macroscópicas) de fluido, que se deslocam a velocidades diferentes, promovendo o transporte de energia térmica.

O movimento do fluido pode ser produzido por uma força exterior ao meio (por exemplo, uma bomba hidráulica que faz fluir água ao longo de um tubo), ou por diferenças de temperatura entre elementos do próprio meio fluido que irão, por sua vez, induzir diferenças de massa volúmica. Elementos de fluido com temperatura mais elevada tendem a subir por impulsão, e porções de fluido mais frio tendem a descer, gerando-se assim um movimento do fluido sem que seja necessária uma «força motriz» externa. Ao primeiro caso, chamamos **convecção forçada**, e ao segundo **convecção livre** (ou natural):

- **Convecção forçada:** movimento devido ao efeito de uma bomba, um ventilador, ou outra força motriz externa (com fonte de energia externa);
- **Convecção livre:** movimento devido a diferenças de massa volúmica ρ num campo gravítico g (sem fonte de energia externa).

O coeficiente convectivo varia consoante se trate de um fluido gasoso ou líquido, aumentando quando a convecção é forçada comparativamente à livre. Quando a transferência de calor se dá para um fluido que muda de fase (condensação ou ebulição), os valores do coeficiente convectivo tornam-se extremamente elevados. A Tabela 2 apresenta valores típicos para cada caso.

Tabela 2 – Valores típicos de coeficiente convectivo

| Tipo de Convecção | h [W/m ² K] |
|-------------------------|--------------------------|
| Livre, gases | 2 – 25 |
| Livre, líquidos | 10 – 1000 |
| Forçada, gases | 25 – 250 |
| Forçada, líquidos | 50 – 20 000 |
| Evaporação; Condensação | 2500 – 100 000 |

3. Radiação

Propagação de energia por intermédio de ondas electromagnéticas, emitidas sempre que os átomos que compõem um corpo material passam de um estado de não equilíbrio para um estado de equilíbrio (mecânica quântica). Como qualquer onda, a radiação é caracterizada por: comprimento de onda (λ); frequência (ν); e velocidade de propagação (c). Tem-se $\lambda = cT = c/\nu$ (o período T é o inverso da frequência), e a velocidade de propagação da radiação num meio qualquer está relacionada com a velocidade da luz no vácuo (uma constante universal) por $c = c_0/n$ (n - índice de refração do meio; $c_0 \cong 300\,000\text{ km/s}$). A radiação térmica, emitida por qualquer corpo cuja temperatura seja superior a 0 K, corresponde à radiação na faixa de comprimentos de onda $\lambda = 0.1$ a $100\text{ }\mu\text{m}$. A radiação visível tem $\lambda = 0.40$ a $0.76\text{ }\mu\text{m}$ (do violeta, pequeno comprimento de onda e alta frequência, ao vermelho, maior comprimento de onda e baixa frequência), e corresponde a cerca de metade do espectro da radiação solar, que vai de $\lambda = 0.1\text{ }\mu\text{m}$ (no ultravioleta, UV) a $3\text{ }\mu\text{m}$ (no infravermelho, IV).

A radiação térmica depende da temperatura do corpo que a emite. Desta forma, o mecanismo de emissão estará relacionado com o movimento de vibração e rotação das moléculas, átomos e electrões que compõem o material (a agitação térmica aleatória das partículas). A radiação térmica só é visível quando a temperatura se torna superior a cerca de 800 K; um corpo aquecido começa a emitir radiação vermelha quando a temperatura é 1000 K.

A radiação ocorre mesmo através do vácuo (isto é, ao contrário da condução e da convecção, não é necessário um meio material, sólido ou fluido, para que se dê a transferência de energia). Uma outra diferença é que as equações que governam a transferência de energia por radiação são do tipo *integral*, enquanto as equações da condução e convecção são *diferenciais*.

A **lei de Stefan-Boltzmann** da radiação diz que o fluxo de energia radiante emitido por um corpo negro (corpo ideal que radia toda a energia que recebe) é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo:

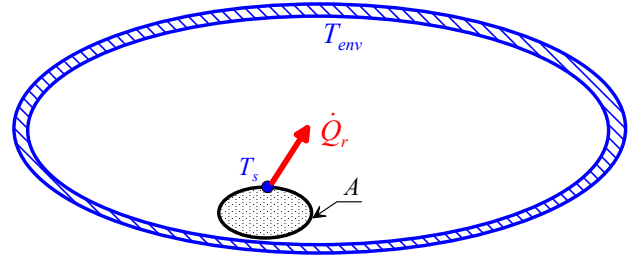
$$\dot{q}_r = \sigma T^4 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

em que $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \text{ K}^4\text{]}$ é a constante de Stefan-Boltzmann. Importante: T deve estar em kelvin.

