

entropia

**Para além da energia, o
ensino da entropia no
Ensino Médio**

Apresentação

Este produto educacional é fruto de uma dissertação de mestrado e traz uma proposta de aulas para tratar da entropia levando em consideração aspectos da complexificação do conhecimento escolar. Este material é voltado para professores e professoras que queiram promover uma educação voltada para a complexidade, buscando superar o paradigma simplificador.

Este produto traz diversos elementos de aprendizagem online, tais como, vídeos, simulações, hipertextos, etc. Dentro a sequência de aulas propostas encontram-se sugestões de leituras, filmes e documentários. A proposta de aula se organiza em três etapas e podem levar de duas a três aulas cada, ficando a critério do(a) professor(a).

Sugerimos a leitura da dissertação de mestrado vinculada à esse produto educacional para melhor entendimento da pesquisa desenvolvida e também dos resultados analisados em razão da aplicação deste produto.

1

Pequeno resgate histórico sobre a natureza do calor, as máquinas térmicas e a entropia

Os conceitos de temperatura e calor nem sempre foram distintos como entendemos hoje. Esses conceitos foram delineados a partir da construção e do desenvolvimento de termômetros, que permitiu melhor entendimento e diferenciação entre temperatura e calor. Segundo Gomes (2012), foi Joseph Black (1728-1799) quem diferenciou o calor da temperatura, concebendo-o como uma quantidade física mensurável, distinta daquela indicada no termômetro. Na época de Black, o calor era entendido como uma substância que existia em abundância nos corpos aquecidos, era indestrutível, imponderável, muito elástica, auto repulsiva e possuía, sob certas condições, grande afinidade com a matéria normal dos corpos.

Black e Antoine Lavoisier (1743-1794) foram grandes defensores e construtores desse entendimento sobre a natureza do calor que ficou conhecido como a Teoria do Calórico. Black, por exemplo, realizou experimentos envolvendo equilíbrio térmico entre corpos e demonstrou que a quantidade de calor que cada corpo cede ou recebe não é diretamente proporcional à massa, como muitos afirmavam à época. Se a troca de calor ocorresse entre corpos feitos da mesma substância e com a mesma massa, então a temperatura de equilíbrio seria alcançaria a média das temperaturas iniciais. Contudo, 'caso os corpos sejam de materiais diferentes, para uma mesma quantidade de calor recebida ou cedida, quem tiver a menor *'capacity for heat'* irá variar mais a sua temperatura" (GOMES, 2012, p. 1037).

Black demonstrou que a mudança de fase das substâncias demanda uma quantidade relativamente grande de calor, em oposição ao que se pensava na época:

colocando certa massa de gelo a 32 °F num recipiente e a mesma massa de água a 33 °F em outro recipiente e deixando-os dentro de uma sala fechada a 47 °F, verificou que em meia hora a temperatura da água já alcançava 40 °F enquanto que o gelo precisou de 5 horas para derreter e, somente 10,5 horas depois, atingiu a temperatura de 40 °F, levando-o a entender que o gelo precisou de 21 vezes mais calor para aumentar 8 graus (de 32 °F a 40 °F) em comparação com a água que aumentou 7 °F (33° F a 40 °F). Para Black essa quantidade de calor teria sido absorvida pelo gelo e estaria escondida na água. É interessante notarmos que esse calor 'escondido' ($21 \times 7 - 8 = 139$ °F ou 77,2 °C), corresponde a um valor muito próximo do calor latente de fusão da água 80 cal/g (se considerarmos a escala Celsius).

Anos mais tarde, em 1783, o próprio Lavoisier apresenta, juntamente com Pierre Simon Laplace (1749-1827), uma memória à Academia de Ciências em que reconhece que os físicos estão 'divididos quanto à natureza do calor - um fluido que penetra nos corpos consoante a sua temperatura e a sua capacidade para retê-lo, ou o resultado da agitação das partículas constituintes da matéria" (BRITO, 2008, p. 56). Mesmo dividido entre o entendimento do calor como substância ou uma forma de agitação das partículas constituinte dos corpos, Lavoisier optou por seguir a teoria corpuscular do calor, acreditando que os estados físicos da matéria poderiam ser explicados pela menor ou maior quantidade dessa partícula de calor, o qual denominou de calórico. Para Lavoisier os átomos estariam envoltos de uma atmosfera calórica que tinha propriedade repulsiva, enquanto que os átomos mantinham-se unidos devido a força gravitacional. Assim, nos sólidos tem-se pouco calórico e a atração gravitacional prevalece mantendo as moléculas unidas e rígidas em suas posições, já nos líquidos há uma maior quantidade de calórico que diminui essa rigidez gravitacional, deixando os átomos menos unidos, e, finalmente, nos gases a quantidade de calórico é tal que vence a atração gravitacional e os átomos tendem a se dispersar totalmente (BASSALO, 1992, p. 31).

O início da Revolução Industrial contribuiu para aumentar as discussões sobre a natureza do calor. Muitos cientistas da época realizaram diversos experimentos e contribuíram de forma significativa para o fim da Teoria do Calórico, dentre eles podemos destacar Benjamin Thomson (Conde Rumford) (1753-1814), Humphrey Davy (1778-1829), James Prescott Joule (1818-1889), Julius Robert Von Mayer (1814-1878), Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888), entre outros (SILVA, 2013, p.84). Rumford investigou a produção de calor durante a perfuração de canhões numa fábrica em Munique, medindo a temperatura da água em que mergulhou o canhão. Enquanto existisse atrito entre as duas peças de metal haveria aquecimento na água sem que se verificasse alteração

em suas massas (BRITO, 2008). Davy também investigou a geração de calor por atrito, constatando que 'a causa imediata dos fenômenos caloríficos é o movimento" (op. cit., 2008). Foi preciso mais alguns anos para que o calor deixasse de ser entendido como uma substância e passasse a ser tratado como um tipo de energia associado ao movimento. Contribuíram para essa transição as pesquisas de Mayer ao observar que a cor do sangue venoso de marinheiros próximos ao equador era mais claro, quando comparado com o do europeu, indicando um menor consumo de oxigênio durante respiração (processo de combustão). A época existia grande controvérsia sobre a origem do calor animal. Para Pierre Louis Dulong (1785-1838) e César-Mansuète Despretz (1791-1863) e Johannes Peter Muller (1774-1842) a fonte de calor animal reside, além da respiração nos pulmões, em diversos lugares que denominou sistema nervoso. Já para Heinrich Gustav Magnus (1802-1870) a fonte do calor animal residia em todos os organismos no interior dos tecidos. Para Mayer o calor poderia se transformar em movimento e vice-versa (MELO, 2012).

Uma das contribuições de Joule para a questão do calor foi o experimento do equivalente calórico da energia mecânica (Figura 1.1). A partir de um aparato simples no qual a queda de um corpo movimentava um conjunto de pás que, por sua vez, agitavam a água dentro de um calorímetro, Joule foi capaz de estabelecer uma relação entre a energia mecânica da queda do corpo com o ganho de energia térmica pela água.

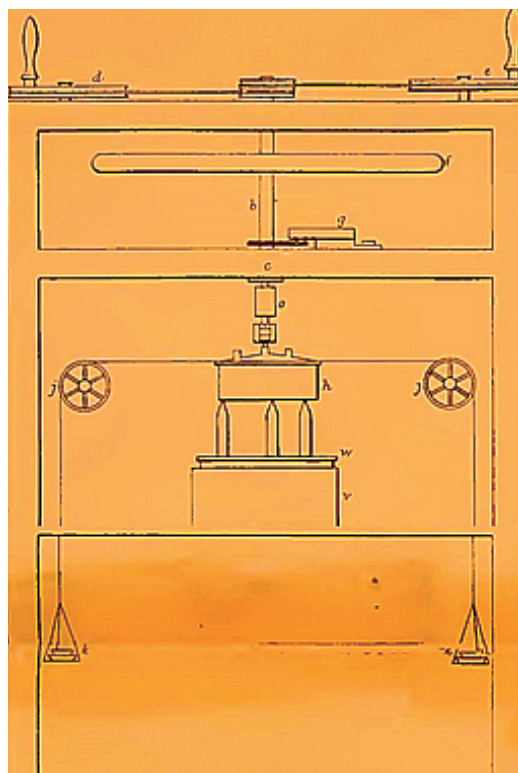


Figura 1.1: aparato experimental criado por Joule.

Fonte: JOULE, p. 632, 1884.

Esse trabalho possibilitou avançar em direção ao entendimento do calor como uma forma de energia, além de proporcionar que seu nome fosse dado à unidade de energia.

Na época de Joule e Mayer já havia sido construído algumas máquinas térmicas (equipamentos que utilizam o calor para realizar um trabalho mecânico). O engenheiro Thomas Savery (1650-1716) construiu em 1698 um dispositivo que chamou de bomba de vapor, usada basicamente para retirar água do interior das minas de carvão. Não se pode denominar o invento de Savery de máquina térmica, pois a mesma não possuía partes móveis.

