



Abordando a entropia: trabalhando os conceitos de microestados e macroestados com alunos de segundo ano do ensino médio

Eliomácio Rabelo da Silva Cunha¹; Antônio de Sousa Marinho Filho²; Antônio Joel Ramiro de Castro³

Como Citar:

CUNHA, Eliomácio Rabelo da Silva; FILHO, Antônio de Sousa Marinho; DE CASTRO, Antônio Joel Ramiro. Abordando a entropia: trabalhando os conceitos de microestados e macroestados com alunos do segundo ano do ensino médio. Revista Sociedade Científica, vol.7, n. 1, p.1577-1599, 2024.
<https://doi.org/10.61411/rsc202425317>

DOI: 10.61411/rsc202425317

Área do conhecimento: Ciências Naturais.

Palavras-chaves: Entropia; Probabilidade; Estatística; Macroestados; Microestado.

Publicado: 24 de março de 2024

Resumo

O presente estudo apresenta uma proposta de ensino da entropia, considerando os conceitos de microestados e macroestados para uso com alunos do segundo ano do ensino médio; para tanto, propõe-se uma adaptação da ideia de Nivaldo de Oliveira Gregio (ex-aluno do MNPEF): levar os conceitos de entropia e sua aplicação em sala de aula, através de vídeos e material didático concreto (painel, moedas, baralho, caixa de acrílico) com a finalidade de tratar de forma conceitual, com alguns exemplos, através de cálculos no nível preciso. A estatística e a probabilidade são partes fundamentais e subsidiam como ferramenta Matemática. A contagem de configurações possíveis precisa considerar critérios claros para identificar microestados diferentes. As práticas mostradas ao longo deste texto servem para facilitar a contagem dos diferentes microestados, porém são irrelevantes no sentido de definir-se o número de microestados de cada macroestado. A aparente trivialidade e as dúvidas geradas neste exercício de construção dos microestados possíveis consistem em aspecto essencial para a correta consideração da natureza probabilística dos fenômenos naturais. Conclui-se que, ao associar o aumento de entropia nas transformações irreversíveis com a degradação energética, influi no desenvolvimento da vida e no meio ambiente, demonstrando o caráter probabilístico da entropia. Finalmente, o intuito desse artigo é fornecer ferramentas para que o ensino da entropia possa ser feito de maneira mais significativa, mais participativa, levando o estudante a gostar de aprender novos conceitos.

¹Feclesc – UECE ✉

²Feclesc – UECE ✉

³UFC ✉



1. **Introdução**

A entropia é, em geral, ensinada ou tratada de forma superficial nos livros, textos de Ciências ou Física do ensino médio, isso quando não aparece como assunto complementar. Até mesmo no material de vários sistemas de ensino (grandes escolas particulares), quase não se vê acerca do assunto, talvez por ser pouco cobrado nos vestibulares e no Enem. Frequentemente tem-se uma unidade sobre o estudo da termodinâmica, sendo dedicado um ou dois capítulos (primeira e segunda lei da termodinâmica).

Quando se ensina ou apresenta, por exemplo, a Segunda Lei através de uma fórmula que fornece o rendimento de máquinas térmicas, negligencia-se muitas vezes o significado e a importância que essa tem no contexto atual. Em particular, o aspecto microscópico da lei é deixado de lado. Ora, fechar os olhos para isso é ignorar o aspecto estatístico da lei, seu significado e suas consequências nas aplicações modernas da Teoria das Probabilidades, da estatística, ampliando sobremaneira os métodos da Termodinâmica para outras áreas do conhecimento.

Assim, esse artigo explicita a proposta que objetiva levar aos alunos do segundo ano do ensino médio o conceito de entropia, os cálculos básicos de variação de entropia, aspectos estatísticos, possibilitando ao aluno do ensino médio entender a temática qualitativamente e quantitativamente. Propõe-se, então, uma abordagem prática e sua utilização nas várias transformações que ocorrem na natureza. No processo, é salutar frisar para eles as consequências do aumento da entropia, dos seus efeitos ambientais, científicos e até sociais.

Faz-se importante ressaltar que este trabalho é inspirado na dissertação de Mestrado de Nivaldo de Oliveira Gregio, texto no qual o autor constrói materiais didáticos para o ensino da entropia. A proposta de ensino ora apresentada pauta-se no uso desse material com algumas adaptações e complementos para o ensino dos



conceitos de entropia no segundo ano das escolas públicas estaduais e no Instituto Federal do Ceará no Município de Morada Nova.

É de igual forma importante esclarecer que esse artigo não é simplesmente um exemplo de como fazer o ensino da entropia em sala de aula, mas uma seleção de conceitos, definições e ferramentas que possibilitem aos professores descobrirem a importância do ensino da entropia no nível médio, servindo como subsídio básico adequado para preparação de aulas as quais motivem os alunos, sejam significativas.

2. Fundamentação teórica

2.1 Breve histórico

No final do século XIX, o físico austríaco Ludwig Eduard Boltzmann propôs e demonstrou o teorema – H, segundo o qual um gás inicialmente fora do equilíbrio termodinâmico atinge o equilíbrio após algum tempo, como consequência das múltiplas colisões entre suas moléculas; o estado do gás é matematicamente descrito por uma distribuição de velocidades das moléculas e, em particular, o estado de equilíbrio é descrito pela distribuição de Maxwell-Boltzmann.

