

ABORDAGEM DE CONCEITOS DE CALOR, ENERGIA E ENTROPIA NO ENSINO DE TERMODINÂMICA: UM ESTUDO DE RESENHA

Álison Pereira da Silva¹

O livro de Antônio S. T. Pires, *Evolução das Ideias da Física* (2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011), explora os avanços da Física desde a Grécia antiga até os tempos modernos, enfatizando os aspectos históricos e filosóficos que acompanham essas mudanças. A obra investiga as interações entre a Física e a Filosofia, destacando como cada uma influenciou a outra. Além disso, o autor busca ensinar o leitor a testar conceitos, avaliar hipóteses e considerar os argumentos de um problema com a devida atenção. Em essência, Pires (2011) defende que, na Ciência, a habilidade de pensar criticamente é mais valiosa do que um simples conhecimento enciclopédico. Assim sendo, esta resenha foca no capítulo 7, que trata do tema energia, calor e entropia.

A temática do calor, presente na termodinâmica desempenha um papel fundamental na compreensão dos princípios físicos que regem o comportamento da energia e da matéria, especialmente no contexto do ensino médio. Compreender como o calor se transforma em trabalho e como a energia é conservada e transformada em diferentes sistemas é crucial para o desenvolvimento do pensamento crítico e científico dos alunos. Dentro desse contexto, surge a seguinte pergunta de pesquisa: como a abordagem dos conceitos de calor, energia e entropia pode ser otimizada no ensino de termodinâmica no ensino médio para promover uma compreensão mais profunda e engajadora entre os estudantes? Essa indagação visa explorar estratégias didáticas que possam facilitar a assimilação desses conceitos complexos, considerando a relevância e as implicações da termodinâmica na vida cotidiana e no avanço do conhecimento científico.

Este estudo explora os conceitos de energia, calor e entropia, com base em ideias desenvolvidas ao longo da história. No início, Huygens mostrou que, em uma colisão elástica, a soma dos produtos das massas pelos quadrados das velocidades dos corpos antes da colisão era igual à mesma soma depois da colisão. No entanto, ele não conseguiu explicar a perda de movimento, ou seja, a perda de energia, em colisões inelásticas. Para resolver isso, Leibniz introduziu o termo *vis viva*, que descreve a força em ação, representada por mv^2 , sugerindo que ela se conserva em colisões elásticas. Ele também questionou os Newtonianos, que acreditavam que as forças diminuam em colisões elásticas e que, de tempos em tempos, Deus precisava fornecer novas forças para que o universo continuasse funcionando.

Por volta do século XIX, surgiu a ideia de medir a força vital através do trabalho mecânico, que foi definido como o produto da força pela distância ou pela integral da força

¹ Doutorando em Física pela UFRN. E-mail: alisonpereira.silva@outlook.com

em relação à distância. Isso mostrou que o trabalho representa metade da variação da *vis viva*.

Com o passar dos anos, o conceito de calor passou a ser analisado de maneira mais detalhada, e os conceitos de temperatura e calor foram se consolidando aos poucos. Nesse cenário, Bernoulli apresentou suas contribuições para as leis relacionadas aos gases, sugerindo que estes eram formados por pequenas partículas em movimento rápido, colidindo umas com as outras, e que o calor intensificava o movimento interno do gás. Em 1859, Maxwell introduziu a teoria cinética dos gases.