Thomas Newcomen (1664-1729), que era ferreiro e mecânico, inspirado nos estudos de Denis Papin (1647-1713), construiu em 1712 o motor Newcomen, que consistia, basicamente, de um cilindro no qual se injetava vapor de água fazendo com que um êmbolo subisse devido à maior pressão do vapor frente à pressão atmosférica, para, posteriormente, resfriar o cilindro com água tornando o ar em seu interior rarefeito e proporcionando o retorno do êmbolo devido à diferença entre a pressão atmosférica e a pressão no interior do cilindro. Nesse retorno, o êmbolo, por meio de uma alavanca, retirava certa quantidade de água de um poço (Figura 1.2);

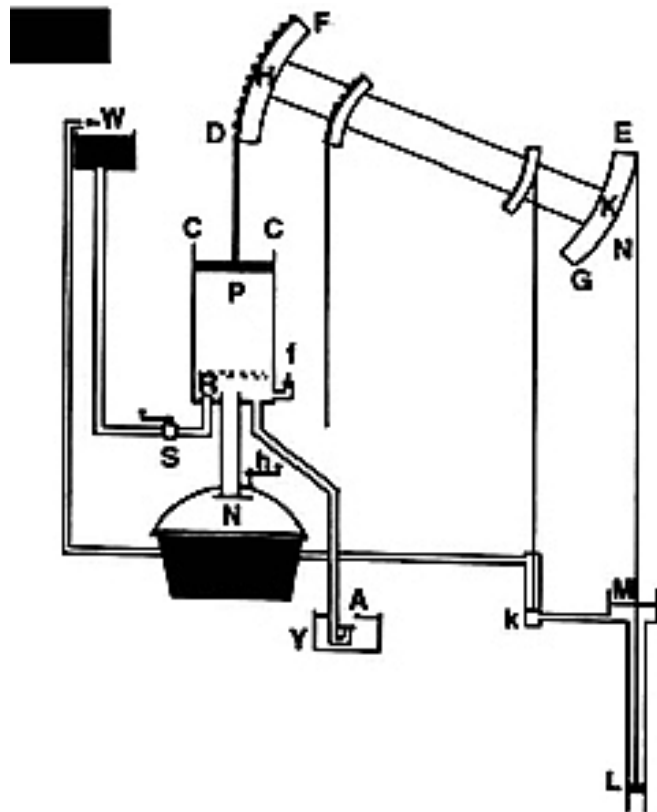


Figura 1.2: Máquina térmica de Newcomen.
Fonte: DIAS, P. M. C., p.63, 1999.

Foi somente no ano de 1763 que James Watt (1736-1819) teve contato com a máquina de Newcomen enquanto trabalhava como fabricante de instrumentos na Universidade de Glasgow. Watt percebeu que o resfriamento do cilindro proporcionava grande perda de energia, diminuindo seu rendimento. Ele adaptou um condensador separado da máquina para resfriar o vapor do cilindro aumentando o rendimento da máquina de Newcomen. A primeira máquina de Watt (Figura 1.3) foi finalizada em 1769 (BALDOW & MONTEIRO, 2010).

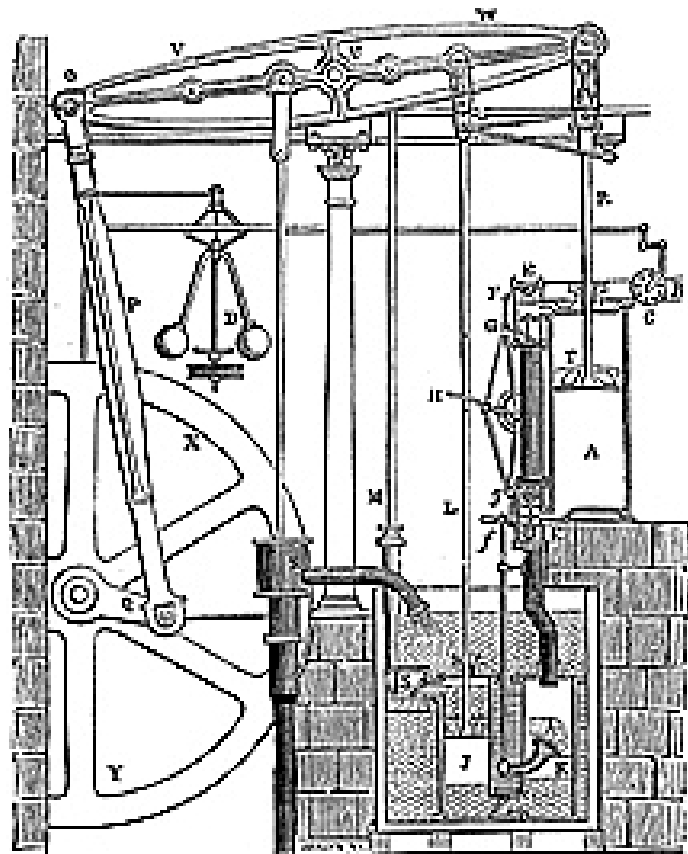


Figura 1.3: Máquina térmica de James Watt.

Fonte: http://etc.usf.edu/clipart/36300/36399/engine_watt_36399.htm

Cabe ressaltar que o conhecimento e desenvolvimento das máquinas à vapor se deu pela via técnica, ou seja, não se tinha e nem se precisava ter um conhecimento científico aprofundado sobre o funcionamento dessas máquinas que, segundo Hobsbawn (1977),

Nem mesmo sua máquina cientificamente mais sofisticada, a máquina a vapor rotativa de James Watt (1784), necessitava de mais conhecimento de física do que os disponíveis então há quase um século. (HOBSBAWN, E., 1977)

A rápida difusão das máquinas à vapor inglesas trouxeram a necessidade de uma

nova perspectiva para a questão do calor. Não se trata mais de entender a natureza do calor, mas compreender sua utilização e em quais condições o calor produz energia mecânica.

É em Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) que encontramos um estudo mais aprofundado sobre o rendimento das máquinas a vapor no trabalho publicado no ano de 1824 sob a forma de ensaio, totalizando cento e dezenove páginas. De acordo com Passos (2002), Carnot afirma que 'ao contrário das máquinas cujos movimentos não dependem do calor e que podem ser estudadas pela teoria mecânica, as máquinas a fogo necessitam de uma teoria semelhante". O pai de Carnot, Lázaro Carnot, tinha em mente que, para se obter um melhor rendimento, a máquina térmica deveria evitar choques, colisões ou quaisquer mudanças bruscas de velocidade, para ele somente os movimentos contínuos eram conservativos (PRIGOGINE & STENGERS, 1984, p. 91).

Carnot entende que todo fluxo de calor que não resulte numa variação no volume do gás (expansão e contração) constitui numa total perda de rendimento. O ciclo por ele idealizado consta de duas fontes com temperaturas diferentes, deste modo, quando o sistema está em contato com a fonte quente, absorve calor, isotermicamente, aumentando seu volume sem alterar a temperatura da fonte e quando está em contato com a fonte fria cede calor à ela comprimindo-se e mantendo a temperatura do sistema e da fonte fria constante. Intercalando com esses processos isotérmicos têm-se duas etapas em que o sistema é isolado das fontes não podendo trocar calor com o meio, mas variando sua temperatura e sofrendo expansão e compressão. O *Princípio de Carnot* estabelece que o funcionamento das máquinas térmicas advém do transporte de calórico da fonte quente para a fonte fria e, a potência motriz, independe da substância utilizada. É preciso destacar que o trabalho de Carnot pressupõe o calor com uma substância, numa época em que a teoria do calórico estava em colapso, além disso, seu trabalho teve pouca repercussão dado o baixo nível de formalismo apresentado. Carnot não representou as transformações do ciclo por meio de diagramas, tão pouco matematizou sua teoria. Foi Benoit Paul Émile Clapeyron (1799-1864) que os representou por meio de um gráfico de pressão em função do volume e equacionou o Princípio de Carnot (DIAS, 2007a).

William Thomson (1824-1907), também conhecido como Lord Kelvin, encontra uma contradição entre o Princípio de Carnot (o calórico é conservado e, portanto, não pode ser transformado em trabalho) e o Princípio de Joule, que entende que 'as diversas formas de trabalho poderiam ser convertidas umas nas outras e que, além disso, todas elas poderiam ser dissipadas na forma de calor" (OLIVEIRA, 2012, p. 13). Clausius propõe que

o Princípio de Carnot possa ser corrigido considerando que existe um transporte de calor da fonte quente para a fonte fria. Para isso ele parte do Princípio de Joule que afirma que uma máquina térmica transforma em trabalho (W) parte do calor retirado da fonte quente (Q_W) sendo $W = \text{fator de conversão} \cdot Q_W$. Então, a máquina térmica recebe da fonte quente uma quantidade de calor Q que aumenta o conteúdo de calor da substância (U) de um fator igual a $Q - Q_W$, e, para finalizar o ciclo, a máquina precisa conservar seu conteúdo de calor constante desfazendo do calor excedente desse processo que vale $Q_t = Q - Q_W$. Para justificar essa rejeição de calor da máquina térmica para a fonte fria, Clausius propõe o seguinte princípio: '... [calor] mostra uma tendência de equalizar diferenças de temperatura e, portanto, de passar de corpos mais quentes para [corpos] mais frios" (DIAS, 2007a). Clausius demonstra ainda que, partindo do Princípio de Joule, no qual o conteúdo de calor é conservado em um ciclo completo ($\oint dU = 0$), vale a relação $dU = dW + dQ$