Esse processo é irreversível e a irreversibilidade é descrita pela existência de uma função H, negativo da entropia, que decresce. Às críticas e observações ao seu trabalho, Boltzmann respondeu que seu teorema é estatístico e representa o comportamento “mais provável” do gás.

No teorema H, $H = -S = k \int dV p$, p , onde p é a distribuição de velocidades (probabilidades de um estado de velocidade) e dV é o elemento de volume no espaço de velocidades.

Após essas críticas, Boltzmann desenvolveu uma expressão para a segunda lei, obtida por contagem de microestados $S = k \ln \Omega$, onde S é a entropia e k, a constante de Boltzmann. A partir disso, os físicos adotaram uma nova forma de abordagem da natureza no estudo da termodinâmica, baseada em princípios da estatística.



2.2 Teoria Matemática da Comunicação

O presente artigo está associado à Teoria Matemática da Comunicação e à aprendizagem significativa proposta por David Ausubel. Essa teoria foi proposta pelo americano Claude Shannon (1916-2001) e por Warren Weaver nos anos 40 do século XX e tem como objetivo o estudo dos mecanismos de transferência de sinais. Shannon utilizou como modelo teórico a analogia com termodinâmica em que a entropia é definida como grau de desordem dentro do sistema. Em consequência, a teoria da informação possibilita a quantificação da informação ao nível do sinal, deixando de lado a informação semântica, ou seja, o conteúdo nocional.

Na teoria da informação, a quantidade de informação é inversamente proporcional à probabilidade de aparecimento de um sinal. A teoria de Shannon pretendia estudar as possibilidades de otimizar a transmissão das mensagens, compreendidas como sequências de signos, definidos por algum código, deixando de lado a parte do significado. Definiu-se também os componentes de um modelo de comunicação, tais como o emissor, o receptor, o canal, o código, a mensagem e o ruído.

As conclusões da dita teoria foram muito proveitosas para o desenvolvimento da telecomunicação e da sua junção com a inteligência artificial.

É importante salientar que, para que ocorra aprendizagem, parte-se do pressuposto de que os estudantes têm o que Ausubel chamou de “Subsunçor” (conhecimento prévio de matemática) para que ocorra uma Aprendizagem significativa conforme a proposta de Ausubel. Moreira (2011, p. 14) descreve a aprendizagem significativa como:

O processo através do qual uma nova informação (um novo conhecimento) se relaciona de maneira não arbitrária e substantiva (não literal) à estrutura cognitiva do aprendiz. É no curso da aprendizagem significativa que o significado lógico do material de aprendizagem se transforma em significado psicológico para o sujeito.



Para Ausubel (1963, p. 58), “a aprendizagem significativa é o mecanismo humano, por excelência, para adquirir e armazenar a vasta quantidade de ideias e informações representadas em qualquer campo de conhecimento”. Sendo Ausubel pertencente à linha cognitivista, o aprendiz atribui significado à realidade na qual o discente está inserido. Logo, a aprendizagem não ocorre de forma aleatória, não por acaso novos conhecimentos se estruturam fortalecendo conhecimentos já existentes.

2.3 Entropia

No estudo da Primeira Lei da termodinâmica, há o estabelecimento da conservação da energia. Assim, pode-se imaginar muitos processos ou transformações termodinâmicas em que a energia se conserva e que, todavia, nunca ocorrem. Por exemplo: quando se coloca em contato dois corpos, um quente e um frio, não acontece do quente ficar mais quente e o frio ficar mais frio. Contudo, essa transformação não viola a primeira Lei da Termodinâmica.

O conceito de entropia aqui é como uma medida quantitativa da desordem de um sistema ou corpo. O termo desordem às vezes pode dar uma ideia diferente da que se pretende expressar. Entropia está associada com desordem e o enunciado da segunda lei que em processos naturais a entropia do sistema tende a aumentar é equivalente a dizer que a desordem do sistema tende a aumentar. Assim colocado, o sentido termodinâmico da palavra desordem é

para expressar que existe uma desorganização ou falta de ordem, nada mais que isso. Então, é viável tratar em primeiro lugar o aspecto qualitativo, dando um sentido intuitivo de equivalência entre entropia e desordem e, em segundo lugar, dar uma base sólida quantitativa para esta equivalência.

Para melhor compreensão quanto à relação entropia-desordem, é possível imaginar uma expansão isotérmica reversível de um gás ideal que recebe certa quantidade de calor dQ e se expande. Considerando-se que o sistema inclui somente o



gás ideal, a transformação isotérmica deste gás terá variação da energia interna nula, pois a energia interna é proporcional à temperatura absoluta. Logo, aplicando a primeira lei da termodinâmica, pode-se escrever que: $dQ = dU + dW \Rightarrow dQ = dW$, o trabalho infinitesimal dW realizado pelo gás é dado por $dW = p.dV$, então, na transformação isotérmica: $dQ = p.dV$, utilizando-se da equação de Clapeyron, escreve-se:

$$p.V = n.R.T \Rightarrow p = \frac{n.R.T}{V}, \text{ fazendo as devidas substituições, tem-se:}$$

$$dQ = \frac{n.R.T}{V} dV, \text{ assim: } \frac{dQ}{T} = n.R. \frac{dV}{V}.$$

Com isso, a relação $\frac{dQ}{T}$ é a definição da variação infinitesimal da entropia.