Discutindo o conceito de calor, percebe-se que, na antiguidade, acreditava-se que o calor fluía de objetos quentes para frios. Entretanto, em 1665, Hooke trouxe uma nova perspectiva ao afirmar que o calor era uma propriedade de um corpo, resultante do movimento ou agitação de suas partes. Assim, ao tocar um corpo, ele transferia parte desse movimento, provocando a agitação de suas partes. Para explicar por que um corpo aquecido acima de certa temperatura emite luz e brilha, Newton sugeriu que essa emissão era fruto da vibração das partes do corpo. Ele também destacou que, de forma inversa, a absorção de luz por um corpo provoca vibrações que são percebidas pelos sentidos como calor. Em 1697, Georg Ernst introduziu a teoria do flogístico, um elemento com massa presente em todos os materiais combustíveis, argumentando que substâncias que queimavam não continham esse elemento. Nesse contexto, Joseph Black observou que era necessária uma quantidade específica de calor para elevar a temperatura de um objeto, introduzindo o conceito de calor latente e fazendo a distinção entre calor e temperatura, sendo considerado, portanto, o fundador da termometria.

É relevante destacar que, no final do século XVIII, Lavoisier desafiou a teoria do flogístico, passando a considerar o calor como um tipo de fluido imponderável, chamado calórico, cuja quantidade total era conservada no universo. Assim, o calor foi interpretado como um efeito de uma substância material real ou de um fluido extremamente sutil, que se infiltra entre as partículas dos corpos, separando-as umas das outras.

Pode-se destacar Carnot, que investigou a geração de movimento a partir do calor e utilizou a teoria do calórico para explicar o funcionamento da máquina a vapor. Ele fez uma analogia entre essa máquina e uma roda hidráulica, cuja energia é gerada pela queda d'água de um nível elevado. As diferentes temperaturas na máquina foram vistas como semelhantes às elevações entre os níveis superior e inferior da água corrente. Carnot sugeriu que a máquina poderia realizar mais trabalho com a mesma quantidade de fluido calórico se o calor fluísse entre uma maior diferença de temperaturas. Ao examinar o problema do fluxo de calor, ele concluiu que a perda de calor de uma máquina para o ambiente era um subproduto natural do uso do calor como fonte de trabalho. Dessa forma, formulou a lei geral que estabelece que é impossível extrair trabalho do calor sem, ao mesmo tempo, descartar algum calor. No entanto, não atribuiu a devida importância a essa nova lei da Natureza, que mais tarde, ao ser reescrita, passou a ser conhecida como a segunda lei da Termodinâmica. Assim, a segunda lei foi descoberta antes da primeira.

Neste estudo, Carnot esteve próximo de descobrir a primeira lei, mas considerava que existia uma contradição entre as duas. Se a energia é conservada, isso implica que o

calor gerado pelo fogo em uma máquina a vapor se transforma em trabalho. Por outro lado, se o trabalho resulta da transferência do calórico de um reservatório para outro, como ele acreditava, isso significaria que nenhum calor poderia ser aproveitado, uma vez que o calórico era visto como uma substância indestrutível. Para ele, havia uma contradição entre a conversão e a conservação de calor. Ele não percebeu o conceito de energia, do qual o calor é apenas uma das formas. Assim, o fluxo de calor sempre ocorre do corpo quente para o corpo frio. Quando dois objetos com temperaturas distintas entram em contato, o mais frio aquece e o mais quente esfria, nunca observamos o contrário. A teoria do calórico explicava esse fenômeno, afirmando que a diferença de temperatura era o fator responsável pelo fluxo de calor. Na analogia com a roda hidráulica, seria como afirmar que a água sempre flui de cima para baixo.

Nesse contexto, havia vários fenômenos que não eram satisfatoriamente explicados pela teoria do calórico. Um exemplo era o calor gerado pelo atrito. Quando dois objetos são esfregados um contra o outro, eles se aquecem. Mas de onde vem esse calor? Ele surge em um local onde antes não existia, indicando que o calórico foi produzido. No entanto, acreditava-se que o calórico não poderia ser criado ou destruído; ele apenas se transferia de um objeto para outro. Os defensores da teoria explicaram esse fenômeno afirmando que um calor latente era liberado durante o atrito.