Segundo Prigogine & Stengers (1984) a conclusão de Clausius sobre a necessidade de uma fonte fria tem implicações ainda maiores, pois mostra que, apesar do planeta ser um estoque infinito de energia, essa energia não está à disposição sob quaisquer circunstâncias. No ciclo de Carnot o trabalho obtido pela máquina é pago com uma diminuição entre as temperaturas das fontes de calor. O retorno à diferença de temperatura entre as fontes pode ser obtido num processo idealmente reversível, no qual o trabalho é consumido para criar a diferença de temperatura. Clausius não tinha interesse pelo estudo da máquina real, que apresentava menor rendimento do que o previsto pela máquina ideal, contudo essas preocupações começaram a emergir já no século XVIII sob o olhar do princípio da conservação que se preocupava inclusive em descrever as 'perdas". Décadas antes (1811), o barão Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), propõe uma nova lei, que, além de não derivar das leis da mecânica newtoniana, é totalmente estranha a ela, contudo possui um alto rigor matemático e uma simplicidade elegante. Fourier afirmou que 'o fluxo de calor entre dois corpos é proporcional ao gradiente de temperatura entre esses dois corpos" (PRIGOGINE & STENGERS, 1984, p. 84). Essa afirmação de Fourier introduz na física o conceito de irreversibilidade, pois não é possível admitir que o calor vá, de forma espontânea, se concentrar numa única região do corpo ou que irá se mover da fonte fria em direção à fonte quente. Segundos esses autores,

Todos sabiam que essa lei é irreversível no sentido de que o calor tem a propriedade fundamental, segundo a expressão empregada por Boerhaave, de sempre se 'propagar', se nivelar, de nunca se concentrar e criar espontaneamente diferenças de temperatura (op. cit., p. 85).

Com essa base teórica Thomson foi capaz, após tomar conhecimento dos trabalhos publicados por Clausius, de formalizar o segundo princípio da termodinâmica. No artigo publicado em 1851, ele retoma a teoria do calor incorporando as modificações de Clausius e enuncia a segunda lei:

É impossível, por meio de agente material inanimado, derivar trabalho mecânico de qualquer parte da matéria, esfriando-a abaixo da temperatura do objeto mais frio, nas redondezas (DIAS, 2007a).

No ano seguinte, Thomson publica outro artigo em que se preocupa com o trabalho que é irremediavelmente perdido no funcionamento da máquina térmica e conclui que: 1. Existe uma tendência universal à dissipação da energia mecânica; 2. Não é possível restaurar qualquer porção de energia mecânica sem algum equivalente de dissipação; 3. Entende que a vida humana na Terra não poderia existir em um tempo finito no passado e poderá não existir em um tempo no futuro, dado que a obtenção de energia mecânica por meios térmicos somente é possível enquanto o sistema não atinge o equilíbrio térmico (DIAS, 2007b).

Segundo Prigogine e Stengers (1984), 'Thomson executou assim um salto vertiginoso da tecnologia dos motores para a cosmologia'. O universo, sendo um sistema fechado e obedecendo a lei de conservação de energia, está esgotando as diferenças de temperatura e se encaminhando para um estágio no qual nenhuma energia mecânica poderá ser obtida.

Segundo Silva (2009), Clausius, explorando as ideias de conservação e transformação a partir dos trabalhos de Carnot, nota que além da transformação do calor em trabalho, existia também a transformação da energia a uma dada temperatura para outra energia a outra temperatura, sendo realizado pela passagem do calor da fonte quente para a fonte fria. Introduziu uma nova função de estado (S), dado por $S = \frac{Q}{T}$, que depende apenas dos parâmetros pressão, temperatura, volume e quantidade de calor. Clausius em seu trabalho *Ueber verschiedene für die Anwendung bqueme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie*, descreve a escolha para a palavra entropia:

'Se desejarmos designar S por um nome apropriado podemos dizer que é o *conteúdo de transformação* do corpo, do mesmo modo que U é o conteúdo de calor e trabalho do corpo. Todavia, como eu acho melhor dar nomes como estas, que são importantes para a ciência, a partir das línguas antigas, de modo que elas possam ser introduzidas sem mudanças

em todas as línguas modernas, eu proponho o nome da grandeza S a entropia de um corpo, da palavra grega $\etaτροπη$, uma transformação. Eu propositalmente formei a palavra entropia, de modo a ser o mais similar possível à palavra energia, visto que ambas as grandezas, conhecidas por estes nomes, são tão proximamente relacionadas uma com a outra no seu significado físico que uma certa similaridade nos seus nomes me parece vantajosa" (CLAUSIUS, 1865, apud SANTOS, 2009).

A energia do sistema também é uma equação de estado, porém não dá conta de diferenciar os fluxos úteis, aqueles que podem ser reconduzidos à máquina numa eventual inversão do sistema, dos fluxos dissipados aqueles que são inevitavelmente 'perdidos', no sentido de que não podem ser reconduzidos à máquina. Clausius enuncia o princípio de equivalência das transformações em seu trabalho 'on the application of the Theorem of the equivalence of transformations to the internal work of a mass of matter':

'Se a quantidade de calor Q da temperatura t é produzida a partir do trabalho, o valor equivalente desta transformação é $\frac{Q}{T}$; e se a quantidade de calor Q passa de um corpo cuja temperatura é t_1 para outra cuja temperatura é t_2 , o valor equivalente dessa transformação é $Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$ onde T é uma função da temperatura que é independente do tipo de processo por meio do qual a transformação é efetuada, e T_1 e T_2 denotam os valores desta função que correspondem às temperaturas t_1 e t_2 . Mostrei por considerações separadas que T é, com toda a probabilidade, nada mais que a temperatura absoluta" (CLAUSIUS, 1862, p. 83).

Para Clausius o quociente $\frac{Q}{T}$, representa a equivalência entre as transformações dentro de um ciclo, com sinal positivo para quando o calor é transformado em trabalho e negativo para quando o trabalho é transformado em calor. Se tratando de um processo reversível, esse quociente será sempre nulo.

Clausius define duas entropias para as máquinas térmicas reais, uma para os fluxos úteis e reversíveis que se dá entre a máquina e o meio externo, em que o sinal depende do sentido de operação da máquina, e outra para as transformações internas irreversíveis do sistema, que é sempre nulo ou positivo. Deste modo a entropia, em sistemas reais e, portanto irreversíveis, nunca diminui, podendo no máximo manter-se constante.

Voltando à descrição dos gases, Clausius apresenta em 1857 a Teoria cinética dos gases que trouxe contribuições importantes como a interpretação atômico-molecular da pressão, a relação entre temperatura e energia cinética, a descrição das propriedades dos gases em equilíbrios entre outras. Ele chegou a estimar a velocidade das moléculas do gás, em temperatura ambiente, como algo entre 461 m/s e 492 m/s. Dado que a difusão de qualquer gás no ambiente não ocorre tão rapidamente, Clausius reviu seu postulado sobre o tamanho infinitesimal das moléculas e definiu o *livre caminho médio* como sendo a distância percorrida por uma molécula antes de interagir com outras, de modo que, mesmo possuindo alta velocidade, a difusão do gás no ambiente levaria algum tempo. Maxwell entende a natureza estatística do trabalho de Clausius e corrobora suas hipóteses com uma divergência conceitual. Enquanto que para Clausius a velocidade das moléculas seriam todas iguais para um gás homogêneo a uma dada temperatura, Maxwell entende que as colisões entre as moléculas cria uma distribuição de velocidades em torno de um valor médio, assim, existiriam moléculas com velocidades superiores e inferiores à média para uma dada temperatura. (SANTOS, 2009, p. 101-103).

Nesse momento Maxwell abre um novo caminho para a física, antes determinística, e que agora se vê diante de uma teoria estatística em que a certeza dá lugar à probabilidade. Essa passagem da física determinística e probabilística tem uma representação muito conhecida que é o *Demônio de Maxwell*, que retrata um ser capaz de selecionar moléculas de um gás contido numa caixa com dois compartimentos. Num dos compartimentos tem-se o gás numa temperatura elevada e no outro em uma temperatura baixa. Segundo a distribuição de velocidades propostas por Maxwell o gás quente poderia ter moléculas mais lentas que certas moléculas presentes no gás frio, e vice versa. O papel do demônio seria permitir a passagem das moléculas mais lentas do gás quente para o gás frio e as moléculas de maior velocidade do gás frio para o gás quente. Desse modo o gás quente se tornaria ainda mais quente, enquanto que o gás frio se tornaria mais frio. O Demônio de Maxwell traria ordem ao sistema composto pelos dois gases e violaria a segunda lei da termodinâmica, visto que o calor teria passado do corpo mais frio para o mais quente (SANTOS, 2009, p. 105-107).

Para termos uma ideia da aplicação da probabilidade na física podemos pegar um sistema constituído de N partículas que serão distribuídas em dois compartimentos. Se $N = 4$ temos apenas uma maneira de colocarmos as 4 partículas num só compartimento. Já se colocamos 1 partícula num dos compartimentos, então teremos 4 modos distintos de fazer isso. Para a divisão igualitária de partículas teremos um total de 6 formas distintas de fazê-lo e será a distribuição com maior número de combinações. A análise combinatória

nos permite calcular o número de combinações possíveis para separação de N partículas em dois compartimentos distintos [$C(N_1, N_2) = \frac{N!}{N_1!N_2!}$]. Quanto maior o valor de N maior será o número de combinações possíveis e, para $N_1 = N_2$, o número de combinações possíveis alcança valores muito maiores. A Figura 1.4 mostra o acentuamento e um pico na função a medida em que o número de partículas, N, aumenta.