Por conseguinte, pode-se concluir que a desordem é proporcional à variação da entropia num processo reversível infinitesimal. É possível compreender da seguinte forma:

O gás passa para um estado mais desordenado depois da expansão porque as moléculas se movem em um volume maior e suas posições tornam-se mais aleatórias. Logo a variação relativa de volume dV/V fornece uma estimativa do aumento da desordem”, e a equação anterior mostra que essa razão é proporcional à grandeza dQ/T (YOUNG; FREEDMAN, 2004, p. 218).

Existe uma consideração essencial nessa relação entropia-probabilidade. A entropia, cuja variação é definida pela integral, é uma quantidade aditiva, enquanto a probabilidade é uma quantidade multiplicativa. Por exemplo: a probabilidade de jogar um dado e encontrar um quatro é de $1/6$, mas ao lançar dois dados a probabilidade de obter um quatro é $1/6.1/6$. Por outro lado, se um sistema A tem entropia S_A e um sistema B tem entropia S_B , um sistema C formado pelos sistemas A e B terá entropia $S_C = S_A + S_B$.

Como, então relacionar entropia e probabilidade, se uma se soma e a outra se multiplica? A solução natural é que possam ser associadas através de uma função



logarítmica. Sabendo, da matemática do ensino médio, que $X = Y \cdot Z$, então $\log X = \log Y + \log Z$, portanto, o logarítmico é a forma lógica de relacionar essas duas grandezas (entropia e probabilidade).

Ludwing Eduard Boltzmann (1844-1906) em seus trabalhos publicados durante a década de 1870 mostrou que a segunda lei da termodinâmica é essencialmente uma lei estatística (GASPAR, 2000, p.378), mas a equação tal como se conhece foi proposta por Max Planck, no seu artigo em alemão “Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum” de 1901.

Apesar disso, essa fórmula, famosa, encontra-se gravada no túmulo de Boltzmann, qual seja: $S = k \cdot \ln W$. Nessa equação, k é a constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), e W é chamada de multiplicidade que corresponde ao número de microestados de uma configuração ou de um macroestado e S é a entropia da configuração. Nota-se que se utiliza a constante de Boltzmann que decorre de distribuições estatísticas, de energias e tempo, ou de velocidades e momento linear em função da temperatura absoluta (K) em determinada região do espaço com posições definidas x, y, z .

Fazendo a conexão entre a teoria de informação de Shannon e a entropia, é possível afirmar que a entropia é uma função logarítmica e que os Bits (0 e 1) consistem na base mais comum para se tratar informação. Assim, pode-se utilizar a equação $S_i = C \cdot \log W$ na base 2 como a Entropia associada com a multiplicidade de microestados, porém para facilitar as comparações manteremos a base e introduzindo a constante C que se refere à constante para mudança à base de interesse.

2.2.1 Variação da entropia

A variação da grandeza entropia define se um processo é reversível ou irreversível, pois, como já é sabido, em todos os processos irreversíveis em um sistema fechado a entropia aumenta. A pergunta que surge é: como determinar a variação de entropia?



Figura 1- Transformação isotérmica reversível. Fonte Gregio (2016).

Voltando à expansão isotérmica reversível: ao imaginar que o sistema em consideração corresponde a certa quantidade de gás ideal confinada (fronteira – ver figura acima) no interior de um cilindro construído com paredes adiabáticas, cuja base seja uma fonte de calor mantida a uma temperatura constante T . Como a base é mantida a uma temperatura constante, o gás terá uma temperatura fixa. Esse cilindro é provido de um êmbolo que pode se movimentar sem atrito; sobre o êmbolo móvel coloca-se um recipiente contendo certa quantidade de pequenas bolinhas de chumbo. Merece atenção o fato de que a vizinhança neste caso inclui: as paredes do cilindro, o êmbolo, a base de aquecimento e o ambiente externo.

Para efetuar a expansão isotérmica reversível de um volume (V_i) até o volume (V_f), basta ir tirando uma bolinha de chumbo de cada vez e espera uma nova situação de equilíbrio, quando se atingirá um novo estado final, com a mesma temperatura inicial T e volume (V_f).

Determinando-se calor trocado (ΔQ_i) a cada bolinha (i) retirada, pode-se encontrar a quantidade de calor total (ΔQ_T) na retirada de N bolinhas, somando-se todas as contribuições de $i=1$ até $i=N$.

A entropia é uma função de estado assim como a pressão (p), a temperatura (T) e a energia interna (U). No caso desta expansão isotérmica reversível, a variação da entropia pode ser determinada pela simples divisão do calor total induzido pela temperatura T do sistema:



$\Delta S_T = \Delta Q_T / T$. Logo, a variação total da entropia assim não depende da substância de trabalho.

Ressalta-se que se tudo ocorreu de forma reversível, a variação de entropia será nula e existem duas situações distintas e importantes a considerar: a entropia gerada em uma transformação irreversível e a entropia trocada entre o sistema e a vizinhança. O calor recebido pelo sistema sendo idêntico ao calor retirado da vizinhança, teremos: $\Delta Q_T = \Delta Q_V$, e assim, $\Delta S_U = \Delta Q_T / T - \Delta Q_V / T = 0$. Vê-se a aplicação desse conceito determinando matematicamente a variação de entropia de uma transformação isotérmica de um gás ideal.

