



Transmissão de calor

3º ano

Aula1 ▯ 1. Introdução

Tópicos

- Relação entre termodinâmica e transmissão de calor
- Calor Específico
- Mecanismos Básicos de Transmissão de Calor
- Leis Básicas de Transferência de Calor
- Mecanismo Combinado de Transmissão de Calor
- O Balanço de Energia

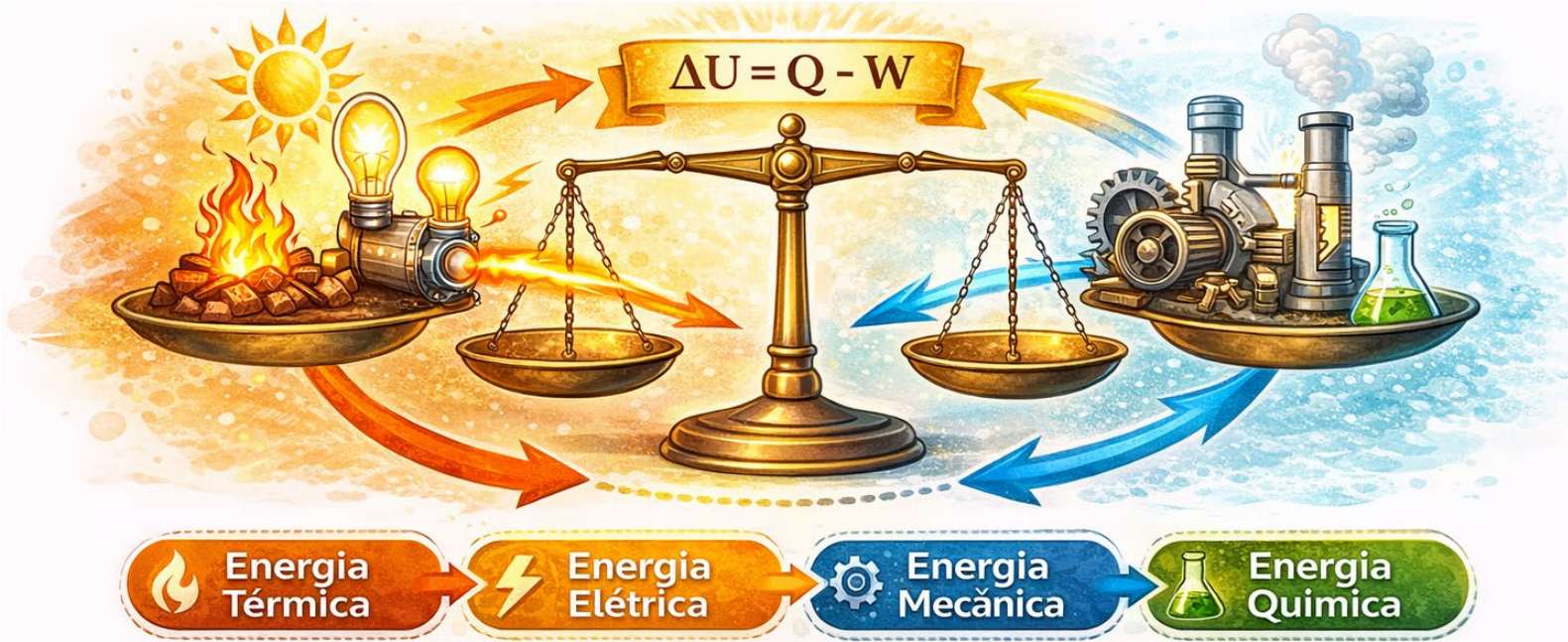
1.1. Relação entre termodinâmica e transmissão de calor

Transmissão de Calor é o processo pelo qual a energia é transportada, sempre que existir um gradiente de temperatura no interior de um sistema ou, quando dois sistemas com diferentes temperaturas são colocados em contacto.



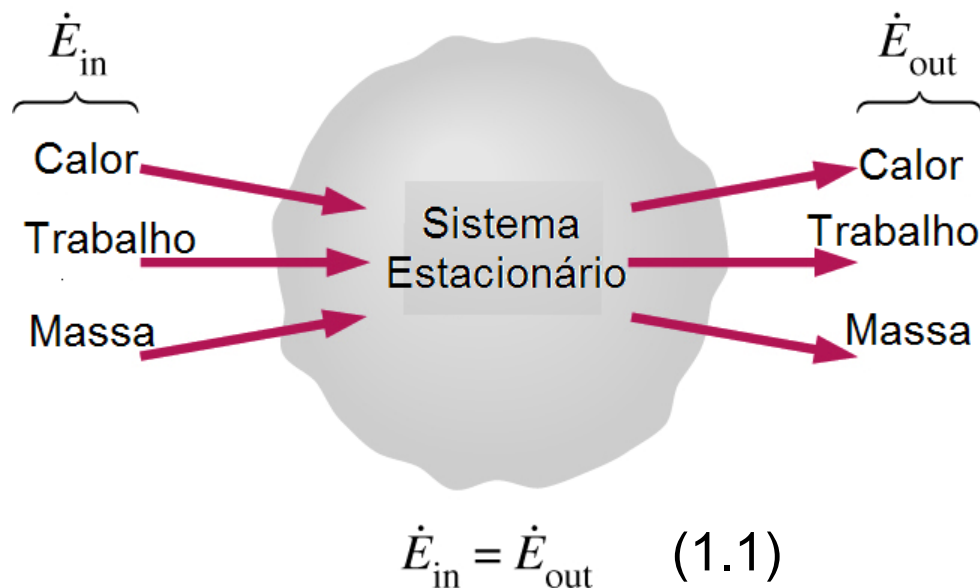
1ª Lei da Termodinâmica

A primeira lei da Termodinâmica preconiza que a energia não pode ser criada ou destruída mas sim transformada de uma forma para outra. Esta lei governa quantitativamente todas as transformações de energia, mas não faz restrições quanto à direcção das referidas transformações.

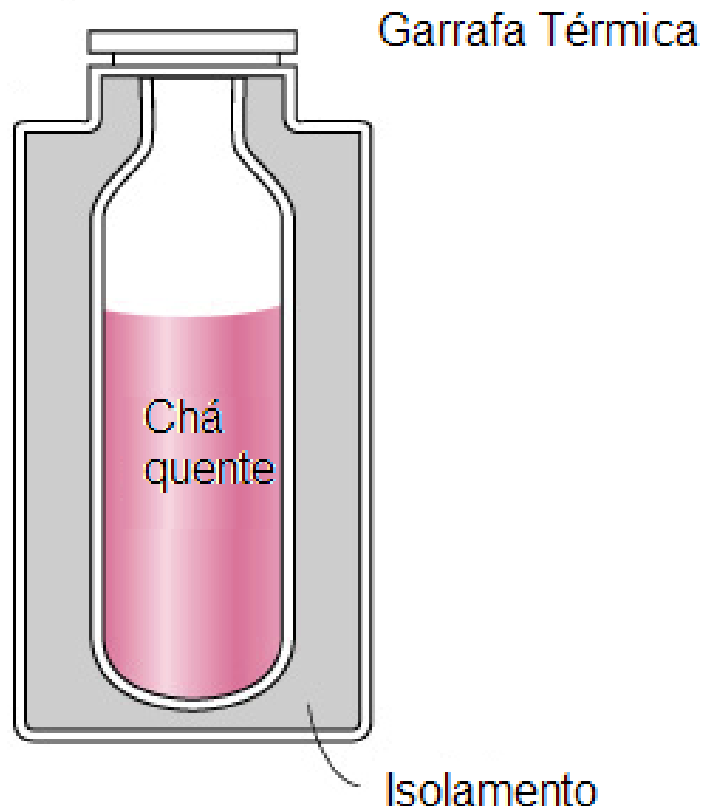


1ª Lei da Termodinâmica

A primeira lei da Termodinâmica também conhecida como **lei de conservação de energia** pode ser enunciada da seguinte forma: “*a variação total da quantidade de energia (aumento ou redução) de um sistema, durante um processo, é igual a diferença entre a energia total que entra e a que sai do sistema durante o processo.*”