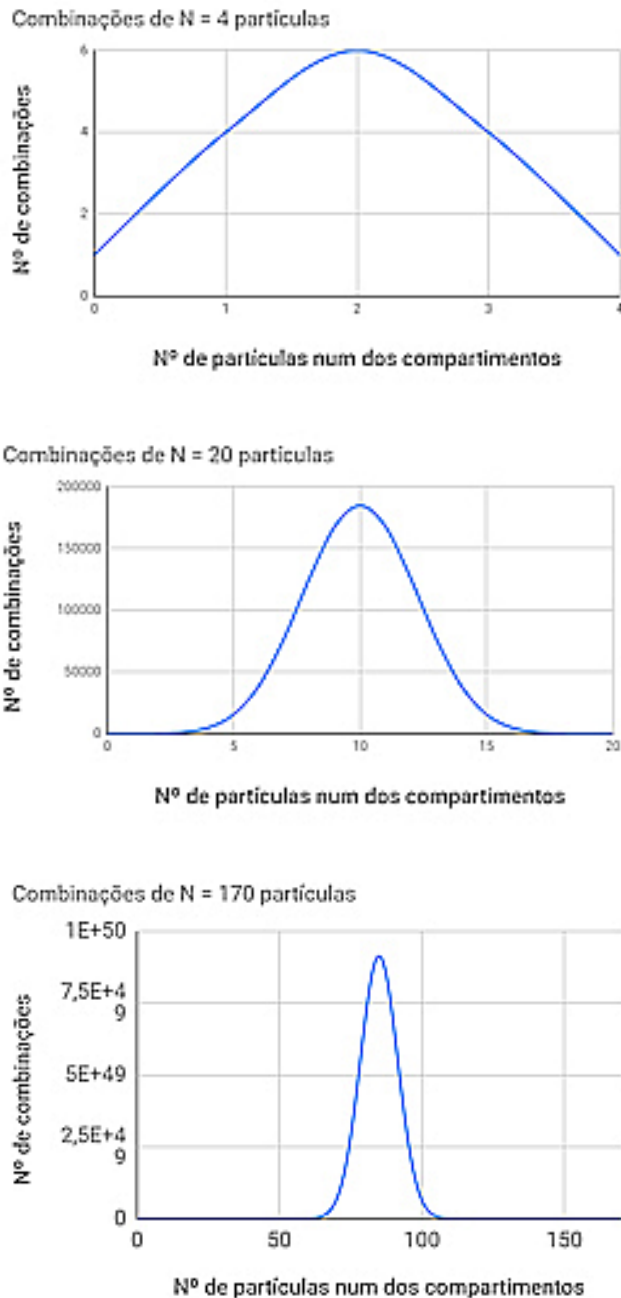


Figura 1.4: Gráficos do número de combinações para N=4; N=20 e N=170.
Fonte: Autoria própria.

Para cada forma de organizar as moléculas ou dividir a energia entre as mesmas, encontram-se inúmeras maneiras de se fazer essa organização ou divisão. Cada divisão de partículas ou energia recebe o nome de macroestado, enquanto, que o número de forma que se pode organizar ou distribuir dentro daquele macroestado, recebe o nome de microestado.

Segundo Prigogine & Stengers (1984), Boltzmann foi o primeiro a notar que o crescimento da entropia poderia ser associado ao crescimento da desordem molecular e conseqüentemente ao gradativo esquecimento da dissemetria inicial. A entropia, então caracteriza cada estado macroscópico a partir do número de microestados (W), em que $S=k \ln W$, sendo k a constante de Boltzmann. O estado de equilíbrio torna-se assim, um verdadeiro atrativo para a evolução do sistema, no qual os processos irreversíveis são aqueles em que o estado final possui maior atrativo que o estado inicial e o processo reversível se verifica apenas quando os estados inicial e final possuem o mesmo atrativo, o que permite ao sistemas passar em ambos os sentidos.

'Aqui, ao contrário, todos os sistemas em estado de não equilíbrio evoluem para o *mesmo* estado de equilíbrio. Chegado ao equilíbrio, o sistemas *esqueceu* suas condições iniciais, esqueceu a maneira como foi preparado" (PRIGOGINE & STENGERS, 1984, p.98).

Deste modo, as contribuições de Boltzmann permitiram outra interpretação para a entropia, no qual o estado mais provável que pode ser acessado por um sistema é aquele em que se tem o maior número de microestados possíveis, dado que todos os microestados são igualmente prováveis. Deste modo não importa as condições iniciais do sistema, ele sempre caminhará para o estado mais provável, como maior número de microestados, no qual se tem uma equipartição de energia. Do ponto de vista microscópico ainda pode ocorrer pequenas flutuações em torno da equipartição, mas não será suficiente para tirar os sistema desse estado e portanto o processo se torna irreversível. Nas palavras do próprio Boltzmann:

'A relação entre a Segunda Lei da Termodinâmica e a teoria das probabilidades foi inicialmente mostrada quando eu provei que uma demonstração analítica desta Lei pode ser fundamentada apenas a partir da teoria das probabilidades. [...] podemos calcular o estado de equilíbrio investigando a probabilidade de diferentes possíveis estados do sistema. O estado inicial será, na maioria dos casos, muito improvável

e, a partir dele, o sistema irá evoluir em direção a estados mais prováveis, isto é, ao estado de equilíbrio do calor. Se aplicarmos isto na Segunda Lei, podemos relacionar a quantidade que comumente designamos como entropia com a propriedade do estado atual. Pensando num sistema isolado de corpos que não troca energia com o meio externo, por exemplo, um corpo de alta temperatura e outro de baixa temperatura, colocados em contato e isolados do exterior, permitindo-se a troca de calor somente entre eles (...) O sistema de corpos que pensamos pode ter no início qualquer estado; através da troca entre os corpos, este estado muda; de acordo com a Segunda Lei esta mudança deve sempre ocorrer de modo que a entropia de todos os corpos aumente cada vez mais; o sistema de corpos caminhará de um estado mais improvável para um estado mais provável" (MAGIE, 1935).

A entropia pode ser considerada como um conceito complexo que exige uma visão sistêmica que fuja de qualquer simplificação e até mesmo isolamento. Em nosso entendimento, tratar da entropia de forma isolada, num capítulo específico do LD, ajuda a reforçar o paradigma simplificador e não ajuda a promover um pensamento complexo.

2

Proposta de aula – Comentários iniciais

No ensino tradicional nota-se uma dificuldade em propor aulas mais abertas e focadas em temas pautados na realidade discente. Essa dificuldade decorre especialmente ao se buscar aprofundar um determinado assunto ou conceito sem estabelecer as relações intradisciplinares e interdisciplinares e se afastar da realidade em que vivemos. Ao se pensar numa aula que integre diferentes áreas do conhecimento, buscando uma visão mais holística do conhecimento, corre-se o risco de desenvolver o assunto de forma superficial e, na tentativa de reunir as diferentes áreas do conhecimento, acaba por suplantar as suas características (MORIN, 2007).

Historicamente o conceito de entropia é demasiadamente controverso tanto para os cientistas quanto para os professores e autores de materiais didáticos, como apontam Flores-Camacho e Ulloa-Lugo (2014); Santos (2008); Baldow e Monteiro Júnior (2010). Por ter sido enunciado de várias formas e se expandido para diversas áreas do conhecimento, esse conceito tornou-se de difícil conceituação e demasiadamente complexo, no sentido de poder integrar e interagir em diferentes sistemas. Assim, por exemplo, apresentar a entropia somente a partir da ordem e desordem acaba por dificultar o entendimento mais amplo do conceito e fornece uma visão distorcida do que vem a ser a entropia.

Em nosso entendimento a discussão acerca do conceito de entropia pode perpassar pela visão de ordem e desordem de um sistema ou de sistemas, mas isso não pode ser imediato e nem mesmo deve ser a única definição sobre o assunto. Nesse sentido, propõe-se desenvolver o conceito de entropia de forma não sequencial, não linear. Para tanto, teceremos uma rede (Figura 2.1) em torno do tema a partir da qual o(a)

professor(a) terá liberdade de escolher o caminho mais adequado. Dentro dessa rede encontraremos possibilidades de tratar os sistemas fechados (que não trocam energia com a vizinhança), o esgotamento dos conversores energéticos, os processos reversíveis e irreversíveis, as máquinas térmicas e seu rendimento, os sistemas abertos (que trocam energia com a vizinhança), a auto-organização, a vida, evolução e diversidade, a poluição e despoluição e as limitações ao crescimento econômico. Essa abordagem procura seguir as premissas de uma aula mais complexa que aponta para o conhecimento escolar com suas características próprias, pautadas por elementos do conhecimento cotidiano e científico e com a preocupação em propor a transição do simples para o complexo.

