

Aula 02 - As leis da transferência de calor e sua relação com transferência de calor

Prof. Dr. Caio¹, Prof. Paulo Akira²

1. Conceitos introdutórios

Vamos apresentar aqui algumas definições básicas para ciências térmicas.

- **Termodinâmica:** trata-se da ciência que estuda a energia e a entropia. O objeto de estudo é a energia e suas transformações.
- 5 • **Transferência de Calor:** refere-se ao trânsito de energia térmica ocasionada por uma diferença de temperatura.
- **Energia térmica:** energia associada à translação, rotação, vibração e estado eletrônico dos átomos (e moléculas) que fazem parte da matéria.
- **Calor:** é a energia transferida devido a uma diferença de temperatura.
10 Em outras palavras, calor trata-se do fluxo de energia térmica.
- **Sistemas Térmicos:** tratam-se de sistemas que englobam o armazenamento e o fluxo de calor por condução, convecção e radiação.
- **Volume de Controle:** região do espaço a qual nossa atenção é dirigida (relacionado a entrada e saída de massa).
- 15 • **Vizinhança:** tudo que é externo ao sistema ou ao volume de controle.
- **Fronteira:** superfície que separa o sistema ou o volume de controle da vizinhança. A fronteira não tem espessura, volume ou massa. Pode ser fixa ou móvel.

¹caiofrs@insper.edu.br.

²pauloafe@insper.edu.br.

- **Trabalho:** interação energética entre o sistema (ou o volume de controle) e a vizinhança.

20

1.1. *Formulação Lagrangiana e Euleriana*

Para ciências térmicas e de fluídos não estamos interessados, no contexto de mecânica, em estudar o comportamento de cada partículas que compões a matéria de forma individual. No caso, nos interessa em observar como um conjunto de partículas se comporta dentro de um volume pré-determinado, de forma
25 geral estamos interessados no fluxo. Dessa forma, utilizamos a formulação Euleriana no desenvolvimento dos modelos matemáticos. Já no caso de mecânica dos sólidos, temos interesse em saber como cada partícula se comporta (deslocamento, deformação, etc.). Dessa forma, utilizamos a formulação Lagrangiana. De forma ilustrativa, na formulação Lagrangiana é como se viajássemos montados em uma partícula, acompanhando toda sua "viagem" até sua configuração final.

30

1.2. *Relação entre termodinâmica e transferência de calor*

Na termodinâmica o principal foco é estudar as o estado em que um sistema se encontra após sofrer transformações. Por sua vez, transferência de calor está
35 relacionada ao processo de como estas transformações ocorrem. Dessa forma, em termodinâmica estudamos, por exemplo, transformação de estados, leis de conservação e ciclos. Na transferência de calor, por sua vez, estudamos os mecanismos para as transformações de estado ocorrerem como, por exemplo, a condução, a convecção e a radiação.

40

Para um maior aprofundamento em Termodinâmica, recomendamos [1] e [2]. Para os conceitos de transferência de calor em nível de graduação, temos a obra [3]. Já para uma visão de matemática aplicada para modelagem computacional de ciências térmicas, Hughes apresenta em [4] um texto introdutório sobre a
45 equação do calor que vamos explorar nas próximas aulas.

2. Trabalho e Calor

Energia pode atravessar a fronteira de um sistema fechado de duas maneiras distintas: trabalho ou calor. Ressalta-se que ambas são interações energéticas entre o sistema e sua vizinhança. Trabalho e calor não são propriedades termo-
 50 dinâmicas, ou seja, dependem do processo adotado e não dos estados.

Considerando o sistema quase-estático (i.e., um valor de pressão é o suficiente para descrever o estado do sistema) representando na figure 1, podemos calcular o valor do trabalho W :

$$\delta W = PAdx = PdV \Rightarrow W = \int_1^2 PdV, \quad (1)$$

onde δW é o diferencial do trabalho que depende do caminho e $dV = Adx$.

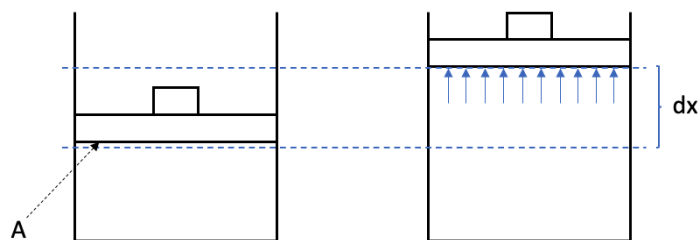


Figura 1: Exemplo de estado inicial e final em um sistema quase-estático.

