



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

Exemplo de Aula

Marcos Moura

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

Exemplo de Aula

Marcos Moura

Introdução

Este material traz a apresentação de uma abordagem da segunda lei da termodinâmica baseada na definição estatística de entropia, juntamente com o questionário prévio e *slides* preparados para a aula. Esta abordagem foi feita numa turma da segunda série do ensino médio de uma escola pública federal. Na ocasião, a segunda lei da termodinâmica e alguns de seus desdobramentos foram explorados em 3 tempos de aula de 45 minutos cada.¹

Para essa proposta de ensino da segunda lei da termodinâmica é preciso que os alunos já tenham estudado 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 ponto de partida para a abordagem da segunda lei da termodinâmica é a questão da *seta do tempo*, na qual se discute que as leis fundamentais da física (microscópicas) não diferenciem o passado do futuro, mas os fenômenos a nossa volta seguem uma cronologia que não pode ser revertida. Imerso nessa discussão, apresenta-se os conceitos de macroestado, microestado e multiplicidade explorando exemplos como jogo de dados e cara ou coroa.

¹Nesta escola, a segunda lei da termodinâmica não integrava o conteúdo programático. Dessa forma, o tempo de aplicação do projeto em aulas foi limitado de modo a não comprometer o programa regular da turma.

Transpondo essa discussão para um modelo de gás ideal, explica-se a origem da irreversibilidade associado ao grande número de partículas. A entropia é introduzida como uma forma conveniente de expressar multiplicidade. A segunda lei da termodinâmica é apresentada, então, associada ao fato de que a entropia de um sistema isolado nunca diminui. Material didático próprio para o ensino médio e contendo uma discussão detalhada desses temas pode ser encontrado em

- http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Marcos_Moura/modulo1.pdf

Após a discussão sobre a seta do tempo, a temperatura absoluta é introduzida a partir da relação entre a entropia e a energia interna. Verificamos que essa definição de temperatura é compatível com nossa experiência cotidiana mostrando que, como consequência do aumento da entropia, calor nunca pode fluir espontaneamente de um corpo frio para um quente. Com isso, demonstra-se o enunciado de Clausius para a segunda lei da termodinâmica. Também a partir da definição de temperatura absoluta e da formulação entrópica da segunda lei da termodinâmica, exploramos o funcionamento de máquinas térmicas e demonstramos o enunciado de Kelvin para a segunda lei. Esses tópicos são discutidos em

- http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Marcos_Moura/modulo2.pdf

Como foi mencionado, a aplicação dessa proposta de ensino contou com uma limitação de tempo. No entanto, caso esse tipo de restrição não exista e haja interesse do professor e alunos, pode-se estender de várias formas o estudo da segunda lei da termodinâmica e da definição estatística de entropia. Materiais didáticos descrevendo possíveis complementações estão em

- http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Marcos_Moura/modulo3.pdf
- http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Marcos_Moura/modulo4.pdf

- http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Marcos_Moura/modulo5.pdf

O conteúdo desses “módulos” didáticos e possíveis roteiros para sua utilização estão descritos em

- http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Marcos_Moura/modulo0.pdf

O questionário prévio foi elaborado para que o professor possa conhecer melhor as pré-concepções de seus alunos. Para a elaboração desse questionário, considerou-se alguns princípios do *Just-in-Time Teaching (Ensino sob Medida*, em tradução livre)². Ao analisar as respostas dadas pelos alunos em período anterior a aula, o professor pode preparar sua aula a partir das dificuldades manifestadas pelos próprios alunos.

O formulário também tem a finalidade de preparar os alunos para o tema a ser tratado, fazendo-os pensar em situações particulares relacionadas à aula. Procuramos elaborar perguntas interessantes, que estimulassem os alunos a respondê-las. Não se espera do aluno uma resposta certa ou errada. O objetivo é que ele reflita sobre cada ponto explorado no questionário e seja sincero nas suas respostas, mostrando o grau de profundidade que consegue atingir.

O questionário explora noções sobre multiplicidade e irreversibilidade, mas sem utilizar uma linguagem formal. Ao final ele aborda questões associadas aos conceitos de temperatura e calor e às leis da termodinâmica. As questões estão apresentadas a seguir neste documento. Uma versão em formato pdf que pode ser impressa e distribuída diretamente aos alunos está em

- http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Marcos_Moura/questionario.pdf

²I. S. Araujo, E. Mazur, *Instrução pelos colegas e ensino sob medida: Uma proposta para o engajamento dos alunos no processo de ensino-aprendizagem de física*, Caderno Brasileiro de Ensino Física, v. 30, p. 362 (2013).