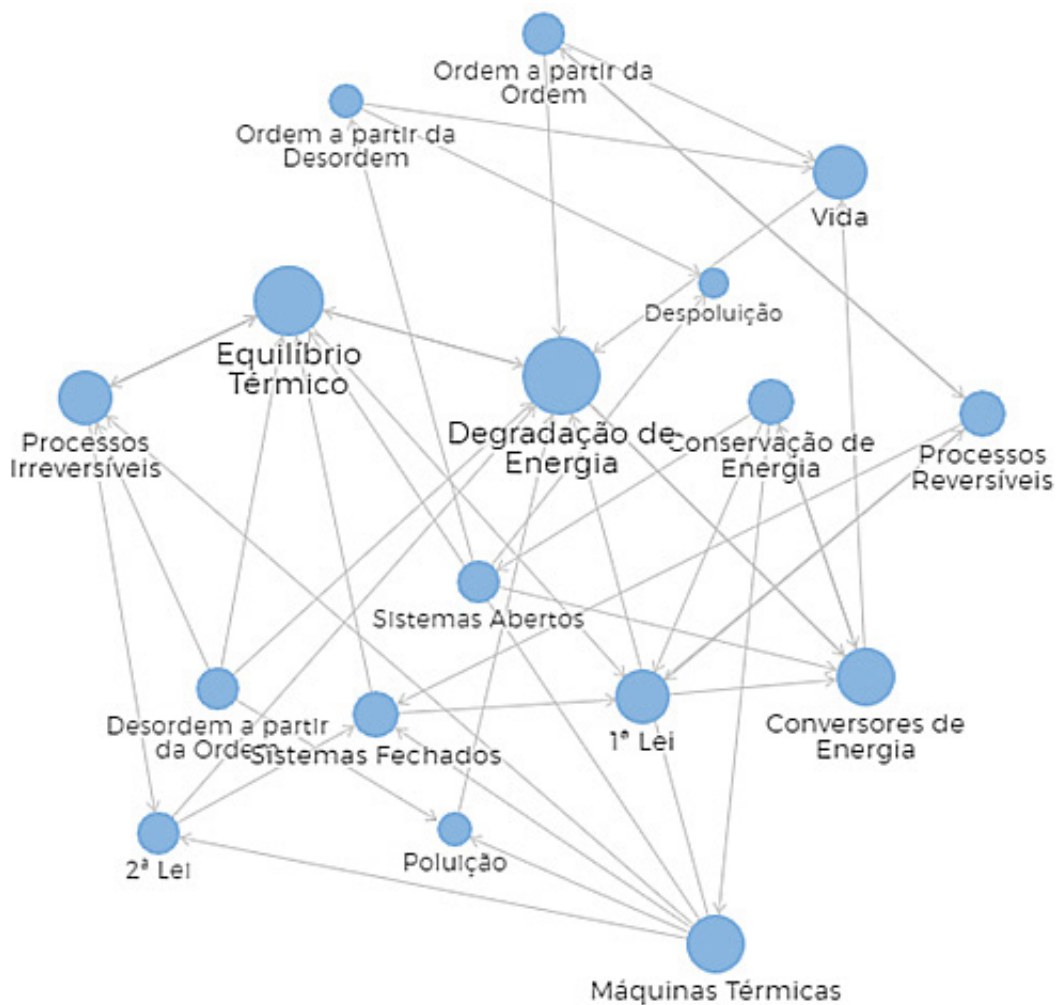


Figura 2.1 - Rede de conceitos relacionados à entropia⁵.

Fonte: autoria própria

⁵ Essa rede foi construída a do programa on line Onodo. Com ele foi possível associar os conceitos de modo que o tamanho de cada círculo fosse relativo ao número de conexões com outros conceitos.

Nas conexões da rede destacam-se os conceitos de equilíbrio térmico e degradação de energia que correspondem à 1ª e 2ª lei da termodinâmica, respectivamente, aspectos que serão considerados nas aulas propostas.

A partir da rede (Figura 2.1) e dos dados sistematizados a partir da análise dos livros didáticos, optamos por tratar os seguintes elementos nas aulas propostas:

Potencialidades	Conceitos - Rede	Questões orientadoras
<ul style="list-style-type: none"> - Olhar para os processos de transformação de energia em conversores em geral para identificar as transformações de energia envolvidas. - Diferenciar energia útil de energia não útil em situações cotidianas. 	<p>1ª Lei, conservação de energia, conversores de energia, degradação de energia, processos irreversíveis,</p>	<p><i>Qual o caminho que a energia percorre quando você carrega a bateria de um celular? E quais os tipos de energia você observa nesse percurso?</i></p>
<ul style="list-style-type: none"> - Tratar da crise dos conversores e do esgotamento das fontes de energia como forma de conscientização pelo uso racional de energia. 	<p>Máquinas térmicas, equilíbrio térmico, conversores de energia, equilíbrio térmico.</p>	<p><i>Quais transformações de energia estão presentes no seu dia a dia?</i></p> <p><i>O que acontece com a energia que não utilizamos?</i></p> <p><i>O modo como usamos energia afeta o meio ambiente? de que forma?</i></p>

<p>- Discutir a limitação da 1ª lei tomando como exemplos situações que levam às questões sobre processos reversíveis e irreversíveis e ainda processos reversíveis por meio de uma ação.</p> <p>- relacionar a flecha do tempo com o aumento da entropia do Universo.</p> <p>- Abordar a poluição das águas e do ar, salientando o aumento da entropia e sua irreversibilidade.</p>	<p>Processos reversíveis e irreversíveis, 2ª lei, sistemas fechados, sistemas abertos, degradação de energia, desordem a partir da ordem, poluição e despoluição.</p>	<p><i>Como obter trabalho mecânico a partir de uma caldeira a vapor? Esse processo é reversível ou irreversível? Explique.</i></p> <p><i>De que forma pode-se incorporar o conceito de entropia nos processos reversíveis e irreversíveis?</i></p>
--	---	--

Quadro 2.1: Questões orientadoras vinculadas à rede de conceitos e as potencialidades no LD.

Fonte: Autoria própria

Tratar da entropia, como já dissemos, exige cuidado para que o conceito não seja vinculado somente à desordem, principalmente à desordem espacial. Para tanto as aulas propostas buscam ao mesmo tempo conceituar a entropia dentro da física escolar e expandi-la para outras áreas do conhecimento, de modo que o(a) estudante perceba algumas relações entre as diferentes áreas do saber (questões sociais, ambientais, políticas e econômicas da atualidade). A proposta apresenta atividades divididas em 6 aulas que abordam assuntos que permitam aprimorar as relações entre os conceitos apresentados. Para organizá-las considera-se que: 1ª etapa de complexificação - aulas 1 e 2; 2ª etapa de complexificação - aulas 3 e 4; 3ª etapa de complexificação - aulas 5 e 6. Tomou-se como etapa de complexificação os momentos em que as aulas trazem maior possibilidade e relações com a temática envolvida.

2.1 A proposta de aula com comentários

Como já discutimos, a sequência de aulas a seguir tem como objetivo permitir que o(a) professor(a) aborde o ensino de entropia de forma mais aberta e complexificada.

Entende-se como complexificação do conhecimento quando incorporamos elementos de outras disciplinas, do conhecimento cotidiano e científico, permitindo que o(a) aluno(a) reflita sobre o mundo em que vive e de que forma pode atuar sobre ele.

A primeira aula inicia-se com a questão: **É preciso economizar energia? Por quê?** Essa pergunta pode levar ao contraditório, uma vez que é possível que se tenha a ideia da conservação de energia e, portanto, a resposta seria que não é necessário economizá-la, dado que a mesma nunca acabará. Por outro lado, recorrentemente se verbaliza a necessidade de se economizar energia. García & Ballenilla (2008) apontam que a percepção dominante é a de que os recursos energéticos são inesgotáveis e tem-se um entendimento ingênuo em relação ao desenvolvimento tecnológico e sua capacidade de resolver os problemas futuros de nossa sociedade. Como forma de explorar essa questão inicial pode-se pedir que os alunos assistam, previamente ou posteriormente, o documentário 'Futuro Energético' da Discovery e consigam expandir sua visão sobre energia.

FUTURO ENERGÉTICO – DOCUMENTÁRIO 2010

Descrição: documentário da Discovery sobre o consumo atual e as perspectivas futuras para a geração de energia.



Parte 1/3: <https://youtu.be/FnZMWJLzIf0>



Parte 2/3: <https://youtu.be/Cb9m2hAHZUg>



Parte 3/3: https://youtu.be/KQOj_VqB_Eg

Entendemos que essa pergunta é central nessa proposta retornando em outros dois momentos, de modo a permitir que o(a) estudante responda novamente, reelaborando seus argumentos e até mesmo se contradizendo. A partir das respostas dadas em diferentes momentos da proposta de aulas espera-se identificar uma possível transição do pensamento simples e de senso comum para algo mais complexo.

Dando sequência, a atenção volta-se às transformações de energia, tendo como objetivo tornar explícito as 'perdas' de energia durante as transformações, possibilitando a introdução de conceitos como, por exemplo, os processos reversíveis e irreversíveis. Isso permite extrapolar a visão da conservação de energia ao se perceber que, apesar da energia sempre ser conservada, ela acaba se tornando inútil para algumas aplicações.

Para isso são propostas duas questões sobre o carregamento da bateria do celular: *Qual o caminho que a energia percorre quando você carrega a bateria de um celular? E quais os tipos de energia você observa nesse percurso?*

Ainda que essas perguntas possam ser respondidas de forma mais direta, é possível propor reflexões mais elaboradas com esquemas e desenhos. O texto⁶, que trata do funcionamento de uma bateria recarregável para ampliar as reflexões, pode trazer elementos para essa reflexão. Além disso, a Figura 2.2 apresenta um esquema que pode ajudar a sistematizar o caminho percorrido pela energia.

