



# Aspectos da complexificação para tratar a entropia nas aulas de Física

**THIAGO CAVALCANTI RIBEIRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF, Polo Universidade Federal do ABC, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadora:  
Profa. Dra. Giselle Watanabe

Santo André - SP  
Novembro de 2018

ASPECTOS DA COMPLEXIFICAÇÃO PARA TRATAR A ENTROPIA NAS  
AULAS DE FÍSICA

Thiago Cavalcanti Ribeiro

Orientadora:  
Giselle Watanabe

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF, Polo Universidade Federal do ABC, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Santo André - SP  
Novembro - 2018

## FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do ABC  
Elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da UFABC  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Cavalcanti, Thiago

Aspectos da complexificação para tratar a entropia nas aulas de Física / Thiago Cavalcanti. — 2018.

133 fls.

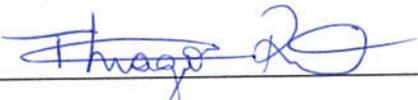
Orientadora: Giselle Watanabe

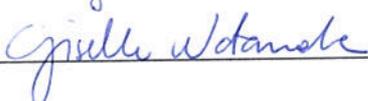
Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF, Santo André, 2018.

1. Entropia. 2. Complexidade. 3. Ensino de física. 4. Livros didáticos. I. Watanabe, Giselle. II. Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF, 2018. III. Título.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, de acordo com as observações levantadas pela banca no dia da defesa, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Santo André, 08 de janeiro de 2019

Assinatura do autor: 

Assinatura do orientador: 



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**Fundação Universidade Federal do ABC**  
**Programa de Pós-Graduação em Mestrado Nacional Profissional em**  
**Ensino de Física**

Avenida dos Estados, 5001 – Bairro Santa Terezinha – Santo André – SP  
CEP 09210-580 · Fone: (11) 4996-0017  
ppg.mnpef@ufabc.edu.br

**FOLHA DE ASSINATURAS**

Assinaturas dos membros da Banca Examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Thiago Cavalcanti Ribeiro, realizada em 29 de novembro de 2018:

Prof.(a) Dr.(a) **Giselle Watanabe** (Universidade Federal do ABC) – Presidente

Prof.(a) Dr.(a) **Nelson Studart Filho** (Universidade Federal do ABC) – Membro Titular

Prof.(a) Dr.(a) **Fátima Rodríguez-Marín** (Universidad de Sevilla - Espanha) – Membro Titular

Prof.(a) Dr.(a) **Marcelo Oliveira da Costa Pires** (Universidade Federal do ABC) – Membro Suplente

Prof.(a) Dr.(a) **Roseline Beatriz Strieder** (Universidade de Brasília) – Membro Suplente

## **Agradecimentos**

Os meus sinceros agradecimentos à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Giselle Watanabe, por contribuir de forma tão intensa, sincera e paciente seus conhecimentos e ideias. Por acreditar e me incentivar nos momentos mais difíceis.

À Universidade Federal do ABC e ao Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física os quais, por meio de seus professores e alunos, trouxeram reflexões e participaram de minha formação.

Aos colegas que integram o Grupo de Ensino de Ciências e suas Complexidades (GrECC), pelo apoio durante todo esse tempo.

À minha família, que compreendeu os momentos de ausência, mas nunca deixaram de estar comigo, sempre acreditando e proporcionando o melhor.

À Vivian que me incentivou a iniciar esse mestrado e que despertou meu olhar para as questões ambientais, tão fundamentais para a construção de quem sou hoje.

À Estela que me acompanhou na reta final e nunca deixou de ser paciente mesmo quando a ausência mostrava-se insuportável.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

### ASPECTOS DA COMPLEXIFICAÇÃO PARA TRATAR A ENTROPIA NAS AULAS DE FÍSICA

Thiago Cavalcanti Ribeiro

Orientadora:  
Giselle Watanabe

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF, Polo Universidade Federal do ABC, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

A sociedade contemporânea tem se mostrado cada vez mais conectada, interligada e global, e de certo, muitas das questões de cunho escolar científico tratadas nas aulas de Física produzem poucos diálogos entre o mundo escolar e o mundo real. De certo, um ensino que busque essa aproximação parece não encontrar eco em um sistema de ensino propedêutico, positivista, determinista, incapaz de dialogar com as diferentes áreas do saber. Diante disso, esta dissertação busca, a partir da temática da energia e entropia, propor e analisar aulas com potencial diálogo com outras áreas do conhecimento. Metodologicamente, analisam-se livros didáticos de física do Ensino Médio de modo a encontrar espaços de inserção da entropia a fim de enriquecer as abordagens dadas à Física Térmica; em seguida, propõem-se aulas sobre a entropia tomando-a como um conceito aglutinador que permite promover um ensino sobre o tema energia de forma mais complexa. A proposta de aula foi aplicada na escola e as respostas dos alunos e das alunas permitiram identificar que nem sempre os/as estudantes *complexificam* o conhecimento de forma linear e progressiva. No entanto, indicam possibilidades reais de aproximações com assuntos de suas realidades que levariam a um ensino mais complexo.

**Palavras Chaves:** Entropia; Complexidade; Ensino de Física; Livros Didáticos.

Santo André - SP  
Novembro - 2018

## ABSTRACT

### ASPECTS OF COMPLEXIFICATION TO TREAT ENTROPY IN PHYSICAL LESSONS

Thiago Cavalcanti Ribeiro

Supervisor:  
Giselle Watanabe

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), Polo Universidade Federal do ABC, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

Contemporary society has been increasingly connected, interconnected and global, and of course, many of the scientific schooling issues addressed in physics classes produce few dialogues between the school world and the real world. Of course, a teaching that seeks this approximation seems to find no echo in a propaedeutic, positivist, deterministic education system, incapable of dialoguing with the different areas of knowledge. In view of this, this dissertation seeks, from the energy and entropy theme, to propose and analyze classes with potential dialogue with other areas of knowledge. Methodologically, textbooks of high school physics are analyzed in order to find spaces for insertion of entropy in order to enrich the approaches given to Thermal Physics; then classes on entropy are proposed taking it as an agglutinating concept that allows to promote a teaching on the energy theme in a more complex way. The lecture proposal was applied in the school and the students' answers allowed to identify that students do not always complexify knowledge in a linear and progressive way. However, they indicate real possibilities of approximations with subjects of their realities that would lead to a more complex teaching.

**Keywords:** Entropy; Complexity; Physics Teaching; Didactic books.

Santo André - SP  
Novembro - 2018

## SUMÁRIO

<b>Introdução</b>	8
<b>Capítulo 1 - Complexidade, entropia e o ensino de física</b>	12
1.1 Elementos da complexidade	14
1.2 A natureza do calor, as máquinas térmicas e a entropia	19
<b>Capítulo 2 - Caminhos de pesquisa</b>	31
2.1 Análise Textual Discursiva	32
2.2 As trajetórias da pesquisa	35
2.2.1 A escola pesquisada	35
2.2.2 As etapas da pesquisa	36
<b>Capítulo 3 - A entropia nos livros didáticos</b>	39
3.1. A abordagem da entropia nos LD de Física	40
3.2. Articulações entre elementos de uma visão mais complexa com a organização curricular presente no LD	59
<b>Capítulo 4 - Proposta de aulas: a entropia como saber complexo</b>	64
4.1 Uma proposta de aula sobre entropia	66
<b>Capítulo 5 - As falas dos e das estudantes nas aulas sobre entropia: níveis de complexificação alcançados</b>	76
<b>Considerações finais</b>	82
<b>Anexo 1 - Processos Irreversíveis e leis da termodinâmica</b>	85
<b>Apêndice 1 - O caminho da energia ao se carregar a bateria de um celular</b>	88
<b>Apêndice 2 - As energias em nosso cotidiano</b>	89
<b>Apêndice 3 - Dispositivos de conversão de energia</b>	90
<b>Apêndice 4 - Transcrição das respostas dos alunos(as)</b>	91
<b>Apêndice 5 - Para além da energia, o ensino da entropia no Ensino Médio</b>	100
<b>Referências Bibliográficas</b>	135

## Introdução

A educação deveria ser um reflexo dos anseios da sociedade mais justa. No entanto, de forma geral, ela responde apenas aos interesses políticos e econômicos que se transformam de tempos em tempos. Essa abordagem voltada aos interesses fluidos se reflete na escolha dos conteúdos e propostas educacionais de cunho político-partidário. E isso, de certo modo, mostra que a escola sempre estará imersa em conflitos advindos do contexto social e político. Ela é o reflexo de uma sociedade complexa e em mudança, e que, na prática, tende a reproduzir a ordem social estabelecida, excludente, competitiva, hierárquica e submissa aos interesses das classes dominantes (GARCÍA, 1998a, p. 14-15).

Não muito distante do nosso momento atual, após a 2ª Guerra Mundial e em meio a guerra fria, foi criado, nos Estados Unidos da América (EUA), o PSSC (Physical Science Study Committee), com a intenção de abordar os conceitos escolares de física de forma muito objetiva, com cunho matemático exacerbado e com grande apelo experimental. Buscava-se atrair jovens estudantes para as ciências exatas. Esse programa se espalhou pelo mundo e influenciou o currículo brasileiro a partir de sua chegada em 1962. Pode-se dizer, ainda que sob alguns aspectos a serem cuidados, que a ciência e tecnologia prosperaram no século XX como nunca antes na história da humanidade, impulsionadas principalmente pela especialização e fragmentação do conhecimento. Ou seja, parece que a simplificação e redução trouxeram uma visão de mundo coerente com o que se propunha na época - avanço estritamente tecnológico e científico visando a produção armamentista e o domínio aeroespacial.

Nas últimas décadas e, principalmente, no início do século XXI presenciamos uma crescente integração com o movimento de globalização, em especial, com o advento da rede de computadores - internet. Nesse sentido, como afirma Morin (2000), os problemas deixaram de ser individuais e passaram a ser globais (energia, doenças, crises econômicas e políticas). A visão compartimentada, desfragmentada, que isola as partes do todo, que orienta ainda os estudos e a forma de encarar o mundo parece não caber mais nesse momento. Segundo o autor,

“De fato, a hiperespecialização impede de ver o global (que ela fragmenta em parcelas), bem como o essencial (que ela dilui). Ora, os problemas essenciais nunca são parceláveis, e os problemas globais são cada vez mais essenciais. Além disso, todos os problemas particulares só podem ser posicionados e pensados corretamente em seus contextos; e o próprio

contexto desses problemas deve ser posicionado, cada vez mais, no contexto planetário” (Morin, 2003b, p. 13-14).

O conhecimento escolar, tomado do ponto de vista de García (1998), numa sociedade interligada, precisa buscar outras formas de atender às suas necessidades ajudando-a a pensar e refletir sobre os problemas contemporâneos e futuros que são cada vez mais globais e complexos. A informação na atualidade está acessível a uma grande parcela da população, no entanto, a carência reside em interpretar, relacionar, se posicionar e fazer seu uso para resolver os problemas da realidade dos sujeitos. A escola, então, poderia superar a função de transmissora de conteúdos acabados e inquestionáveis, no qual o modelo de aprendizagem se dá por adição de conhecimento e considera o(a) estudante uma caixa vazia, sem nenhuma experiência anterior (GARCÍA, 1999), e propor uma revolução do pensamento.

Para isso, há, portanto de se repensar o papel da escola, do(a) professor(a) e do(a) estudante no processo de ensino e aprendizagem. Como afirma Gadotti (2000), a escola deve superar a visão utilitarista que faz do conhecimento, deixando de fornecer apenas as informações úteis, para se colocar como bússola aos alunos que hoje “navegam” num mar de informações e que, nem sempre, são capazes de discernir sobre as questões mais importantes. Essa enorme quantidade de informações disponíveis exige dos(as) estudantes outro posicionamento frente ao conhecimento, no qual ganha espaço as relações e interpretações do mundo.