Como já demonstrado, tem-se a equação: $dQ/T = nR \cdot dV/T$, e integrando os termos dessa equação de um estado inicial i para um estado final f , obtém-se:

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n \cdot R \cdot \ln \frac{V_f}{V_i}.$$

A integral do lado esquerdo dessa equação depende dos estados i e f naturalmente, usamos a isoterma para ir do estado inicial i para o estado final f , mas sendo $dS = dQ/T$ uma função de estado, a variação delta S não dependerá da forma ou do caminho com que o sistema passa de um estado para outro, então:

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ_R}{T}$$

O índice R foi colocado em dQ para deixar claro que o calor deve ser trocado de forma reversível.

Da equação anterior, percebe-se que a variação da entropia ⁴ depende da energia transferida em forma de calor e da temperatura na qual o calor é transferido e como T é a temperatura absoluta, sempre positiva, o sinal, as variações da entropia são iguais ao sinal trocado.



3. Metodologia de aplicação

3.1 Recursos didáticos

O material necessário para desenvolver a proposta de trabalho compreende: vídeo, pedaços de gelo num recipiente, garrafa de café, caixinha de acrílico com bolinhas coloridas.

Para facilitar o entendimento do tema pelos alunos e a fim de tornar o assunto leve e prático alguns materiais tornam-se importantes na construção de uma aprendizagem mais significativa: passaremos inicialmente um (ou mais) vídeo coletado na internet para mostrar os conceitos de reversibilidade e irreversibilidade como transformações corriqueiras que muitas vezes nem se imagina existir, como o estourar de pipocas. Com isso, visa-se a despertar o interesse pela ocorrência do processo inverso, a pipoca se transformando em milho.

Levaremos também uma garrafa de café à sala de aula e pediremos a um aluno que segure a xícara com a mão enquanto se coloca café; o objetivo é a percepção de que a mão está esquentando enquanto o café esfria. Não vamos queimar mão de ninguém, é claro. Já imaginou o contrário: a mão ficar fria e o café esquentar?

Iniciaremos a aula assim: mostrando que tanto a pipoca se transformando em milho quanto o café quente esquentar ao receber calor de nossas mãos são processos que não violam um dos princípios mais fundamentais da natureza (a conservação da energia). É comum ouvir nas aulas de física ou mesmo de química que a “energia não se cria, não se perde, ela se transforma”, no entanto existem processos que, mesmo obedecendo ao princípio da conservação da energia, sofrem transformações somente em um sentido, são os chamados de processos irreversíveis.

Colocado assim, perguntar-se-á à turma o que seria necessário para ocorrer o processo inverso, se possível. A resposta à pergunta começaria pela prática de se colocar pedaços de gelo no interior de um copo ou outro recipiente transparente com o tampo aberto, colocado sobre a mesa da sala de aula tão logo deu-se início à aula. A essa altura, parte do gelo já estaria derretendo, sofrendo fusão. Supondo que não



ocorrerão indagações por parte dos alunos nessa etapa, pois é comum se dissermos que para que a água obtida, a partir do gelo, volte a congelar é necessário retirar calor, colocando essa água no interior de um congelador (resposta da pergunta; o agente externo é quem torna possível esse congelamento). Esse congelamento, nessas condições, obedece ao princípio da conservação da energia, mas não ocorre espontaneamente em ambiente com temperatura acima de 0°C .

3.2 Usando o baralho para mostrar o conceito de desordem

Há que se ter algum princípio, além da conservação da energia, que defina o sentido de algo acontecer, expressando em qual sentido pode acontecer e no sentido contrário não. Num momento posterior descrito anteriormente, é possível esclarecer aos alunos que existe uma grandeza que define o sentido das transformações espontâneas, portanto, irreversíveis, que é a entropia: “Todos os processos irreversíveis em um sistema fechado são acompanhados por aumento de entropia” (HALLIDAY; RESNICK, 2012, p. 248).

Para mostrar que certas transformações só ocorrem num sentido e que nele há aumento da desordem, iremos utilizar como recurso didático um baralho, instrumento a partir do qual se mostra como as cartas estão organizadas, sendo ele novo ou as cartas estando separadas por naipes e numa ordem, por exemplo do ás até o rei, que corresponde uma configuração possível. Basta embaralhar para perceber facilmente que as cartas estão sendo tiradas de sua ordem inicial e que existe um número imenso de ordenamentos possíveis.

Portanto, recuperar a ordem inicial passa a ser uma questão de probabilidade, difícil de acontecer. O aluno aqui pode participar fazendo o embaralhamento. Ilustra-se com isso uma transformação irreversível, na qual o estado final (desordem) é uma situação mais provável de ocorrer espontaneamente que o estado ordenado inicial do baralho.



3.3 Tornando quantitativo o termo desordem com o uso de painel

Como em todas as analogias entre o mundo macroscópico e os fenômenos envolvendo átomos e moléculas, existem limitações. A forma de contagem de configurações possíveis das cartas leva em conta que estas são distinguíveis umas das outras, no entanto, para gases, líquidos ou sólidos as partículas constituintes não são, a princípio, identificáveis uma a uma.

Para desenvolver uma linguagem mais precisa e quantificável em relação à associação entropia-desordem, consideraremos as configurações possíveis de um sistema fechado, relacionando-as com os conceitos de número de micro e macroestados possíveis, partindo de dois estados de energia E_1 e E_2 que podem ser ocupados com igual probabilidade por quatro partículas.