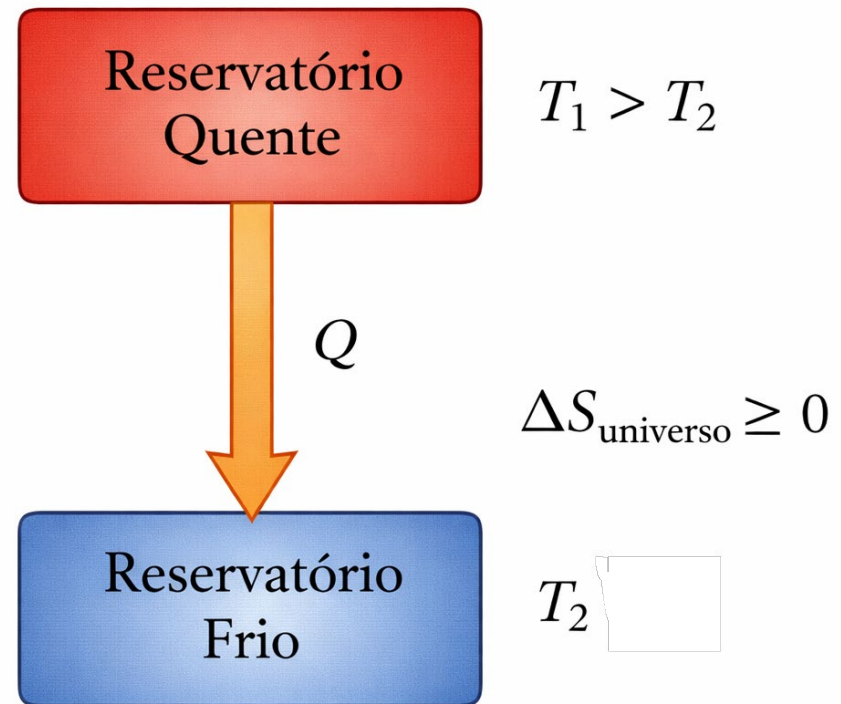
Termodinâmica e Transferência de Calor



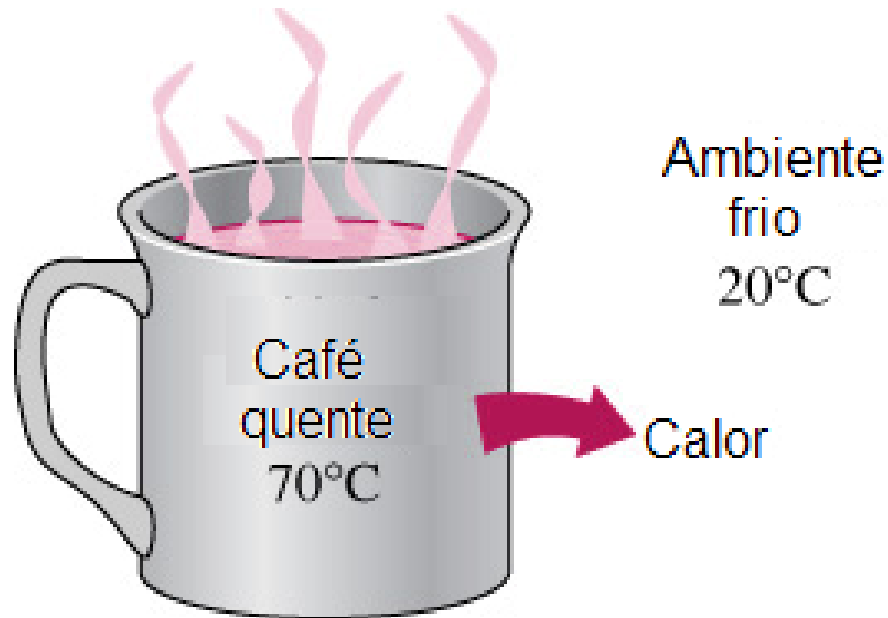
Normalmente interessa saber quanto tempo demora o chá quente, dentro da garrafa térmica, a atingir determinada temperatura, o que não pode ser determinado só pela análise termodinâmica.

2ª Lei da Termodinâmica

A segunda lei da termodinâmica, preconiza que não é possível nenhum processo cujo único resultado seja uma transmissão líquida de calor, de uma região de baixa temperatura para outra de temperatura mais alta.



Termodinâmica e Transferência de Calor



O calor sempre flui de uma região com temperatura mais alta para uma de mais baixa.

Corolário das Duas Leis

A termodinâmica clássica está limitada principalmente ao estudo dos estados de equilíbrio (mecânico, químico e térmico) e sendo assim ela é de pouca ajuda na determinação quantitativa das transformações que ocorrem devido à deficiência ou falta de equilíbrio dos processos de engenharia. Sendo o fluxo de calor resultado de falta de equilíbrio de temperatura, o seu tratamento quantitativo deve ser baseado em outros ramos da ciência.

Corolário das Duas Leis

Termodinâmica Clássica

Estados de equilíbrio:

- Mecânico 
- Químico 
- Térmico 



Estados de equilíbrio:

- Mecânico
- Químico 
- Térmico 



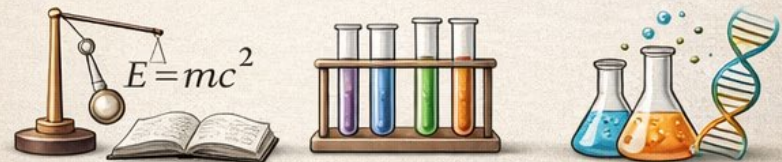
Desequilíbrios em Engenharia

Desequilíbrio de:

- Trabalho 
- Calor 
- Reações Químicas 

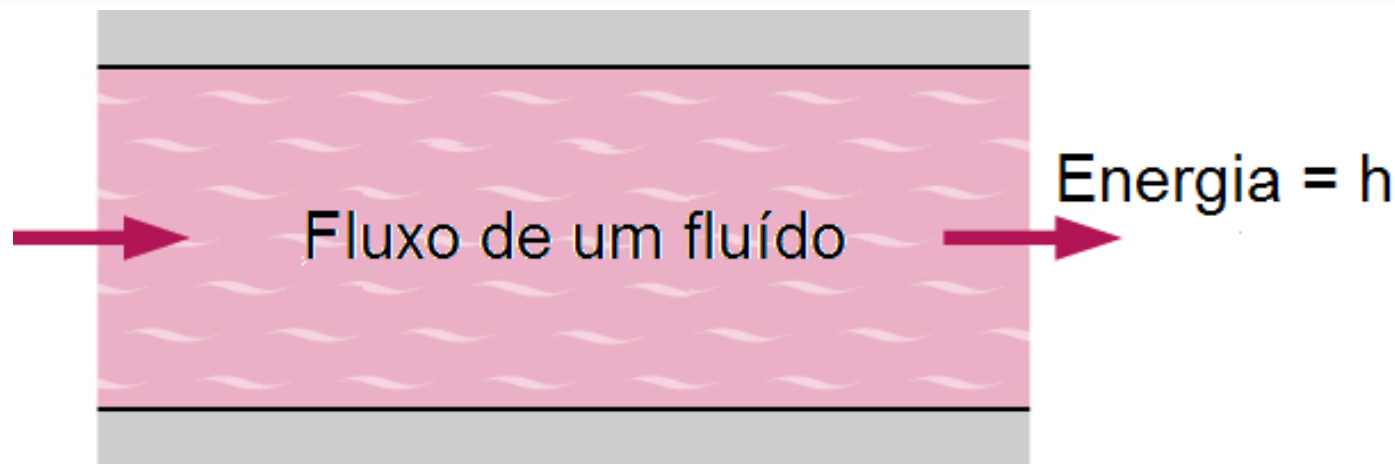


Problemas mais complexos
Outras ciências necessárias



Calor e outras formas de energia

Na análise de sistemas que envolvem fluxos de fluidos, frequentemente encontra-se a combinação das propriedades u e Pv . Por conveniência esta combinação é definida como entalpia, h . Ela é, $h = u + Pv$ onde o termo Pv representa a energia do fluxo do fluido.

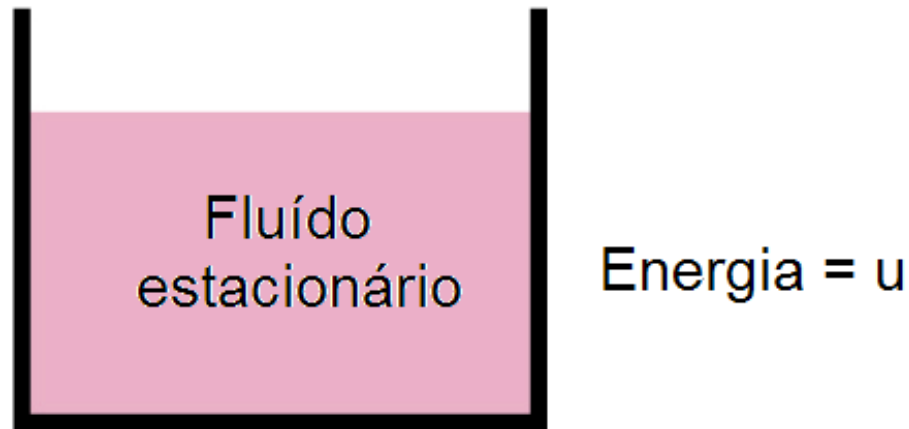


Calor e outras formas de energia

A energia pode-se manifestar de várias formas tais como: térmica, mecânica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química e nuclear. À soma de todas as formas de energia é chamada de *energia total* e é designada pela letra **E**.

As formas de energia, estão relacionadas com a estrutura molecular do sistema e o grau de actividade molecular e é chamado *energia microscópica*.

À soma de todas as formas microscópicas de energia chama-se *energia interna* do sistema e design-se pela letra **U**.



Corolário das Duas Leis

O calor específico é definido como a energia necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em um grau. Ele pode ser:

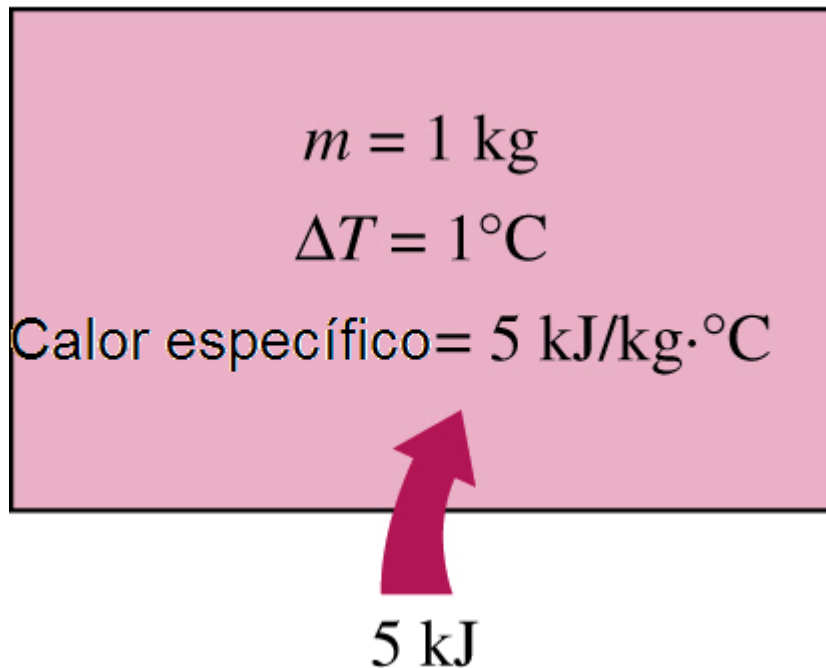
Calor específico à volume constante **C_v** ; e

Calor específico à pressão constante **C_p** .