Segundo García (1998a), as especificidades de cada disciplina e a hiperespecialização do professor acabam por dificultar o diálogo e a integração entre as mesmas. Esse contexto favorece um discurso baseado no paradigma simplificador (MORIN, 2002). Tal paradigma permitiu o avanço do conhecimento científico e gerou a hiperespecialização dos(as) pesquisadores(as) e professores(as). Segundo o autor,

“O tratamento tradicional da educação supõe uma perspectiva simplificadora da realidade. O conhecimento dividido em várias parcelas de conteúdos e destinada a diversos especialistas. Não há preocupação em se adentrar nas interfaces dos saberes tampouco de levantar problemas fundamentais que implicam em visões globais e interdisciplinares” (GARCÍA, 1988, p. 41, tradução nossa).

Em resumo, uma educação determinista e reducionista parece não caber mais nos tempos atuais visto que é necessário trazer à tona elementos que permitam uma reflexão mais

crítica sobre os problemas que atingem a escola, os nossos alunos e alunas. É nesse sentido que defendemos uma educação voltada para complexidade, que não reduza o conhecimento apenas aos conceitos científicos acabados, mas que permita incorporar aspectos da incerteza, do indeterminismo e da probabilidade, entendendo que a ambiguidade não é necessariamente excludente, podendo ser complementar e coexistir.

No contexto científico escolar, as leis da Termodinâmica, apresentadas geralmente pela disciplina de física, traz uma visão parcial e até estéril, com pouco diálogo com outras áreas do conhecimento. É com essa preocupação, ou seja, a fim de superar o paradigma simplificador e caminhar pela via da complexidade, que nesta dissertação aborda-se o conceito científico escolar Entropia. Esse conceito permite extrapolar a discussão sobre energia (geração, uso, conservação, economia) e aproximar diversas outras áreas do conhecimento permitindo ao e à estudante uma visão mais sistêmica do mundo, no qual ele(a) se tornem capazes de ser agentes transformadores de suas realidades. O mundo atual passa por uma crise em escala global em que temos dois sérios problemas: as mudanças climáticas e o esgotamento dos recursos naturais. Até pouco tempo acreditávamos que era possível atingirmos um crescimento sustentável e o termo sustentabilidade foi amplamente incorporado por toda sociedade. Hoje caminhamos para uma perspectiva do decrescimento como forma de mantermos e recuperarmos grande parte dos danos ambientais de nosso planeta. Dentro dessas perspectivas cabem as seguintes indagações: “Por que preciso saber sobre a entropia no mundo de hoje?” e “De que forma esses conhecimentos me permitem refletir sobre os problemas ambientais? Essas são questões que mobilizam esse trabalho, em que se espera trilhar um caminho que permita aproximar os conteúdos escolares dessas reflexões.

García (1998a) salienta que a escola deve ser o lugar para partilhar reflexões acerca das relações humanas e destes com o meio, promovendo um determinado modelo de desenvolvimento humano, tanto pessoal quanto social, alternativo ao modelo atual e predominante. Nesse sentido, este trabalho busca ir além da física para explorar o conceito da entropia, conectando outras áreas de conhecimento para complexificar o processo de ensino e aprendizagem. As questões socioambientais, do nosso ponto de vista, permitem essa extrapolação ao tratar o planeta como o grande palco das transformações de energia e variação da entropia.

Diante desses pressupostos, o **objetivo geral** desta dissertação é propor um conjunto de aulas sobre a entropia considerando aspectos promovam uma aprendizagem mais

complexa. Como objetivos específicos estão: (i) identificar aspectos da complexidade nos discursos dos referenciais teóricos; (ii) aprofundar o conceito de entropia a fim de identificar aspectos que contribuam para um ensino menos determinista; (iii) identificar espaços para inserção do assunto entropia no currículo tomando os livros didáticos como referência; (iv) propor aulas com foco no conceito entropia e nos pressupostos da complexidade; e (v) analisar as concepções dos(as) participantes acerca dessa proposta de aulas. Como forma de organização, esta dissertação apresenta cinco capítulos.

O Capítulo 1 faz um breve resgate acerca da questão da complexidade e da entropia presentes nas reflexões sobre ensino para, então, discutir as ideias de García (1998a, 1998b, 2005) e Morin (2007), o que se refere à base teórica que sustenta esse trabalho. Ainda nesse capítulo apresentam-se um breve resgate histórico sobre a física do calor, desde o conceito de calórico até as leis de termodinâmica, em especial, o conceito de entropia em seus distintos enunciados.

No Capítulo 2 discutem-se as estratégias de pesquisa e os métodos utilizados. A análise dos referenciais teóricos e das respostas das falas dos(as) alunos(as) foram feitas utilizando a Análise Textual Discursiva (ATD) (MORAES e GALIAZZI, 2007). Nesse capítulo também apresentam-se o público alvo, a escola e as questões orientadoras da proposta de aula.

No Capítulo 3, analisam-se alguns livros didáticos com a intenção de identificar espaços de inserção da entropia em uma abordagem mais complexificada.

No Capítulo 4 estrutura-se a proposta de aula (produto dessa dissertação) acerca da entropia. Trata-se do conceito mais amplo de energia, permitindo a compreensão dos conceitos físicos escolares, mas também dá-se espaços para discutir questões de natureza social e ambiental.

No Capítulo 5 analisam-se as respostas dos(as) alunos(as) acerca da aprendizagem ocorrida a partir da proposta de aula sobre entropia. Usando a ATD, estabelecem-se três níveis de complexidade que permite olhar para as mudanças nas ideias dos alunos e das alunas acerca da entropia e suas relações.

## Capítulo 1

### Complexidade, entropia e o ensino de física

“O CAOS É UMA ORDEM POR DECIFRAR”

JOSÉ SARAMAGO

Neste capítulo discutem-se alguns aspectos da complexidade e entropia no contexto do ensino. No geral, trabalhos com esse enfoque, tal como de Watanabe (2012), propõe uma educação que se aproxima da criticidade e reflexividade, pautando em três dimensões (Educativa, do Ensino e Epistemológica) analisadas sob o viés da complexidade. García (1988; 1998b; 2004) propõe um modelo sistêmico de aula no qual reconhece a escola como uma realidade complexa e singular, no sentido de entender que o conhecimento escolar difere do conhecimento cotidiano e do conhecimento científico.

Para a questão do ensino da entropia podemos citar o trabalho de Covolan e Silva (2005) que analisaram a evolução da aprendizagem de estudantes do Ensino Médio (EM) quando colocados diante de situações do cotidiano ligados à entropia por meio de atividades e textos didáticos. Já Santos (2008), faz uma análise de alguns livros didáticos do EM e também de projetos de ensino de Física, como o PSSC (Physical Science Study Committee) e o GREF (Grupo de Reelaboração do Ensino de Física) com o intuito de verificar de que forma o assunto de entropia é abordado. Este trabalho aponta que a história e a epistemologia da ciência tem um papel estruturante no desenvolvimento do conceito de entropia e propõe o estabelecimento de três momentos epistemológicos dentro da história da termodinâmica buscando uma abordagem mais significativa para a aprendizagem da entropia. No artigo de Monteiro et.al. (2008) há uma proposta de atividade prática de baixo custo que busca apresentar os conceitos da 2ª lei da termodinâmica, principalmente a irreversibilidade, os microestados e macroestados e a entropia. O artigo de Haglung, Jeppsson e Strömdahl (2010) investigam os diferentes significados da palavra “entropia” e como isso pode ser um obstáculo para o ensino. Os autores identificaram cinco sentidos distintos para a palavra entropia, a saber: Termodinâmico, Estatístico, Desordem, Informação e Homogeneidade.

Quanto ao significado da complexidade, é comum associá-lo com algo difícil e complicado, que envolve muitos cálculos e muitas variáveis, sendo quase que o oposto do

“simples”. ÁVILA et.al. (2018, no prelo), realizaram uma pesquisa junto a estudantes de graduação, professores e pesquisadores de diversas áreas e constataram que o entendimento sobre a complexidade situa-se dentro do paradigma simplificador descrito por Morin (2002), trazendo elementos específicos da área de atuação do pesquisado, indicando que se faz necessário um maior debate, ampliando as reflexões sobre o tema, na busca de um espaço para a mudança de paradigma.

Em suma, a complexidade não pode ser definida de forma única, pois, em sua essência, contrapõe-se aos conceitos reducionistas e deterministas, contudo, podemos percorrer uma rede de conceitos e reflexões que busca nos guiar através do pensamento mais complexo a partir da visão de alguns autores. Nesse sentido podemos olhar para complexidade a partir das ideias de García (1988; 1998a; 1998b; 2004; 2005), que é biólogo por formação, e interpreta que a complexidade reside numa nova forma de tratar os problemas do cotidiano, tendo como foco a organização do conhecimento escolar complexificado, que não se resume a apenas um braço do conhecimento científico. Para ele o conhecimento escolar precisa dar conta de questões cotidianas que em sua essência são cada vez mais complexas. Toma as questões ambientais como porta de entrada para essa mudança de visão de mundo, a mudança de um pensamento simples para outro mais complexo.

Para Morin (2007), a complexidade emerge justamente pelo caminho que a tentava expulsar, caminho esse seguido pela ciência que buscava simplificar e reduzir para melhor entender e explicar o universo como um todo. Isso gerou uma hiperespecialização das ciências que permitiu enormes avanços e descobertas, mas ao mesmo tempo a tornou estéril, incapaz de dar conta de fenômenos e situações cotidianas da sociedade moderna. Deste modo, a complexidade, ou melhor, o pensamento complexo se faz necessário para promover a religação das ciências, introduzindo conceitos, abolidos pelo pensamento simplificador, como o acaso, a incerteza, a ordem e a desordem, a incompletude.

Para Prigogine (1984), a termodinâmica dos processos irreversíveis constatou que fluxos de energia e matéria que atravessam certos sistemas físico-químicos e os afastam do equilíbrio podem impelir o fenômeno da auto-organização, rupturas de simetria e evolução no sentido de aumento da complexidade e diversidade. A complexidade será então tomada como necessária para lidar com elementos do mundo em transformação e fora do equilíbrio.

Para um entendimento sobre o paradigma da complexidade e de que forma o conhecimento escolar pode ser a porta de entrada para a transição do pensamento

simplificador para o pensamento mais complexo, faremos, num primeiro momento, uma análise das discussões sobre a natureza do conhecimento escolar e dos paradigmas da ciência. Em seguida, sob uma perspectiva histórica, apresentaremos alguns pesquisadores que trouxeram contribuições para o melhor entendimento acerca da natureza do calor e trabalho mecânica (máquinas térmicas). Além disso, abordaremos alguns enunciados da entropia e o papel do tempo para o entendimento da física do não equilíbrio.

### **1.1 Elementos da complexidade**

O ensino de ciências vem apontando para a necessidade de aproximar os discursos escolares da realidade. Essa tentativa encontra algumas barreiras. Uma delas advém da própria natureza da ciência, da forma como ela se desenvolve e dos objetos de estudos que estão envolvidos. Em último caso, o que está em questão são as perspectivas de ciência que se prioriza. Como salienta Cini (*apud* WATANABE, 2012) a ciência se organiza a partir de três perspectivas distintas, a saber: da determinação, indeterminação e complexidade.

A perspectiva da determinação parte do princípio de que existe uma previsibilidade e regularidade nos fenômenos naturais, dessa forma bastaria conhecer as condições iniciais e as leis que regem determinado sistema para então ter acesso a todas as etapas de sua evolução temporal. Para se chegar a essa descrição é preciso isolar um problema do seu entorno para poder analisar como determinados parâmetros influenciam no sistema em questão. Essa perspectiva da ciência ganhou destaque e influenciou diversas outras áreas do conhecimento devido à sua capacidade de inspirar confiança e certeza, tanto à comunidade científica quanto a sociedade em geral. O mérito dessa perspectiva reside na busca por leis mais simples e universais que permitam o entendimento dos fenômenos e a sistematização dos mesmos. A sua limitação está em não dar conta de situações reais, e, portanto, complexas, nas quais não podem ter suas partes isoladas e tratadas de forma independente.