55 Da equação 1, caso:

- $W > 0$ significa que o trabalho está sendo realizado sobre a vizinhança pelo sistema;
- $W < 0$ significa que o trabalho está sendo realizado sobre o sistema pela vizinhança.

60 Note que, como o trabalho não é uma propriedade termodinâmica, o trabalho do estado 1 para o estado 2 é diferente do trabalho do estado 2 para o estado 1.

A relação pressão e volume pode ser obtida tanto de forma experimental quanto de forma analítica tal que possa ser ajustada por uma curva. No caso analítico, temos os processos politrópicos que são descritos pela equação:

$$PV^n = cte. \quad (2)$$

65 Caso $n = 0$ temos um processo isobárico (pressão constante) e caso $n = \pm\infty$ o processo é chamado isométrico, isocórico ou isovolumétrico (volume constante).

Substituindo, 2 em 1, para $n \neq 1$, temos

$$W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n}, \quad (3)$$

e para $n = 1$, temos

$$W = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (4)$$

Denotaremos por Q o calor envolvido nos processos termodinâmicos. Dessa forma, adotaremos a seguinte convenção de sinais:

- $Q > 0$: o calor é "transferido" da vizinhança para o sistema;
- 70 • $Q < 0$: o calor é "transferido" do sistema para a vizinhança.

3. Primeira Lei da Termodinâmica

A Primeira Lei se refere a um balanço de energia no sistema como mostrado na figura 2. Segunda Max Plank, a 1a Lei é o princípio da conservação de energia aplicado no contexto de transferência de calor.

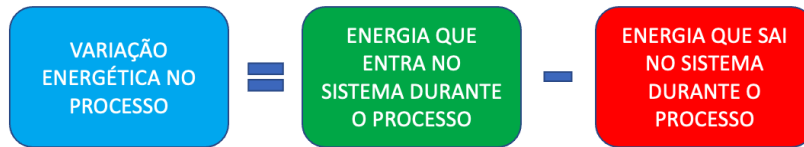


Figura 2: Balanço energético relacionado a um processo termodinâmico.

75 A equação que traduz a figura 2 é dada por:

$$E_2 - E_1 = Q_{1 \rightarrow 2} - W_{1 \rightarrow 2}. \quad (5)$$

O lado esquerdo da equação 5 refere-se ao interior do sistema e o lado direito refere-se a fronteira. Dito isso podemos reescrever a equação 5 como

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE, \quad (6)$$

onde $\Delta E = E_2 - E_1$, ΔU é a variação de energia interna, ΔKE é a variação de energia cinética e ΔPE é a variação de energia potencial.

É importante ressaltar que para a modelagem matemática é crucial escolher uma fronteira adequada para o volume de controle. Na figura 3 temos alguns
80 exemplos de escolha de fronteira para um mesmo sistema.

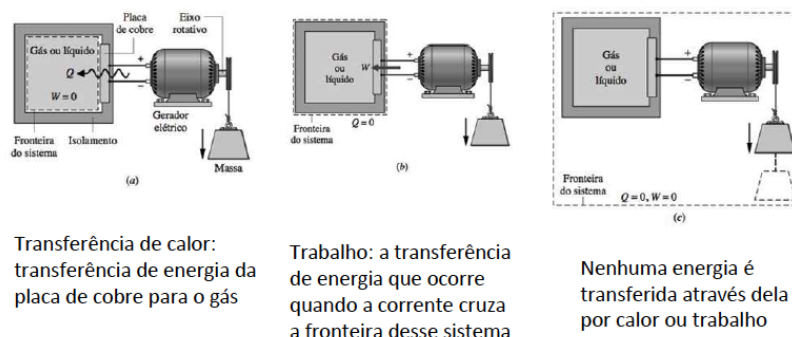


Figura 3: Escolha de fronteira para um sistema. Fonte: [1]

4. Entropia

A entropia está diretamente ligada ao conceito de micro e macroestados. A seguir temos a definição formal destes conceitos.