O calor específico à pressão constante C_p é maior que à volume constante C_v , porque à pressão constante o sistema expande e deve ser fornecida ao sistema a energia para esta expansão.

$$\mathbf{C_p = C_v + R} \quad (1.2)$$

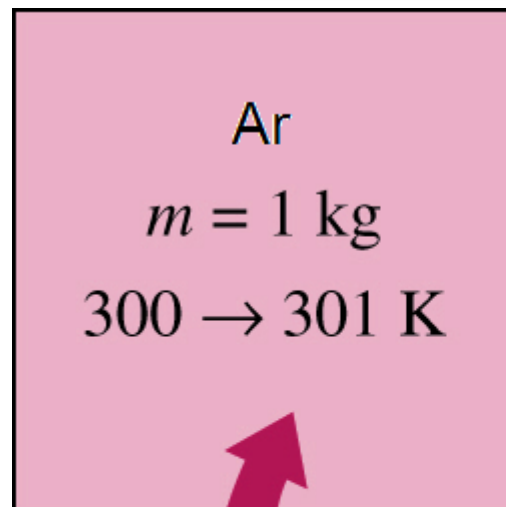
Calor Específico



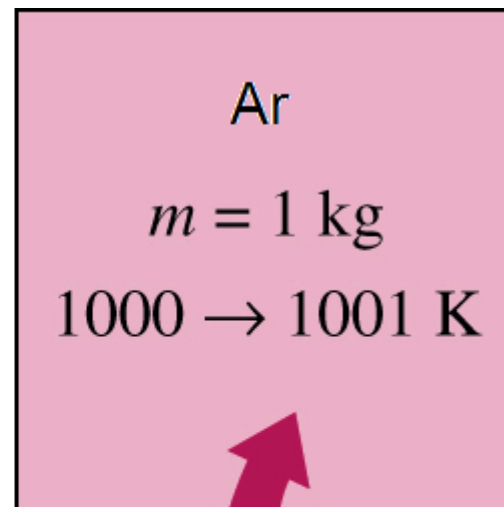
O calor específico é a energia requerida para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa de determinada substância de um modo específico.

Calor Específico

O calor específico das substâncias varia com a temperatura.

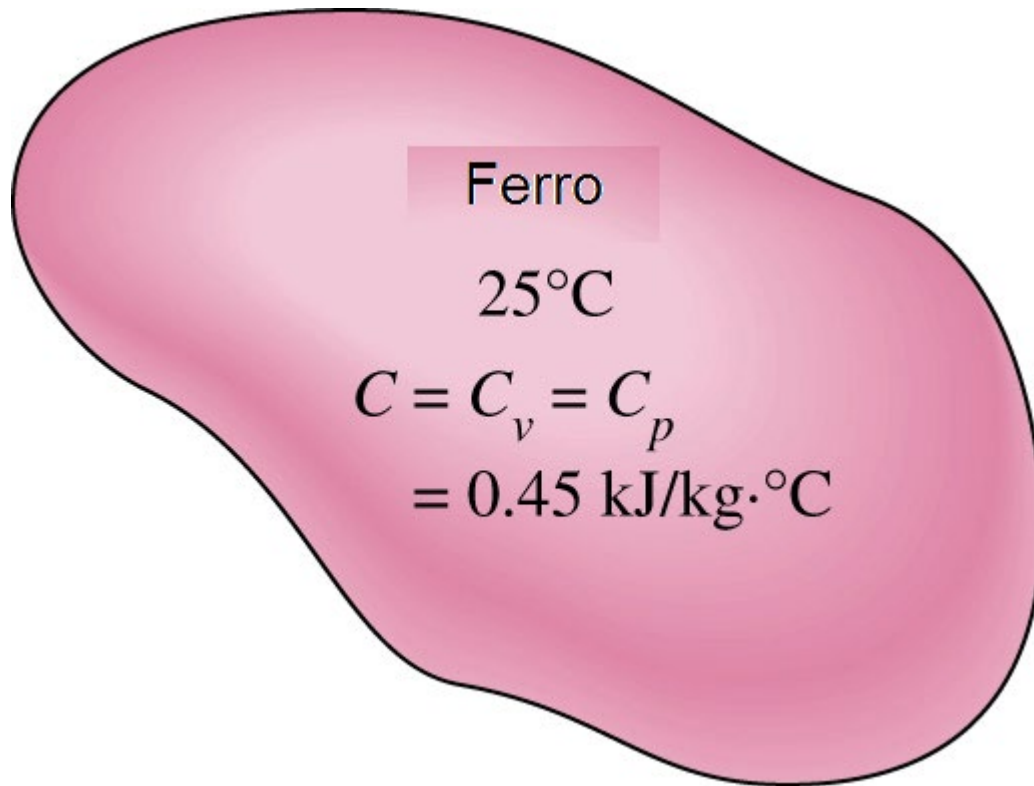


0.718 kJ



0.855 kJ

Calor Específico



O calor específico à pressão constante C_p e à volume constante C_v de uma substância incompressível, são idênticos e designam-se por C .

1.2 Mecanismos Básicos de Transmissão de Calor

Existem três modos básicos de transmissão de calor que são:

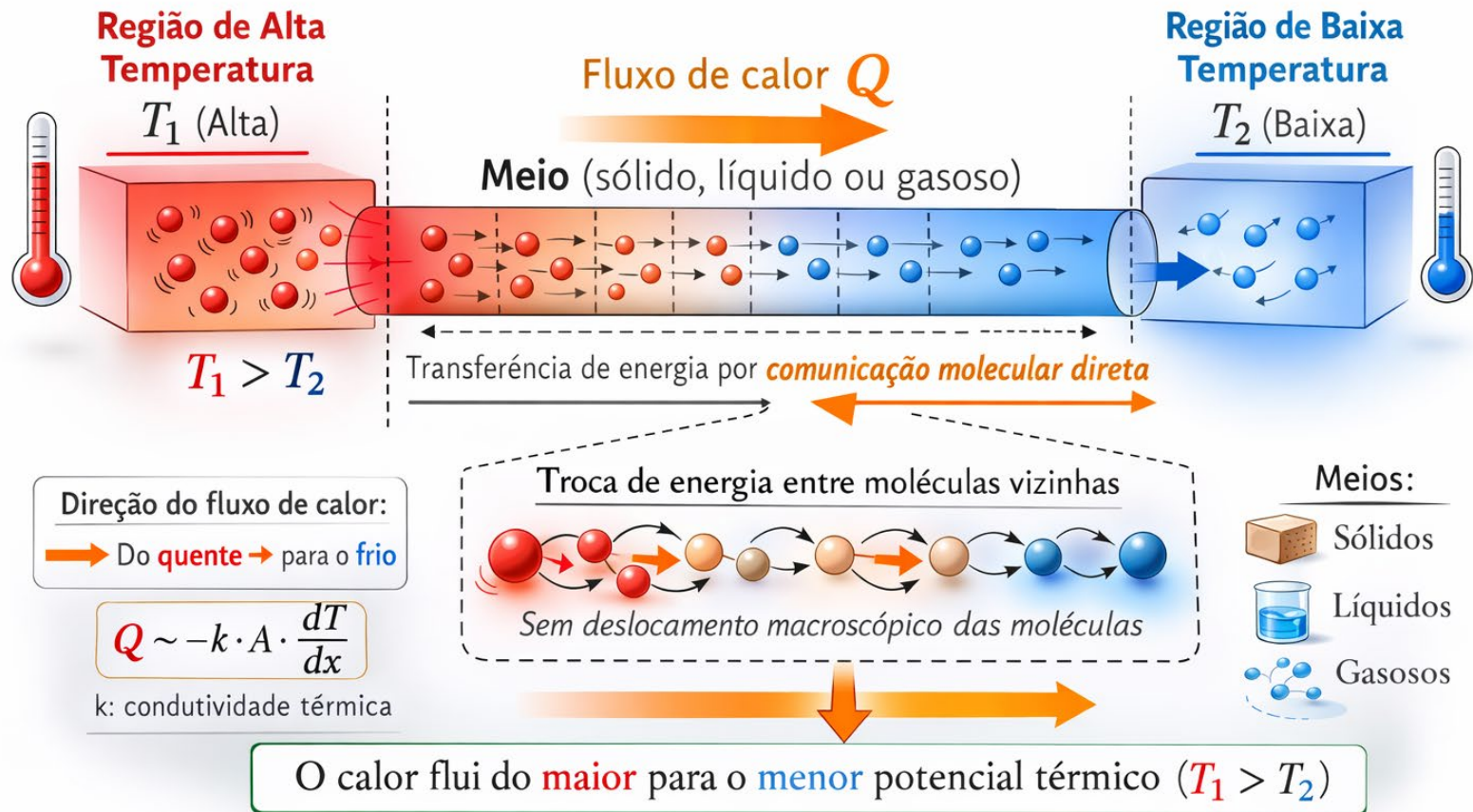
- Condução;
- Convecção; e
- Radiação.

Todos os modos de transferência de calor requerem que haja gradiente de temperatura, e em todos eles a transferência de calor se faz da temperatura mais alta para a mais baixa.