Na perspectiva da indeterminação não se tem o objeto de estudo de modo acessível e visível. Para tanto, essa perspectiva, passa a olhar para as relações que permeiam das interações entre os objetos de estudo, sem que os mesmos sejam conhecidos. A construção da ciência sob essa perspectiva se dá através de postulados gerais. Podemos exemplificar essa perspectiva com o princípio da incerteza (impossibilidade de se conhecer com total precisão a posição e o momento de uma partícula), as funções de onda da mecânica quântica, a descrição

probabilística dos fenômenos quânticos, a inseparabilidade entre observador e o objeto observado.

A perspectiva da complexidade permite incorporar à ciência, e, portanto torná-los objetos de estudos, conceitos como caos, acaso e desordem. Deste modo, a complexidade foge das determinações e incorpora a imprevisibilidade para tratar de situações reais-naturais em que se torna impossível tratar as partes sem levar em consideração o todo.

No contexto do ensino e da educação García (1998a) argumenta que a escola e o saber escolar são únicos e complexos, e que, portanto não devem se sujeitar exclusivamente ao conhecimento científico e/ou cotidiano. Deste modo o conhecimento escolar tem a oportunidade de tratar de problemas reais, afastando-se do determinismo, das verdades absolutas, do conhecimento fechado e acabado, aproximando-se das incertezas, probabilidades, ordem e desordem.

O conhecimento cotidiano, segundo Garcia (1998a), é tido como aquele vivido pelo sujeito sendo, portanto, muito experimental e prático, vinculado à resolução de problemas e descrição de fenômenos próprios do *mesocosmo* (aquele próximo à realidade do sujeito). Este conhecimento deve sempre ser levado em consideração dentro da construção do conhecimento escolar. Os alunos e alunas trazem consigo as experiências vividas em seu entorno, sendo os estereótipos sociais aprendidos na família e também nas mídias determinantes no processo de ensino e aprendizagem.

Já o conhecimento científico é aquele produzido tradicionalmente pela academia e comunidade científica, organizado nas disciplinas tradicionais (física, biologia, geografia, medicina, engenharia etc), sendo considerado mais geral e menos contextualizado. No conhecimento científico, que descreve os fenômenos do *microcosmos* e do *macrocosmos*, “os conceitos se definem com precisão e se organizam em sistemas conceituais muito complexos e com clara lógica interna” (GARCÍA, 1998a, p.28).

Para García (1998a) existem quatro hipóteses e dimensões sobre a construção do conhecimento escolar: (i) *compatibilidade*; (ii) *substituição*; (iii) *independência-coexistência* e (iv) *integração e enriquecimento*. A hipótese (i) considera que existe uma continuidade entre o conhecimento cotidiano e o científico, sendo possível transitar entres essas duas formas de conhecimento sem muitas mudanças nas ideias do sujeito e que o mesmo teria condições de aplicar os conhecimentos aprendidos na escola em sua vida cotidiana. A

hipótese (ii) considera que a epistemologia do conhecimento científico e do cotidiano são distintas e, portanto, não há uma continuidade entre ambas, porém é possível ir de uma outra mediante fortes mudanças no sujeito e esse seria o papel da escola, substituir as ideias de senso comum (cotidiano) dos alunos pelo conhecimento específico de cada área do saber (conhecimento científico). Desse modo, os alunos e alunas seriam capazes de aplicar o conhecimento científico aprendido na escola em sua vida cotidiana. Já a hipótese (iii) considera que as epistemologias do conhecimento cotidiano e científico são diferentes, além de possuírem contextos próprios. Deste modo é o meio e o contexto em que se encontra o sujeito que impulsiona o conhecimento científico ou o cotidiano, em outras palavras o conhecimento não seria algo integrado e único, mas sim um conjunto de teorias adequadas a cada contexto. Um aluno ou aluna estabelece um modo de pensar e resolver os problemas escolares de uma forma diferente que um cientista o faz em seu ambiente de pesquisa e mesmo assim ambos utilizam um conhecimento cotidiano em sua vida social e familiar.

Em resumo, o conhecimento científico, escolar e cotidiano seriam considerados como três epistemologias distintas. Desse modo não é possível a transição de uma forma de conhecimento em outra, mas apenas a ativação de uma ou de outra de acordo com o contexto do problema a ser resolvido. Para essa hipótese só é possível construir o conhecimento científico mediante contextos concretos, o que dificulta a aplicação desses conhecimentos nos problemas do cotidiano. Por fim, a hipótese (iv) considera que o conhecimento escolar é fruto da integração transformadora das contribuições de várias formas de conhecimentos, adotando o princípio da complementaridade e propondo a interação e evolução das duas formas de conhecimento. A hipótese de integração e enriquecimento do conhecimento cotidiano “postula a substituição e o enriquecimento do conhecimento cotidiano, para que a escola promova uma mudança radical, a substituição de formas simples e cotidianas de pensamento por formas complexas” (GARCÍA, 1998a, p. 25).

Claxton (1991, *apud* García, 1998a) aponta que é muito difícil e tem se mostrado fracassado a ideia de que o conhecimento científico possa, a partir da escola, ser transferido para a vida privada permitindo que o(a) aluno(a) aplique o que foi aprendido na escola em sua vida cotidiana. Claxton destaca ainda que, essa dificuldade em transpor o conhecimento científico para a vida cotidiana se deve em razão dos problemas serem muito diferentes, enquanto que o primeiro trabalha com questões fechadas, com poucas variáveis e podem ser modificadas a qualquer momento, o segundo trabalha com questões abertas, com muitas variáveis que não se podem modificar de forma simples. Para García (1998a), o conceito de

*transposição didática* falha pois atribui ao conhecimento científico uma visão intelectualista, longe da participação de entidades concretas; acrítica, que considera o conhecimento científico como legítimo e legitimador; e inadequada para muitas disciplinas que não correspondem a um saber científico. Em outras palavras não se deve reduzir o conhecimento escolar a uma simplificação de uma disciplina científica.

Nesse sentido, formar os sujeitos em áreas muito especializadas dificulta a resolução de problemas complexos e incertos, que não possuem uma única resposta e que se modificam à medida em que são resolvidos. Em outras palavras, tratar de problemas abertos exige que o sujeito reveja suas ideias, invente novas combinações, reinterprete o problema e produza um novo modelo.

O conhecimento científico se constrói a partir de uma alternância entre um conhecimento mais específico, que permite um aprofundamento e nos fornece muitos dados, e uma visão mais globalizadora, que necessitam de dados concretos para não se tornarem vazias (GARCÍA, 1988). O conhecimento escolar, por sua vez, não deveria ser reduzido à uma visão simplista do mundo. Os problemas do cotidiano são complexos e vão além de saber calcular a velocidade média de um carro ou sua desaceleração frente a um obstáculo. Segundo García,

(...) o conhecimento escolar deve ser entendido como um conhecimento singular, o resultado da integração, em relação ao caráter peculiar dos contextos e dos participantes no processo de ensino-aprendizagem, de diferentes formas de conhecimento: conhecimento científico, conhecimento diário, conhecimento metadisciplinar, conhecimento prático, ideologias, etc. (GARCÍA, 2005, p. 4, tradução nossa).

Vale destacar que os pressupostos do paradigma simplificador vão além das discussões escolares, eles permeiam outras formas de pensamento da sociedade, tais como, “(...) a racionalidade econômica dominante, a concepção do desenvolvimento ilimitado, a cultura da superficialidade, o pensamento único e politicamente correto e a ciência mecanicista” (GARCÍA, 2004, p.33). Essa forma de interpretar o mundo, ou seja, pautada pelo pensamento simplificador tem relação estreita com a perspectiva de uma ciência mecanicista pautada por leis determinísticas, tendo as leis de Newton como sua principal representante. Em sua essência, as leis determinísticas da mecânica são reversíveis, ou seja, dado as condições iniciais e conhecendo certas variáveis é possível predizer seu estado futuro e até mesmo seu estado passado. Deste modo, “(...) o futuro e o passado desempenham, em dinâmica,

exatamente o mesmo papel, isto é, absolutamente nenhum”. (PRIGOGINE & STENGERS, 1984, p. 149).

A física clássica, como uma ciência determinística, sempre buscou encontrar a simplicidade, a estabilidade, a universalidade, a objetividade e a imparcialidade frente ao observador. Mesmo os fenômenos mais complexos devem ser reduzidos em partes simples para que possam ser matematizadas e ajustados às equações e teorias vigentes. Para o pensamento clássico e mecanicista se faz necessário essa separação, pois o pensamento simplificador não é capaz de conceber a junção das partes ao mesmo tempo em que contempla o todo. Ao se observar o todo perde-se a capacidade de interpretar as peculiaridades das partes, em contrapartida, se as partes ganham destaque, torna-se impossível conceber o todo (MORIN, 2007). Foi a própria busca da ciência clássica pela ordem e simplicidade dos fenômenos que levou à descoberta de um mundo de desordem e incertezas, no qual a visão determinística cedeu lugar a uma visão probabilística. O átomo que simbolizava a unidade básica de constituição de toda matéria não mais se mostrava como elementar, sua constituição e descrição não cabiam dentro da física clássica. No outro extremo, a ordem do cosmos, imutabilidade e sua completa separação do homem se viram abalada com a descoberta dos buracos negros, a radiação cósmica de fundo e a Teoria da Relatividade (PRIGOGINE & STENGERS, 1984). O paradigma simplificador parece não conceber todas essas observações e fenômenos no qual é preciso olhar para as partes sem ignorar o todo.

A evolução dos estudos sobre o calor e, principalmente, sobre o funcionamento das máquinas térmicas constituiu o primeiro grande abalo à mecânica determinística de Newton, suas leis e fenômenos reversíveis. O surgimento, e posterior estudo das máquinas térmicas, não cabiam mais nas leis reversíveis da mecânica, pois, como veremos, a termodinâmica e conseqüentemente o estudo das máquinas térmicas, se alicerçam em transformações irreversíveis em que o tempo desempenha um papel importante e construtivo na descrição dos fenômenos. A perspectiva da complexidade ganha então espaço para se desenvolver. Buscaremos descrever sucintamente um pouco da história da termodinâmica dando ênfase na mudança de perspectiva da ciência para tratar dessas novas questões e da importância da complexidade nessas discussões.

## 1.2 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).

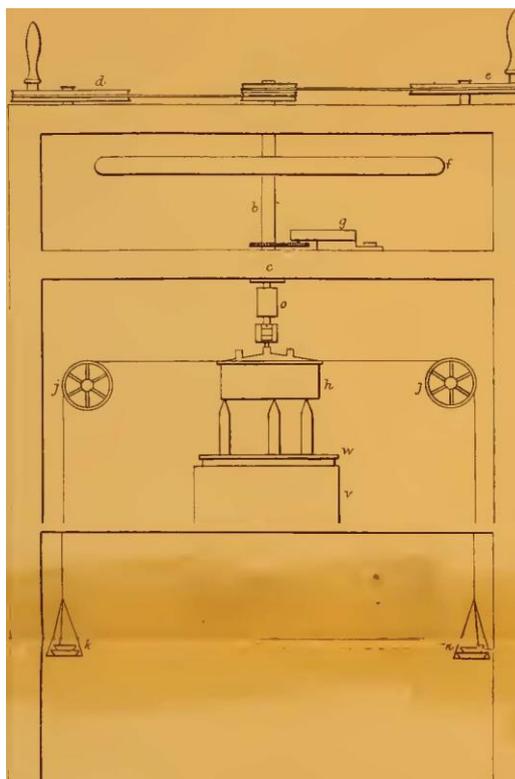
Anos mais tarde, em 1783, o próprio Lavoisier apresenta, juntamente com Pierre Simon Laplace (1749-1827), uma memória à Academia de Ciências em que reconhece que os físicos estão “divididos quanto à natureza do calor - um fluido que penetra nos corpos

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.