Figura 2 - Sistema fechado com dois níveis de energia e quatro partículas, que podem ocupar livremente qualquer um desses estados. Fonte: os autores

Nesse sistema, cada macroestado é dado pela soma da energia total das quatro partículas. Os microestados correspondem às diferentes distribuições das partículas em cada um dos cinco macroestados possíveis: $(4E_1)$; $(3E_1+1E_2)$; $(2E_1+2E_2)$; $(1E_1+3E_2)$; $(4E_2)$.

Buscando dar visibilidade e tornar quantitativo o termo desordem, utilizamos um painel onde representamos os dois níveis de energia. Usa-se também quatro cartelas de cores diferentes para representar as partículas, e suas configurações ilustram os microestados e os macroestados possíveis. Computando-se o total de microestados temos todas as configurações possíveis:

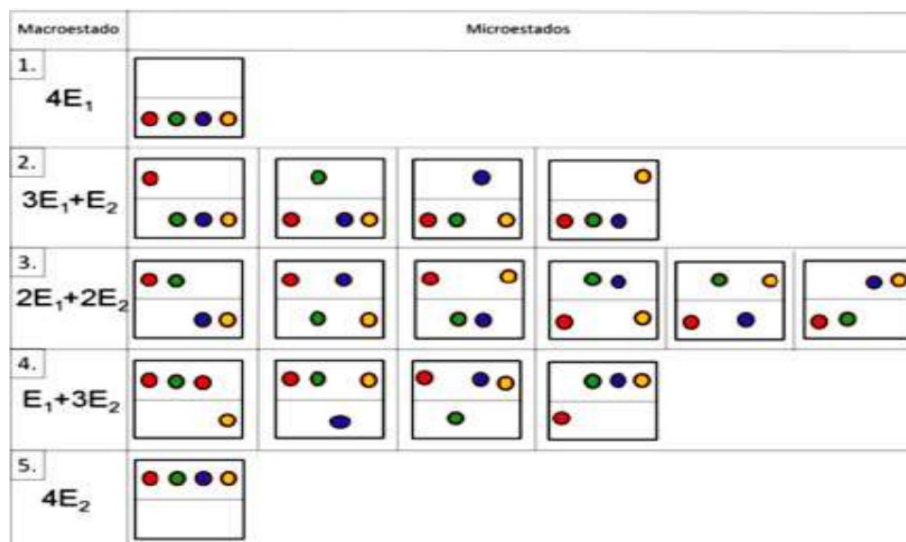


Figura 3 - Distribuição de todos os microestados de cada macroestado. Fonte: Gregio (2016).

Há 5 macroestados de energias diferentes e um total de 16 microestados; a probabilidade de ocorrência de um determinado macroestado é obtida dividindo-se o número de microestados do macroestado pelo número total de microestados possíveis. Em nosso exemplo, a probabilidade de ocorrência de cada macroestado é: $P_1 = 1/16$; $P_2 = 4/16$; $P_3 = 6/16$; $P_4 = 1/16$.

O aluno deverá perceber que o macroestado com maior probabilidade de ocorrer corresponde àquele com maior número de microestados (configurações possíveis), o que se associa à maior desordem e, portanto, maior entropia, podendo-se assim representar matematicamente a desordem do sistema. Nesse caso, de 4 partículas que podem ser distribuídas em 2 estados, o macroestado de maior desordem - portanto maior entropia - é o de número 3 que tem a maior probabilidade de ocorrência 6/16.

3.4 Moedas e configurações possíveis

Analogamente, pode-se relacionar o aumento de entropia com o aumento da desordem entendida como situação de maior número de configurações possíveis, utilizando, por exemplo, quatro moedas idênticas. Sabem-se que um dos lados da moeda é chamado de “coroa” e o outro é “cara”.

As caras e coroas podem ser distribuídas em 5 diferentes macroestados: 4 coroas; 3 coroas e uma cara; 2 coroas e 2 caras; uma coroa e 3 caras; 4 caras. Cada um desses macroestados pode ter um ou mais microestados, que incluem informações sobre cada uma das moedas, individualmente.

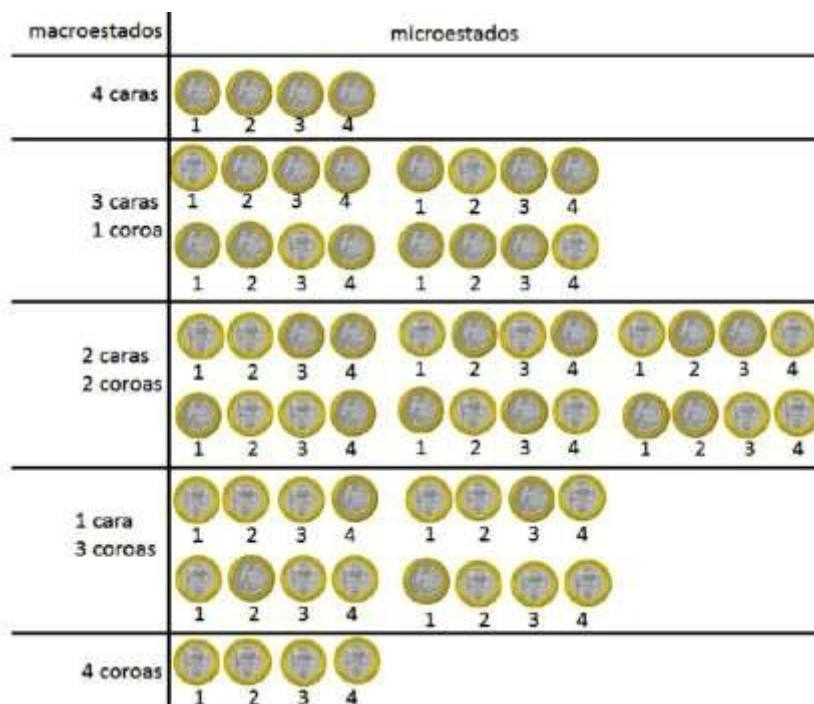


Figura 4 – distribuição probabilística de 4 moedas, podendo dar cara ou coroa. Fonte: Gregio (2016).