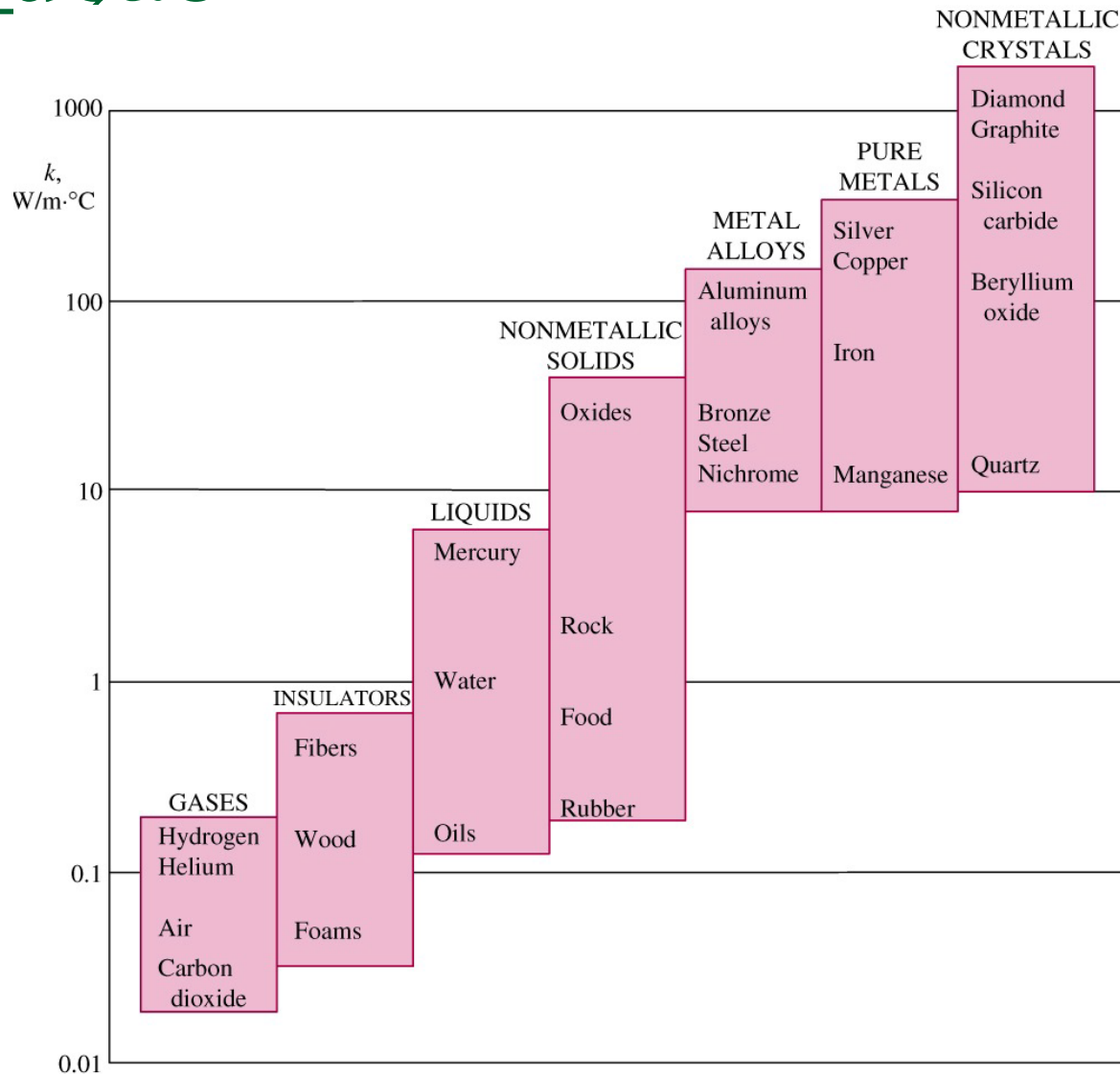
Condução

É um processo pelo qual o calor flui duma região de alta temperatura para outra de baixa temperatura dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contacto físico directo. Na condução a energia é transmitida por meio de comunicação molecular directa, sem apreciáveis deslocamentos das moléculas.