Além disso, ele mediu a capacidade térmica de um bloco sólido de metal e a de um peso equivalente de aparas de torno, constatando que eram exatamente iguais. Concluiu que a quantidade de calor gerada não poderia ser explicada por algum calor latente e desafiou a teoria do calórico, sugerindo que o calor produzido era um calor novo. Afirmou que o calor se manifestava como movimento, mas não aprofundou suas explicações a esse respeito. Ele também ressaltou que o processo de combustão no corpo é responsável pela produção de calor e trabalho. Além disso, percebeu que o movimento, por meio do atrito, também gerava calor, o qual se misturava ao calor proveniente da combustão. Assim, concluiu que os processos químicos no corpo geravam movimento, trabalho e calor, que podiam ser convertidos entre si.

Em 1840, Joule provou de maneira definitiva que o trabalho pode gerar calor e estabeleceu seu equivalente mecânico, chegando à conclusão de que o calor não é conservado, mas sim uma forma de energia. Em 1845, ele apresentou uma teoria sobre a conservação da energia, que, no entanto, não foi aceita de imediato. Com o tempo, Thomson reconheceu a relevância das descobertas de Joule, contribuindo para a aceitação da ideia de conservação. Helmholtz, por sua vez, destacou que a conservação da força é um princípio universal da natureza. Ele argumentou que a força viva e a força tensorial de sistemas dinâmicos podem se converter em calor conforme relações definidas, e que essas formas de energia podem ser transformadas em energia química, eletrostática, voltaica e magnética. Helmholtz via calor, luz e eletricidade como formas de movimento e, portanto, como manifestações de energia mecânica. Para ele, a vis viva é sempre conservada, não apenas em colisões elásticas, mas em todas as colisões, uma vez que ela se transforma em outras formas que, no final, também são consideradas vis viva.

Até o século XIX, a terminologia em torno da palavra "força" gerava confusão. A expressão "vis viva" possuía um significado diferente do conceito de força segundo

Newton. A adoção do termo "energia" por Thomson resolveu essa ambiguidade conceitual e terminológica. Sua convicção de que as diversas manifestações da energia eram diferentes formas de energia mecânica enfatizou o papel integrador do conceito de energia em uma teoria que visava explicar os fenômenos naturais de maneira mecânica.

Ao discutir as leis da termodinâmica, a conservação da energia é identificada como a primeira lei dessa área. O termo "Termodinâmica", introduzido por Thomson em 1854, refere-se ao estudo do "movimento do calor" e concentra-se no comportamento de um grande número de partículas, em vez de examinar uma única partícula. As leis termodinâmicas não dependem da estrutura específica ou das propriedades dos elementos constituintes da matéria. A primeira lei nos informa sobre a quantidade de energia que podemos adicionar ou remover de um sistema, além de definir as regras que regem a conversão de uma forma de energia em outra. É importante notar que a energia cinética e a energia potencial são relativas, tornando-se significativo apenas o estudo das variações na energia. A energia se apresenta de diversas maneiras; do ponto de vista prático, é entendida como a capacidade de realizar trabalho, enquanto, do ponto de vista científico, é uma noção abstrata. Acredita-se que a energia não possa ser criada nem destruída, apenas transformada de uma forma para outra. Esse princípio estabelece a existência de uma grandeza abstrata denominada energia, cujo valor numérico permanece inalterado nas várias transformações que a natureza sofre.

Neste estudo, ao estabelecer o princípio da conservação da energia, Clausius chegou à conclusão de que uma máquina a vapor funciona como um mecanismo que absorve calor de um reservatório quente e converte parte desse calor em trabalho, enquanto o restante é liberado em um reservatório frio. Ele aceitou a proposta de Carnot de que toda máquina térmica deve descartar uma quantidade finita de calor, a qual passou a ser referida como a segunda lei da termodinâmica. Em 1850, Clausius determinou que o calor flui naturalmente de um reservatório quente para um reservatório frio, mas nunca na direção oposta. No ano seguinte, ao examinar o ciclo de Carnot, Thomson mostrou que existe uma temperatura mínima que não pode ser superada, calculando essa temperatura como sendo $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sob a perspectiva clássica, essa é a temperatura em que todas as moléculas de um corpo estão em repouso e foi chamada de "zero absoluto". Thomson também observou que a segunda lei pode ser formulada afirmando que é impossível transformar completamente uma certa quantidade de calor em trabalho; assim, em todas as transformações de energia de uma forma para outra, uma parte da energia é convertida em calor.

