



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica

Manual para o Professor

Marcos Moura
&
Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Marcos Moura, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2016

Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica

Manual para o Professor

Marcos Moura

Carlos Eduardo Aguiar

1 Introdução

A segunda lei da termodinâmica é um tema importante na Física e em outras ciências. É um tema com fama de ser de difícil compreensão. A entropia, um conceito fundamental associado à segunda lei da termodinâmica, compartilha a mesma reputação.

A abordagem tradicional da física térmica, em particular da segunda lei da termodinâmica, é essencialmente macroscópica e as dificuldades que os estudantes encontram para compreender a segunda lei a partir desse ponto de vista são reconhecidamente grandes. No ensino superior, essas dificuldades resultaram em propostas alternativas de ensino baseadas no enfoque microscópico e estatístico. No ensino médio, entretanto, não há propostas alternativas abrangentes; a abordagem dominante segue o ponto de vista macroscópico, centrado na análise de máquinas térmicas.

O material apresentado a seguir propõe uma abordagem microscópica para o ensino da segunda lei da termodinâmica, partindo da noção estatística de entropia. Com essa abordagem, a maioria dos resultados da termodinâmica clássica podem ser obtidos sem muita dificuldade: a irreversibilidade da “seta do tempo”, a definição de temperatura absoluta, os enunciados de Clausius e Kelvin para a segunda lei e a eficiência de máquinas térmicas são exemplos explorados neste material e podem ser ensinados em cursos introdutórios de física tanto no nível médio quanto no superior.

A abordagem estatística não produz apenas explicações claras para a segunda lei e seus principais resultados. Ela também permite que equações de estados de sistemas simples como um gás ideal ou uma fita elástica sejam obtidas com relativa facilidade, o que pode ser explorado nos cursos básicos do ensino superior ou em disciplinas das licenciaturas em física. No ensino médio, o tema pode ser estudado opcionalmente, como aprofundamento dos resultados anteriores.

Acreditamos que uma abordagem estatística como a presente nesse material permite explicar fenômenos térmicos a partir de um ponto de vista mais simples para os alunos. É um fato que os estudantes costumam preferir modelos microscópicos para explicar fenômenos térmicos. É importante ressaltar que a abordagem microscópica não exclui os conceitos macroscópicos ensinados tradicionalmente. Na verdade, o que se espera é uma abordagem unificada, mostrando que pontos de vista macroscópicos e atomísticos são complementares. Afinal, todo sistema macroscópico é constituído por partículas atômicas.

2 Organização e Utilização do Material Didático

O material didático, como já mencionamos, segue uma abordagem essencialmente estatística da segunda lei da termodinâmica e do conceito de entropia, semelhante em alguns aspectos às adotadas no ensino superior, mas acessível ao ensino médio. Nessa proposta de ensino, a segunda lei continuará ocupando o lugar usual na sequência de ensino de física térmica, após a lei zero da termodinâmica, escalas termométricas, calor, gases ideais e a primeira lei da termodinâmica. A abordagem da primeira lei pode ser a tradicional, presente nos livros textos de ensino médio, desde que seja introduzida a relação entre energia interna, calor e trabalho.

O material didático é composto por cinco módulos, organizados sequencialmente e divididos de acordo com o grau de aplicabilidade nos ensinos médio e superior. Isso facilita ao professor seguir o material até um ponto

Módulo	Nível de ensino
I. A Seta do Tempo	Para alunos do ensino médio. Também pode ser utilizado em cursos do ciclo básico universitário e licenciaturas.
II. Entropia e Temperatura	Para alunos do ensino médio. Também pode ser utilizado em cursos do ciclo básico universitário e licenciaturas.
III. Entropia e Pressão	Pode ser utilizado como estudo complementar no ensino médio. Mais apropriado a alunos de curso superior.
IV. Desigualdade de Clausius	Apropriado a alunos de curso superior. Pode ser utilizado como estudo complementar no ensino médio.
V. Equações de Estado	Mais apropriado ao ensino superior.

Tabela 1: Nível de ensino recomendado para utilização dos módulos.

adequado ao propósito do curso e interesse dos alunos. A tabela 1 apresenta de forma resumida em que nível de escolaridade cada módulo do material didático pode ser utilizado. Os módulos são apresentados a seguir.