Para um tipo de corpo não ideal, designado por corpo cinzento, o valor do fluxo de calor trocado por radiação é reduzido por um coeficiente empírico, a emissividade ε :

$$\dot{q}_r = \varepsilon \sigma T^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \text{com } 0 \leq \varepsilon \leq 1.$$

O valor da emissividade é dado em Tabelas. Desta forma a taxa de calor trocado por radiação entre um corpo cinzento, cuja superfície A está à temperatura T_s , e um meio envolvente, muito maior, à temperatura T_{env} , é:



$$\dot{Q}_r = A \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{env}^4) \text{ [W]}$$

Em muitas situações a transferência de calor faz-se simultaneamente por convecção (livre) e radiação, sendo útil definir um coeficiente equivalente de radiação. Este é obtido da equação anterior, escrevendo:

$$\dot{q}_r = \underbrace{\left[\varepsilon \sigma (T_s^2 + T_{env}^2) (T_s + T_{env}) \right]}_{h_r} (T_s - T_{env}) \text{ [W/m}^2\text{]}$$

ou: $\dot{q}_r = h_r (T_s - T_{env})$

com: $h_r = \varepsilon \sigma (T_s^2 + T_{env}^2) (T_s + T_{env}) \approx 4 \varepsilon \sigma T_s^3 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}.$

O fluxo de calor total, devido a convecção e radiação, será dado por:

$$\dot{q} = \dot{q}_c + \dot{q}_r = h_{tot} (T_s - T_{env}) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \text{com } h_{tot} = h_c + h_r \text{ [W/m}^2 \text{ K]}.$$

Resumo:

Tabela 3 – Características essenciais dos modos de transferência de calor

| Modo de transferência | Fluxo de calor $\dot{q} = \dot{Q} / A \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$ | Mecanismo |
|-----------------------|---|---|
| Condução | $k(T_1 - T_2) / L$ | Interacções microscópicas, molécula a molécula (difusão) |
| Convecção | $h(T_1 - T_2)$ | Movimento relativo macroscópico de elementos de fluido |
| Radiação | $\sigma \varepsilon (T_1^4 - T_2^4)$ | Propagação (no vazio, ou num meio) de ondas electromagnéticas (ou fotões) |

Capítulo 1 – Introdução. Modos de Transferência de Calor

Exercícios:

- 1) Considerar o arrefecimento de 130 °C até 70 °C, durante 20 minutos, de uma esfera de bronze exposta a ar ambiente a 30 °C. A esfera tem 15 cm de diâmetro e as propriedades do material são $k = 111 \text{ W/m.K}$, $\rho = 8520 \text{ kg/m}^3$, e $c_p = 0.38 \text{ kJ/kg.K}$. Calcular: a) Calor transferido; b) Potência calorífica média; c) Fluxo de calor médio na superfície; d) Coeficiente convectivo inicial.
- 2) Transferência de calor em regime permanente entre 2 placas paralelas a 290 K e 150 K, separadas por 2 cm, e com emissividade igual a 1. Fluxo calorífico quando o espaço é constituído por: a) ar; b) vazio; c) isolamento de fibra de vidro; d) superisolamento com condutibilidade térmica 0.00015 W/m.K .
- 3) Um chip de computador dissipa uma potência eléctrica de 3 W para ar a 60 °C. A área superficial é 0.34 cm^2 . a) Calor transferido em 8 h (em kWh); b) Fluxo de calor na superfície.
- 4) Uma lâmpada incandescente esférica com 8 cm de diâmetro consome 150 W de potência eléctrica. O filamento cilíndrico tem 0.5 mm de diâmetro e comprimento 5 cm. a) Fluxo de calor na superfície do filamento; b) Fluxo de calor no bolbo esférico da lâmpada; c) Custo anual para um funcionamento de 8 h/dia e custo de electricidade de 16 c/kWh.
- 5) Arrefecimento de melancia (esfera 35 cm) num frigorífico, de 25 °C a 10 °C. A potência de arrefecimento medida é 200 kJ/h e as propriedades físicas da melancia são semelhantes às da água. a) Fluxo de calor na superfície da melancia; b) tempo necessário para o arrefecimento.
- 6) Uma placa com circuitos lógicos de 15x20 cm tem 120 chips adjacentes em que cada um consome 0.1 W de potência eléctrica. a) Calor dissipado em 10 h (kWh); b) Para uma temperatura máxima de 50 °C e temperatura ambiente 30 °C, qual o coeficiente convectivo de transmissão de calor.