

O que é entropia? - reflexões para o ensino de ciências

What is entropy? - reflections for science teaching

¿Qué es la entropía? - reflexiones para la enseñanza de las ciencias

Recebido: 08/05/2020 | Revisado: 10/05/2020 | Aceito: 14/05/2020 | Publicado: 23/05/2020

Murilo Sodré Marques

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7857-4539>

Universidade Federal do Oeste da Bahia, Brasil

E-mail: murilo.sodre@ufob.edu.br

Wanisson Silva Santana

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9341-4285>

Universidade Federal do Oeste da Bahia, Brasil

E-mail: wanisson.santana@ufob.edu.br

Resumo

Diferente da pressão ou da temperatura, o conceito de entropia, embora compartilhe de abstração e importância semelhante ao conceito de energia, destoa desse último por não ser intuitivo, além da ambiguidade historicamente atrelada ao mesmo por conta dos desenvolvimentos relativos à segunda Lei da Termodinâmica. Neste trabalho, buscamos promover uma reflexão sobre as discrepâncias existentes em torno da conceituação de entropia em termos de desordem e seus impactos no processo de aprendizagem em todos os níveis de ensino, elencando outras possibilidades conceituais, dentre as quais a entropia de Shannon, tida como mais adequada para representar todo o corpo de conhecimento multidisciplinar advindo da teoria da informação, incluindo a computação quântica. O trabalho leva em conta as publicações do químico israelense Arieh Ben Naim e, aproveitando-se da inexistência de outras possíveis analogias para a entropia na literatura brasileira, propõe uma exposição que contemple as diferentes perspectivas em torno do tema como viés para uma aprendizagem significativa e adequando, portanto, todos os níveis de ensino a manter o formalismo (ainda fenomenológico) da termodinâmica em sintonia com a (nova) Termodinâmica Quântica e com o caráter interdisciplinar atual da entropia.

Palavras-chave: Entropia; Desordem; Teoria da informação; Ensino de Ciências.

Abstract

Unlike pressure or temperature, the concept of entropy, while sharing abstraction and importance similar to the concept of energy, clash of the last for not being intuitive, in addition to the ambiguity historically linked to it due to developments related to the Thermodynamics second's Law. In this work, we seek to promote a reflection on the existing discrepancies around the conceptualization of entropy in terms of disorder and its impacts on the learning process at all levels of teaching, listing other conceptual possibilities, among which Shannon's entropy, seen as more adequate to represent the entire body of multidisciplinary knowledge arising from information theory, including quantum computing. The work takes into account the publications of the Israeli chemist Arieh Ben Naim and, taking advantage of the lack of other possible analogies for entropy in Brazilian literature, proposes an exhibition that contemplates the different perspectives around the theme as a bias towards a meaningful learning and therefore adapting all levels of education to maintain formalism (still phenomenological) of thermodynamics in line with the (new) Quantum Thermodynamics and with the current interdisciplinary approach to entropy.

Keywords: Entropy; Disorder; Information theory; Science teaching.

Resumen

A diferencia de la presión o la temperatura, el concepto de entropía, aunque comparte una abstracción e importancia similar al concepto de energía, no está de acuerdo con este último por no ser intuitivo, además de la ambigüedad históricamente vinculada a él debido a los desarrollos relacionados con la segunda Ley de la Termodinámica. En este trabajo, buscamos promover una reflexión sobre las discrepancias existentes en torno al concepto de entropía en términos de desorden y sus impactos en el proceso de aprendizaje en todos los niveles de educación, enumerando otras posibilidades conceptuales, entre las cuales la entropía de Shannon, considerada como más adecuado para representar todo el cuerpo de conocimiento multidisciplinario que surge de la teoría de la información, incluida la computación cuántica. El trabajo toma en cuenta las publicaciones de la química israelí Arieh Ben Naim y, aprovechando la falta de otras posibles analogías para la entropía en la literatura brasileña, propone una exposición que contempla las diferentes perspectivas en torno al tema como un sesgo hacia el aprendizaje significativo y adaptando, por lo tanto, todos los niveles de educación para mantener el formalismo (aún fenomenológico) de la termodinámica en línea

con la (nueva) termodinámica cuántica y con el carácter interdisciplinario actual de la entropía.

Palabras clave: Entropía; Desorden; Teoría de la información; Enseñanza de las Ciencias.

1. Introdução

Os fundamentos da Termodinâmica emergiram em um contexto de profundas transformações (sobretudo das relações sociais e do trabalho) na Europa do século XIX durante a revolução industrial, quando a máquina térmica e outras tecnologias chamavam a atenção para os fenômenos relacionados ao calor, acerca dos quais pouco (até então) se conhecia. Apesar de que o calor parecia uma força - podendo ser transformado em trabalho - suas operações não podiam ser explicadas em termos da mecânica newtoniana (Müller, 2007). Portanto, uma teoria para o calor era necessária e naquela época havia duas teorias conflitantes para explicar a obtenção de trabalho. Uma delas era baseada no princípio de Carnot-Kelvin, que estabelecia que o trabalho produzido dependia da diferença de temperatura entre uma fonte quente e uma fonte fria. Dizia-se que o trabalho dependia da qualidade (o que hoje denominamos propriedade intensiva). A outra visão adotava o princípio de Mayer-Joule, que estabelecia que o trabalho produzido era proporcional ao calor (o chamado equivalente mecânico do calor), e portanto o trabalho dependia da quantidade - o que hoje denominamos propriedade extensiva (Oliveira, 2014). Estas duas visões foram unificadas por Clausius, em 1850, quando ele argumentou que o conflito entre Carnot e Joule era somente aparente: um envolvia a conservação de algo (que não era calor e depois foi denominado energia) em transformações entre calor e trabalho mecânico; o outro envolvia a conversão de calor em energia, e a propriedade que o calor não pode fluir espontaneamente de um corpo mais frio para um corpo mais quente sem produzir uma alteração no resto do universo, formulando assim o conceito de entropia (Lynskey, 2019), o qual pode pertencer a qualquer sistema desde que com algumas poucas partículas, incluindo assim quase tudo no universo, desde núcleos até superaglomerados de galáxias.