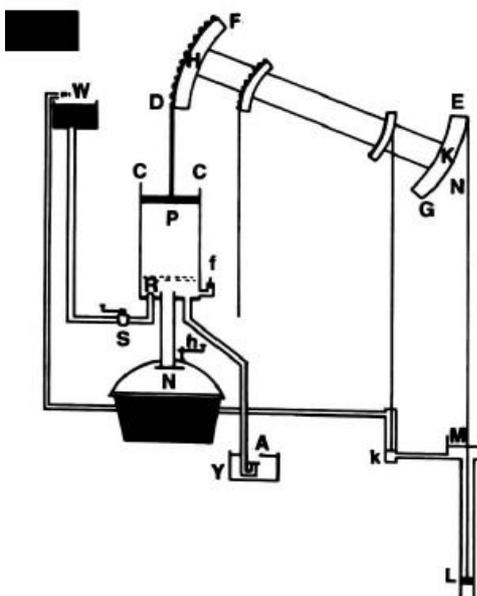
**Figura 1.1:** aparato experimental criado por Joule.

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.

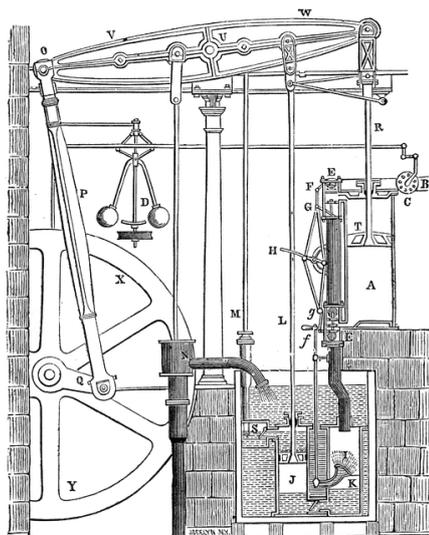
Thomas Newcomen (1664-1729), que era ferreiro e mecânico, inspirado nos estudos de Denis Papin (1647-1713), construiu em 1712 o motor Newcomen, que consistia, basicamente, de um cilindro no qual se injetava vapor de água fazendo com que um êmbolo subisse devido à maior pressão do vapor frente à pressão 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](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  $W =$  fator de conversão.  $Q_w$ . 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 bequeme 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 *ητροπη*, 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

equivalencia 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.

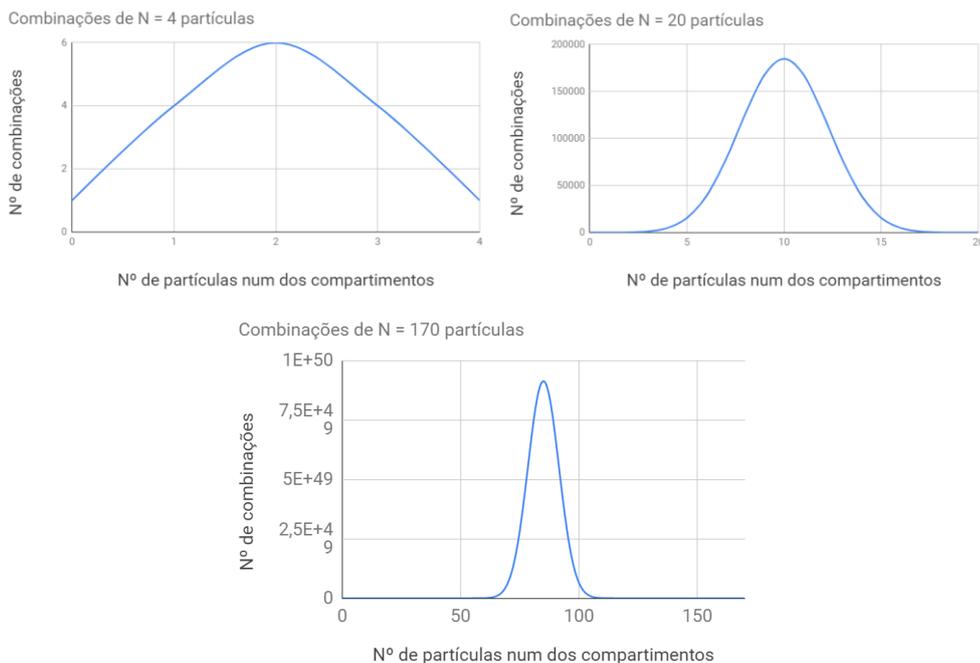
Clausius define duas entropias para as máquinas térmicas reais, uma para os fluxos úteis e reversíveis que se dá entre a máquina e o meio externo, em que o sinal depende do sentido de operação da máquina, e outra para as transformações internas irreversíveis do sistema, que é sempre nulo ou positivo. 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 consequentemente 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 sistemas 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.

## Capítulo 2

### Caminhos de pesquisa

Neste capítulo apresentam-se, considerando os aspectos da complexidade, os caminhos trilhados pela pesquisa. Para tanto, considera-se que como aspecto fundamental o olhar da complexidade apresentado no Capítulo 1. De forma geral, toma-se a complexidade enquanto aspecto que permeia o ensino e a educação. Nesse caso busca-se formar um sujeito pautado por um pensamento complexo (Morin 2002, García 1998b) e numa proposta de aula que se torna cada vez mais complexa.

Muitas escolas ainda mantêm o modelo de ensino voltado à transmissão dos conceitos se ausentando de discutir os possíveis erros nos pensamentos dos alunos e das alunas. De forma geral, a escola deixa de incorporar o conhecimento cotidiano no conhecimento científico escolar. Como vimos, García (1998b) destaca que esse modelo de escola e de ensino reproduz a ideologia dominante em nossa sociedade, pautado por um pensamento único que não admite outras visões de mundo. Nessa perspectiva, e o pensamento único é o imperativo, então o ensino se torna enciclopédico e memorizado. De forma geral, quase nenhum valor é dado à construção de argumentos e instrumentos para interpretar os grandes problemas socioambientais que fazem parte do cotidiano dos sujeitos.

Também vimos com García (1998b) que a escola não se constitui de uma instituição neutra e sem intenções, uma vez que “(...) o conhecimento que se constrói na escola tem um sentido, obedece a uma intencionalidade”. A escola e seus professores e professoras por mais que busquem mediar os conflitos de aprendizagem com uma postura científica e neutra, não a atingem. Isso ocorre, porque estão inseridos em uma sociedade em transição. É nessa sociedade que se encontra terreno fértil para realizar a transição para o paradigma da complexidade, como aponta Morin (2003a):

“O conhecimento do mundo enquanto mundo torna-se necessidade ao mesmo tempo intelectual e vital. E o problema universal para todo cidadão: como ter acesso às informações sobre o mundo, e como adquirir a possibilidade de articulá-los e organizá-los. Mas, para articulá-los e organizá-los, e deste modo reconhecer e conhecer os problemas do mundo, é preciso uma reforma de pensamento. Essa reforma, que comporta o desenvolvimento da contextualização do conhecimento, reclama ipso facto a complexificação do conhecimento” (MORIN, 2003a, p.152).

Essa forma de pensar, a qual se refere Morin (2002), leva à hiperespecialização da ciência e seu reflexo no ensino às inúmeras disciplinas desconectadas, incapazes de dialogar umas com as outras. A busca por uma nova forma de observar e intervir sobre o mundo parece ser um espaço fértil dentro do ensino que se preocupe em olhar para as relações e interações dos conceitos, ao invés de se aprofundar excessivamente, perdendo a capacidade de dialogar além da sua própria área de conhecimento. A busca pela complexidade deve balizar a estrutura dos currículos escolares permitindo romper o paradigma simplista e mecanicista que é incapaz de dar conta dos problemas socioambientais tão urgentes em nossa sociedade moderna.

Para dar conta desses aspectos, essa pesquisa de natureza qualitativa tem como dados a escrita dos alunos e alunas, analisadas por meio da Análise Textual Discursiva (ATD) (MORAES e GALIAZZI, 2007). A pesquisa qualitativa, segundo Gerhardt e Silveira (2009), busca explicar o porquê das coisas, evidenciando aquilo que convém ser feito sem a intenção de quantificar valores ou colocar os resultados à prova, pois os dados não são métricos. Na pesquisa qualitativa, o pesquisador, cujo conhecimento é parcial e limitado, é ao mesmo tempo sujeito e objeto da pesquisa que busca trazer à tona aspectos da realidade que não podem ser quantificáveis. O foco da pesquisa volta-se para compreender e explicar a dinâmica das interações sociais.

Como forma de organização deste capítulo, discute-se aspectos da ATD e, em seguida, apresentam-se as principais etapas da pesquisa, considerando as análises das respostas dos(as) alunos(as).

## **2.1 Análise Textual Discursiva**

A ATD (MORAES e GALIAZZI, 2007) pode ser considerada um método aplicado à pesquisas qualitativas, que possibilita ao pesquisador aprofundar-se no material de estudo aumentando sua compreensão a medida em que, recursivamente, o analisa. Na ATD o pesquisador busca novas interpretações sobre o material estudado à medida que se apropria do texto analisado. É um processo auto-organizado que se apoia em três pilares: *unitarização, categorização e comunicação*. Segundo Moraes e Galiazzi:

(...) Defende-se que esta é uma metodologia exigente, solicitando intensa impregnação do pesquisador. Este, ao longo do processo, é desafiado a reconstruir seus entendimentos de ciência e de pesquisa, no mesmo movimento em que reconstrói e torna mais complexas suas compreensões dos fenômenos que investiga. Como processo auto-organizado a análise textual discursiva cria espaços para a emergência do novo, uma tempestade de luzes surgindo do caos criado dentro do processo (MORAES e GALIAZZI, 2007, p. 126).

Num primeiro momento o pesquisador define o *corpus*, que consiste no conjunto de documentos, produzido pelo próprio pesquisador ou de terceiros, a serem analisados e extraídos os significados relevantes à pesquisa. O *corpus* deve dialogar com a proposta da pesquisa formando assim uma amostragem coerente capaz de produzir resultados válidos.

O próximo passo da ATD é a *unitarização* que consiste num desmonte dos textos para que o pesquisador possa realizar uma análise detalhada, destacando seus elementos constituintes. É nesse momento que se pode perceber os diferentes sentidos dos documentos analisados, cabendo ao pesquisador definir os limites dessa análise frente aos objetivos da pesquisa, em outras palavras, o grau de fragmentação fica a cargo do pesquisador e dos objetivos da pesquisa. Com a unitarização surgem as *unidades de análise* que podem emergir a partir de uma ou mais leituras e representam um elemento de significado do documento analisado. Esse processo de fragmentação pode acabar descontextualizando as ideias e o pesquisador deve atentar-se para reescrever resgatando o sentido do texto de onde surgiram. Moraes e Galiazzi (2007) chamam a atenção para esse processo:

(...) na fragmentação sempre se tende a uma descontextualização, é importante reescrever as unidades de modo que expressem com clareza os sentidos construídos a partir do contexto de sua produção. Isso implica incluir alguns elementos de unidades anteriores ou posteriores dentro da sequência do texto original. Isso se faz necessário, pois as unidades, quando levadas à categorização, estarão isoladas e é importante que seu sentido seja o mais claro possível. (MORAES e GALIAZZI, 2007, p. 20).

Outra característica importante da ATD é o envolvimento do pesquisador com os documentos analisados e é esperada uma forte impregnação na medida em que o *corpus* é desconstruído. A ordem inicial e coerente do *corpus* passa por uma desestabilização conduzindo a ordem estabelecida para o limite do caos para que, então uma nova ordem possa surgir a partir da desordem.