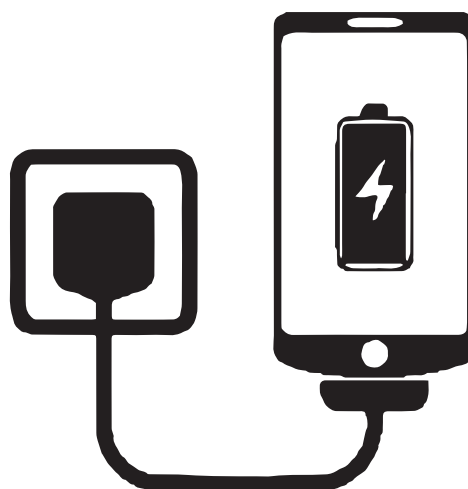


Figura 2.2: Carregamento da bateria de um celular
Fonte: Autoria própria

O carregamento da bateria do celular é apenas um exemplo que pode ser usado para essa problematização. O importante é trazer situações cotidianas, próximas à realidade dos(as) estudantes. Salienta-se que o intuito geral dessa atividade é tratar os conceitos de conservação de energia, 'perdas", transformações, custos, rendimento, eficiência e a degradação de energia (ainda que não seja explicitado dessa forma). A Figura 2.3 é um exemplo de como esses conceitos podem se organizar, dando ênfase às transformações envolvidas e introduzindo o caráter da organização (baixa entropia) e da desordem (alta entropia).

⁶ (<https://cienciaetecnologias.com/bateria-recarregavel-funcionamento/>)

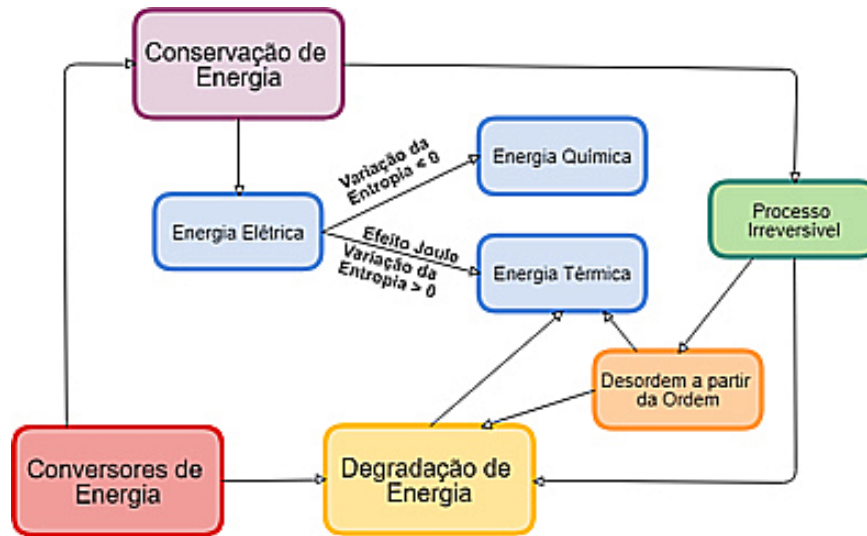


Figura 2.3: Mapa de conceitos.

Fonte: Autoria própria.

Salienta-se que a ordem obtida na bateria (separação de cargas negativas e positivas) foi possível a partir da desorganização e, conseqüentemente, do aumento de entropia, de outra forma de energia mais organizada e de baixa entropia (energia elétrica). Deste modo, a Figura 2.3 pode contribuir para estruturar a organização dos conceitos. Evidentemente essa não é a única organização conceitual possível, de forma que o(a) professor(a) tem liberdade para modificá-la de acordo com seus interesses.

Estudar o caminho da energia durante o carregamento da bateria de um celular permite perceber diversas formas de energia e como elas se relacionam a partir das transformações, envolvendo uma situação cotidiana e recorrente. Nesta etapa de complexificação ainda não foi discutido um caráter mais amplo da energia, deste modo, o **primeiro nível de complexificação** ocorre quando existe uma percepção sobre as transformações de energia e uma preocupação em relação à escassez demonstrada pela necessidade de economia, mesmo que esteja vinculada à questões financeiras ou até mesmo por questões ecológicas.

Para a segunda etapa de complexificação busca-se ampliar a discussão sobre conservação e degradação de energia de modo a inserir outros elementos que potencializam as reflexões sobre energia e entropia, tais como, esgotamento das fontes não renováveis e a aproximação do limite de obtenção de energia a partir de fontes renováveis, como a hidráulica por exemplo. Como parte desta etapa, é possível abordar

as máquinas térmicas, desde a máquina de Newcomen até chegar ao ciclo de Carnot, que estabeleceu um limite teórico ao rendimento das máquinas térmicas. Esse caminho pode ser o da história da ciência ou a contextualização histórica dos conteúdos apresentados. Deixamos aqui uma sugestão de filme que trata das transformações sociais e econômicas durante a revolução industrial na Inglaterra e Estados Unidos da América.

A REVOLUÇÃO INDUSTRIAL – FILME

Descrição: O filme aborda a revolução industrial na Europa e nos EUA.



Link: https://youtu.be/DmvL6vy_6Qg

As máquinas térmicas, assim como o carregador do celular, podem ser classificadas como um conversor energético que ao transformar uma forma de energia em outra acaba degradando parte da energia e, conseqüentemente, aumentando a entropia do sistema. É possível avançar nesse assunto e chegar até as usinas de energia atuais, em que algumas ainda mantêm a mesma fonte de energia que as máquinas térmicas (carvão, gás, petróleo), embora tantas outras se utilizem de outras fontes de energia (urânio, hidráulica, solar, maré, vento, geotérmica).

A parte central desta etapa da proposta está voltada para as seguintes questões: **(i) Quais transformações de energia estão presentes no seu dia a dia? (ii) O que acontece com**

a energia que não utilizamos? (iii) O modo como usamos energia afeta o meio ambiente?

De que forma? Pretende-se, a partir dessas perguntas, trazer à tona o uso da energia no contexto da vida cotidiana, as transformações envolvidas e o impacto socioambiental do uso de energia, além de possibilitar a reflexão sobre o consumo exacerbado de bens duráveis e não duráveis.

Ainda nesse contexto, a partir do Balanço Energético Nacional (BEN) (BRASIL, 2017), pode-se discutir os dados das tabelas e gráficos, possibilitando a ampliação das reflexões e debates. A Tabela 2.1 mostra os recursos hídricos do Brasil, tanto o inventariado + aproveitado, que 'corresponde ao montante de energia das usinas em operação ou construção e os aproveitamentos disponíveis estudados nos níveis de inventário e projeto básico (BRASIL, 2017, p. 124), quanto o Estimado que corresponde a quantidade de energia ainda disponível.

ANO	INVENTARIADO + APROVEITADO	DISPONÍVEL	TOTAL
1993	82.686	51.800	134.486
1994	82.686	51.800	134.486
1995	92.880	50.500	143.380
1996	92.880	50.500	143.380
1997	92.880	50.500	143.380
1998	92.880	50.500	143.380
1999	92.880	50.500	143.380
2000	92.880	50.500	143.380
2001	92.880	50.500	143.380
2002	92.880	50.500	143.380
2003	92.880	50.500	143.380
2004	92.880	50.500	143.380
2005	92.880	50.500	143.380
2006	102.080	31.769	133.849
2007	102.080	31.769	133.849
2008	102.080	31.769	133.849
2009	102.080	31.769	133.849
2010	102.080	31.769	133.849
2011	108.778	28.096	136.874
2012	108.160	26.577	134.737
2013	108.634	26.534	135.168
2014	110.282	25.702	135.983
2015	110.733	25.373	136.105
2016	111.051	25.348	136.398

Tabela 2.1 - Recursos hidráulicos (Valores em MW).

Fonte: BEN 2017, editado.

A Tabela 2.1 proporciona uma reflexão sobre o esgotamento da capacidade de transformação da energia hidráulica em elétrica. É possível notar que, segundo dados do Governo Federal, embora a quantidade de energia obtida tenha aumentado, a quantidade de energia estimada tem diminuído quase que na mesma proporção. O Gráfico 2.1 permite melhor visualização desse possível esgotamento.

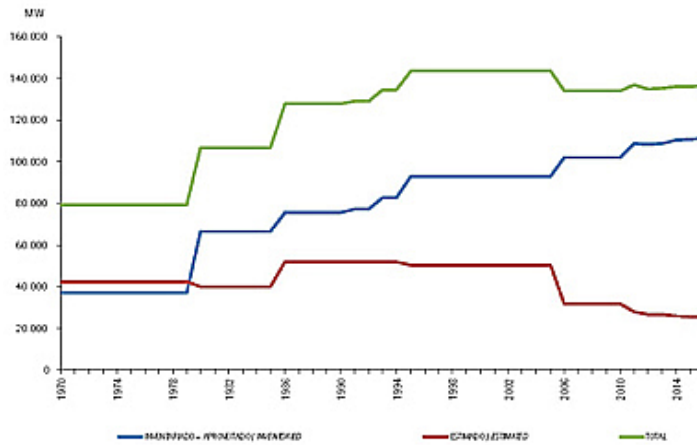


Gráfico 2.1 - Potencial elétrico.

Fonte: BEN 2017.