Hoje sabe-se que ambos conceitos (entropia e energia) tem papel fundamental no formalismo não apenas da termodinâmica, mas em boa parte do arcabouço teórico da Física, ao ponto de a formulação destes conceitos ser considerada como uma das grandes realizações da ciência, ao permitir organizar o corpo teórico da termodinâmica de equilíbrio e de processos irreversíveis, da mecânica estatística e exercer papel central na teoria da informação (Borges, 2007).

Os químicos usam (o conceito de) entropia todo o tempo em seus cálculos, e os seus valores numéricos para várias substâncias são listadas em vários livros-texto. Em tais casos, porém, a entropia nada mais é do que uma quantidade empírica calculada de acordo com resultados experimentais. O problema surge quando tentamos defini-la do ponto de vista teórico e calcular seu valor, uma vez que partamos de algum modelo prévio adequado (Wanderlingh, 1995).

Lynskey (2019) afirma que “diferente da pressão, temperatura ou energia, o conceito de entropia não é intuitivo, além de ser ambíguo, com razões históricas atreladas à segunda Lei da Termodinâmica que, por si só, tem sido permeada por interpretações por diferentes cientistas desde a sua formulação no século XIX” (p. 2). Leff (2012), por sua vez, argumenta que “apesar de a utilização do conceito de energia poder ser desafiador neste contexto, o seu uso na Termodinâmica e sua conexão com o conceito de entropia parece estar envolto em certo mistério” (p. 28).

Leff vem sugerindo a analogia entre entropia e uma função espalhamento de energia como alternativa à associação usual (Leff, 1996); tal associação foi proposta independentemente também por Lambert (também crítico da analogia com desordem) relacionada aos conteúdos de Química Geral a nível universitário, chegando a convencer autores de trinta e quatro livros - texto (dados de 2014) a remover afirmações relacionando entropia com desordem das novas edições de suas obras (Lambert, 2006). Para conturbar ainda mais o cenário, o químico Arieh Ben Naim intercede em prol da associação entre a entropia da Termodinâmica e aquela associada à Teoria da Informação de Shannon (Ben-Naim, 2008), além da aparição da (não tão recente na literatura especializada) entropia não extensiva de Tsallis. Torna-se, portanto, indispensável uma abordagem clara sobre tais conceitos ao longo de todo o ciclo regular de ensino, desde o primeiro contato do estudante com as ciências no final do ensino fundamental até a universidade. De acordo com o conhecimento dos autores, ainda não há - até o momento - uma tentativa de reavaliação do conceito de entropia nos variados níveis brasileiros de ensino (seja em livros didáticos, seja em abordagens e metodologias de aprendizagem) de modo a abarcar todas as possibilidades teóricas relativas ao conceito surgidas ao longo do século XX, algumas das quais mais adequadas às pesquisas na (recém surgida) área de Termodinâmica Quântica. O que tem-se visto é o contrário: uma associação irrestrita - em todos os níveis de ensino - dos conceitos de entropia e desordem do sistema (com raízes na já citada revolução industrial), analogia esta permeada por incongruências conceituais sérias.

Ante o exposto, o objetivo do trabalho é, atinando ao impacto que a ambiguidade em torno do conceito de Entropia pode trazer, e partindo de alguns aspectos da teoria de aprendizagem significativa de David Ausubel, realizar uma exposição das perspectivas de analogias para o supracitado conceito mais utilizadas pela comunidade científica, tomando como base algumas proposições feitas por Ariele Ben Naim (Ben Naim, 2008; Ben Naim, 2017) em suas obras, como um salutar de invocar a comunidade brasileira de Ensino de Ciências a uma reflexão acerca de tema tão fundamental ao Ensino. Visando lograr êxito em tal pleito, este trabalho está dividido como segue: na seção 2, será discutida a metodologia do trabalho; na seção 3 serão discutidas três diferentes abordagens em torno do conceito de entropia, que consideramos relevantes para nossas reflexões; na seção 4, trataremos da relevância do tema no contexto do ensino de Física, por fim, a seção 5 engloba as nossas considerações finais.

2. Metodologia

Uma pesquisa tem como finalidade trazer novos saberes para a sociedade como preconizam Pereira et al. (2018). Uma vez que as motivações para o presente trabalho decorrem da experiência docente dos autores no ensino de graduação, mais especificamente das dificuldades encontradas durante a prática docente, a proposta metodológica seguiu naturalmente a mesma tônica. Por não dispormos de um quantitativo de público alvo suficiente para uma coleta de dados concreta, optamos, em um primeiro momento, por levantar algumas reflexões no âmbito dos conceitos, visto que a discussão de entropia sob a perspectiva estatística, por exemplo, fica a cargo das disciplinas do ciclo profissionalizante dos cursos de graduação em Física e áreas afins.