Uma vez que as unidades de análise foram extraídas do *corpus* no processo de unitarização, é possível prosseguir para próxima etapa da ATD, a *categorização*, que consiste

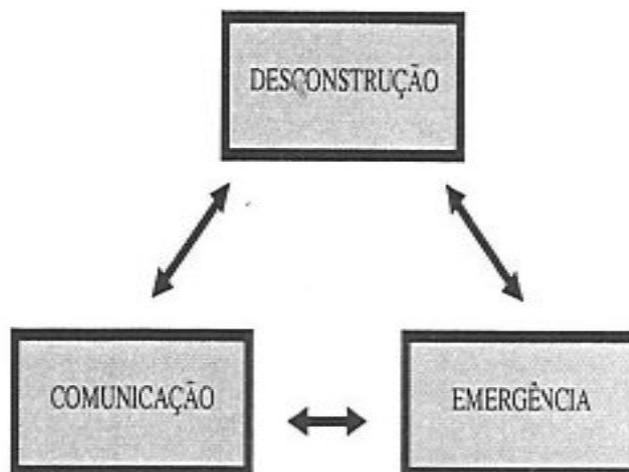
num processo de comparação constante entre as unidades de análise, agrupando-as em categorias semelhantes. Esses agrupamentos em torno de categorias definidas pelo pesquisador acabam constituindo “os elementos de organização do metatexto que se pretende escrever” (MORAES e GALIAZZI, 2007, p. 22). Três metodologias guiam a criação dessas categorias: método dedutivo, indutivo e intuitivo. Para o método dedutivo as categorias são definidas antes de analisar o corpus, ou seja, *a priori*, sendo deduzidas a partir dos referenciais teóricos. Nos métodos indutivo e intuitivo as categorias são criadas a medida em que se analisa os textos. A indução se dá por comparação e diferenciação entre as unidades de análise, agrupando os elementos semelhantes e seguindo do particular para o geral que resultará nas denominadas *categorias emergentes*. O método intuitivo, por sua vez, é fruto da intensa impregnação do pesquisador com o objeto de estudo, no qual as categorias surgem como “insights”. As categorias emergentes criadas nos dois últimos métodos refletem uma maior subjetividade para a análise do corpus.

Sintetizando as duas primeiras etapas da ATD, Moraes e Galiuzzi (2007) apontam que:

Se no primeiro momento da análise textual discursiva se processa uma separação, isolamento e fragmentação de unidades de significado, na categorização, o segundo momento da análise, o trabalho dá-se no sentido inverso: estabelecer relações, reunir semelhantes, construir categorias. O primeiro é um momento de desorganização e desmontagem, uma análise propriamente dita; já o segundo é de produção de uma nova ordem, uma nova compreensão, uma síntese. A pretensão não é o retorno aos textos originais, mas a construção de um novo texto, um metatexto que tem sua origem nos textos originais, expressando a compreensão do pesquisador sobre os significados e sentidos construídos a partir deles (MORAES e GALIAZZI, 2007, p. 31).

Por fim, o pesquisador elabora um novo texto a partir das etapas anteriores. Dependendo das escolhas do pesquisador é criado um texto mais descritivo em que as categorias e subcategorias são basicamente apresentadas, “fundamentando e validando essas descrições a partir de interlocuções empíricas ou ancoragem dos argumentos em informações retiradas dos textos” (MORAES e GALIAZZI, 2007, p. 35). Já para uma análise mais interpretativa terá maior abstração, afastando-se do original e aproximando do pesquisador, criando novos sentidos para os documentos analisados. Os textos produzidos possuem coerência própria não sendo apenas uma organização dos fragmentos do corpus. A ATD constitui assim um processo auto-organizado, recursivo de fragmentação, análise e reconstrução a partir das ênfases dadas pelo pesquisador e seus objetivos, gerando texto que

podem trazer novos significados e ser novamente submetido à análises posteriores (Figura 2.1).



**Figura 2.1** – Ciclo de análise proposto pela ATD  
 Fonte: Moraes e Galiazzi, 2007, p. 41

Esse ciclo auto-organizado de fragmentação e reconstrução “se utiliza da desordem e do caos, para possibilitar a emergência de formas novas e criativas de entender os fenômenos investigados” (MORAES e GALIAZZI, 2007, p. 41).

## 2.2 As trajetórias da pesquisa

A pesquisa realiza-se em duas etapas que ocorrem em momentos que podem se sobrepor. Assim, por exemplo, houve momentos em que o pesquisador estava analisando livros didáticos e já atuando na escrita de possíveis atividades que poderiam incorporar aspectos encontrados nas pesquisas nesses livros. Assim, a própria construção da pesquisa se dá de forma complexa. Dessa forma, como uma maneira de elucidar as etapas da pesquisa, inicialmente, apresenta-se a escola para, em seguida, discutir aspectos que constituíram a estrutura desta dissertação.

### 2.2.1 A escola pesquisada

A pesquisa foi realizada numa escola particular localizada no bairro Moinho Velho na cidade de São Paulo, com as turmas do 3º ano do Ensino Médio. A atividade (proposta de aula complexificada) para coleta de dados envolveu quarenta alunos. A escolha desta turma deu-se em função do currículo da escola e em função dos mesmos terem passado pela

termodinâmica, no 2º ano do Ensino Médio, sem terem visto o conceito de entropia. Esta escola faz parte da rede de educação vicentina sendo, portanto, uma escola confessional que segue os ensinamentos de São Vicente de Paulo e Santa Luíza de Marillac. Utiliza material apostilado e atende a um público de classe média, tendo um trabalho de assistência social para a creche com bolsas integrais.

A atividade proposta levou em consideração a carga horária semanal de física e também o tempo previsto para a abordagem tradicional deste conteúdo, deste modo, a proposta foi dividida em 6 aulas de 45 minutos cada.

Para a coleta de dados foram elaboradas atividades abertas na qual o(a) estudante pudesse livremente discutir suas ideias sobre o tema entropia. Todas as atividades desenvolvidas pelos alunos e alunas foram registradas em folha sulfite A4 e serviram de dados para essa pesquisa. A atividade inicial refere-se à seguinte pergunta: “*É preciso economizar energia? Por quê?*”. Essa mesma pergunta foi respondida mais duas vezes ao longo das aulas, sendo que a comparação das respostas dadas a essa pergunta em diferentes momentos da proposta é alvo desta pesquisa. Outras atividades desenvolvidas pelos(as) alunos(as) encontram-se nos apêndices 1, 2 e 3.

### **2.2.2 As etapas da pesquisa**

Para organizar a escrita, este trabalho tem início a partir do estudo dos referenciais teóricos, que permitiram encontrar melhores formas de pensar e organizar uma proposta de aula com o tema entropia. Usando a ATD buscou-se destacar as relações entre os conceitos que envolvem a entropia na disciplina de física e também em outras áreas do conhecimento.

Num segundo momento realiza-se a análise de seis Livros Didáticos (LD) do Ensino Médio do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) (BRASIL, 2014) com o objetivo de entender e, posteriormente, analisar, a forma como o conceito de entropia é abordado tomou-se os LD como parâmetro de organização do currículo de física para o Ensino Médio. Nesse primeiro momento, a leitura permitiu aproximar e impregnar com o conteúdo e sua organização em cada um dos LD, sendo possível encontrar espaços para articular potenciais inserções dentro de cada tópico, contribuindo para uma aula mais complexa e crítica. Para a análise dessas obras foram considerados pressupostos da ATD em que a leitura dos textos serviu de base para o pesquisador organizar os conteúdos de forma a encontrar possíveis espaços de articulação entre os mesmos, buscando uma abordagem mais sistêmica. Num segundo momento foi proposto um conjunto de aulas com foco na questão da entropia, a

partir energia e suas transformações. A intenção foi propor situações para tratar o conceito de energia de forma mais ampla e complexa. Construiu-se a proposta levando em consideração o caráter não linear do desenvolvimento da Física Térmica e as ideias a respeito da complexificação do conhecimento escolar, apresentados no capítulo 1, como forma de melhor articular os conceitos físicos sobre energia e entropia. A proposta foi dividida em três encontros de duas aulas cada. No momento inicial foi proposta a questão central deste trabalho: “É preciso economizar energia? por quê? Essa questão tratou da questão da conservação de energia e seu uso no cotidiano, de modo a aflorar uma visão para além do assunto energia elétrica, tão comumente lembrada quando se trata da energia. Para dar conta de ampliar essa visão, foi proposta a atividade (Apêndice 1) que consiste em olhar para as energias e suas transformações durante o carregamento de um celular. Do nosso ponto de vista, ao se questionar a origem da energia disponível na tomada é possível ampliar as discussões para além da energia elétrica, avançando sobre as diferentes fontes de energia utilizadas nas usinas de transformação. A intenção desta atividade foi explorar a degradação da energia ao longo da cadeia de transformações até chegar na bateria carregada e pronta para o uso.

O segundo momento abordou outras fontes de energia, tais como petróleo e seus derivados, além de apresentar alguns dados (tabelas e gráficos) que apontam para um esgotamento da produção de petróleo mundial e também do esgotamento da capacidade de obtenção de energia a partir dos recursos hídricos do Brasil, segundo dados do próprio governo. De um lado tem-se uma fonte de energia não renovável (petróleo e seus derivados) no qual o esgotamento, mesmo que distante da realidade concreta dos alunos e alunas é uma possibilidade. Já a aproximação de um limite para obtenção de energia hidrelétrica, mesmo sendo uma energia renovável, permite trazer à discussão o papel político, econômico, estratégico e social da energia e os interesses que a envolvem. Ainda nesse momento discutiu-se as máquinas térmicas e a revolução por elas causada. Ao final desse segundo momento os alunos e alunas respondem novamente a questão central deste trabalho.

No terceiro momento abordam-se a irreversibilidade, inicialmente, propondo um problema relacionado à um dispositivo que deve realizar trabalho mecânico a partir de duas situações distintas, uma delas mecânica e outra térmica (Apêndice 3). Para melhor entendimento e posterior discussão sobre o assunto, foi realizada a leitura de um texto que trata da irreversibilidade (Apêndice 4). Com essa atividade foi possível discutir os processos irreversíveis e a conseqüente degradação da energia ao longo das transformações e tratar do conceito de entropia dentro dessa perspectiva. Ainda nesse momento, os alunos e as alunas

escolheram um produto industrializado qualquer e traçaram o caminho das transformações de energia e suas perdas (aumento de entropia) ao longo de sua cadeia produtiva, desde a extração dos recursos naturais até seu futuro descarte. Por fim, responderam novamente a questão central desta pesquisa.

Os dados analisados consistem nas respostas dadas à questão central. A partir delas foram criadas três categorias, considerando os pressupostos da ATD, que contemplam diferentes níveis de complexidade. A análise buscou identificar nas respostas dos alunos e das alunas, mudanças em relação ao nível de complexificação das respostas.

## Capítulo 3

### A entropia nos livros didáticos

Com o intuito de identificar as maneiras como conceito de entropia aparece no Ensino Médio (EM), realizou-se uma pesquisa em seis livros didáticos (LD) de Física que integram o PNLD 2015 (Plano Nacional do Livro Didático) (BRASIL, 2014). A opção por analisar os LD de Física se deu devido a necessidade de elucidar os espaços nos quais o tema pode ser inserido considerando o currículo vem sendo seguido nas escolas. Do nosso ponto de vista, esse currículo é influenciado pela disposição dos conceitos presentes no LD que, por sua vez, trata-se de uma organização mais tradicional. Além disso, a escolha pelo PNLD, enquanto orientador dessa pesquisa, se dá devido ao seu alcance a nível nacional e pela rigorosidade no processo de seleção e análise, garantindo assim que os conteúdos conceituais estejam minimamente adequados para o público alvo. Nesse sentido, aspectos básicos de organização como, por exemplo, o respeito ao Estatuto da Criança e Adolescente (ECA) e minimização de erros conceituais são garantidos.

Em suma, a partir dessa análise espera-se encontrar espaços para discutir o conceito de entropia e suas implicações dando destaque a esses assuntos dentro da própria Física Térmica e também em questões que envolvam a energia, sistemas caóticos, questões ambientais, entre outros.

Para a análise considerou-se o volume 2 de cada exemplar de física do EM visto que, tipicamente, nele se encontram as discussões acerca da Física Térmica e, conseqüentemente, dos princípios da termodinâmica. A opção por analisar os capítulos de Física Térmica, e não somente a parte que trata especificamente da entropia, deve-se a necessidade de encontrar os possíveis momentos de inserção do conceito de entropia em espaços sutis. O Quadro 3.1 apresenta, na primeira coluna, os LD de Física do EM que foram objetos de análise, identificados pelo sistema alfanumérico L1, L2, ..., Ln; seguidas do Título da obra; Ano/Autor(es); e Editora.