Em relação aos combustíveis fósseis, em 1956, Marion King Hubbert, geofísico estadunidense, estimou que o pico de produção mundial de petróleo se daria em 50 anos enquanto que o de Texas e Estados Unidos ocorreria entre 1966 e 1971. Mesmo sabendo que os recursos não renováveis são finitos é possível que os(as) estudantes não tenham claramente essa dimensão e que não façam uma associação direta entre esse esgotamento e o padrão de consumo próprio e da sociedade moderna. Os Gráficos 2.2 e 2.3 mostram o ápice da produção de petróleo nos EUA em 1970 e, no mundo, por volta de 2005 (GARCÍA & BALLEENILLA, 2008).

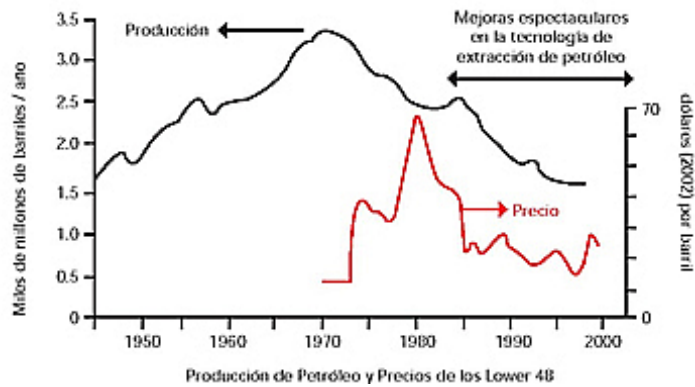


Gráfico 2.2 - Produção de petróleo nos EUA.

Fonte: García & Ballenilla, 2008.

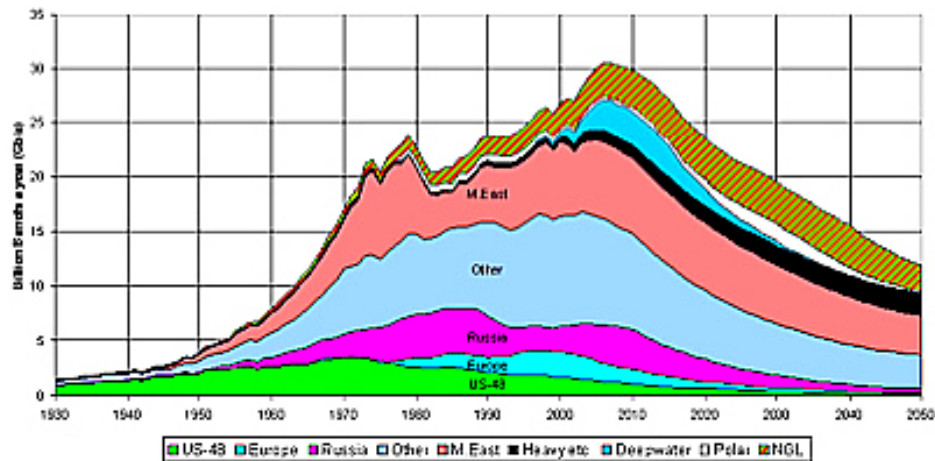


Gráfico 2.3 - Produção de petróleo mundial.

Fonte: García & Ballenilla, 2008.

O Gráfico 2.3 é composto por dados reais e projeções futuras, enquanto que o Gráfico 2.2 apenas possui dados reais. A análise desses dois gráficos possibilita uma série de discussões a respeito das fontes não renováveis, tais como, ***em quanto tempo elas irão acabar? Quais medidas os países deverão tomar para manter a oferta de energia para a sociedade? Quais mudanças econômicas, políticas e sociais acompanharão essa transição? Existe relação entre o preço dos alimentos e a queda de produção de petróleo?***

Espera-se que, com essa atividade seja possível ampliar a questão da conservação da energia durante as transformações para uma visão de esgotamento da capacidade de

obtenção de energia útil e também chamar atenção para a queda de rendimento durante a cadeia de transformações de energia. Para finalizar esse ciclo de aulas, propõe-se que o(a) aluno(a) volte-se à questão central (***É preciso economizar energia? Por quê?***) para respondê-la novamente.

Em suma, o ***segundo nível de complexificação*** ocorre quando o sujeito percebe que a energia é uma grandeza finita que se conserva ao longo de uma cadeia de transformações, embora alguns recursos energéticos possam se esgotar, como é o caso dos combustíveis fósseis. Outros podem saturar em relação à capacidade de se 'extrair' energia daquela fonte, como é o caso das hidrelétricas. Espera-se também que o sujeito olhe para além da energia elétrica, sendo capaz de perceber todo um conjunto de formas de energia possíveis.

No ***terceiro nível de complexificação*** inicia-se com a abordagem do conceito de irreversibilidade e expandindo-o para outras áreas do conhecimento, principalmente com foco na questão ambiental. Desse modo, a irreversibilidade está presente em questões como poluição do ar e das águas, produção de bens de consumo e o uso da energia de forma geral. O conceito de irreversibilidade foi um tanto estranho à época, dominada pelo triunfo da mecânica Newtoniana e suas leis totalmente reversíveis no tempo. Tendo conhecimento de certas variáveis num certo instante seria possível avançar ou retroceder sem problema algum, o próprio tempo não tinha outra importância senão registrar os acontecimentos. As máquinas térmicas e o desenvolvimento da termodinâmica impõe ao tempo uma nova função, um sentido (Prigogine e Stengers, 1984).

Até aqui foi tratada a conservação da energia, das 'perdas' nas transformações e também do esgotamento de certos recursos energéticos e conversores. Agora, a intenção é tratar dos processos reversíveis e irreversíveis, das limitações da primeira lei da termodinâmica e do significado da segunda lei da termodinâmica. A atividade (Figura 2.4) proposta consiste então em, a partir de alguns objetos dados, imaginar uma forma de obter trabalho mecânico.

1ª situação: você possui dois baldes cheios de água e mais os itens que desejar. Crie um dispositivo que possa realizar trabalho mecânico utilizando esse baldes. Tenha total liberdade para modificar o que for necessário nos baldes dados.

2ª situação: você possui uma caldeira cheia de água e mais os itens que desejar. Crie um dispositivo que possa realizar trabalho mecânico utilizando essa caldeira. Tenha total liberdade para modificar o que for necessário na caldeira. Segundo o Michaelis⁴ caldeira é: recipiente metálico de qualquer tamanho para aquecer qualquer líquido, produzir vapor, cozinhar alimentos etc.



Figura 2.4: Conversores energéticos

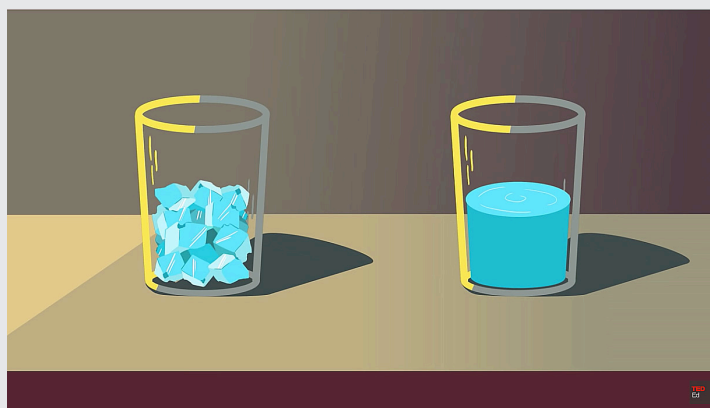
Fonte: Autoria própria.

Além da descrição de todas as etapas, se faz necessário deixar claro os limites de utilização dessa energia, destacar as transformações de energia durante o procedimento e também estimar seu rendimento. Para contribuir com as discussões e reflexões propõe-se a leitura de um texto sobre reversibilidade e irreversibilidade (Disponível em: <https://bit.ly/2BX3gW4>). O texto restringe os conceitos de reversibilidade e irreversibilidade ao campo da Física, mas é possível extrapolar para outras áreas do conhecimento. As questões que norteiam essas aulas são as seguintes: **(i) Como obter trabalho mecânico a partir de uma caldeira a vapor? Esse processo é reversível ou irreversível? Explique.** **(ii) De que forma pode-se incorporar o conceito de entropia nos processos reversíveis e irreversíveis?**

Para ampliar as discussões propõe-se um pequeno vídeo que introduz o conceito de entropia a partir do conceito de micro e macroestados.

O QUE É ENTROPIA? - JEFF PHILLIPS

Descrição: Há um conceito fundamental para a química e física. Ele ajuda a explicar por que processos físicos acontecem de um jeito e não de outro: por que o gelo derrete, por que o creme se espalha no café, por que o ar vaza no pneu furado. É entropia e é notavelmente difícil compreender esse conceito. Jeff Phillips dá um curso rápido de entropia.