I. Irreversibilidade e a Seta do Tempo

O ponto inicial da discussão da segunda lei é a questão da *seta do tempo*: os fenômenos a nossa volta têm uma ordem cronológica que não pode ser revertida, embora as leis fundamentais que explicam microscopicamente esses fenômenos não diferenciem o passado do futuro. Na tentativa de entender a origem dessa irreversibilidade, exploramos no módulo os conceitos de microestado, macroestado e multiplicidade. Esses conceitos são utilizados para explicar a origem da seta do tempo e a entropia é introduzida como uma forma conveniente de expressar a multiplicidade. Assim, a segunda lei da termodinâmica é formulada em termos do aumento (ou melhor, não diminuição) da entropia de um sistema isolado. Para abordagem desse tema em sala de aula, sugerimos algumas atividades práticas que ilustram a irreversibilidade em sistemas com muitas partículas e a possível reversibilidade em sistemas de poucas partículas. Essas atividades estão descritas mais à frente.

Este módulo pode ser apresentado sem dificuldade no ensino médio; tanto

as ideias quanto a linguagem matemática são acessíveis aos alunos. A discussão da seta do tempo é uma forma de atrair os alunos para o tema da segunda lei da termodinâmica, possivelmente mais interessante que a abordagem baseada em máquinas térmicas.

II. Entropia e Temperatura

Após a discussão sobre a seta do tempo e a formulação entrópica da segunda lei da termodinâmica, a temperatura absoluta é introduzida a partir da relação entre entropia e a energia interna. Isso permite uma compreensão mais geral do conceito de temperatura. Mostramos que essa definição de temperatura é compatível com nossa experiência cotidiana, verificando que o calor nunca flui espontaneamente de um corpo frio para um quente (enunciado de Clausius para a segunda lei da termodinâmica). A definição termodinâmica de temperatura também nos permite discutir as máquinas térmicas, juntamente com o enunciado de Kelvin e o limite de Carnot para a eficiência dessas máquinas.

Este módulo também pode ser apresentado no ensino médio. A definição termodinâmica de temperatura complementa a definição termométrica de temperatura, que deve ter sido introduzida no início do estudo de física térmica, mostrando que é possível falar de temperatura de maneira independente da substância termométrica e que esse conceito se aplica mesmo a sistemas que não são constituídos por átomos (radiação, por exemplo). O módulo contém os tópicos usualmente tratados no ensino médio quando se apresenta a segunda lei: máquinas térmicas e os enunciados de Clausius e Kelvin. Esses tópicos são abordados de uma forma extremamente simples, que se tornou possível pela discussão prévia da relação entre entropia, energia e temperatura.

III. Entropia e Pressão

Passando de temperatura para pressão, a terceira parte do material discute como o conceito de pressão pode ser expresso a partir da relação entre entropia e volume, num processo análogo ao da definição de temperatura a partir

da entropia e energia interna. Mostramos assim que o princípio do aumento da entropia leva à condição de equilíbrio mecânico (equilíbrio de pressões).

Um cálculo simples nos permite encontrar a relação entre entropia e volume para um gás ideal. Com isso, a equação de estado do gás ideal $pV = NkT$ é facilmente calculada, demonstrando que a pressão nesse tipo de gás é essencialmente um efeito entrópico.

Este módulo é acessível ao ensino médio, embora o nível de dificuldade seja um pouco maior que dos módulos anteriores. Ele deve ser visto como uma extensão do material que o precede, que pode ou não ser aplicada dependendo da avaliação do professor. No ensino superior o material pode ser usado sem problemas. A relação entre entropia e pressão não integra tradicionalmente o currículo do ensino médio, mas permite obter um resultado importante, a equação do gás ideal, e nos mostra que calculando a entropia podemos encontrar equações de estado.

IV. A Desigualdade de Clausius e a Identidade Termodinâmica

No módulo IV, discutimos dois resultados importantes no estudo da termodinâmica, a *desigualdade de Clausius* e a *identidade termodinâmica*. Para demonstrar o primeiro resultado, retomamos o estudo sobre a variação de entropia numa troca de calor entre dois reservatórios térmicos e ampliamos esse estudo para trocas de calor entre outros tipos de sistema. Já a identidade termodinâmica é obtida a partir das definições termodinâmicas de temperatura e pressão. A relação entre a primeira lei da termodinâmica, a identidade termodinâmica e a desigualdade de Clausius também é discutida.

