

Textos Explicativos

As Leis da Termodinâmica

Material de apoio — a Lei Zero, a Primeira, a Segunda e a Terceira Lei da Termodinâmica

A Termodinâmica é o ramo da Física que estuda o calor, a energia e as transformações que ocorrem em sistemas físicos, além dos limites que existem para essas transformações. Esse estudo é organizado em quatro leis fundamentais — a Lei Zero e a Primeira, Segunda e Terceira Leis da Termodinâmica —, que juntas explicam desde o funcionamento de um simples termômetro até os limites de eficiência de motores, geladeiras e usinas de energia.

Lei Zero da Termodinâmica: Equilíbrio Térmico

A Lei Zero da Termodinâmica estabelece o conceito de equilíbrio térmico, que é a própria base física para a definição de temperatura. Ela afirma que, se um corpo A está em equilíbrio térmico com um corpo B, e esse mesmo corpo B está em equilíbrio térmico com um corpo C, então A e C também estão em equilíbrio térmico entre si — mesmo sem terem entrado em contato direto um com o outro.

Dois corpos estão em equilíbrio térmico quando têm a mesma temperatura, condição em que não há mais troca líquida de calor entre eles quando colocados em contato. É essa lei que justifica o uso de um termômetro: ao aguardar o termômetro entrar em equilíbrio térmico com o corpo que se deseja medir, sua leitura passa a refletir corretamente a temperatura desse corpo.

Exemplo prático: ao mergulhar um termômetro em um copo de água morna, o termômetro (inicialmente a uma temperatura diferente) troca calor com a água até que ambos atinjam a mesma temperatura — o equilíbrio térmico. Só então a leitura do termômetro se torna estável e confiável.

Primeira Lei da Termodinâmica: Conservação de Energia

A Primeira Lei da Termodinâmica é a aplicação do princípio da conservação de energia aos sistemas térmicos: a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada de uma forma em outra ou transferida entre um sistema e o ambiente. Ela relaciona a variação da energia interna de um sistema com o calor que ele troca com o meio e o trabalho que realiza (ou que é realizado sobre ele):

$$\Delta U = Q - W$$

Nessa fórmula, ΔU é a variação da energia interna do sistema, Q é o calor trocado com o meio (positivo quando o sistema recebe calor, negativo quando cede) e W é o trabalho realizado pelo sistema sobre o meio (positivo quando o sistema se expande, negativo quando é comprimido). Em outras palavras: parte do calor recebido por um sistema pode ser convertida em trabalho, e o restante permanece armazenado como energia interna do próprio sistema.

Exemplo prático: um gás recebe 500 J de calor de uma fonte térmica e realiza um trabalho de 200 J ao se expandir contra o ambiente. A variação de sua energia interna é $\Delta U = Q - W = 500 - 200 = 300 \text{ J}$ — ou seja, 300 J do calor recebido ficaram armazenados como energia interna do gás, e os outros 200 J foram convertidos em trabalho.

Segunda Lei da Termodinâmica: Entropia e o Sentido dos Processos

Enquanto a Primeira Lei garante que a energia se conserva em qualquer processo, ela não impõe nenhuma restrição sobre a direção em que esses processos podem ocorrer. É a Segunda Lei da Termodinâmica que estabelece esses limites e essa direção natural para os fenômenos térmicos.

Existem diferentes formas equivalentes de enunciar essa lei. Pelo enunciado de Clausius, é impossível que o calor flua espontaneamente de um corpo mais frio para um corpo mais quente, sem a realização de trabalho externo — por isso um cubo de gelo derrete em um copo de água morna, e não o contrário. Pelo enunciado de Kelvin-Planck, é impossível construir uma máquina térmica que converta integralmente, em um ciclo completo, todo o calor recebido em trabalho — toda máquina térmica real precisa necessariamente rejeitar parte do calor para uma fonte fria.

Essa lei está diretamente associada ao conceito de entropia, uma grandeza física que mede o grau de desordem (ou de dispersão de energia) de um sistema. Segundo a Segunda Lei, a entropia total de um sistema isolado (como o universo, em última análise) nunca diminui: ela sempre aumenta em processos reais e irreversíveis, ou permanece constante no caso ideal de um processo reversível. É por isso que os processos térmicos têm uma direção natural bem definida — e é essa mesma lei que explica por que é impossível construir uma máquina de 'moto-contínuo', capaz de produzir trabalho indefinidamente sem nenhuma perda de energia.

Exemplo prático: quando uma xícara de café quente é deixada sobre uma mesa, o calor flui espontaneamente do café (mais quente) para o ar ao redor (mais frio), até que ambos atinjam a mesma temperatura — nunca o contrário. Esse fluxo espontâneo de calor do quente para o frio é uma manifestação direta da Segunda Lei.

Terceira Lei da Termodinâmica: o Zero Absoluto

A Terceira Lei da Termodinâmica trata do comportamento dos sistemas físicos à medida que sua temperatura se aproxima do zero absoluto (0 kelvin, equivalente a $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), a temperatura mais baixa teoricamente possível, na qual cessaria toda a agitação térmica das partículas de um sistema.

Essa lei estabelece que a entropia de um sistema em um estado perfeitamente ordenado (um cristal perfeito, por exemplo) tende a um valor mínimo constante à medida que sua temperatura se aproxima do zero absoluto. Uma consequência prática fundamental dessa lei é que o zero absoluto é uma temperatura inatingível na prática: seriam necessárias infinitas etapas de resfriamento para alcançá-lo exatamente, por mais eficiente que fosse o processo utilizado.

Essa impossibilidade de atingir o zero absoluto tem uma ligação direta com a Segunda Lei: como nenhuma fonte fria pode estar exatamente a 0 K, o rendimento de Carnot (o rendimento máximo teórico de uma máquina térmica) nunca pode chegar a 100%, por mais próximas que as temperaturas das fontes fria e quente estejam entre si.