Link: https://youtu.be/YM-uykVfq_E

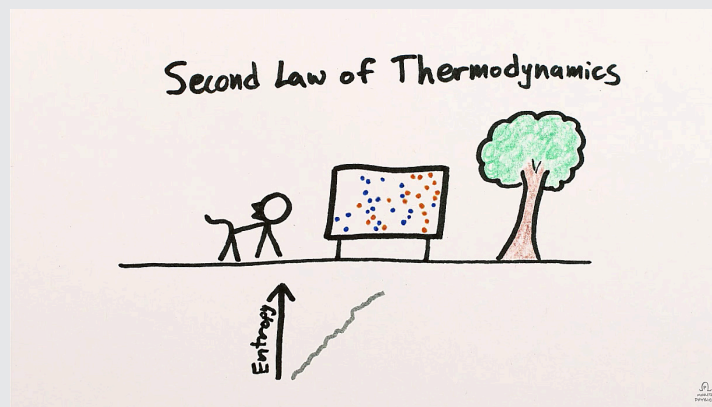
Ao longo dessa atividade pode-se evidenciar as limitações da 1ª lei da termodinâmica (conservação de energia), ao inverter o sentido de funcionamento do dispositivo criado. No caso da caldeira, não será possível fazer com que o trabalho mecânico retorne o vapor para dentro da mesma, tão pouco fazer com que a energia térmica adquirida pela água retorne ao combustível utilizado. Abre-se assim a oportunidade de introduzir a 2ª lei da termodinâmica para afirmar que a energia se conserva em todos os processos, mas que nem todos os processos podem ocorrer de forma espontânea. Segundo Thomson (1852), quando o calor é criado por algum procedimento irreversível haverá alguma dissipação de energia mecânica e é impossível reverter integralmente o processo. Daí a necessidade de uma variável de estado que indique um sentido para as transformações espontâneas, a entropia, que aumenta durante transformações irreversíveis.

É possível estender essa limitação para além das máquinas térmicas enunciando de forma geral que, em sistemas isolados, todos os processos naturais existe um aumento de entropia. Segundo Prigogine e Stengers (1984), 'o crescimento da entropia designa uma evolução espontânea do sistema. A entropia torna-se assim um 'indicador

de evolução' e traduz a existência na física de uma 'flecha do tempo'".

WHY DOESN'T TIME FLOW BACKWARDS? (POR QUE O TEMPO NÃO FLUI PARA TRÁS?)

Descrição (traduzida): Este vídeo é sobre por que a entropia dá origem à flecha do tempo, e também como a condição inicial de baixa entropia do universo é responsável pelo fato de que nós experimentamos o tempo agora, e como, em última análise, levará ao calor de alta entropia morte do universo.

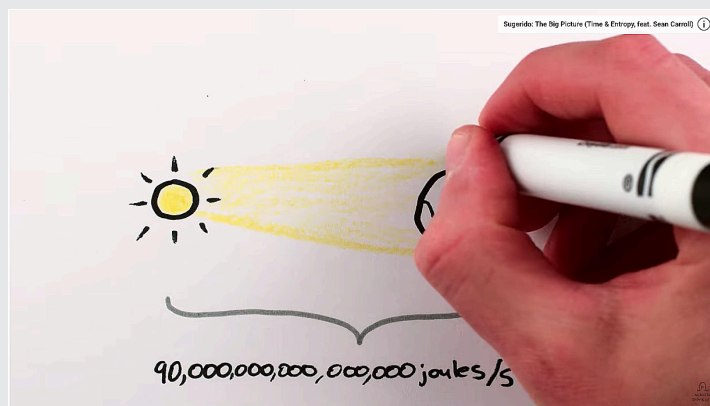


Link: <https://youtu.be/yKbJ9leUNDE>

Ainda nesse conjunto de aulas é possível ampliar o alcance dos conceitos aprendidos, em especial, o conceito de entropia. O objetivo com isso é tirar o foco da conservação de energia e colocá-lo na degradação de energia, ou seja, no aumento de entropia. Desse modo, é esperado que o(a) estudante seja capaz de identificar as variações de entropia nas diversas áreas do conhecimento e dar-se conta de que a sociedade deve buscar manter baixo o nível de entropia do planeta. Para expandir o conceito de entropia pode-se mostrar um pequeno vídeo que mostra como o Sol fornece energia de baixa entropia à Terra que por sua vez utiliza essa energia de baixa entropia para organizar sistemas de alta entropia.

HOW ENTROPY POWERS THE EARTH (COMO A ENTROPIA FORTALECE A TERRA)

Descrição: Este vídeo é sobre como não precisamos apenas de energia para alimentar nossas vidas, precisamos de energia com baixa entropia! Isso também é conhecido como 'energia livre", e uma forma de pensar sobre a entropia é a falta de energia livre. O sol nos fornece energia útil e de baixa entropia, na forma de fótons de luz visível, que são então absorvidos e convertidos em plantas, açúcar, moléculas complexas, etc., antes de serem irradiados de volta ao espaço como calor, que possui uma entropia muito maior.



Link: <https://youtu.be/sAMIGyaUz4M>

Nesse sentido, propõe-se a discussão sobre os processos de produção e descarte de bens de consumo dando destaque a cadeia de produção linear (extração, uso e descarte). À medida que a entropia aumenta, diminui-se a quantidade de energia disponível para realizar trabalho útil (exergia). Isso possibilita um olhar para além da energia, suas transformações e conservação, abrindo um caminho para analisar a entropia nesses processos. Nesse caso, o ser humano deixa de ser apenas um consumidor de energia e torna-se um agente degradante de energia de alta qualidade, ou seja, baixa entropia. Assim, suas escolhas, seu modo de vida, suas interações com a sociedade e com o meio ambiente passam a fazer parte do questionamento sobre a necessidade ou não de se economizar energia.

Para despertar esses aspectos apresentados, é proposta uma atividade, baseada

na Figura 2.4, que mostra, de forma esquemática e simplificada, a cadeia produtiva linear.

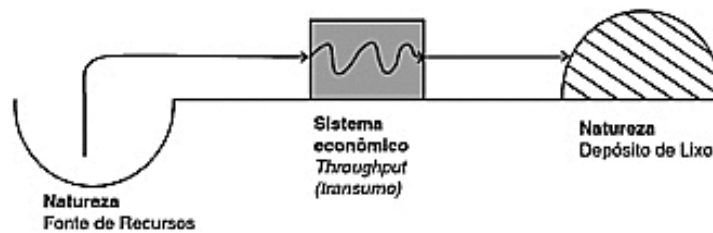


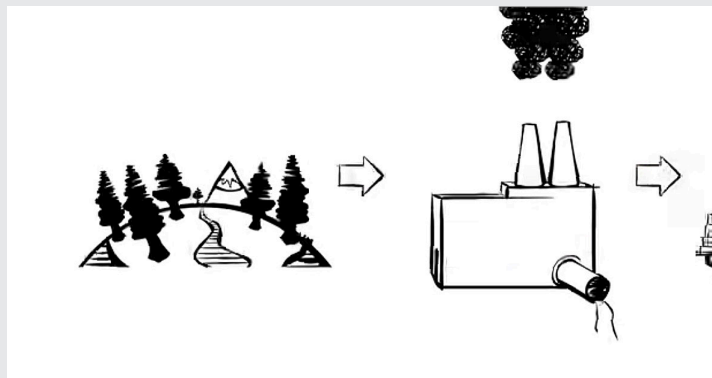
Figura 2.4: Cadeia produtiva linear (natureza como fonte de recursos e depósito de lixo).

Fonte: Cavalcanti (2012).

A atividade consiste em escolher um produto que seja utilizado no dia a dia (pode-se incluir alimentos) para detalhar a cadeia produtiva do mesmo, ou seja, elencar todos os recursos que são extraídos da natureza, as transformações de energia envolvidas no processo de fabricação, as poluições geradas, a vida útil desse produto e, posteriormente, todo processo de descarte. É importante destacar que, a extração desses recursos por si só já leva a outra cadeia produtiva linear, em que foram produzidos os maquinários necessários para essa extração. Na parte do sistema econômico devem constar as transformações envolvidas e os subprodutos dessas transformações, como por exemplo, a poluição do ar e das águas, o uso intensivo de energia e água para as transformações, a força de trabalho (remunerado ou não), entre outros. Na última parte, denominada a natureza, tem-se um depósito de lixo no qual receberá todo descarte de produtos que já não funcionam mais ou que se tornaram obsoletos (programadamente ou não). Dentro dessa discussão existem um vídeo no YouTube que aborda a questão da produção e descarte de produtos, especificamente, a garrafa plástica de água. O vídeo chama a atenção para o consumo exagerado dessas garrafas plásticas e o impacto ambiental que elas produzem.

A HISTÓRIA DA ÁGUA ENGARRAFADA

Descrição: A História da Água Engarrafada, lançada em 22 de março de 2010 (Dia Mundial da Água) emprega o estilo Story of Stuff para contar a história da demanda fabricada - como você faz com que os americanos comprem mais de meio bilhão de garrafas de água toda semana quando já flui da torneira. Ao longo de cinco minutos, o filme explora os ataques da indústria de água engarrafada à água da torneira e o uso de publicidade sedutora e com tema ambiental para encobrir as montanhas de resíduos plásticos que produz. O filme conclui com um apelo para retomar a torneira, não apenas assumindo um compromisso pessoal para evitar a água engarrafada, mas também apoiando investimentos em água potável limpa e disponível para todos.



Link: <https://youtu.be/Se12y9hSOM0>

Para o fechamento desta aula propõe-se que o(a) estudante volte-se à questão central (É preciso economizar energia? Por quê?) para respondê-la novamente.

Em suma, o terceiro nível de complexificação ocorre quando o sujeito entende-se como parte do problema e também da solução tendo em vista que suas atitudes possuem ligação direta com questões socioambientais. Espera-se que este nível de complexidade traga ao indivíduo uma percepção menos fatalista e simplista sobre a questão da energia e que o permita dialogar com as diferentes esferas do conhecimento a fim de se posicionarem frente às diversas questões. Também é esperado que o aluno e a aluna consigam usar conceitos da física, como degradação, conservação, entropia, rendimento etc., como argumentos para construir sua resposta.