	<b>Título</b>	<b>Ano/Autor(es)</b>	<b>Editora</b>
1	Conexões com a Física	2013 / Martini, Spinelli, Reis, Sant'anna.	Moderna
2	Física – Conceitos e contextos: pessoal, social e histórico.	2013, Pietrocola, Pogibin, Andrade, Romero.	FTD
3	Física	2014 / Guimarães, Piqueira, Carron.	Ática
4	Física – Interação e Tecnologia	2013, Gonçalves Filho, Toscano.	Leya
5	Ser Protagonista – Física	2013, Válio, Fukui, Molina, Oliveira.	SM edições
6	Física – Ciência e Tecnologia	2013, Torres, Ferraro, Soares, Penteadó.	Moderna

**Quadro 3.1:** LD de Física para o EM.

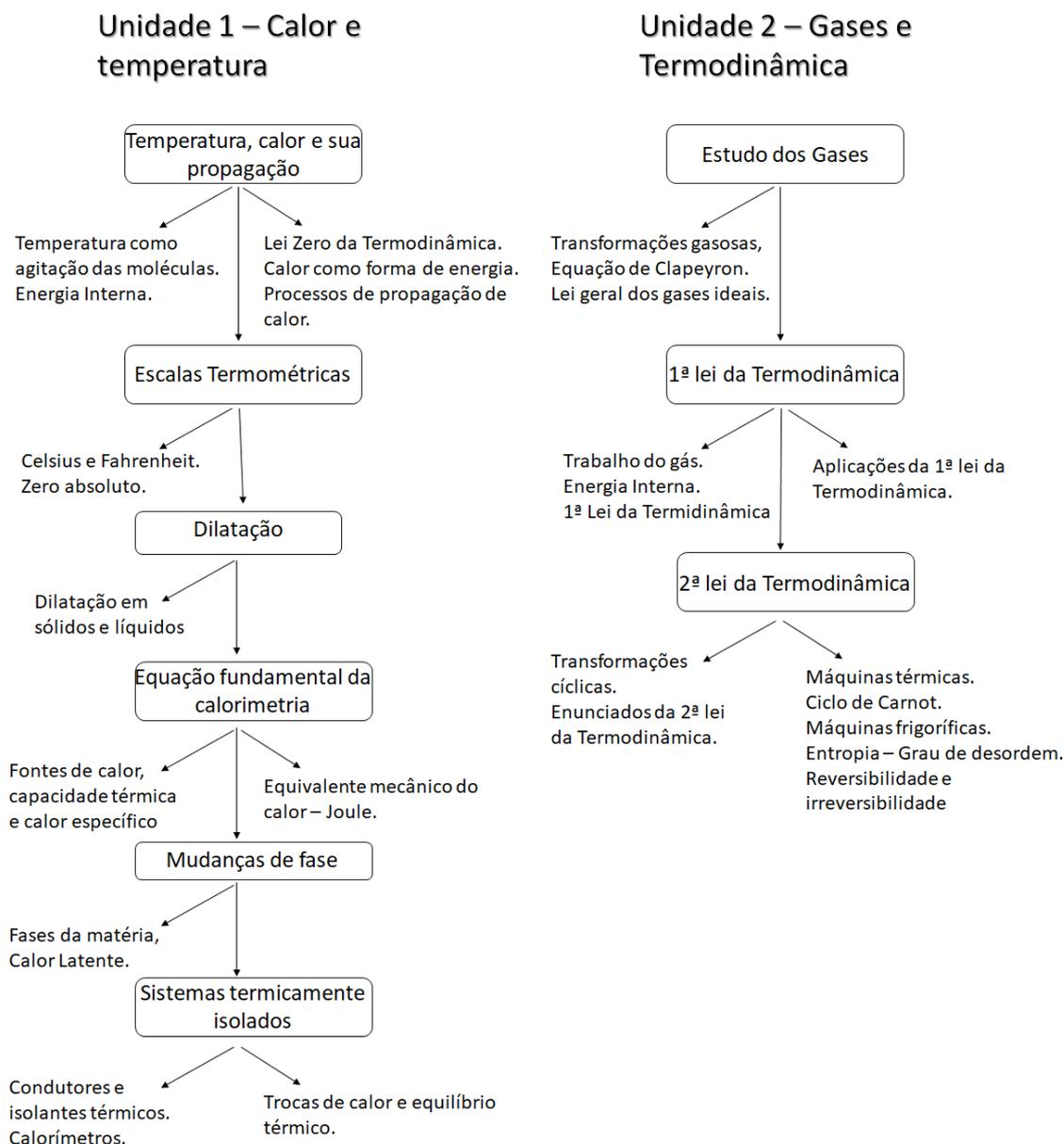
Fonte: Autoria própria

A seguir, apresentam-se as análises de cada um dos LD, tomando-se como referência os pressupostos da ATD (MORAES e GALIAZZI, 2007), e aspectos da complexidade (GARCÍA, 1998b).

### **3.1. A abordagem da entropia nos LD de Física**

- **A entropia em L1**

O L1 está dividido em três volumes. O volume 2 está organizado em seis unidades cobrindo os conteúdos conceituais de termodinâmica, óptica e ondulatória. As unidades de interesse para a pesquisa são: Unidade I - Calor e temperatura; Unidade II - Gases e Termodinâmica. Quanto à entropia e suas aproximações, seguem a distribuição presente na Figura 3.1.



**Figura 3.1:** Organizações conceituais L1. Fonte:

Autoria própria

Na unidade 1 deste volume se inicia com uma discussão sobre os conceitos de temperatura e calor, contextualizando-os com situações cotidianas, por exemplo, ao tratar da sensação de calor a certa temperatura ambiente. Relaciona a temperatura à agitação das moléculas (mais agitadas, maior temperatura). O exemplar segue definindo as escalas termométricas, dilatação dos corpos, calorimetria e mudanças de fase. A unidade é finalizada com a discussão sobre trocas de calor em recipientes termicamente isolados. Na unidade 2,

capítulo 1, o livro traz uma discussão sobre os gases, suas propriedades e as transformações gasosas sem mencionar a transformação adiabática, que será tratada adiante.

O capítulo 2 aborda a 1ª lei da termodinâmica iniciando a discussão a partir do trabalho realizado por um gás. A dedução matemática vem acompanhada da análise gráfica do diagrama  $p \times V$ , no qual é enfatizado que o trabalho realizado pelo gás para ir de um estado A para outro estado B, depende do caminho (transformação) entre esses dois estados. Na sequência é apresentado o conceito de Energia Interna, como sendo uma grandeza relacionada a “*soma de várias energias, entre elas, as energias de translação, rotação e de vibração de suas moléculas*” (Martini et.al., 2013, p.118). A preocupação mais acentuada da obra é relacionar a variação da energia interna diretamente com a variação de temperatura do gás. Na continuidade, define a 1ª lei da termodinâmica em termos de conservação de energia, de forma que variação da energia interna é tratada como sendo “*a diferença entre a quantidade de calor recebida e o trabalho realizado pelo sistema sobre o meio externo*”. (Martini et.al., 2013, p.119).

No último capítulo desta unidade (capítulo 3), a discussão introdutória trata dos limites à 1ª lei da termodinâmica, para isso utiliza o exemplo de uma bola de vidro que, ao cair de certa altura, se quebra em vários pedaços. A energia envolvida nesse processo se conserva, mas os pedaços de vidro só se juntarão mediante uma intervenção, assim, concluem que existem fenômenos que são irreversíveis. O sistema massa-mola ideal (sem atrito ou dissipação de energia) é citado como um exemplo de um processo praticamente reversível, no qual é possível retornar ao estado inicial sem a necessidade de nenhuma intervenção.

No mesmo capítulo é abordado o assunto de transformações cíclicas com foco nas máquinas térmicas, motores a explosão e locomotivas a vapor. As transformações são analisadas a partir da 1ª lei da termodinâmica, assim, como no ciclo a variação de energia interna é nula, o trabalho realizado advém do calor recebido pelo gás. Dá-se a entender que calor recebido pelo gás é inteiramente transformado em trabalho, o que viola completamente a 2ª lei da Termodinâmica.

Em seguida é discutida a 2ª lei da Termodinâmica como uma limitadora daquilo que não se pode observar no dia a dia, mesmo que obedeça a 1ª lei. Como exemplo, apresenta o fato de ser impossível que dois líquidos miscíveis e misturados se separem espontaneamente, explicitando que existe uma sequência correta para os eventos, ou seja, “a 2ª lei da

termodinâmica descreve aquilo que não pode ocorrer de forma espontânea” (Martini et.al., 2013, p.131).



**Figura 3.2:** líquido sendo misturados - exemplo de processo irreversível.

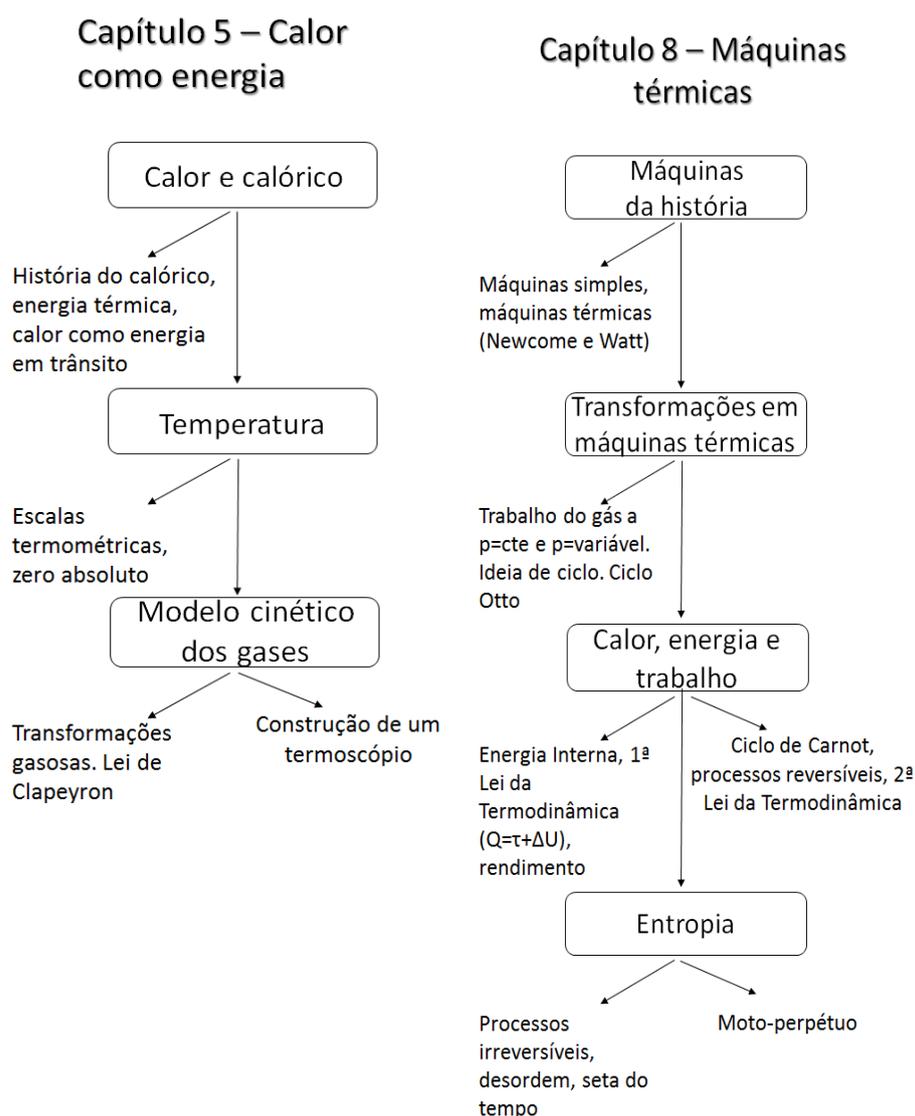
Fonte: MARTINI et.al., 2013, p. 131

A obra apresenta os enunciados de Clausius (sentido do fluxo de calor) e Thomson (rendimento das máquinas térmicas) para a 2ª lei e iniciam a discussão acerca das máquinas térmica, inicialmente trazendo um pequeno levantamento histórico e posteriormente a matematização do rendimento das máquinas térmicas. Apresentam o ciclo de Carnot destacando que o rendimento máximo somente pode ser obtido a partir de um processo reversível e que depende exclusivamente da temperatura das fontes quente e fria.