Quanto à caracterização (Jacobsen, 2016): a pesquisa apresenta uma abordagem qualitativa; no que tange a sua natureza, classifica-se como pesquisa aplicada, por ter como objetivo "gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos" Gerhardt & Silveira (2009, p. 35). Quanto à classificação, existem duas vertentes (Vergara, 2013): quanto aos meios, a pesquisa enquadra-se como uma pesquisa bibliográfica, já foram analisadas publicações em periódicos indexados através da plataforma Google Scholar, e quanto aos fins, como orienta Pereira et al. (2018) considera-se como sendo aplicada.

3. Quantas entropias?

3.1 A associação de Entropia como desordem

Trata-se do sentido mais usual, no qual a entropia é uma variável extensiva conjugada à temperatura; aqui o papel central é o conceito de adiabaticidade, isto é, calor: deve existir um fator integrante no denominador para a troca infinitesimal de calor que nos permite escrever $dS = d'Q/T$ como afirmam Çengel & Boles (2013).

Já ao se considerar a Termodinâmica como sendo uma descrição estatística macroscópica de sistemas de muitos corpos, a entropia se torna uma propriedade de um ensemble de sistemas (em vez de estar relacionada a um único sistema). Na verdade, o sistema é assumido estar num estado bem definido, apesar de desconhecido, no qual a entropia é nula. A entropia aparece como uma medida no ensemble de todos os microestados os quais correspondem a uma dada restrição macroscópica (Greiner, 1995).

Desse modo, a entropia é vista como uma medida quantitativa macroscópica da desordem microscópica. Essa abordagem é simultaneamente difundida e frágil: por um lado, as complexidades computacionais de sistemas dinâmicos mesmo simples frequentemente "zombam" das mais sofisticadas técnicas analíticas, e até mesmo das técnicas numéricas. Em geral, a dinâmica dos sistemas de n corpos ($n > 2$) não pode ser resolvida exatamente; assim, sistemas termodinâmicos de umas muitas partículas (10^{23}) mostram-se claramente insolúveis, mesmo em um mundo laplaciano perfeitamente determinístico, sem o caos. Assim, são utilizadas suposições físicas poderosas para simplificar os cálculos de entropia - por exemplo, probabilidades iguais a priori, ergodicidade, extensividade, fases aleatórias, limite termodinâmico. Por outro lado, embora tenham sido espetacularmente preditivos e possam ser razoáveis para grandes classes de sistemas físicos, sabe-se que essas suposições não são universalmente válidas. Portanto, não é surpreendente que nenhuma definição completamente satisfatória de entropia tenha sido descoberta, apesar de 150 anos de esforço. Em vez disso, surgiu uma variedade de tipos diferentes que, ao longo das décadas, se tornaram cada vez mais sofisticados, tanto em resposta à profunda compreensão da ciência sobre a complexidade da natureza, mas também em reconhecimento à expressão inadequada da entropia (Capek & Scheehan, 2005).

Em um contexto epistemológico, entendemos como natural a predominância da concepção de entropia enquanto desordem pela maior proximidade desta com a experiência cotidiana. Ainda que contemple a hipótese do *caos* em sua formulação, consiste em uma

manifestação tácita do pensamento mecanicista, sendo a desordem um contraponto clássico ao determinismo newtoniano que, além de assegurar as relações de causalidade das leis físicas, preserva a natureza concreta dos objetos sobre os quais recaem suas aplicações, a saber: partículas, moléculas, dados, moedas etc.

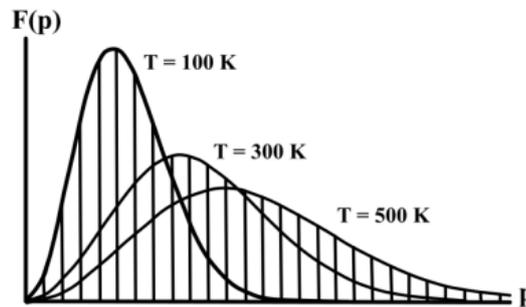
3.2 Entropia como espalhamento de energia

Esta analogia foi proposta por Leff em vários trabalhos, ao discutir como a entropia pode estar relacionada à energia de maneira qualitativa, em um modo interpretativo o qual implica em espaço, tempo e energia de um modo fundamental, otimizando, portanto, (segundo o mesmo) o seu entendimento: (i) a energia se espalha pela matéria macroscópica sendo compartilhada entre os modos de armazenamento microscópicos, (ii) a quantidade ou a natureza do espalhamento de energia muda em processos termodinâmicos, e por fim (iii) o grau de espalhamento (e compartilhamento) de energia é máximo no equilíbrio termodinâmico (Leff, 1996).

Assim, tem-se no espalhamento espacial uma ferramenta útil para processos e estados de equilíbrio, ao passo que o espalhamento temporal tem sua utilidade vinculada à interpretação de entropia em um estado termodinâmico particular (Leff, 2012).

De modo equivalente à interpretação probabilística de Boltzmann para a entropia, Leff argumenta que quando um ponto de fase do sistema atravessa temporalmente o espaço de fases, a partícula se move e troca energia. A noção de espalhamento (também) pode ser compreendida analisando-se a distribuição de momentos de Maxwell, nas quais as faixas de maiores momentos vão se tornando ocupadas a medida que a temperatura cresce (Figura 1) - um reflexo do espalhamento temporal em termos da trajetória no espaço de fase para sistemas clássicos ou da "dança" entre estados discretos de energia para sistemas quânticos (Leff, 2007).