Definição 1. *Um microestado é definido como o arranjo de cada molécula de um sistema em um determinado instante. Esta configuração é especificada pelos estados quânticos de cada partícula.*

Definição 2. *Um macroestado é o estado macroscópico de um sistema definido pelos microestados (e.g., temperatura, pressão, etc.). Um mesmo macroestado pode ser definido por microestados diferentes.*

90 A entropia pode ser entendida como desorganização dentro de um sistema.
Quanto maior entropia, maior será o número de microestados e, portanto, mais
desorganizadas estarão as partículas. Dessa forma, um sólido tem uma entropia
menor do que uma gás, pois, nos sólidos as moléculas tem um grau de ordenação
maior devido as forças atômicas que restringem o deslocamento e velocidade das
95 partículas.

A equação de Boltzmann relaciona a entropia S com um número de micro-
estados Ω relacionados a algum macroestado:

$$S = k_B \ln(\Omega) \quad (7)$$

O conceito de entropia pode ser entendido não só como o grau de desor-
ganização das partículas que compões um sistema, mas também como o grau
100 de incerteza que temos a respeito da configuração em termos de microestados
daquele sistema. Assim, passamos a quantificar a entropia como uma grandeza
probabilística. Essa última visão sobre entropia possibilitou enormes avanços em
Teoria da Informação e, hoje, é a base para a construção das *GANs* (*Generative
Adversarial Networks*).

105 5. Segunda Lei da Termodinâmica

Como visto anteriormente a Primeira Lei da Termodinâmica não impõe ne-
nhuma restrição de sentido, apenas realiza um balanço energético. Por exemplo,
como visto em aula, tomemos como sistema termodinâmico uma xícara de café
exposta ao ambiente como mostrado na figura 4. Aplicando a Primeira Lei con-
110 seguimos medir qual foi a variação energética durante o processo termodinâmico.
No entanto, embora seja intuitivo que o café vai perder energia naturalmente
para o ambiente, a Primeira Lei não explica esse fenômeno que, por sua vez,
será explicado pela Segunda Lei da Termodinâmica.



Figura 4: Exemplo de um sistema termodinâmico: resfriamento da xícara de café.

Existem dois enunciados famosos para a Segunda Lei da Termodinâmica que
115 são ilustrados a seguir.

Definição 3 (Enunciado de Clausius). *É impossível para qualquer sistema operar de tal forma que o único resultado seja a transferência de energia sob a forma de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.*

Definição 4 (Enunciado de Kelvin-Plank). *É impossível para qualquer sis-
120 tema operar em um ciclo termodinâmico e fornecer uma quantidade líquida de energia através de trabalho para sua vizinhança enquanto recebe energia por transferência de calor de um único reservatório térmico.*

De maneira geral, o que estes resultados traduzem é que existe a possibilidade da condição inicial do sistema ser restaurada (e.g., a xícara de calor voltar a
125 ficar aquecida) mas não de forma espontânea. Neste caso ocorre, portanto, uma mudança permanente na vizinhança. Sempre há uma consequência para se reverter um processo espontâneo.

A aplicação clássica para a Segunda Lei são as máquinas térmicas, em especial, o motor térmico. Este último realiza trabalho e transfere calor de um reservatório térmico quente para um reservatório térmico frio operando segundo um ciclo termodinâmico (fluxo de trabalho), como ilustrado na figura 5.

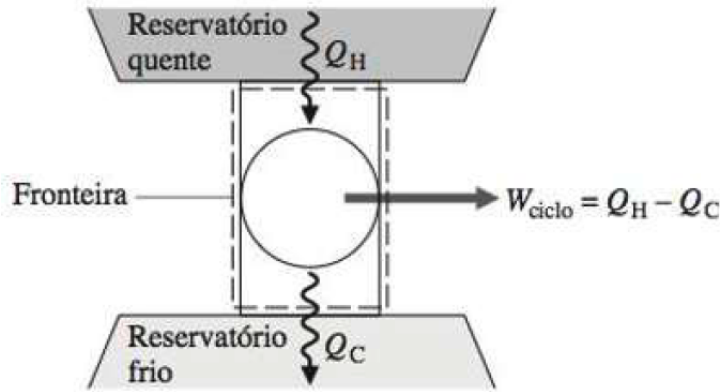


Figura 5: Motor térmico e o ciclo termodinâmico. Fonte: [1].