Por fim, define-se a entropia como sendo a perda de energia útil, ou seja, degradação da energia. Posteriormente a interpretam como sendo a diminuição no grau de ordenação de um sistema ou aumento da desordem. Num boxe intitulado “Para saber mais – Diálogos com a Física Moderna”, os autores descrevem a concepção da Mecânica Estatística, por Boltzmann, no qual evidencia que, mesmo que não seja impossível observar um corpo frio se tornar espontaneamente quente, este evento é extremamente improvável. O exemplar traz, ao final da unidade, uma atividade experimental para discussão da entropia como nível de desordem de um sistema. A atividade consiste em colocar feijões marrons e pretos em dois compartimentos distintos de uma caixa contendo uma divisória com abertura. A ideia da atividade é agitar a caixa, previamente tampada, e anotar a configuração de feijões marrons e pretos em cada compartimento. A intenção da atividade é mostrar aos estudantes o aumento da desordem e a impossibilidade de se retornar à ordem somente com a agitação da caixa com os feijões.

- **A entropia em L2**

O L2 está dividido em três volumes. Particularmente, o volume 2 está dividido em três unidades, a saber: (1) Energia; (2) Calor; e (3) Imagem e som. Na unidade 2, o conteúdo conceitual é apresentado em 4 capítulos, a saber: (5) Calor como energia; (6) Calor e dilatação; (7) Trocas de calor; (8) Máquinas térmicas. A entropia é tratada especialmente nos capítulos 5 e 8, tal como apresentado na Figura 3.3.



**Figura 3.3:** Organizações conceituais de L2.

Fonte: Autoria própria.

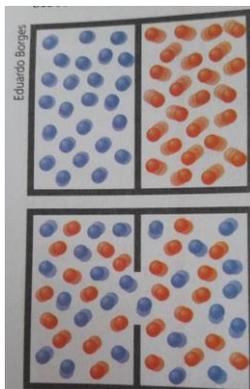
No início do capítulo 5 se faz um resgate histórico da natureza do calor a partir da ideia do calórico e dos trabalhos do Conde Rumford, ao tratar da perfuração de canhões. Na sequência, o calor é interpretado como uma forma de energia buscando apresentar os fenômenos envolvidos; e se discutem a medida da temperatura, a construção de termômetros e as escalas termométricas (Celsius, Fahrenheit e Kelvin). A obra segue por um caminho um tanto quanto diferente do “padrão” e propõem uma discussão sobre gases definindo pressão e posteriormente tratando das transformações gasosas e da Lei de Clapeyron.

Os capítulos 6 e 7 não tratam explicitamente da entropia. O capítulo 6 inicia-se com a dilatação térmica dos sólidos e, posteriormente, dos líquidos, observando o comportamento anômalo da água. No capítulo 7 o conceito de calor como energia é retomado para definir o calor sensível e a capacidade térmica. Ao tratar dos estados físicos da matéria, retomam a ideia atômica para diferenciá-los e também para definir o conceito de calor latente. Para finalizar discutem-se as formas de transferência de calor entre corpos.

O capítulo 8 traz algumas informações históricas sobre as máquinas térmicas e sua relação com o desenvolvimento da humanidade. Nesse caso, apresentam-se a máquina de Newcomen, Severy e Watt, tendo como foco a busca pelo aumento do rendimento nas máquinas a vapor. Em seguida, define-se trabalho do gás à pressão constante e à pressão variável e os ciclos nas máquinas térmicas, incluindo o ciclo Otto. Ao tratar da primeira 1ª lei da termodinâmica, os autores definem a Energia Interna e anunciam que *“(...) é inevitável que parte do calor produzido pela fonte quente para produzir o gás aquecido seja perdida.”* (PIETROCOLA et al., 2013, p. 162). O ciclo de Carnot é apresentado como sendo constituído de quatro processos totalmente reversíveis que proporcionam melhor rendimento, independente da substância utilizada. Os autores deixam claro que, na prática, é impossível construir uma máquina que funcione igual ao ciclo de Carnot, constituindo assim em um limite teórico para os rendimentos das máquinas térmicas. A 2ª lei da termodinâmica é apresentada, inicialmente, a partir do rendimento máximo do ciclo de Carnot. Esse rendimento máximo nunca atinge 100% evidenciando que é impossível, por meio de um processo real, transformar todo calor de uma fonte quente em trabalho mecânico.

Para finalizar o capítulo, a obra apresenta o conceito de entropia. Num primeiro momento apresentam define a entropia pela quantidade de calor trocada em função da temperatura. Em seguida, fazendo um paralelo com as máquinas, concluem que a entropia de um sistema fechado sempre aumenta. Por fim, trazem uma interpretação estatística à entropia

e a relacionam com o nível de desordem de um sistema (Figura 3.4) chegando a apresentar a equação da entropia como sendo o logaritmo do número de microestados possíveis de um sistema.



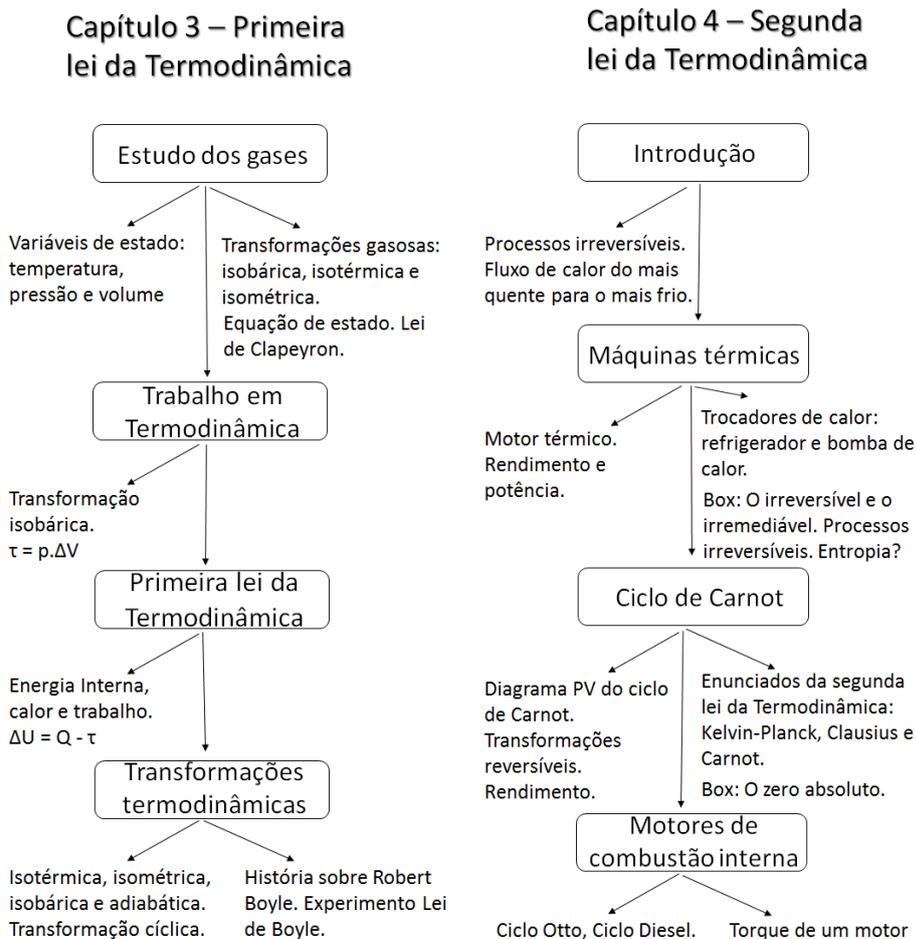
**Figura 3.4:** Aumento da desordem como sinônimo do aumento de entropia

Fonte: PIETROCOLA et. al., 2013, p. 172

A Figura 3.4 mostra um sistema contendo dois compartimentos com gases a diferentes temperaturas que ficam separados por uma divisória. Esse estado é alterado quando se abre uma passagem entre os compartimentos e os gases ficam livres para transitar entre os dois lados até atingir o equilíbrio térmico.

- **A entropia em L3**

O **L3** está dividido em três volumes. O volume 2 possui quatro unidades e dez capítulos. O foco de análise para essa pesquisa está nos capítulos 3 e 4 que tratam da primeira e segunda lei da termodinâmica, respectivamente; no entanto são brevemente apresentados os capítulos de 1 a 5. A Figura 3.5 apresenta a organização dos capítulos 3 e 4.



**Figura 3.5:** Organizações conceituais de L3.

Fonte: autoria própria.

No capítulo 1, intitulado *Temperatura e calor*, se discute os conceitos de temperatura e calor, considerando a medida da temperatura e das escalas termométricas usuais. Apresentam a dilatação térmica e suas aplicações, finalizando com formas de transmissão de calor. No capítulo 2, intitulado *Calorimetria*, discutem a diferença entre o aquecimento de diferentes materiais e, com isso, definem a capacidade térmica do corpo. Em seguida, apresentam os conceitos e definições de calor sensível, calor latente e as mudanças de fase. No boxe identificado “Física explica”, discute-se a diferença entre a ebulição e a evaporação. Por fim, tratam de sistema termicamente isolado, diagrama de fases (pressão x temperatura) e umidade do ar.

O capítulo 3, intitulado *Primeira lei da Termodinâmica*, inicia com o conteúdo conceitual de gases, transformações gasosas e lei de Clapeyron. Em seguida, apresenta a

definição de trabalho em termodinâmica e a 1ª lei da termodinâmica. Os autores a definem como sendo uma aplicação do princípio da conservação da energia. Por fim, analisam as transformações gasosas à luz da primeira lei, apresentando, ao término, a transformação adiabática.

O capítulo 4, intitulado *Segunda lei da Termodinâmica*, traz uma pergunta na abertura do capítulo que remete a irreversibilidade. Para isso usa a imagem/ ilustração de um pedaço de carne sendo assada sobre a brasa e questiona:

Ateando-se fogo ao carvão, ele libera calor, que assa a carne, e transforma-se em cinzas. Após esse processo, é possível as cinzas transformarem-se em brasas e depois em carvão para ser estocado para o próximo churrasco? (Guimarães, Piqueira & Carron; 2014, p. 91).

A partir dessa pergunta questiona-se o porquê de certos fenômenos ocorrerem em determinada sequência e não em outra. A obra salienta que o fluxo de calor do corpo mais frio para o mais quente não contradiz a 1ª lei da termodinâmica, mas que, essa situação não é observada na prática. Em seguida, cita a possibilidade de toda energia mecânica ser transformada em calor, como no caso de uma bicicleta sendo freada, e também apresentam a situação inversa - calor se transformando em trabalho – mostrando que somente parte do calor pode se transformar em energia mecânica. Concluem apontando que: “A energia térmica flui naturalmente do corpo mais quente para o mais frio” (Guimarães, Piqueira & Carron; 2014, p. 92). Apresenta as máquinas térmicas, motor térmico, potência e o refrigerador. Este último é tratado como um dispositivo que transfere calor do corpo frio para o corpo quente mediante o aporte de trabalho por parte de um compressor, o mesmo que ocorre para a bomba de calor. No box “Física explica” é abordada a questão dos processos irreversíveis, utilizando como exemplo uma xícara que cai e se quebra em alguns pedaços (Figura 3.6). No texto, discute-se que a energia liberada na quebra da xícara é menor do que a energia necessária para colar novamente todas suas partes. Portanto, a reconstrução da xícara quebrada é um processo irreversível, porém remediável, mas que necessita de mais energia do que se gerou na destruição.