Figura 1. Densidade de probabilidade de um gás de partículas como função dos momenta para três temperaturas.



Fonte: (Leff, 2007).

Outro partidário da associação entre entropia e espalhamento, Frank Lambert afirma que as ideias básicas que envolvem a entropia não tem sido abordadas de maneira simples pelos professores, resultando em um entendimento restrito dos estudantes (Lambert, 2006). Em vários artigos, Lambert mostra que a natureza da entropia é melhor compreendida primeiro descrevendo-se a dependência da entropia com a dispersão de energia (em termodinâmica clássica) e com a distribuição de energia entre um grande número de movimentos moleculares relacionáveis aos estados quantizados (microestados na termodinâmica molecular).

Por se tratar de uma abordagem que tem como ponto central os processos de transferência de energia e, dessa forma, estar vinculada aos fenômenos físicos propriamente ditos, a proposta de Leff não dispõe da mesma flexibilidade interdisciplinar que podemos encontrar na concepção de entropia enquanto desordem ou na interpretação da entropia enquanto informação, por exemplo.

Todavia, pode vir a ser uma alternativa didática muito interessante por permitir o tratamento de casos particulares que dialogam mais facilmente com as concepções prévias dos estudantes, o que suaviza a transição para definições mais abstratas.

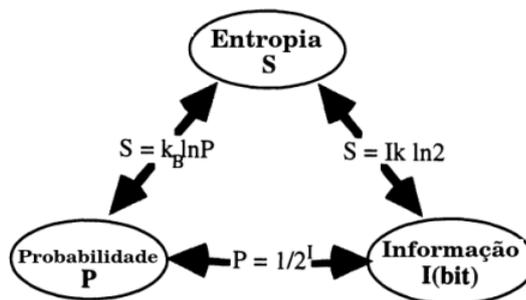
3.3 Entropia como informação perdida (ou faltante) do sistema

A teoria da informação foi desenvolvida por Claude Shannon em 1948 em um artigo cujo título se referia a ela como teoria da comunicação. A teoria foi desenvolvida em conexão com o problema da transmissão de informações ao longo de canais de comunicação.

O principal interesse da teoria foi buscar um método de transmitir a informação através de um canal ruidoso com alta eficiência e confiabilidade, isto é, a uma taxa razoavelmente alta mas com quantidade mínima de erros (Stone, 2015).

Na estrutura da teoria da Informação encontramos a entropia de Shannon como uma medida da informação perdida sobre o verdadeiro estado de um sistema. Como informação pode ser facilmente relacionada a probabilidade, a entropia de Shannon e a entropia estatística de Gibbs são bastante similares (ver Figura 2).

Figura 2. Múltiplas interpretações para a entropia (Wanderlingh, 1995).



Fonte: (Wanderlingh, 1995).

Por sua vez, com o propósito de discutir os principais aspectos da Mecânica Estatística sob a perspectiva de uma Teoria da Informação, Ben Naim, juntamente com os já citados Lambert e Heff, em vários trabalhos (Ben Naim, 2007; Ben Naim, 2011), endossa severas críticas à noção qualitativa e imprecisa de associar entropia à desordem, o que o leva a afirmar que "mudanças na entropia podem algumas vezes ser interpretadas em termos de alterações na desordem, ao passo que variações de entropia sempre podem ser interpretadas em termos de mudanças na medida de informação de Shannon, indicando que há de fato, não apenas uma analogia entre entropia e informação, mas uma identidade entre a entropia termodinâmica e a medida de Shannon da informação".

Como mérito da analogia proposta, Ben Naim cita o trabalho de E. Jaynes, pioneiro na aplicação da teoria da informação na Mecânica Estatística (Jaynes, 1957), que trata as probabilidades fundamentais da Mecânica Estatística como sendo obtidas utilizando-se o princípio de máxima entropia. Este princípio afirma que as distribuições de equilíbrio são obtidas maximizando-se a entropia (ou a informação perdida) com respeito a todas as outras

distribuições. O mesmo princípio pode ser aplicado para derivar a distribuição menos tendenciosa que é consistente com uma dada informação (Ben-Naim, 2008).

A favor da associação entre entropia termodinâmica e entropia da informação está a utilização desta última nos mais variados campos do saber, que vão desde medições pluviométricas em determinadas áreas até o balanço de contas públicas, passando pela transmissão de sinais, teoria de probabilidades, pela neurociência e, obviamente, pela própria ciência da informação, fato que atribui a esta abordagem um forte caráter interdisciplinar, ainda que os seus fundamentos apresentem-se como abstratos.

Aliás, sua natureza interdisciplinar está fortemente vinculada ao próprio conceito de informação, vez que, nos diversos ramos do conhecimento, tanto os objetos de estudo quanto os processos aos quais estão sujeitos, são munidos de algum tipo de informação.

3.4 A entropia não-extensiva de Tsallis

Como ultimo exemplo das diferentes perspectivas em torno do conceito de entropia, trataremos, brevemente, da mecânica estatística de Tsallis - uma generalização para a representação matemática da entropia sem necessariamente adentrar nos aspectos interpretativos do conceito e que, embora seja uma dentre as diversas abordagens estatísticas ditas não-extensivas, tem se mostrado bastante exitosa nas últimas décadas.