Em 1865, Clausius decidiu nomear a razão entre a quantidade de calor e a temperatura, representada pela letra S , resultando na equação $S = Q/T$, e definiu-a como entropia, que significa transformação. Com isso, a segunda lei foi reformulada, indicando que, em processos reversíveis, a entropia se mantém constante, enquanto, em processos irreversíveis, ela aumenta. Clausius afirmou que a entropia do universo tende a um valor máximo. Em 1906, Nernst estabeleceu a terceira lei da termodinâmica, que afirma que a entropia de um sistema no zero absoluto é uma constante universal. Nesse contexto, a lei demonstra que não é possível esfriar um sistema até o zero absoluto em um tempo finito.

No contexto da probabilidade, a probabilidade de um evento ocorrer é definida como a relação entre o número de casos favoráveis a esse evento e o total de casos possíveis. Na Física Estatística, destaca-se que a probabilidade de um sistema ter uma energia específica é proporcional ao número de estados acessíveis desse sistema que possuem essa energia. Dessa forma, a entropia é relacionada à fórmula $S = k \log W$.

Em 1827, Brown, ao observar com um microscópio, percebeu que partículas minúsculas suspensas em uma solução líquida apresentavam um movimento irregular em zigzag. Assim, o calor (energia térmica) se transformava espontaneamente em energia mecânica. Também se mencionou a questão dos sistemas não isolados, afirmando que um alimento de origem vegetal recebeu energia do sol por meio da fotossíntese. O sol, ao queimar seu combustível, contribui para o aumento de sua entropia. Segundo a teoria da evolução, a estrutura hierárquica dos seres vivos surgiu do caos gerado pelas colisões moleculares, mutações genéticas e pela seleção natural. É destacado que, enquanto podemos recordar do passado, não temos a mesma capacidade em relação ao futuro; nosso senso subjetivo da direção do tempo, ou seta psicológica do tempo, é determinado pelo cérebro por meio da seta termodinâmica do tempo, que nos leva a lembrar dos eventos na ordem em que a entropia aumenta. No final do século XIX, Boltzmann, ao aplicar técnicas estatísticas às colisões atômicas, formulou seu teorema H, que afirmava que uma grandeza, representada pela letra H e que é função das posições e velocidades dos átomos do sistema, deve sempre diminuir ou permanecer constante com o tempo. Boltzmann reconheceu que sua demonstração do teorema H era válida apenas para estados iniciais que estivessem distantes do equilíbrio, chegando à conclusão de que a segunda lei se aplica de forma estatística.

Portanto, é destacado que, em uma situação inicial onde as partículas estão uniformemente distribuídas, temos um estado de alta organização e, conseqüentemente, baixa entropia. Em um universo em expansão, se a entropia continuar a aumentar de forma inevitável, poderemos alcançar um estado de equilíbrio termodinâmico no futuro. Nesse caso, o universo, em sua totalidade, se tornaria fundamentalmente desorganizado, o que tornaria a vida como a conhecemos impossível. Esse fenômeno é conhecido como morte térmica do universo. Entretanto, cálculos recentes sugerem que a morte térmica de um universo que se expande constantemente não ocorrerá. Embora a entropia total desse universo continue a crescer, a entropia máxima possível aumenta a uma velocidade maior, o que impede que se alcance um equilíbrio total na entropia máxima.

Referência

PIRES, Antônio S. T. **Evolução das Ideias da Física**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011.