Além do material pré-aula, foi elaborada uma apresentação em *Power-Point* referente aos tópicos explorados na aula. Nessa apresentação o professor encontra ilustrações que auxiliam as discussões e sintetizam as principais informações do conteúdo. Miniaturas dos quadros da apresentação estão ao final deste documento. Versões prontas para uso em sala de aula estão disponíveis em dois formatos distintos, pdf e pptx, em

- http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Marcos_Moura/aula-exemplo.pdf
- http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2016_Marcos_Moura/aula-exemplo.pptx

O primeiro formato (pdf) permite que o professor use a apresentação em diferentes computadores, pois é compatível com variados sistemas operacionais. O segundo formato (pptx) é mais restrito, mas permite ao professor editar e adequar a apresentação de acordo com seus interesses e o perfil de seus alunos.

Questões Prévias

Princípios Matemáticos

Questão 1. Numa quinta-feira, véspera de feriado, os alunos de uma turma de segunda série do ensino médio pedem para o professor de física liberá-los 30 minutos mais cedo que o normal. O professor, então, propõe um jogo de dados. Se os alunos ganharem terão seu desejo realizado. Caso contrário, o professor continuará dando aula até que toque o sinal do colégio. No jogo com dois dados, um estudante da turma escolherá um número de 2 a 12 (inclusive) para representar o professor e outro número para representar os alunos. Após a escolha, o professor jogará os dois dados até que um dos números seja obtido. Este número será o vencedor.

I. Qual número você escolheria para representar o professor?

- | | | | |
|------|------|-------|-------|
| a) 2 | d) 5 | g) 8 | j) 11 |
| b) 3 | e) 6 | h) 9 | k) 12 |
| c) 4 | f) 7 | i) 10 | |

II. Qual número você escolheria para representar os alunos?

- | | | | |
|------|------|-------|-------|
| a) 2 | d) 5 | g) 8 | j) 11 |
| b) 3 | e) 6 | h) 9 | k) 12 |
| c) 4 | f) 7 | i) 10 | |

III. Explique por que você escolheu os números selecionados anteriormente?

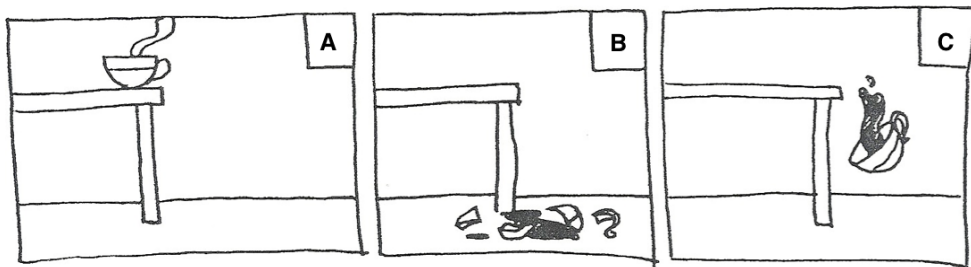
Questão 2. Você tem uma bandeja cheia de moedas, se você jogar todas para cima, fazendo-as girar no ar, é mais provável:

- a) todas as moedas caíam com a “cara” voltada para cima.
- b) todas as moedas caíam com a “coroa” voltada para cima.
- c) aproximadamente metade das moedas caíam com a “cara” voltada para cima (e o restante com a “coroa”).
- d) as três opções são equivalentes.

Reversível × Irreversível

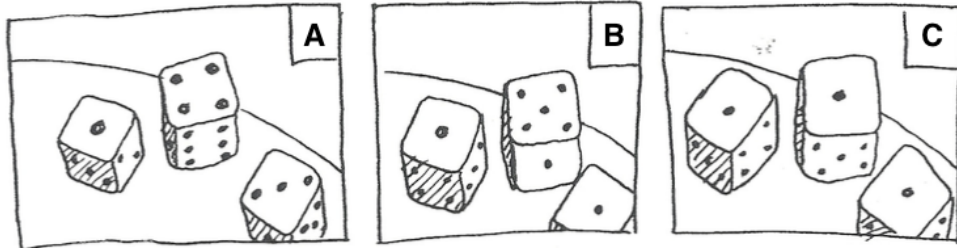
Questão 3. As imagens abaixo são o registro de um fotógrafo de 6 episódios distintos. Infelizmente, o fotógrafo responsável pelas imagens permitiu que elas se embaralhassem e ficassem em ordem aleatória. Tente ajudar nosso amigo a ordenar as fotografias de cada evento avaliando se é possível ou não determinar a sequência cronológica das imagens. Quando for possível estabelecer a cronologia, indique a ordem das imagens identificadas pelas letras A, B e C.