O físico grego (naturalizado brasileiro) Constantino Tsallis introduziu em 1988 uma expressão entrópica caracterizada por um índice q que leva a uma estatística não-extensiva (Tsallis, 1988). A entropia de Tsallis, S_q , é a base para a chamada Mecânica Estatística não-extensiva, a qual generaliza a teoria de Gibbs-Boltzmann, além de ter encontrado aplicações em uma variada gama de fenômenos em diversas áreas como Física, Biologia, Medicina, Economia, Geofísica, dentre outras.

A mecânica estatística de Tsallis não levanta, explicitamente, conjecturas em torno do conceito de entropia, mas aponta para uma propriedade até então incompatível com a mecânica estatística de Gibbs-Boltzmann, que é a propriedade de não-extensividade. Por conta disso, tem se mostrado uma boa candidata a descrever sistemas que apresentam interações de longo alcance, memória de longa duração ou espaço de fases com estrutura fractal (Abe, 2004), aspectos esses que estão distantes dos níveis elementares de ensino, embora possam permear a discussão a nível introdutório, com o intuito de catalogar possíveis abordagens para o conceito, incluindo-se aqui até mesmo a correlação existente entre a entropia de Tsallis e a teoria de informação (Plastino & Plastino, 1999).

Embora a proposta de Tsallis não tenha, deliberadamente, o propósito de confrontar a compreensão do que venha a ser a entropia, os resultados alcançados, sobretudo no que diz respeito às aplicações, já são amplamente reconhecidos no ambiente da física e evidencia um forte caráter interdisciplinar, fato que tem fundamentado a justificativa de incluí-la no bojo das diferentes abordagens.

Há de se reconhecer que, por lidar com conceitos como não-aditividade e não-extensividade, a entropia de Tsallis pode apresentar-se como um tanto quanto incipiente do ponto de vista da aprendizagem, pois tais conceitos não são elementos muito comuns à física básica e muito menos à experiência cotidiana.

4. O conceito de Entropia sob a Perspectiva da Aprendizagem Significativa

A multiplicidade de visões sobre a entropia é, de certo modo, abordada em periódicos mais voltados ao ensino de Química e, em sua maioria, voltadas à análise de conteúdos de livros didáticos. Por se tratar de uma discussão relativamente recente, há poucas menções à correlação proposta por Ben Naim na literatura, principalmente nos periódicos nacionais sobre o tema. Em nossas pesquisas, verificou-se que há muitos trabalhos relacionados à visão de entropia principalmente nos livros didáticos (Cunha et al, 2018), e em professores e estudantes do ensino médio (Aurani, 2018; Flores et al, 2015), boa parte deles direcionados às questões de transposição didática e, sobretudo, às dificuldades dos estudantes na assimilação do conceito - fato genuinamente compreensível, uma vez que o mesmo, sob qualquer perspectiva, guarda um teor de abstração acentuado.

Por conta disso, consideramos que um bom caminho para uma reflexão seja a partir de uma teoria cognitivista de aprendizagem, em especial a teoria de aprendizagem significativa de David Ausubel, segundo a qual a assimilação do novo se consolida num processo dialético com conceitos preexistentes na estrutura cognitiva:

O conceito central da teoria de Ausubel é o de *aprendizagem significativa*, um processo através do qual uma nova informação se relaciona de maneira não arbitrária e substantiva (não literal) a um aspecto relevante da estrutura cognitiva do indivíduo. Isto é, neste processo a nova informação interage com uma estrutura de conhecimento específica, a qual Ausubel chama de "conceito subsunçor" ou, simplesmente "subsunçor", existente na estrutura cognitiva de quem aprende. (Moreira, 1983, p.20).

Quanto aos subsunçores, Moreira nos diz:

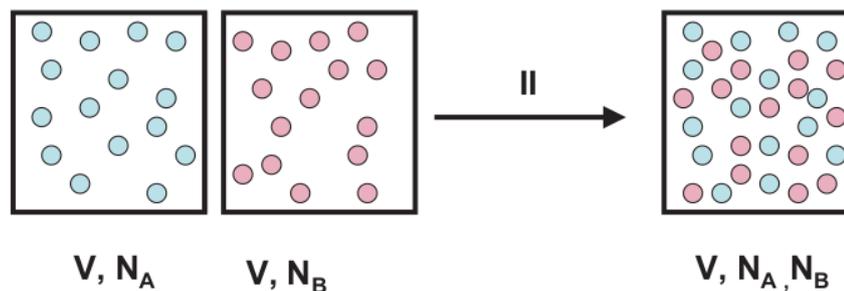
O "subsunçor" é, portanto, um conceito, uma ideia, uma proposição já existente na estrutura cognitiva, capaz de servir de "ancoradouro" a uma nova informação de modo que ela adquira, assim, significado para o indivíduo (*Ibidem*, 1983, p.20).

Assim, muito embora possa estar relacionada com processos que envolvam transferência de energia, a ideia de Entropia não preserva um encadeamento conceitual imediato nos mesmos moldes que encontramos entre energia e os conceitos de força, trabalho e calor, por exemplo.

No caso da entropia, não existem subsunçores com mesmo grau de potencialidade cognitiva que os conceitos de "quente" ou "frio", presentes na experiência cotidiana, o que, muitas vezes, transforma a abordagem desse conteúdo em tarefa pedagógica árdua. Não bastasse tais dificuldades, existem ainda as que podem estar atreladas à própria definição em si, como aponta Ben Naim em sua análise sobre a relação entre entropia e desordem, tomando como exemplo o caso clássico da mistura entre gases. Na situação problema, o autor considera, no primeiro caso, duas caixas de volume V , uma contendo um gás N_A e a outra contendo um gás N_B e submetidas ao processo de mistura. No segundo caso, as caixas em questão contém o mesmo tipo de gás, $N_A=N_B=N$, conforme Figuras 3 e 4:

a) **Mistura de dois diferentes gases:**

Figura 3. Mistura de dois gases distintos.