Para $N = 4$ moedas existem, portanto, 5 macroestados e 16 (42) microestados e no microestado com 2 caras e 2 coroas existem 6 microestados, sendo, portanto, o de maior probabilidade de ocorrer, 6 em 16.

Podemos mostrar que para dois estados possíveis (cara ou coroa) o número de microestados (W) depende do número N de partículas, sendo: $W = 2^N$. Dessa forma, o número de microestados cresce rapidamente com o número N de moedas; para $N = 100$ há 2100 microestados. Imagina?!



4. **Resultados esperados**

Com o uso dos vídeos (gelo derretendo e pipoca estourando), espera-se que fique compreendido o que são transformações irreversíveis. O gelo derretendo no copo sobre a mesa na sala de aula complementará o entendimento. O uso do baralho demonstrará a mesma transformação de forma enfática, já que pode ser manuseado aos olhos de todos, pois ao abrir o baralho, visualiza-se que as cartas estão ordenadas. Em seguida, far-se-á o embaralhamento. Pode-se fazer perguntas nesse momento a respeito do que está acontecendo com as cartas. Dessa forma, espera-se que os alunos percebam o caráter irreversível das transformações.

É sabido que a relação entropia-desordem é diferente da noção de desordem usada no cotidiano. Nesse sentido, para entender de maneira correta essa relação, o uso do painel de macro e microestados ajudará o aluno a perceber o caráter probabilístico da entropia, seu conceito e sua concepção como uma medida dessa desordem. O ideal é que os alunos compreendam que o estado de maior entropia é o que possui o maior número de microestados.

4.1 **Micro e Macroestado**

Para esclarecer a relação entropia-desordem, usar-se-á a distribuição de 4 partículas que podem ocupar com igual probabilidade dois níveis de energia E_1 e E_2 . As partículas serão representadas por pequenos discos imantados construídos com etiquetas circulares de quatro cores diferentes (vermelho, rosa, azul e verde) coladas numa folha imantada⁵ com adesivo e recortadas no formato circular. São necessários 16 discos de cada cor.

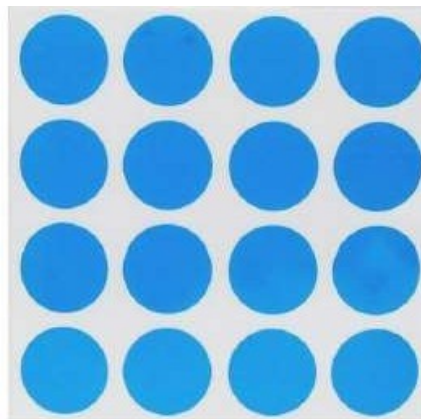


Figura 5 - Etiquetas usadas para representar partículas. Fonte: Gregio (2016).



Figura 6 – folha imantada adesiva para colar as etiquetas. Fonte: Gregio (2016).

Para distribuir essas partículas será usado um quadro branco magnético (à venda nas livrarias) no qual será desenhada uma tabela com um pincel de tinta permanente. Também podemos preparar esse quadriculado numa folha de papel, prendendo-a no painel metálico por meio de ímãs. Nesse modelo os macroestados são caracterizados pela energia total das partículas. Por exemplo, as 4 partículas colocadas no nível E1 geram a energia $4E_1$, uma partícula colocada no nível E1 e 3 no nível E2 resultará na energia $1E_1 + 3E_2$.

Prosseguindo com as diferentes opções de distribuição das 4 partículas, nos dois níveis de energia, teremos os macroestados: $4E_1$, $3E_1 + E_2$, $2E_1 + 2E_2$, $E_1 + 3E_2$ e $4E_2$. Teremos, então, 5 macroestados no total.

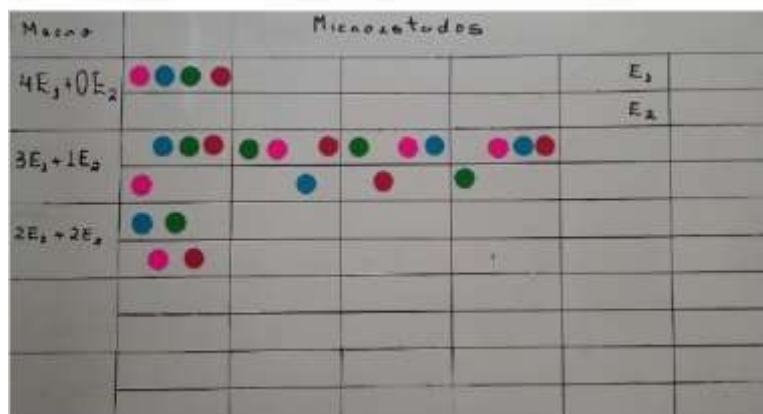


Figura 7: Quadro branco magnético para distribuir partículas. Fonte: Gregio (2016).