I. Qual é a ordem cronológica das imagens do episódio retratado abaixo?



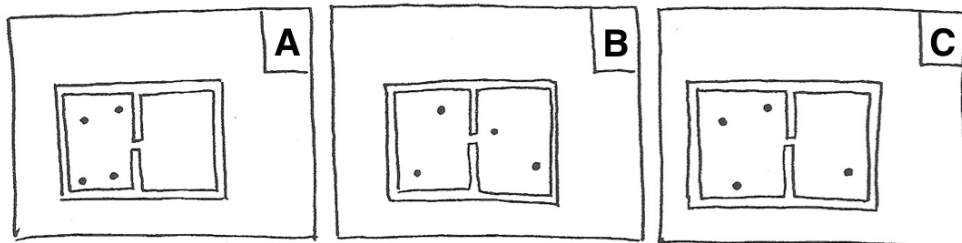
- a) A, B e C
- b) A, C e B
- c) B, A e C
- d) B, C e A
- e) C, A e B
- f) C, B e A
- g) Não é possível estabelecer a sequência cronológica.

II. Qual é a ordem cronológica das imagens do episódio retratado abaixo?



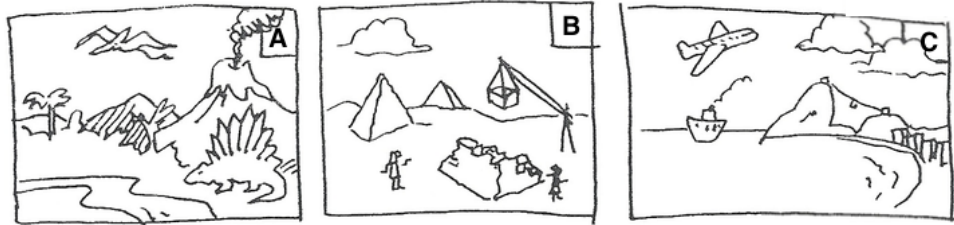
- | | |
|-------------|--|
| a) A, B e C | e) C, A e B |
| b) A, C e B | f) C, B e A |
| c) B, A e C | g) Não é possível estabelecer a sequência cronológica. |
| d) B, C e A | |

III. Qual é a ordem cronológica das imagens do episódio retratado abaixo?



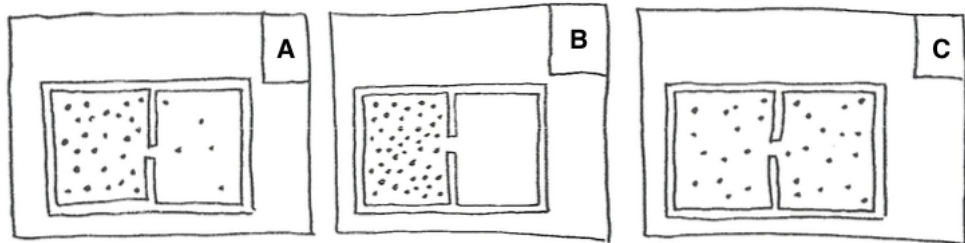
- | | |
|-------------|--|
| a) A, B e C | e) C, A e B |
| b) A, C e B | f) C, B e A |
| c) B, A e C | g) Não é possível estabelecer a sequência cronológica. |
| d) B, C e A | |

IV. Qual é a ordem cronológica das imagens do episódio retratado abaixo?



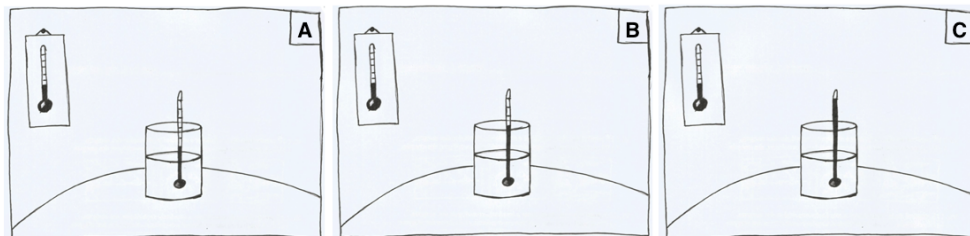
- a) A, B e C
 b) A, C e B
 c) B, A e C
 d) B, C e A
 e) C, A e B
 f) C, B e A
 g) Não é possível estabelecer a sequência cronológica.