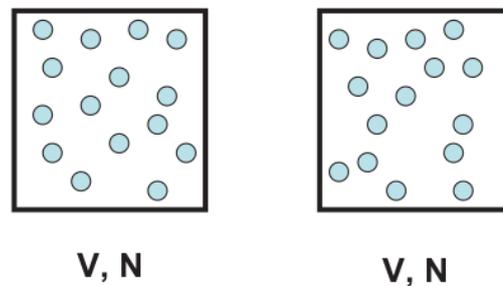


Fonte: (Ben-Naim, 2008).

Analisando a Figura 3, Ben Naim mostra que não é possível se fazer a associação da entropia com desordem sem recair em ambiguidades sérias, pois pode-se provar que os dois sistemas tem a mesma entropia, apesar da mistura parecer ser um sistema mais desordenado

b) **Extensividade da desordem?**

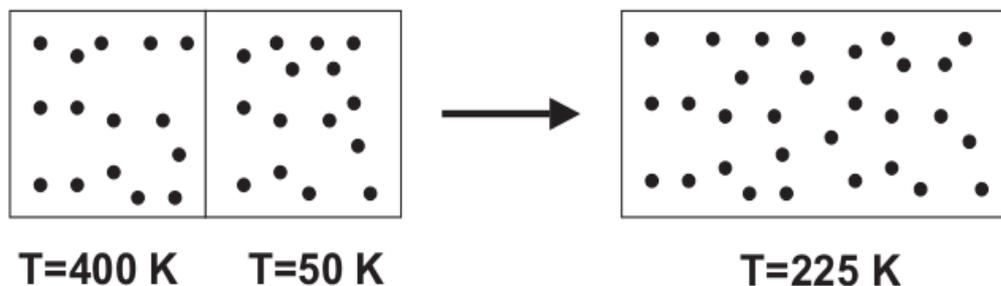
Figura 4. A desordem do sistema conjunto é igual à soma da desordem de cada sistema?



Fonte: (Ben-Naim, 2008).

A Figura 4 corrobora a abordagem crítica de Ben Naim à associação da entropia com desordem, uma vez que sendo desordem um conceito qualitativo, torna-se difícil a defesa em prol de sua aditividade (Ben Naim, 2008). Com o intuito de reforçar este argumento, Ben Naim apresenta um processo de troca de calor entre duas porções idênticas de um mesmo gás (Figura 5), inicialmente isoladas e a temperaturas distintas, $T_1 = 50 \text{ K}$ e $T_2 = 400 \text{ K}$.

Figura 5. Transferência de calor de um gás aquecido para um mais frio.

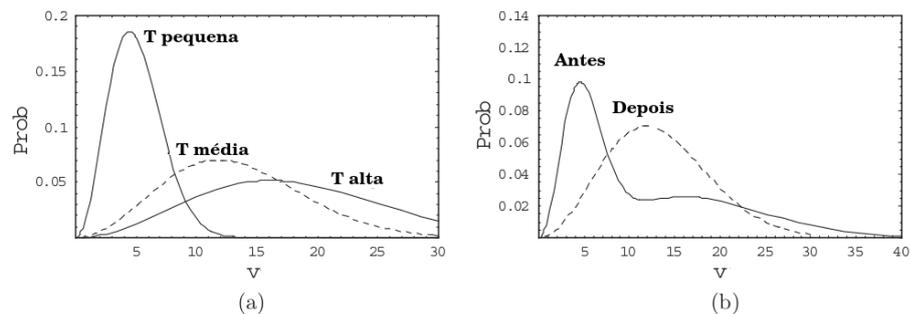


Fonte: (Ben-Naim, 2008).

Nesta última figura, as porções são postas a interagir, por meio de uma única parede diatérmica, de modo que o sistema, constituído pelas duas porções, atinge o equilíbrio térmico à uma temperatura uniforme $T = 225 \text{ K}$. Sabidamente, todo o processo irá acarretar em um aumento da entropia do sistema.

Usando a teoria cinética dos gases, o autor apresenta as distribuições de velocidades antes e depois do processo, (Fig. 6), e levanta a seguinte questão: todo o processo pode ser entendido, inequivocamente, em termos da desordem?

Figura 6. Distribuição de velocidades de um gás a diferentes temperaturas. (a) as distribuições correspondendo ao lado esquerdo da figura 5. (b) a distribuição global de velocidades, antes e depois do processo de transferência de calor.



Fonte: (Ben-Naim, 2008).

A resposta de Ben Naim é "Não". Uma vez que a distribuição das velocidades do sistema está intrinsecamente ligada à temperatura (fig. 6) e, se admitirmos o grau de espreadimento da distribuição como um indicativo do nível de desordem, as distribuições da figura 6 (b) levam a crer que, no final do processo, o sistema se apresenta mais ordenado, contradizendo a correlação com a entropia. Para Ben Naim, isto evidencia o quão subjetivo é o conceito de ordem ou desordem de um sistema.