Este módulo deve ser visto como uma extensão dos módulos II e III. Assim como no módulo III, o nível de dificuldade é maior que a do material inicial, podendo ou não ser aplicado ao ensino médio dependendo da avaliação do professor. No ensino superior, o material pode ser utilizado sem problemas.

V. Equações de Estado de Sistemas Simples

O quinto módulo apresenta cálculos mais elaborados, talvez não acessíveis a alunos do ensino médio, embora aplicáveis em cursos introdutórios de nível

superior. A relação entre temperatura e a energia cinética média dos átomos de um gás monoatômico ideal é obtida a partir do cálculo da entropia em função da energia interna. O cálculo é semelhante ao usado para obter a relação entre entropia e volume, porém mais abstrato.

Uma aplicação semelhante à do gás ideal é feita à “borracha ideal”, um modelo simples que descreve muitas das propriedades de uma fita elástica. Um cálculo similar ao do gás ideal permite obter a entropia como função do comprimento da fita e , com isso, descrever as surpreendentes propriedades termodinâmicas desse sistema.

3 Irreversibilidade na Sala de Aula

Os conceitos de microestado e macroestado e a origem da irreversibilidade, temas centrais do Módulo I, podem ser explorados em atividades práticas com os alunos. Um primeiro exemplo é pedir para que cada aluno lance uma moeda para cima e anote o resultado (cara ou coroa). Após verificar o número total de caras e coroas, discute-se a probabilidade de todas as moedas caírem com a cara (ou a coroa) voltada para cima, e como esta probabilidade depende do número de moedas lançadas. Em turmas grandes, um subgrupo dos alunos pode ser considerado para lançar um número pequeno de moedas. Em turmas pequenas, os alunos podem lançar mais de uma moeda no caso de grandes números.

Uma montagem simples que pode substituir ou complementar a primeira atividade está apresentada na referência [1]. Para a prática, o professor deve levar para sala de aula algumas bolinhas de gude (40, por exemplo para cada *kit*) e uma caixa (com uma tampa removível) dotada de uma divisória com uma fenda central que permita a passagem das bolinhas uma a uma, como apresentado na figura 1. Coloca-se uma certa quantidade de bolinhas em uma das metades (esquerda ou direita) da caixa, que em seguida é tampada e agitada. Ao abri-la, conta-se o número de bolinhas em cada um dos lados. Pode-se tampar, agitar e abrir a caixa sucessivas vezes e verificar se o número de bolinhas em um dos lados se torna muito maior que o número de bolinhas do outro lado. Fazendo essa experiência com números diferentes de bolinhas,

pode-se discutir a reversibilidade de sistemas pequenos.



Figura 1: Material e montagem da caixa para atividade em sala de aula [1].

Outra proposta prática também de baixo custo e de simples confecção é descrito na referência [2]. Para essa atividade são utilizadas uma garrafa PET, uma pequena mangueira de borracha transparente e algumas bolinhas de gude de duas cores diferentes (metade delas preta e a outra metade transparente, por exemplo). Para a atividade, fecha-se uma das extremidades da mangueira, introduz-se as bolinhas na mangueira de modo que as bolinhas de mesma cor fiquem juntas e conecta-se a mangueira ao gargalo da garrafa. Com a montagem pronta, agita-se o sistema de modo que todas as bolinhas saiam da mangueira e depois retornem para ela. Estuda-se, então, o número de configurações possíveis e a probabilidade de se obter novamente as bolinhas agrupadas por cores, como foram organizadas inicialmente. Os materiais utilizados e a montagem da garrafa e mangueira estão apresentados da na figura 2.

Espera-se com essas atividades que o aluno compreenda melhor a origem da irreversibilidade e a condição de que esse princípio, por estar associado



Figura 2: Material e montagem de experimento com garrada PET, mangueira e bolinhas de gude [2].

a uma argumentação estatística, é valido somente para sistemas com grande número de partículas.

Referências

- [1] C. F. M. Rodrigues, *Irreversibilidade e Degradação da Energia Numa Abordagem para o Ensino Médio*, Dissertação (Mestrado em Ensino de Física), Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2014).
- [2] P. V. S. Souza, P. M. C. Dias, F. M. P. Santos, *Ensinando a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica no Ensino Médio*, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 2, art. 2502 (2013).