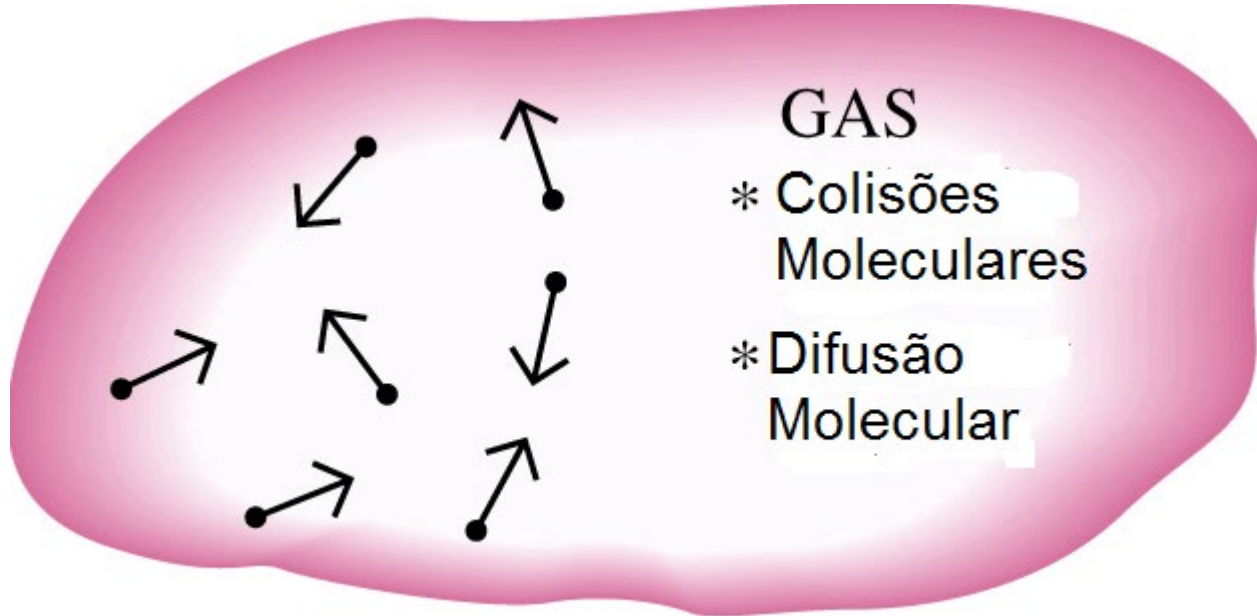
Condução



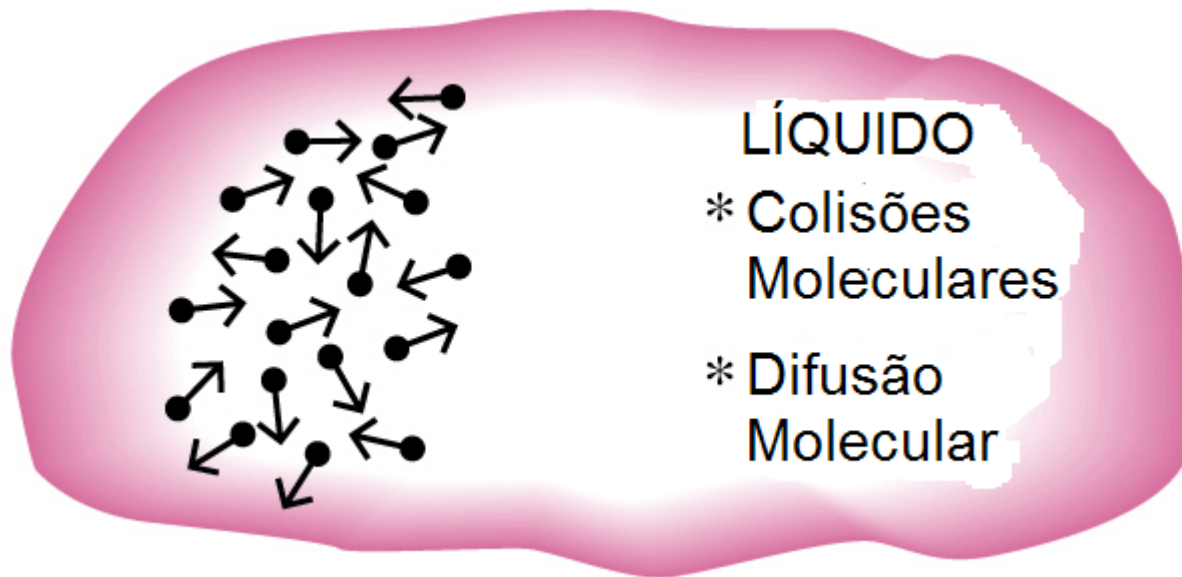
Condução



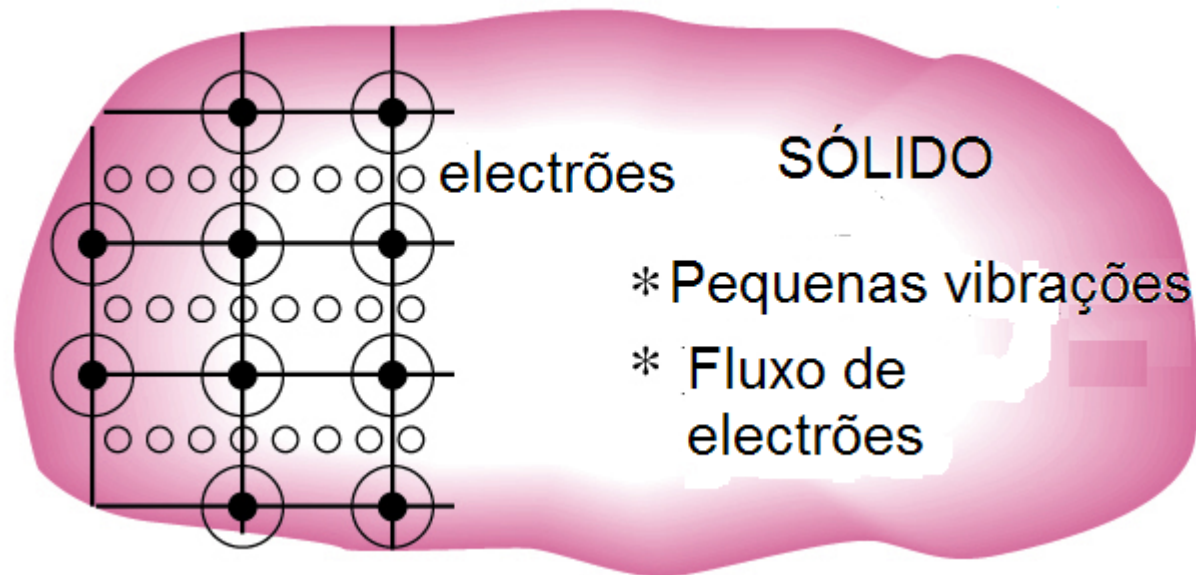
Condução



Condução



Condução

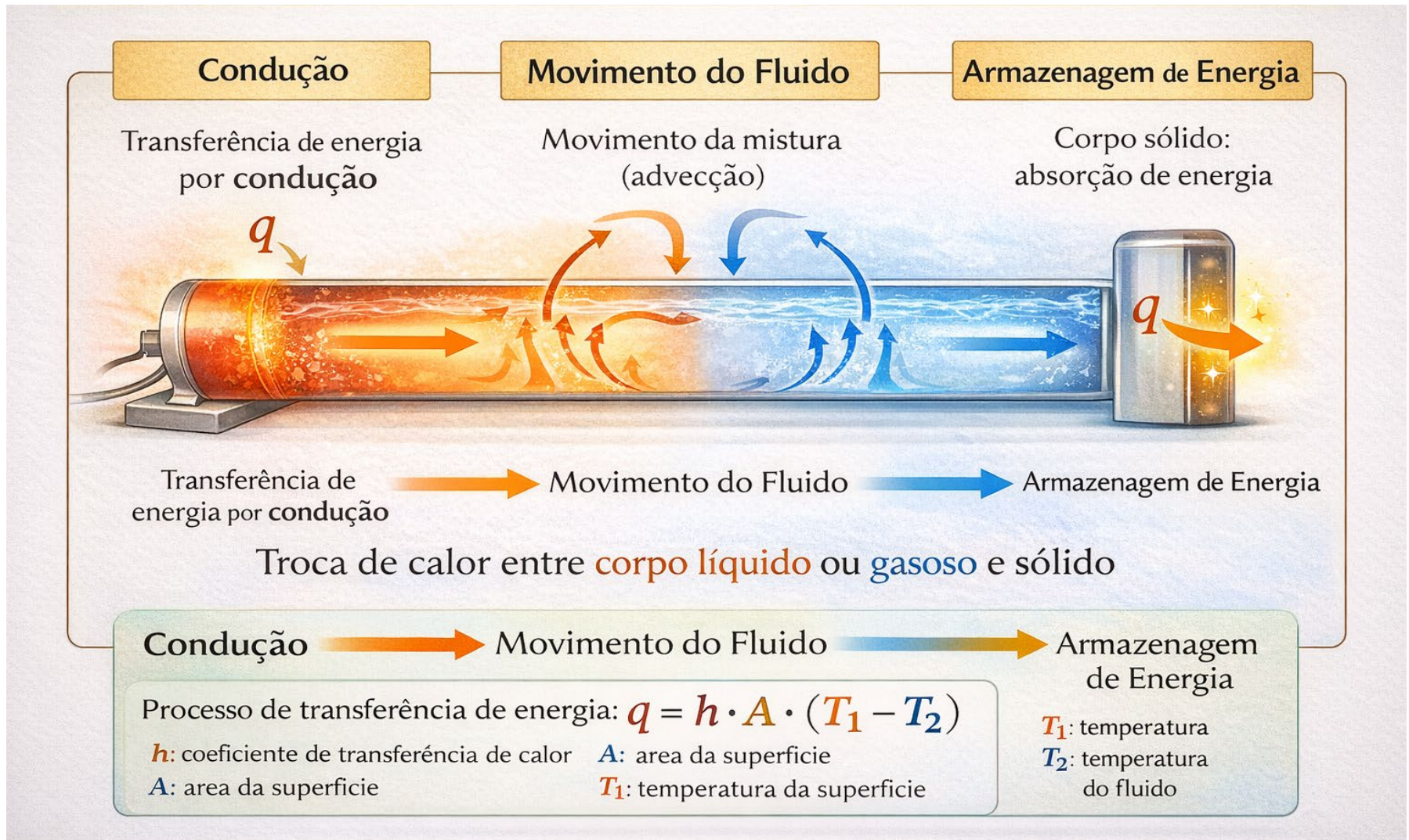


Convecção

É um processo de transferência de energia pela acção combinada da condução de calor e movimento da mistura e armazenagem de energia.

Na prática a convecção subentende-se o processo de troca de calor entre corpo líquido ou gasoso e sólido.

Convecção



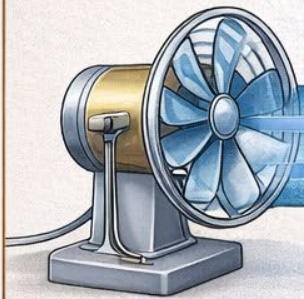
Convecção

A causa do movimento do fluido pode ser externa em consequência dum trabalho mecânico (ex.: com ajuda de um ventilador ou bomba); neste caso tem-se **convecção forçada**, ou o movimento resulta espontaneamente, quando $t = t_1 - t_2$ causa uma diferença de massa específica dum fluido. Este fenómeno chama-se **convecção natural**.