Com base nos exemplos mencionados, entendemos que, na perspectiva da teoria de Ausubel, a alegada ambiguidade, assim como a subjetividade, podem se manifestar como elementos limitadores da aprendizagem, já que a concepção cotidiana de ordem ou desordem, não se relaciona de forma clara com alguns subsunçores relevantes como calor e temperatura, por exemplo. Sobre a relação entre aprendizagem significativa e material a ser aprendido, esclarece Moreira (1983):

[...] uma das condições para ocorrência da aprendizagem significativa é que o material a ser aprendido seja relacionável (ou incorporável) à estrutura cognitiva do aprendiz de maneira não arbitrária e não literal. Um material com essa característica é dito *potencialmente significativo*. (Moreira, 1983, p. 25).

Mais especificamente sobre o material potencialmente significativo, Moreira complementa:

[...] ele deve ser 'logicamente significativo' ou ter 'significado lógico', i.e., ser suficientemente não arbitrário e não aleatório em si, de modo que possa ser relacionado de forma substantiva e não arbitrária, a ideias correspondentemente relevantes que se situem dentro do domínio da capacidade humana de aprender[...]" (Moreira, 1983, p. 25).

Assim, muito embora possa estar relacionada com processos que envolvam transferência de energia, a ideia de entropia não preserva um encadeamento conceitual imediato nos mesmos moldes que encontramos entre energia e os conceitos de força, trabalho e calor, por exemplo. No caso da entropia, não existem subsunções com mesmo grau de potencialidade cognitiva que os conceitos de "quente" ou "frio".

Dessa forma, é muito pouco provável que um conceito munido de ambiguidades e subjetividades se incorpore de modo natural e imediato, às ideias preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz e atenda aos atributos mencionados. Mas, como contornar este tipo de dificuldade, no caso específico da entropia? Ben Naim defende, enfaticamente, que abandonemos a ideia de entropia enquanto desordem e adotemos o conceito de Informação Perdida, muito mais objetivo e destituído de ambiguidades. Lambert, por outro lado, defende que relacionar a entropia com a dispersão de energia e com variáveis da dinâmica molecular torne a construção do conceito mais intuitiva. São caminhos possíveis. Assim como também pode surgir, no futuro, uma abordagem em torno da ideia de entropia que contorne estes problemas e atribua à dinâmica da aprendizagem uma maior eficácia. Nós, no entanto, baseados nas críticas aqui elencadas, acreditamos que, por ora, fazer uma discussão ampla, mostrando diferentes perspectivas, já é um ponto de partida fundamental, sobretudo se buscarmos um amparo no que afirma Gaston Bachelard (Bachelard, 1996) ao discutir sobre a formação do espírito científico e a aquisição de novos conceitos, enfatiza que "[...]o ato de conhecer dá-se contra um conhecimento anterior, destruindo conhecimentos mal estabelecidos[...]" (p.17).

Ou seja, o confronto entre perspectivas distintas em torno de um mesmo tema é, sem dúvidas, catalisador de uma melhor compreensão. Além disso, nas palavras do próprio Bachelard:

[...]toda cultura científica deve começar,[...],por uma catarse intelectual e afetiva. Resta, então, a tarefa mais difícil: colocar a cultura científica em estado de mobilização permanente, substituir o saber fechado e estático por um conhecimento aberto e dinâmico, dialetizar todas as variáveis experimentais, oferecer enfim à razão razões para evoluir (Bachelard, 1996, p. 24).

Assim, ainda que, quando explicitamente confrontadas, algumas abordagens apresentem maiores limitações que outras ou até mesmo maior grau de complexidade, é na multiplicidade e amplitude das diferentes concepções que se estrutura a evolução do entendimento em torno de algum conceito.

5. Considerações Finais

A evolução acerca do entendimento da estrutura da matéria trouxe consigo a necessidade de reformulação do conceito de entropia, tanto no ensino básico quanto no ensino universitário. Ressalta-se aqui a preponderância que a Teoria de Informação ganhou nas últimas décadas, tanto nos aspectos científico e tecnológico, quanto filosófico. Desse modo, a ausência do debate sobre o conceito de Entropia nesse contexto é, no mínimo, anacrônico, corroborando as contribuições do presente trabalho que, ao elencar as variadas abordagens para a conceituação da grandeza entropia, intenta promover uma reflexão na comunidade de ensino de ciências brasileira sobre o papel que tal multiplicidade vem a ter como obstáculo de aprendizagem à luz das teorias de aprendizagem significativa de David Ausubel e da epistemologia do conhecimento de Bachelard.

A insistência em torno de uma única abordagem, em detrimento de uma exposição ampla acerca do tema, além de contribuir para esse anacronismo, promove dificuldades de natureza pedagógica. Ainda não é possível definir até quando os livros didáticos seguirão abordando a entropia de modo tão vago e impreciso. Mas, certamente, é possível afirmar que a forma de aprendizagem a qual conduz tais lacunas conceituais tende a pender a balança da compreensão muito mais para um processo mecânico do entendimento do que para um processo munido de significados, muito mais eficaz para a natureza interdisciplinar que a entropia adquiriu atualmente. Em contrapartida, algumas iniciativas (já elencadas no texto) tem sido tomadas.

Por se tratar de um tema tão abrangente, o trabalho busca suscitar a reflexão da comunidade brasileira, afinal, toda a beleza da termodinâmica reside em seu caráter fenomenológico e grande aplicabilidade iniciada em uma época de transição pré-industrial

(que perpassa aos dias atuais com toda a ciência de motores de combustão interna) a qual viria a culminar depois no estudo da radiação térmica, origem da teoria quântica, outro alicerce moderno da ciência humana ainda não abordado coerentemente no ensino médio. Portanto, apresentar a ideia de Entropia por um viés que permita abarcar diferentes concepções é, no mínimo, uma excelente oportunidade de trazer do século XIX para os dias atuais um debate fundamental ao processo ensino e aprendizagem em seus variados níveis.