V. Qual é a ordem cronológica das imagens do episódio retratado abaixo?



- a) A, B e C
 b) A, C e B
 c) B, A e C
 d) B, C e A
 e) C, A e B
 f) C, B e A
 g) Não é possível estabelecer a sequência cronológica.

VI. Qual é a ordem cronológica das imagens do episódio retratado abaixo?
 Observe a indicação dos termômetros em cada desenho.



- a) A, B e C
- b) A, C e B
- c) B, A e C
- d) B, C e A
- e) C, A e B
- f) C, B e A
- g) Não é possível estabelecer a sequência cronológica.

Questão 4. Qual, entre as opções abaixo, é a alternativa que melhor justifica suas respostas da questão anterior?

- a) Intuição.
- b) Observação de fenômenos corriqueiros.
- c) As leis da física que estudei no colégio.

Definição de Temperatura

Questão 5. Para você, o que significa quente e frio?

Questão 6. Como você explicaria o que é temperatura?

Máquinas Térmicas e Eficiência

Questão 7. Um professor explica que para um motor funcionar ele precisa de uma fonte de energia para gerar o movimento. Assim, pode-se utilizar a energia de uma combustão para movimentar um navio, por exemplo. Estando certo de que domina o princípio de conservação da energia, um estudante propões, então o seguinte problema:

“Se o navio precisa retirar energia de uma fonte para se locomover, porque os engenheiros não projetam um motor que retire energia da água do oceano, transformando a água em gelo, e utilize essa energia para se deslocar?”

I. Esse modelo viola a lei o princípio de conservação de energia (1ª lei da termodinâmica)? Explique.

II. Você acredita que esse motor de navio poderia ser construído? Explique.

Exemplo de Aula para o Ensino Médio

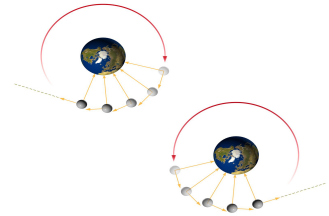
A Seta do Tempo

e a

2ª Lei da Termodinâmica

A seta do tempo

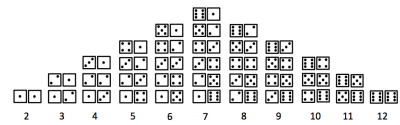
- Os fenômenos à nossa volta são irreversíveis
- No entanto, as leis fundamentais da Física são reversíveis.



A seta do tempo

- Por que os fenômenos a nossa volta são irreversíveis?
- Por que essa irreversibilidade não aparece em sistemas “pequenos” (com poucas partículas)?

Jogo de Dados - Macroestado e Microestado



Microestados: equiprováveis

10 → Macroestados: não-equiprováveis

Cara ou Coroa - Sistema de dois estado.



50% 50%

| Moeda 1 | Moeda 2 | Probabilidade dos Microestados | Probabilidade dos Macroestados |
|---------|---------|--------------------------------|---|
| Cara | Cara | $\frac{1}{4}$ | $\frac{1}{4}$ |
| Cara | Coroa | $\frac{1}{4}$ | $\frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$ |
| Coroa | Cara | $\frac{1}{4}$ | |
| Coroa | Coroa | $\frac{1}{4}$ | $\frac{1}{4}$ |

Multiplicidade (Ω)

Um modelo de gás ideal

Macroestado



Microestados

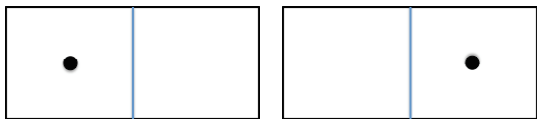


$$\Omega = 4$$

Multiplicidade (Ω)

Cara e coroa e a analogia com o gás ideal.