Convecção

Convecção Forçada

Trabalho mecânico com um ventilador ou bomba

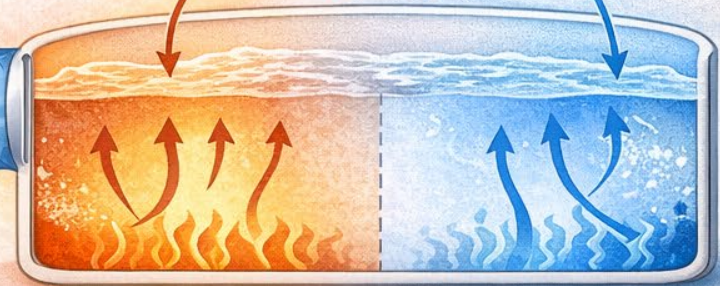


Trabalho mecânico com um ventilador ou bomba

Convecção Forçada

Convecção Natural

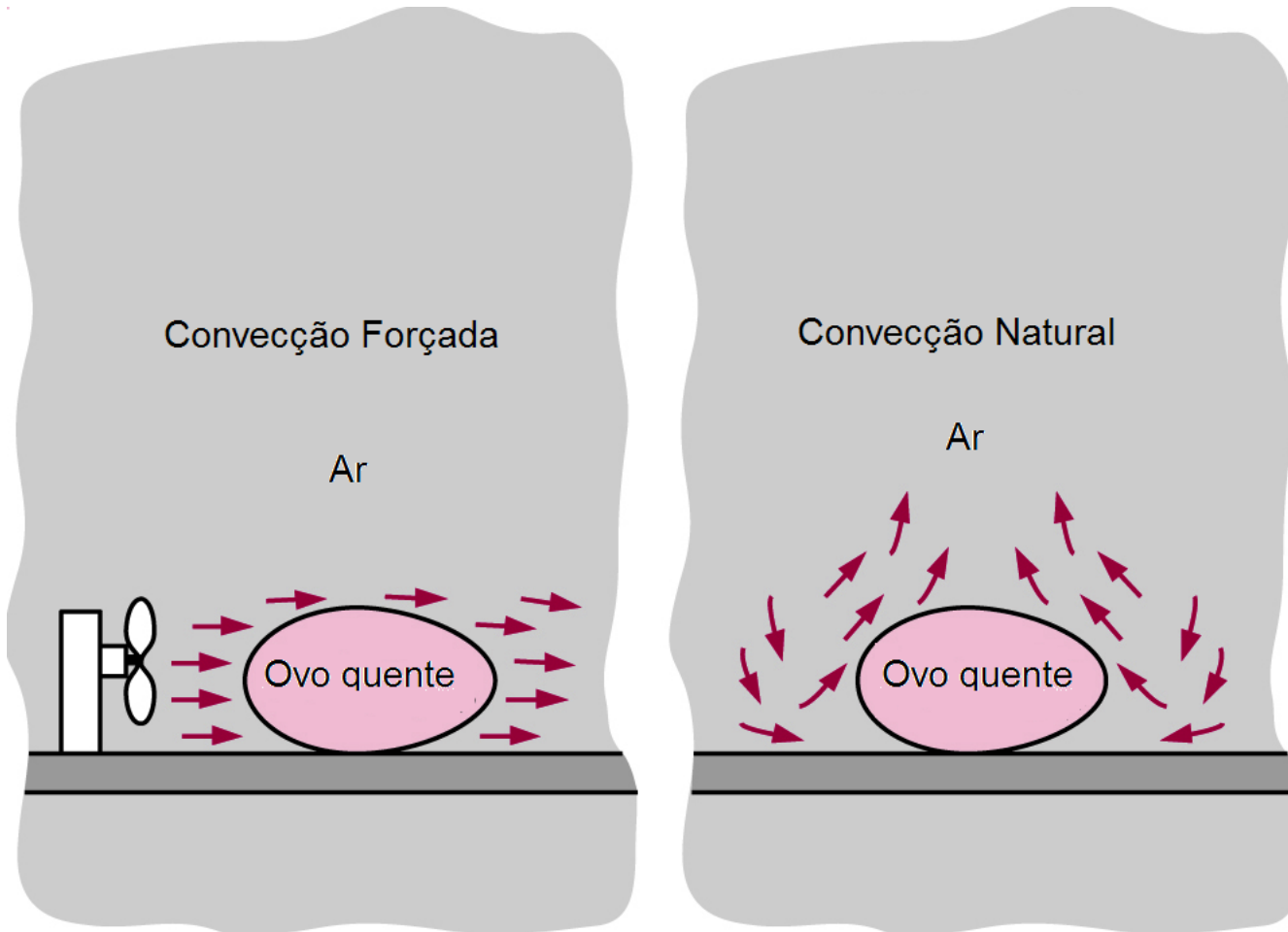
$$T_{\text{quente}} > T_{\text{frio}}$$



$$T_1 \longrightarrow T_2$$

Convecção Natural

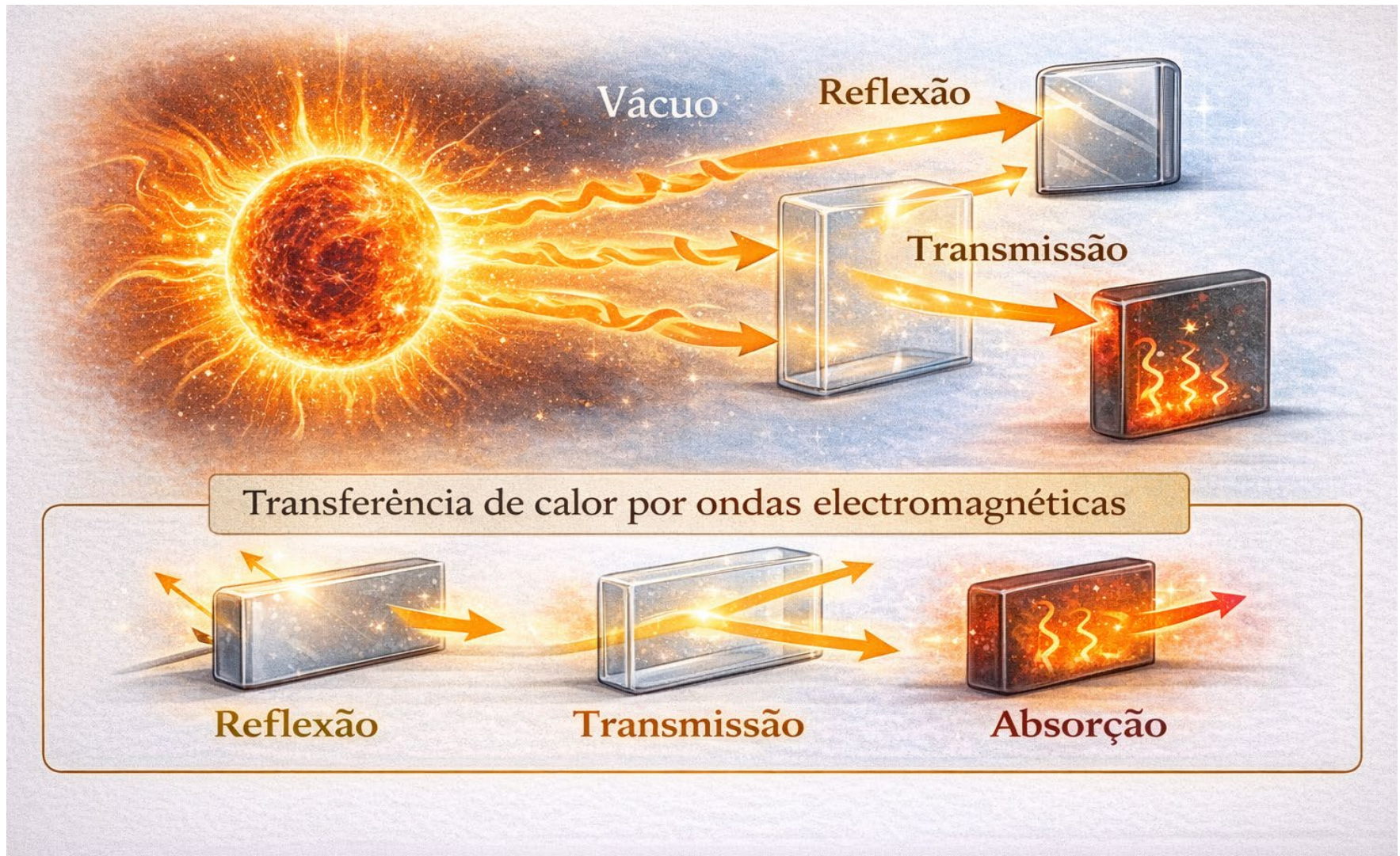
Convecção



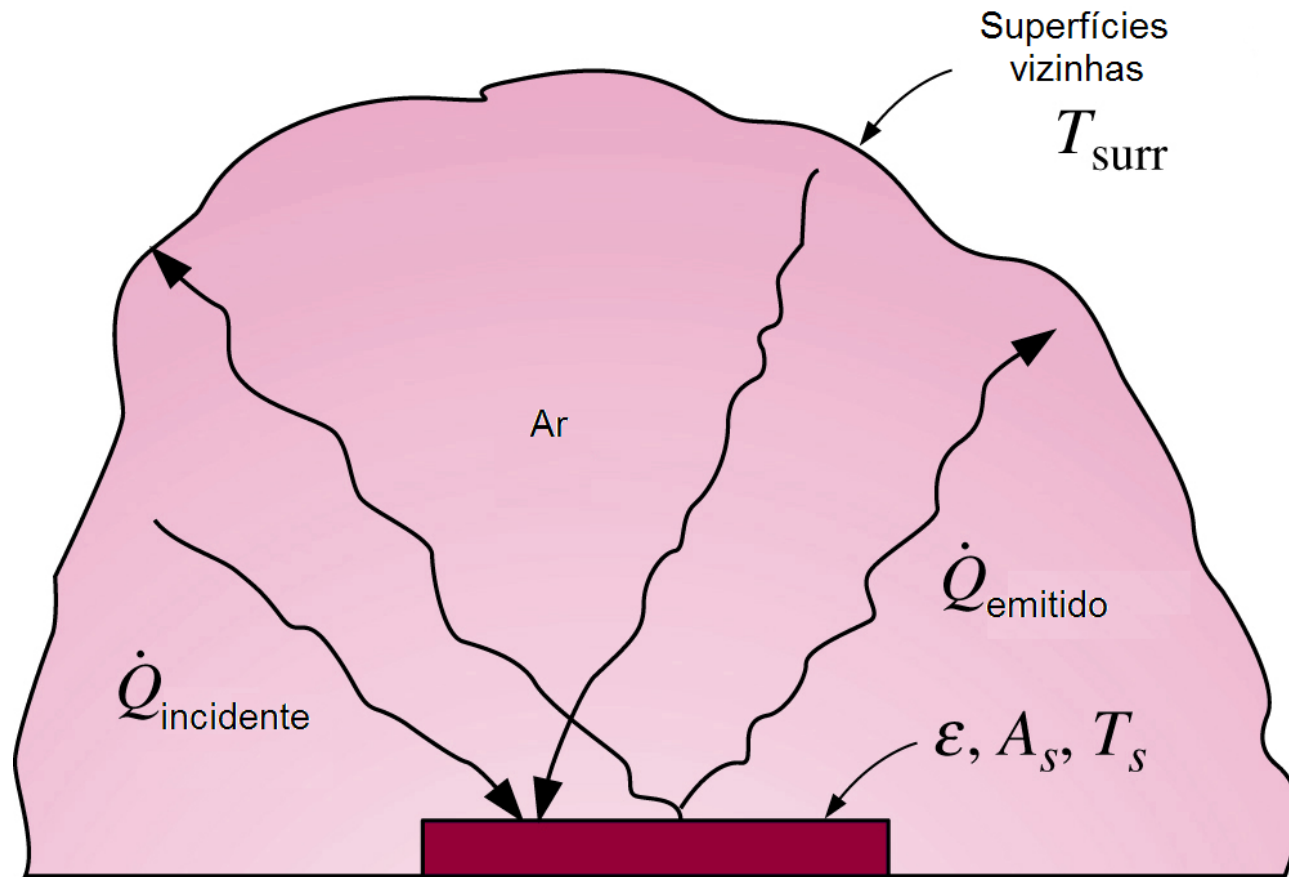
Radiação

É um processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo à alta temperatura, para um de mais baixa, quando tais corpos estão separados no espaço, ainda que exista vácuo entre eles. Um corpo quente emite energia de radiação em todas as direcções. Quando esta energia atinge um outro corpo, uma parte desta pode ser reflectida, outra transmitida e o resto absorvido e transformado em calor. Por outras palavras a radiação é um processo de transmissão de calor por meio de ondas electromagnéticas.

Radiação



Radiação



$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4)$$

1.3 Leis Básicas de Transferência de Calor

As leis básicas de transferência de calor são:

- A Lei de Fourier, que caracteriza a transferência de calor por condução;
- A Lei de Resfriamento de Newton, que determina a quantidade de calor transferido por convecção; e
- A Lei de Stephan–Boltzman, que serve para a determinação do calor transferido por radiação.