Na Figura 7, a primeira coluna representa os cinco macroestados possíveis e nas outras colunas representa os dois níveis de energia, E_1 e E_2 , disponíveis em cada macroestado. Os microestados correspondem às diferentes distribuições possíveis das partículas em cada macroestado. Nessa situação, de dois níveis de energia, ocupadas por quatro partículas, teremos 16 microestados. Sendo quatro partículas distribuídas em dois níveis de energia $16 = 2N$, onde 2 corresponde ao número de níveis de energia e N é o número de partículas.

Define-se multiplicidade (W) em macroestado como o número de microestados desse macroestado. É importante deixar claro que a entropia pode variar de forma logarítmica com a multiplicidade (W).

A primeira coluna representa os cinco macroestados possíveis e nas outras colunas representamos as partículas, num mesmo nível de energia, não teremos um microestado diferente. Os microestados se diferem quando uma partícula que ocupa um nível puder ocupar o outro nível. As partículas são idênticas, mas são distintas uma das outras, por isso foram feitas de cores diferentes.

Há cinco macroestados com energias diferentes e um total de 16 microestados. A probabilidade de ocorrência de um determinado macroestado é obtida dividindo-se o



número de microestados do macroestado pelo número total de microestados. Em nosso exemplo, a probabilidade de ocorrência de cada macroestado é:

$$P_1 = \frac{1}{16} \quad P_2 = \frac{4}{16} \quad P_3 = \frac{6}{16} \quad P_4 = \frac{4}{16} \quad P_5 = \frac{1}{16}$$

4.2 Procedimento em sala de aula: aplicação

Antes de realizar essa atividade, deve ser realizada uma aula sobre entropia na qual se relacione o aumento de entropia com o aumento da desordem. Essa atividade visa a relacionar melhor a entropia e desordem, fugindo do uso cotidiano da palavra desordem, relacionando entropia com o número de microestados de cada macroestado, a sua multiplicidade. Portanto, a entropia maior, a maior desordem, relaciona-se com uma multiplicidade maior.

1ª etapa- trabalho em grupo: os alunos serão divididos em grupos de cinco alunos e, como forma de incentivo à participação, cada grupo receberá um nome para sua identificação, nome que pode ser dado pelos próprios alunos.

Para também incentivar a participação dos alunos, essa atividade será dividida em seis fases com o intuito de serem vivenciadas uma de cada vez, sendo acompanhado o tempo em que cada etapa é cumprida; a próxima fase só seria entregue depois de cumprida correta e completamente a fase anterior.

Para desenhar as várias distribuições das partículas, será fornecida uma tabela para que os alunos preencham conforme a realização de cada fase.



	3E ₁ + 1E ₂	•	•	•						
		•								

Figura 8 – Tabela (painel) para ser preenchida pelos alunos. Fonte: Gregio (2016).

Instrução de como será feita essa atividade: utilizando-se do painel metálico anteriormente construído. O primeiro exemplo (uma distribuição com 3 partículas no nível 1 e uma partícula no nível 2 (3E₁ + 1E₂)) será marcado no painel metálico.

Após essa explicação, entregar-se-á a primeira fase, recortada das demais, marcando a hora do início. Após terminarem, estando correta a 1a fase, marca-se a hora do fim da 1a fase e entregar-se-á a instrução para a 2a e assim sucessivamente até a realização da última fase.

Espera-se dos alunos uma série de respostas, conforme o padrão abaixo demonstrado:

Início:

Fase 1: São 4 partículas, cada uma representada por uma cor diferente e elas podem ser distribuídas em dois níveis de energia, E₁ e E₂. Por exemplo: podem ficar 3 no nível E₁ e uma no nível E₂; nesse caso a energia total é 3E₁ + 1E₂.

Existem outras maneiras diferentes de distribuir essas partículas de forma a terem essa mesma quantidade de energia, 3E₁ + 1E₂? Se sim, quais seriam? Desenhe essas distribuições na tabela fornecida, utilizando a linha onde foi escrito a primeira configuração possível para esse nível de energia, e terminando, mostre ao professor.



Fim da 1ª fase.

Fase 2: Montamos as configurações possíveis para a energia total $3E_1 + 1E_2$.

Quantas foram as configurações possíveis, para esse nível de energia? (A primeira distribuição foi feita no quadro branco magnético, como exemplo para os alunos).

Resp:

Existem outros níveis de energia possíveis? Se sim, quais? Escreva todos eles na coluna da tabela onde foi escrito o nível $3E_1 + 1E_2$ e mostre ao professor, após achar que escreveu todos os possíveis.

Fim da 2ª fase.

Fase 3: Esses níveis diferentes de energia são chamados de macroestado.

Quantos macroestados são possíveis, nesse nosso exemplo de 4 partículas distribuídos em dois níveis de energia?

Resp:

Agora, para cada um desses macroestados, desenhe as várias distribuições das partículas, da mesma forma como as distribuiu para o macroestado $3E_1 + 1E_2$. Após achar que desenhou todas as possíveis configurações, mostre ao professor.

Fim da 3ª fase.