Como sugestões para trabalhos futuros, os autores planejam analisar os conteúdos presentes nos livros didáticos de forma a quantificar as diferentes abordagens do conceito de entropia nas áreas de química e física, possibilitando um estudo quantitativo acerca do espectro de abordagens possíveis em conteúdos (principalmente) nacionais, além de analogias com outras estruturas conceituais comuns às ciências naturais tendo como base os trabalhos de David Ausubel e Bachelard.

Em síntese, quanto mais completa for a enumeração das possibilidades investigativas, mais efetivas serão tais análises ao promoverem rupturas paradigmáticas, além de nortearem políticas públicas tangíveis tanto aos livros didáticos quanto às relações de ensino.

Referências

Abe, S. (2004). Tsallis entropy: how unique? *continuum mechanics and thermodynamics* 16(1):237-44.

Aurani, KM. (2018). As ideias iniciais de Clausius sobre entropia e suas possíveis contribuições à formação de professores. *Revista Brasileira de História da Ciência*, 11 (1): 155-63.

Bachelard, G. (1996). *A formação do espírito científico*. Rio de Janeiro: Contraponto Editora.

Ben Naim, A. (2008). *Statistical thermodynamics based on information*. A Farewell to Entropy. Singapore: World Scientific Publishing.

Ben Naim, A. (2011). Entropy: order or information. *Journal of chemical education* 88(5), 594-596.

Ben Naim, A. (2017). *Information Theory – Part I: An Introduction to the Fundamental Concepts*. Singapore: World Scientific Publishing.

Borges, EP. (1999). Irreversibilidade, Desordem e Incerteza: três visões da generalização do conceito de Entropia. *Revista Brasileira de Ensino de Física* 21 (4), 453-463.

Capek, V. & Scheehan, DP. (2005). *Challenges to the Second Law of Thermodynamics - Theory and Experiment*. Amsterdam: Springer.

Çengel, YA & Boles, MA. *Termodinâmica*. 7. Porto Alegre: Bookman. 2013.

Cunha, JAR, Genovesi, LGR & Queiros, WP. (2018). Das Limitações Histórico-Conceituais das Apresentações do Conteúdo de Entropia nos Livros de Física do Ensino Superior a uma Proposta de Ensino Fundamentada. *Acta Scientiae*, 20 (2), 117-34.

Flores, FF, Lugo, NU & Martinez, HC. (2015). The concept of entropy, from its origins to teachers. *Revista Mexicana de Física E* 61 (1), 69-80.

Gerhardt, TE. & Silveira, DT. (2009). *Métodos de pesquisa*. Porto Alegre: Editora da UFRGS

Jacobsen, AL. (2016). *Metodologia Científica (Orientação ao TCC)*. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração/UFSC, 2016. Acesso em: 13 maio 2020. Disponível em: <https://cursodegestaoelideranca.paginas.ufsc.br/files/2016/03/Apostila-Orienta%C3%A7%C3%A3o-ao-TCC.pdf>

Lynskey, MJ. (2019). *An Overview of the Physical Concept of Entropy*. Acesso em 20 fevereiro 2020. Disponível em: http://gmsweb.komazawa-u.ac.jp/wp-content/uploads/2019/10/02_Michael_J_Lynskey.pdf.

Müller, I. (2007). *History of Thermodynamics*. Springer Science & Business Media.

Oliveira, AER. (2014). *A History of the Work Concept - from Physics to Economics*. New York: Springer.

Greiner, W, Neise, L & Stöcker, H. (1995). *Thermodynamics and Statistical Mechanics*. Berlin: Springer-Verlag.

Jaynes, ET. (1957). Information theory and statistical mechanics. *Physical Review*, 106 (4), 620-30.

Lambert, FL. (2002). Disorder- A Cracked Crutch For Supporting Entropy Discussions. *Journal of Chemical Education* 79 (2), 187-92.

Lambert, FL. (2006). A modern view of entropy. *Chemistry* 15 (1), 13-21.

Leff, HS. (1996). Thermodynamic entropy: The spreading and sharing of energy. *American Journal of Physics* 64 (10), 1261-1271.

Leff, HS. (2007). Entropy, Its Language, and Interpretation. *Foundations of Physics* 37 (1): 1744–66.

Leff, HS. (2012). Removing the Mystery of Entropy and Thermodynamics – Part I. *The Physics Teacher* 50 (1), 28-31.

Moreira, MA. (1983). *Uma abordagem cognitivista ao Ensino de Física. A teoria de aprendizagem de David Ausubel como sistema de referência para a organização do ensino de ciências*. Porto Alegre: Editora UFRGS.

Plastino, A. & Plastino, AR. (1999). Tsallis Entropy and Jaynes' Information Theory Formalism, *Brazilian Journal of Physics* 29 (1): 50-60.

Stone, JV. (2015). *Information Theory - a tutorial introduction*. Sheffield: Sebtel Press.

Tsallis, C. (1988). Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. *Journal of Statistical Physics* 52 (1-2), 479-87.

Wanderlingh, F. (1995). *The big game of energy and entropy*. In: Bernardini, Carlo et al (org.). *Thinking Physics for Teaching*. New York: Springer.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Murilo Sodr  Marques – 50 %

Wanisson Silva Santana – 50 %