O trabalho do ciclo termodinâmico do motor é dado por:

$$W_{\text{ciclo}} = Q_H - Q_C, \quad (8)$$

onde Q_H é o calor relacionado ao reservatório quente e Q_C é o calor referente ao reservatório frio. Dessa forma, a eficiência do motor é dada por:

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{\text{efeito desejado}}{\text{gasto}} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}. \quad (9)$$

Note que a quantidade de calor Q_C nunca é zero, pois, caso contrário estaríamos violando o enunciado de Kelvin-Planck. Fisicamente, isso implicaria que o ciclo do motor não se fecharia. Podemos reescrever a equação 9 em função das temperaturas (**na escala Kelvin**) dos reservatórios:

$$\eta_{\text{motor}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}. \quad (10)$$

Cabe, agora, introduzirmos definições mais formais para processos reversíveis e irreversíveis. Estes servirão para a apresentação dos corolários de Carnot.

Definição 5 (Processo Reversível). *Processo que depois de ocorrido pode ser revertido sem deixar nenhum traço no sistema e nas redondezas.*

Definição 6 (Processo Irreversível). *Processo em que o sistema volta ao seu estado inicial mas deixa sequelas na vizinhança que não podem ser revertidas espontaneamente.*

Os corolários de Carnot tem os seguintes enunciados.

Corolário 1. *É impossível construir um motor que opere entre dois reservatórios e que seja mais eficiente que um motor térmico reversível operando entre os dois mesmos reservatórios.*

Corolário 2. *Dois motores térmicos que operam entre dois reservatórios térmicos tem o mesmo rendimento.*

Observação 1. *Muitas vezes será trabalharmos com as taxas das grandezas em questão. Taxas se referem a variação de uma grandeza no tempo. Por exemplo, a taxa da quantidade de calor Q é dada por:*

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}.$$

6. Exercícios

Os exercícios abaixo foram adaptados de [2].

Exercício 1. *Um gás ideal contido num cilindro-pistão é aquecido com $2kJ$ durante um processo isotérmico. Qual o trabalho envolvido? Lembrando que a para um gás ideal a energia interna depende exclusivamente da temperatura.*

Exercício 2. *Propõe-se construir uma central termoelétrica com potência de $1000MW$ e utilizando vapor d'água como fluido de trabalho. Os condensadores devem ser resfriados com água de um rio. A temperatura máxima do vapor será de $550^{\circ}C$ e a pressão no condensador de $10kPa$ (i.e., $T_L = 45.81^{\circ}C$). Como consultor de engenharia você é solicitado a estimar o aumento de temperatura da água do rio.*

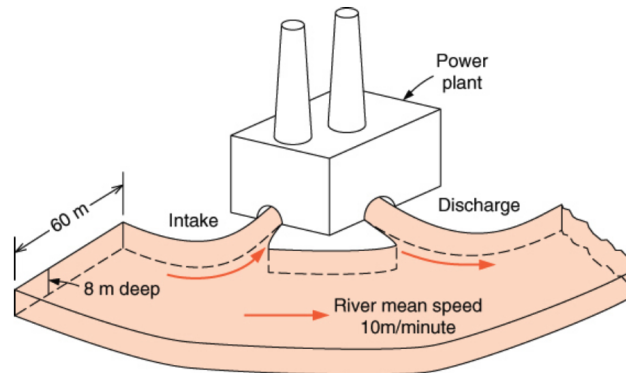


Figura 6: Diagrama da central termoeletrica. Fonte: [2].

Considere:

- A vazão mássica é dada por $\dot{m} = \frac{vA}{\nu}$, onde v é a velocidade do rio, A é área da seção transversal (aproximar por um retângulo com dimensões $8m \times 60m$) e ν é a viscosidade.
- A viscosidade da água é igual a $\nu = 0.001 Pa.s$.
- A taxa de calor pode ser calculada por $\dot{Q} = \dot{m}c\Delta T$, onde c é o calor específico, \dot{m} é a vazão mássica e ΔT é a variação de temperatura no processo considerado.
- Calor específico da água é igual a $c = 4.184 \cdot 10^3 J/(kg.K)$.

Referências

- [1] B. R. Munson, M. J. Moran, H. N. Shapiro, Introdução a engenharia de sistema térmicos, LTC, 2005.
- [2] C. Borgnakke, R. E. Sonntag, Fundamentos da Termodinâmica, Edgard Blucher, 2009.
- [3] F. P. Incropera, P. DeWitt, Bergamn, Lavine, Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, LTC, 2008.

- [4] T. J. R. Hughes, The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Dover, 2000.