Fase 4: Quantas distribuições foram possíveis no total? Resp:

As diferentes configurações possíveis, para um dado macroestado, são chamadas de microestados. Existem quantos microestados para cada macroestado? Responda na tabela fornecida, na penúltima coluna. Depois, calcule a probabilidade de ocorrência de cada macroestado, dividindo o número de microestados de cada macroestado pelo número total de microestados. Responda na tabela fornecida, na última coluna. Após fazer esses cálculos, mostre o resultado ao professor.

Fim da 4ª fase



Fase 5: Calculadas as probabilidades de ocorrência de cada macroestado, qual é o macroestado mais provável? Responda escrevendo o nível de energia desse macroestado mais provável.

Resp: Esse macroestado mais provável é o que possui maior entropia. Fim da 5ª fase.

Fase 6: Foram no total 16 microestados, numa distribuição de 4 partículas em dois níveis de energia, onde, $16 = 2^4$. Para um número N de partículas, distribuídas em dois níveis de energia, o número total de microestados é dado por 2^N , onde N é o número de partículas. Quantos microestados no total teriam se considerássemos 6 partículas?

Resp:

O macroestado mais provável, o de maior entropia, é aquele em que metade das partículas ficam num nível e a outra metade no outro nível, com 4 partículas tínhamos 6 microestados possíveis. E com 6 partículas, quantos microestados teremos para o macroestado mais provável, que é o de três em cada nível de energia?

O número de microestados, de um dado macroestado, é chamado de multiplicidade W desse macroestado. Para calcular essa multiplicidade basta lembrar que essa distribuição é uma combinação de 6 elementos tomados 3 a 3, que pode ser calculado pela equação:

Fim da 6ª fase.

2ª etapa: Conclusão

Após o término da 1ª etapa em sala de aula, haverá uma rápida explicação para relacionar entropia-desordem com o número de microestados, sendo o macroestado mais provável o de maior número de microestados.

A partir do resultado da sexta etapa, 6 partículas em vez de 4, deve-se calcular o estado mais provável para 100 partículas. $W_{100} = 1,01 \cdot 10^{29}$ microestados, no macroestado mais provável, portanto o de maior entropia-desordem, 50 partículas em



cada nível de energia. A partir desse resultado, para 100 partículas, foi perguntado qual seria o número de microestados, para o macroestado mais provável, se houvesse um mol de partículas, evidenciando, então, a grande quantidade de microestados que teríamos nesse caso.

Associa-se então a multiplicidade (W) com a ideia de desordem, de forma que o macroestado mais provável é o que possui maior desordem, ou seja, um maior número de configurações possíveis.

Dessa forma, esperamos que a relação entropia-desordem saia do senso comum do que é desordem, relacionando-a com a multiplicidade de um dado macroestado, qual seja, com a maior quantidade de microestados.

5. **Considerações finais**

O estudo da entropia mostrou-se importante para ser trabalhado na segunda série do ensino médio, dentro do capítulo de termodinâmica. Desenvolver o interesse nos alunos pela entropia, os conceitos de microestado e macroestado junto com as ferramentas matemáticas é oferecer ao corpo discente um momento de muito conhecimento, fruto de um processo árduo de planejamento e execução de aulas que sejam mais significativas para aprendizagem desse tema tão relevante.

Ademais, essa proposta surgiu a partir da vontade de mostrar que é possível tratar esse tema no ensino médio, de tornar o assunto Entropia mais interessante para os alunos. As dificuldades mostram-se superadas ao se introduzir o estudo da entropia com métodos de quantificar o que chamamos de desordem e práticas simples em sala de aula.

A metodologia e a construção do conceito de entropia abrem espaço para a discussão de problemas atuais, mostrando ser capaz de despertar nos alunos grande interesse pelo assunto e seus desdobramentos a partir de situações problematizadas no próprio espaço da sala de aula, valorizando a percepção dos discentes e estimulando-os



a compreender mais à medida que a proposta vai se desencadeando nas fases, conforme descrito no corpo deste texto.

6. **Declaração de direitos**

O(s)/A(s) autor(s)/autora(s) declara(m) ser detentores dos direitos autorais da presente obra, que o artigo não foi publicado anteriormente e que não está sendo considerado por outra(o) Revista/Journal. Declara(m) que as imagens e textos publicados são de responsabilidade do(s) autor(s), e não possuem direitos autorais reservados à terceiros. Textos e/ou imagens de terceiros são devidamente citados ou devidamente autorizados com concessão de direitos para publicação quando necessário. Declara(m) respeitar os direitos de terceiros e de Instituições públicas e privadas. Declara(m) não cometer plágio ou auto plágio e não ter considerado/gerado conteúdos falsos e que a obra é original e de responsabilidade dos autores.

7. **Referências**

1. AUSUBEL, D.P. The psychology of meaningful verbal learning. New York: Grune and Stratton, 1963.
2. GASPAR, Alberto. Física 2: Ondas, óptica e termodinâmica. São Paulo: Editora Ática, 2000.
3. GREGIO, Nivaldo de Oliveira. Termodinâmica, um tutorial para entendimento do conceito de entropia. (Dissertação) Universidade Federal de São Carlos, 2016.
4. HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. Física: Ondas, gravitação, fluidos e termodinâmica. V. 2. 4a ed.LTC,1984.
5. MOREIRA, M.A. Aprendizagem significativa: a teoria e textos complementares. São Paulo: Livraria Editora da Física, 2011.
6. YOUNG, Hugh D.; Y, Roger. Física II: Termodinâmica e ondas. São Paulo: Addison Wesley, 2004.