1.3.1 Lei de Fourier

A lei de Fourier é a lei básica de transmissão de calor por condução, tendo sido Jean Baptiste Joseph Fourier o primeiro a usa-la explicitamente, num artigo sobre transferência de calor, no ano de 1822. Esta lei preconiza que o calor trocado por condução numa certa direcção, é proporcional a área normal à direcção e ao gradiente de temperaturas em tal direcção:



$$Q \propto A \frac{dT}{dx} \quad (1.3)$$

1.3.1 Lei de Fourier

Introduzindo uma constante positiva chamada *Condutividade Térmica*, que é uma propriedade termodinâmica, pode-se escrever:

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1.4)$$

1.3.1 Lei de Fourier

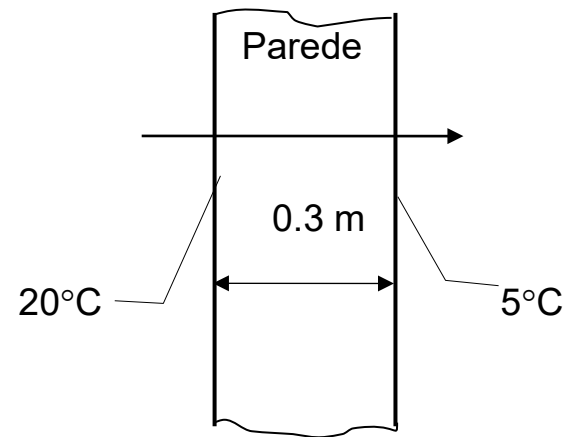
Utilizando o conceito de Fluxo de Calor, que é a taxa de troca de calor por unidade de área $[\text{W}/\text{m}^2]$, tem-se que:

$$\frac{Q}{A} = q = -k \frac{dT}{dx} \quad (1.5)$$

O sinal negativo é posto para garantir que o fluxo de calor seja positivo no sinal positivo de x .

Exemplo 1.1

As superfícies interna e externa de uma parede de 5 x 6 m e 30 cm de espessura e condutividade térmica de $0,69 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ são mantidas às temperaturas de 20°C e 5°C respectivamente. Determine o calor transferido pela parede.



Exemplo 1.1 (Resolução)

Assume-se:

1. Regime permanente pois a temperatura da parede mantém-se constante nos valores especificados.
2. As propriedades térmicas da parede são constantes.

Propriedades: A condutividade térmica da parede é dada e o valor é $k = 0,69 \text{ W/m}\cdot\text{C}$.

Análise: *Sob condições de regime permanente o calor transferido pela parede calcula-se de:*

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{\Delta T}{L} = (0.69 \text{ W/m}\cdot\text{°C})(5 \times 6 \text{ m}^2) \frac{(20 - 5) \text{ °C}}{0.3 \text{ m}} = \mathbf{1035 \text{ W}}$$

Condutividade Térmica

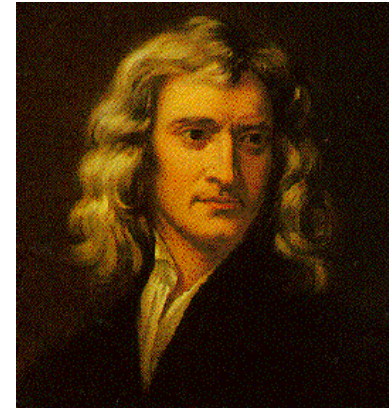
A condutividade térmica é uma propriedade física do material. Ela indica a quantidade de calor que fluirá através duma área unitária se o gradiente de temperatura for unitário. Assim a condutividade térmica k é numericamente igual a quantidade de calor em Joule que passa num segundo através de uma área unitária (1m^2) do corpo, numa queda de temperatura de 1K , sobre o trajecto de um metro (1m) do fluxo de calor.

1.3.2 Lei de Newton (I)

A densidade de fluxo de calor transmitida por unidade de tempo por convecção entre uma superfície e um fluido pode ser calculada pela relação:

$$q = h A_s (T_s - T_\infty) \quad (1.6)$$

Esta relação foi proposta originalmente pelo cientista Inglês Isaac Newton (1701), onde A_s é a área superficial ou de contacto, q é a densidade de fluxo de calor, h é o coeficiente de troca de calor por convecção [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], T_s é a temperatura da superfície e T_∞ é a temperatura do fluido. A temperatura do fluido é em geral tomada num ponto afastado da superfície.



Isaac Newton
(1642-1727)

1.3.2 Lei de Newton (II)

Uma preocupação a ser resolvida é o ponto onde deve ser colocado o termómetro que fará a medição das temperaturas. Para a temperatura T_s é simples uma vez que por definição esta deverá ser a temperatura da superfície. Entretanto no segundo caso, a situação complica-se uma vez que a temperatura próximo da peça quente será maior que longe dela.

A quantidade total de calor transmitida é dada por:

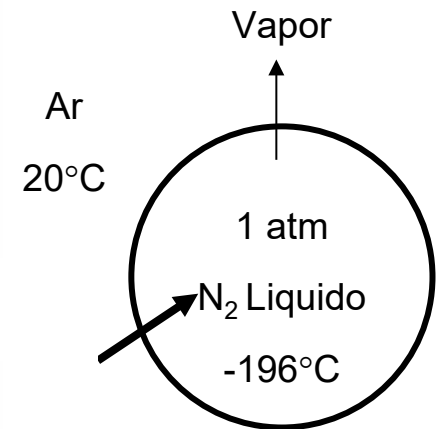
$$Q = q \cdot A \quad [W] \quad (1.7)$$

Exemplo 1.2 (I)

A temperatura de ebulição do nitrogénio a pressão atmosférica ao nível das águas do mar (1 atm) é de -196°C . De aí o nitrogénio ser comumente usado em estudos científicos a baixa temperatura, já que a temperatura do nitrogénio líquido num tanque aberto mantém-se constante a -196°C até o nitrogénio líquido no tanque acabar. Qualquer transferência de calor no tanque resulta na evaporação de algum nitrogénio líquido que tem o calor de vaporização de 198 kJ/kg e a massa específica de 810 kg/m^3 a 1 atmosfera. Considere-se um tanque esférico de 4m de diâmetro inicialmente cheio de nitrogénio líquido a 1 atm e a temperatura de -196°C .

Exemplo 1.2 (II)

Um tanque está exposto ao ar ambiente que se encontra a temperatura de 20°C , com um coeficiente de transmissão de calor de $25 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$. A temperatura do tanque de paredes finas é a mesma do nitrogénio que se encontra no seu interior. Desprezando a transferência de calor por radiação determine a taxa de evaporação do nitrogénio líquido no tanque, como resultado da transferência de calor do ar ambiente.



Exemplo 1.2 (Resolução I)

Assume-se:

1. Regime permanente;
2. As perdas de calor por radiação são desprezadas;
3. O coeficiente de transferência de calor por convecção é constante e uniforme em toda a superfície;
4. A temperatura das paredes do tanque é igual a temperatura do nitrogénio no seu interior.

Propriedades: O calor de vaporização e a massa específica do nitrogénio, são dados a 1 atm e são respectivamente 198 kJ/kg e 810 kg/m³.

Análise: O calor transferido para o tanque calcula-se de:

Exemplo 1.2 (Resolução II)

$$A_s = \pi D^2 = \pi (4 \text{ m})^2 = 50.27 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= hA_s (T_s - T_{\text{air}}) = (25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})(50.27 \text{ m}^2)[20 - (-196)]^\circ\text{C} \\ &= \mathbf{271,430 \text{ W}}\end{aligned}$$

A taxa de evaporação do nitrogénio líquido do tanque determina-se de:

$$\dot{Q} = \dot{m}h_{fg} \longrightarrow \dot{m} = \frac{\dot{Q}}{h_{fg}} = \frac{271.430 \text{ kJ/s}}{198 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{1.37 \text{ kg/s}}$$

1.3.3 Lei de Stephan – Boltzman (I)



Josef Stefan e Ludwig Boltzman(1879)

A quantidade de (calor) energia que deixa a superfície como calor radiante depende da temperatura absoluta e da natureza da superfície.

Um irradiador perfeito ou corpo negro emite energia radiante da sua superfície a razão q_{rad} é dada por:

$$q_{rad} = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.8)$$

Onde σ é uma constante de proporcionalidade chamada constante de Stefan-Boltzman, que tem o valor de $5,675 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

1.3.3 Lei de Stephan – Boltzman (II)

Onde:

A - é a área da superfície em m^2 ;

T_1 - é a temperatura da superfície emissora em Kelvin;

T_2 é a temperatura absoluta do ambiente que troca calor com o corpo dado e ε é a emissividade do corpo dado.

Contudo os corpos reais emitem e absorvem apenas uma percentagem da energia radiante o que se traduz pela expressão:

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon A (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.9)$$

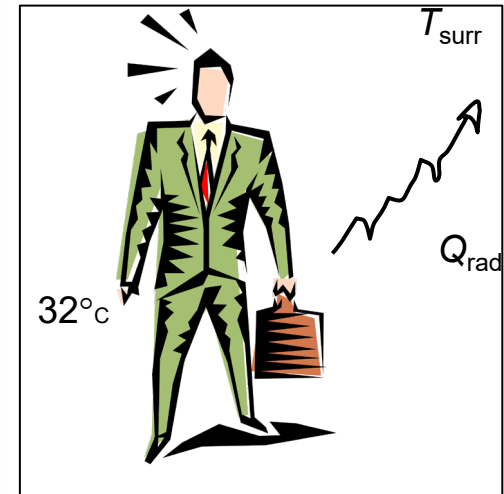
Exemplo 1.3

Considere-se uma pessoa cuja área exposta é de $1,7 \text{ m}^2$, a sua emissividade de 0,7 e a temperatura da sua superfície de 32°C .

Determinar o calor que esta pessoa perde por radiação numa sala grande se esta tiver as paredes a:

300 K;

280 K.



Exemplo 1.3 (Resolução I)

Assume-se:

1. Regime permanente;
2. As perdas de calor por convecção são desprezadas;
3. A emissividade da pessoa considera-se constante em todo o corpo.

Propriedades: A emissividade é considerada constante de 0,7.

Análise: É de notar que o homem está completamente envolvido pela pelas paredes da sala.