$N = 1$



$\Omega = 1$

$\Omega = 1$

Multiplicidade

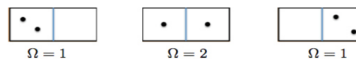
Gás ideal com duas partículas:

$N = 2$

Microestados:



Macroestados:

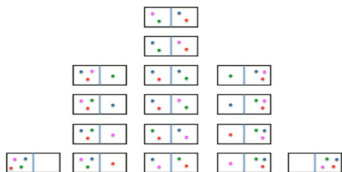


Multiplicidade

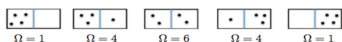
Gás ideal com quatro partículas:

$N = 4$

Microestados:

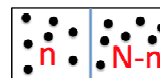


Macroestados:



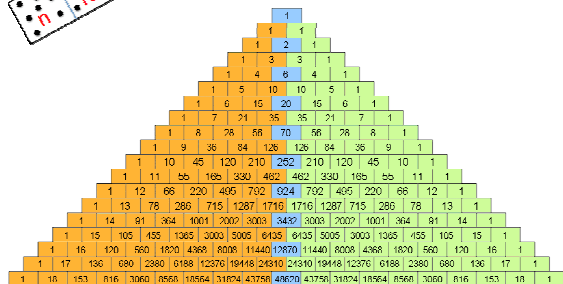
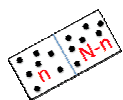
Multiplicidade

Gás ideal com N partículas:



$$\Omega(N, n) = \frac{N!}{n!(N-n)!}$$

Multiplicidade



Com grande número de partículas:

- Situações em que o número de partículas em uma das metades é muito maior que o da outra metade são altamente improváveis;
- Situações em que as partículas são distribuídas quase igualmente entre as duas metades do recipiente são muito mais prováveis que quaisquer outras.
- Para um número de partículas grande, da ordem de 10^{23} , a imensa maioria (na verdade, a quase totalidade) dos microestados acessíveis correspondem à uma distribuição praticamente homogênea de partículas pelo recipiente.

A origem da irreversibilidade

Muitíssimo provável: baixa multiplicidade → alta multiplicidade.
 Pouquíssimo provável: alta multiplicidade → baixa multiplicidade.

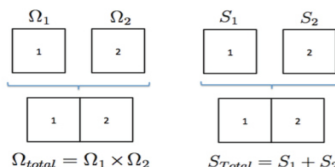


“O sistema de partículas sempre evolui de um estado improvável para um estado provável” (L. Boltzmann*)

*L. Boltzmann, Wien. Ber., v. 76, p. 373-435 (1877), tradução para o inglês de K. Sharp e F. Matschinsky, Entropy, v. 17, p. 1971 (2015).

Multiplicidade e Entropia

Entropia: $S = k \ln \Omega$



A Segunda Lei da Termodinâmica

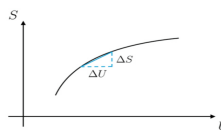
Um sistema tende a evoluir a um estado de máxima multiplicidade (estado de equilíbrio).

$S = k \ln \Omega$

A entropia de um sistema isolado nunca diminui!

- $\Delta S_{Total} > 0$ processo reversível
- $\Delta S_{Total} = 0$ processo reversível

Entropia, Energia e Temperatura



$\frac{1}{T} = \frac{\Delta S}{\Delta U}$

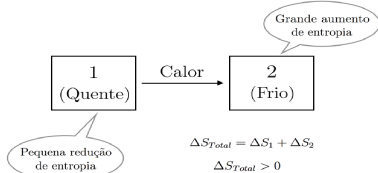
N e V constantes

Para uma mesma variação de energia:

- pequenas variações de entropia em altas temperaturas;
- grandes variações de entropia em baixas temperaturas.

Entropia, Energia e Temperatura

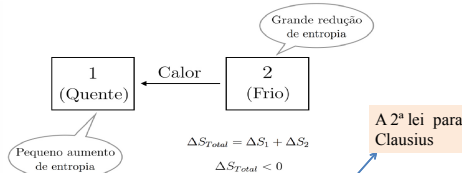
Sentido do fluxo de calor



A entropia total do sistema aumenta quando o calor flui de um corpo quente para um corpo frio.

Entropia, Energia e Temperatura

Sentido do fluxo de calor

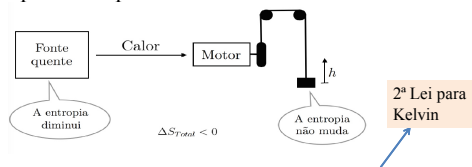


A 2ª lei para Clausius

É impossível realizar um processo cujo único efeito seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.

Máquinas Térmicas

A máquina perfeita é possível?



É impossível realizar um processo cujo único efeito seja remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho.

Máquinas Térmicas

A máquina térmica possível