Exemplo 1.3 (Resolução II)

(a) $T_{\text{surr}} = 300 \text{ K}$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{rad}} &= \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \\ &= (0.7)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1.7 \text{ m}^2)[(32 + 273)^4 - (300 \text{ K})^4] \text{K}^4 \\ &= \mathbf{37.4 \text{ W}}\end{aligned}$$

(b) $T_{\text{surr}} = 280 \text{ K}$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{rad}} &= \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \\ &= (0.7)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1.7 \text{ m}^2)[(32 + 273)^4 - (280 \text{ K})^4] \text{K}^4 \\ &= \mathbf{169 \text{ W}}\end{aligned}$$

1.4 Mecanismo Combinado de Transmissão de Calor

Até agora considerou-se, separadamente os mecanismos básicos de transmissão de calor (condução, convecção e radiação). Em muitos casos práticos a transferência de calor numa superfície ocorre simultaneamente por convecção para o ar ambiente e por radiação para o meio circundante. Neste caso a perda de calor por unidade de área é dada pela combinação dos dois mecanismos.

$$Q = h(T_s - T_\infty) + \sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (1.10)$$

1.5 O Balanço de Energia (I)

A consideração do balanço de energia, muitas vezes desempenha um papel muito importante na análise de transferência de calor. Se delimitar-se as fronteiras do sistema em consideração, é possível igualar o fluxo de energia que está a ser transferida de ou para esse sistema, ao fluxo de energia que está a ser armazenada dentro do mesmo sistema.

1.5 O Balanço de Energia (II)

Durante a consideração do balanço de energia as designações usadas para os fluxos de energia transferidas ou geradas são as seguintes:

E_{in} - é o fluxo de energia fornecida ao sistema;

E_{out} - é o fluxo de energia que sai do sistema;

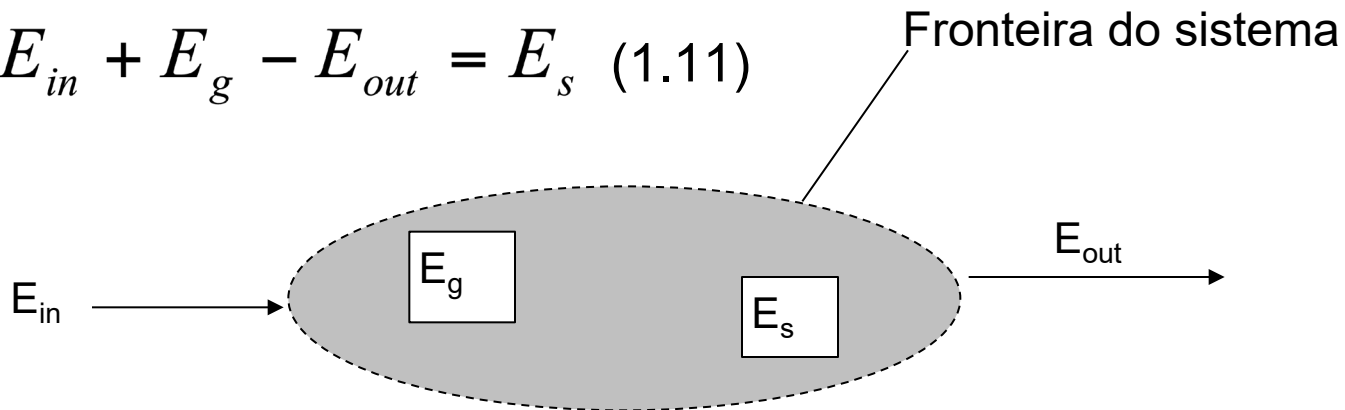
E_g - é o fluxo de energia gerada no interior do sistema;

E_s - é o fluxo de energia que está a ser armazenada no sistema.

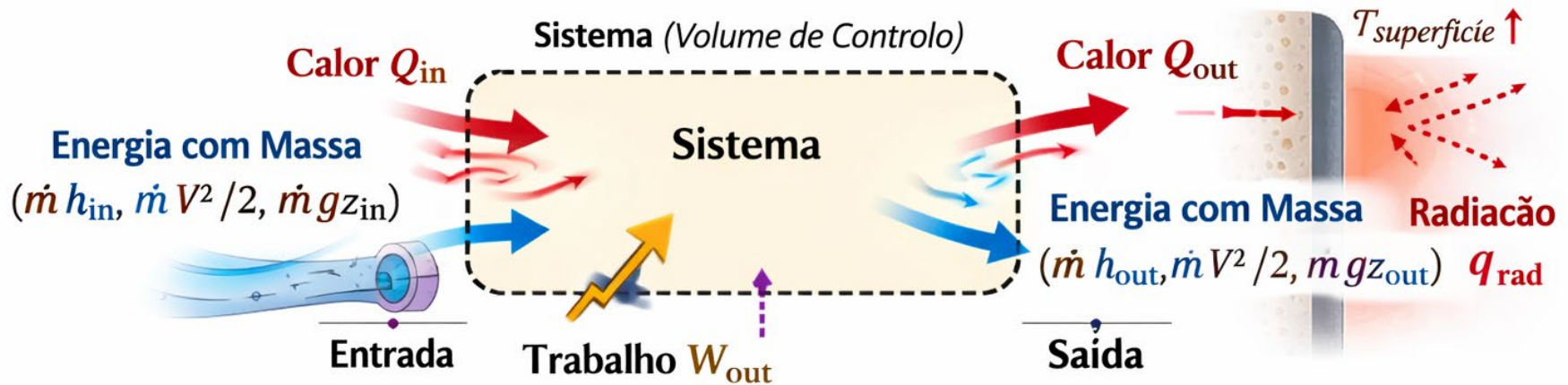
1.5 O Balanço de Energia (III)

O balanço dos fluxos de energia através da fronteira do sistema e as alterações internas que podem ocorrer podem ser expressas numa forma geral como:

$$E_{in} + E_g - E_{out} = E_s \quad (1.11)$$



1.5 O Balanço de Energia (IV)



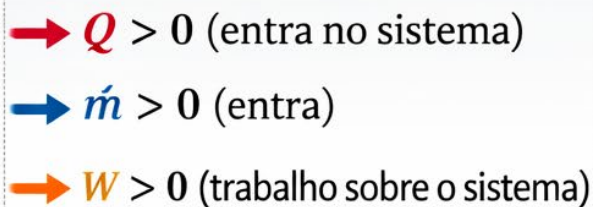
$$Q_{in} + W_{in} + E_{massa,in} = Q_{out} + W_{out} + E_{massa,out} + \Delta E_{armazenada}$$

$$\uparrow - \Delta E_{armazenada} = \text{Energia armazenada } (U, E_{cin}, E_{pot})$$

Modos de Transferência de Calor



Fluxos de Energia



Sistema (Volume de Controlo)

- Fronteira real ou imaginária
- Regime permanente: $\Delta \dot{E} = 0$
- Regime transitório: $\Delta \dot{E} \neq 0$

1.6 Método de Resolução de Problemas Técnicos

A primeira etapa ao aprender-se qualquer ciência é conhecer os fundamentos. A etapa seguinte é dominar os fundamentos, pondo este conhecimento em teste. Isto é feito resolvendo problemas relevantes. A resolução de tais problemas, especialmente complicados, requer uma aproximação sistemática. Usando uma aproximação passo a passo, pode-se reduzir a solução de um problema complicado à resolução de uma série de problemas simples. Ao resolver um problema, recomenda-se usar as seguintes etapas, com zelo, quando possível. Isto ajuda a evitar alguns dos erros comuns associados a resolução de problemas.

Etapa 1: Tradução do problema em suas próprias palavras.



Em suas palavras faça uma descrição sumária do problema, a informação chave dada, e as grandezas a serem encontradas. Isto é certifique-se de que compreende o problema e os objectivos, antes de tentar resolve-lo.

Etapa 2: Esquema



Desenhe um esboço real do sistema físico envolvido e anote a informação relevante na figura. O esboço não tem de ser algo muito elaborado, mas deve assemelhar-se ao sistema real e mostrar as características chave. Indique todas as interações de energia e mássicas com os arredores. Alistar a informação dada no esboço, ajuda a compreender o problema, no seu todo, de uma vez. Também, confira as propriedades que permanecem constantes durante o processo (tais como a temperatura durante um processo isotérmico), e indique-as no esboço.

Etapa 3: As suposições



Indique todas as suposições feitas para simplificar o problema e para tornar possível a sua resolução. Justifique as suposições questionáveis. Proponha valores razoáveis para as grandezas necessárias em falta. Por exemplo, na ausência de dados específicos sobre a pressão atmosférica, pode admitir que seja 1 atm. Entretanto, deve-se notar na análise que a pressão atmosférica diminui com o aumento da altitude.

Etapa 4: As leis físicas



Aplique todas as leis e princípios básicos físicos relevantes (tais como o da conservação de energia), e reduza a sua formulação o mais simples utilizando as suposições feitas. Entretanto, a região a que uma lei física é aplicada deve ser primeiramente claramente identificada. Por exemplo, o aquecimento ou o resfriar de uma bebida enlatada são analisados geralmente aplicando o princípio de conservação de energia à toda a lata.

Etapa 5: As propriedades



Determine as propriedades desconhecidas nos estados conhecidos, necessárias para resolver o problema, das relações ou de tabelas de propriedades. Aliste as propriedades separadamente e indique a sua fonte se possível.

Etapa 6: Os cálculos



Substitua as grandezas conhecidas nas relações simplificadas e execute os cálculos para determinar as desconhecidas. Atenção particular deve se dar às unidades e à simplificação das mesmas e recorde-se que uma grandeza dimensional sem unidades não faz nenhum sentido. Também, não dê uma falsa exactidão elevada do resultado, copiando todos os dígitos da máquina de calcular, arredonde os resultados a um número apropriado de dígitos significativos.

Etapa 7: Raciocínio, verificação e discussão



Para certificar-se de que os resultados obtidos são razoáveis e racionais, verifique a validade das suposições feitas. Repita os cálculos que resultaram em valores não racionais. Por exemplo, isolar um aquecedor de água que consome \$80 de gás natural por ano não pode resultar em economizar \$200 num ano.