**Figura 3.6:** A xícara que se quebra ilustra um processo irreversível em L3.

Fonte: GUIMARÃES, PIQUEIRA & CARRON; 2014 p.98.

Neste ponto salienta-se que a 2ª lei da termodinâmica trata da “irreversibilidade dos fenômenos termodinâmicos naturais da matéria inanimada” (GUIMARÃES, PIQUEIRA & CARRON; 2014, p. 98), surgindo o contraponto: “Por outro lado, os seres vivos, recebendo energia solar, organizam o ambiente, a memória, o conhecimento, remediando as situações” (Guimarães, op. cit., p. 98). Na sequência é apresentado o Ciclo de Carnot como sendo uma busca por melhores rendimentos das máquinas térmicas. Algumas observações são realizadas sob a forma de perguntas e respostas, e, uma delas diz respeito à impossibilidade de construir uma máquina operando com o ciclo de Carnot. A resposta dada é que, para que os processos possam ser reversíveis é necessário que ocorram muito lentamente o que faria com que a potência tendesse a zero.

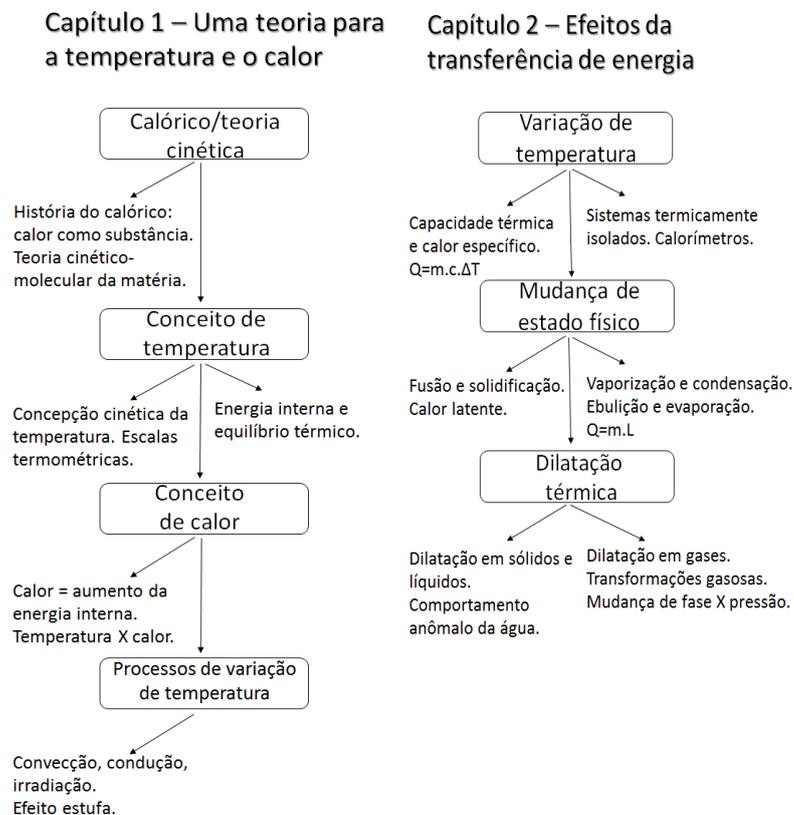
Na página seguinte apresentam-se três enunciados da 2ª lei da termodinâmica: Enunciado de Kelvin-Planck (É impossível construir um motor térmico cíclico com rendimento de 100%); Clausius (É impossível construir uma máquina térmica cíclica que transfira, sem dispêndio de energia, calor de um corpo mais frio para outro mais quente); e Carnot (o zero absoluto é inatingível). Nos três enunciados notam-se referências ao conceito de entropia. No primeiro, a ideia de energia degradada; no segundo, o conceito de aumento da desordem; e no terceiro, o zero absoluto leva a um único microestado e sua entropia seria zero ( $S = k \ln 1 = 0$ ). Por fim, são apresentados os ciclos Otto e Diesel dentro do assunto de motores de combustão interna.

O capítulo 5, denominado *Fontes de energia e impactos ambientais*, inicialmente mostra a quantidade de energia recebida pelo Sol e suas formas de uso. A obra discute as

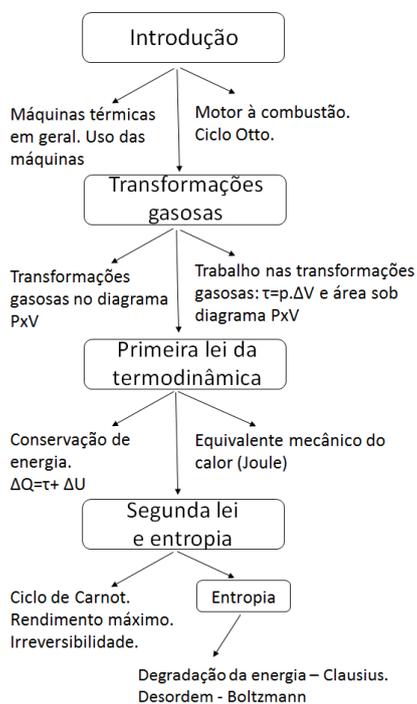
diferentes formas que a sociedade utiliza para transformar a energia, em geral, buscando a conversão para a energia elétrica. Em seguida, o foco se volta para a questão dos impactos ambientais, tratando da importância do efeito estufa para manter a temperatura da Terra numa faixa habitável e posteriormente relaciona o aumento do efeito estufa com ações antropogênicas, principalmente a queima de combustíveis fósseis. A discussão continua abordando a questão da camada de ozônio e a questão da poluição atmosférica provocado pela combustão dos hidrocarbonetos. O capítulo finaliza com a questão dos biocombustíveis, da usina nuclear e das hidrelétricas que recebe um contraponto em relação a sua imagem de energia sustentável.

- **A entropia em L4**

O **L4** está dividido em três volumes. O volume 2 possui sete capítulos, sendo que os três primeiros apresentam espaços para discutir a entropia. A Figura 3.7 traz a organização dos capítulos 1, 2 e 3.



### Capítulo 3 – Máquinas térmicas



**Figura 3.7:** Organizações conceituais de L4

Fonte: autoria própria.

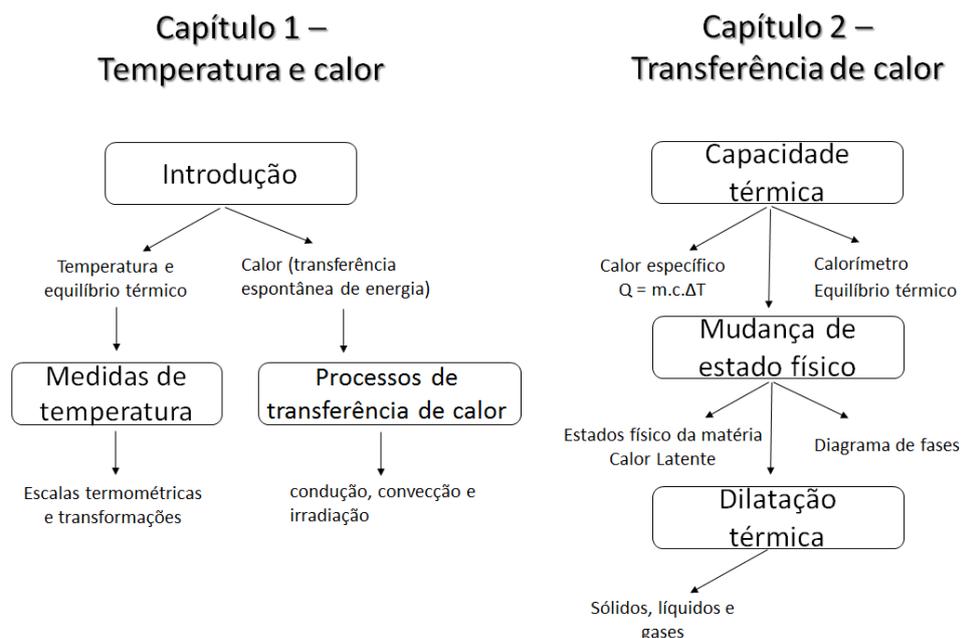
O capítulo 1, intitulado *Uma teoria para a temperatura e o calor*, inicia a discussão sobre temperatura a partir da sensação, do tato, mostrando o como falho esse tipo de abordagem. Em seguida, apresenta a teoria do calórico, tratando o calor enquanto uma substância, para depois apresentar a teoria cinético-molecular da matéria, conceituando o calor como energia. A partir daí a obra retoma o conceito de temperatura e de equilíbrio térmico. Conceitua o calor e o diferencia de temperatura, finalizando o capítulo com os processos de transferência de calor.

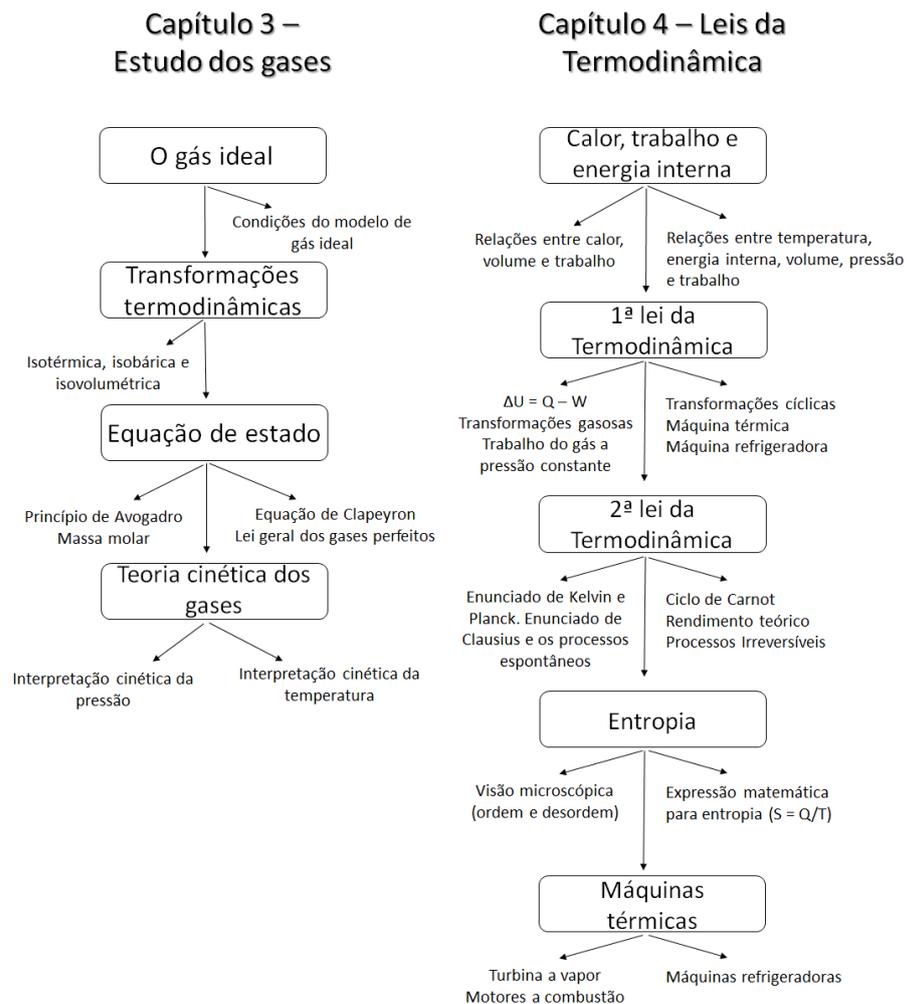
O capítulo 2, intitulado *Efeitos da transferência de energia*, se inicia conceituando capacidade térmica, calor específico e calor sensível. Utiliza do princípio da conservação da energia para tratar dos sistemas termicamente isolados. No tópico seguinte trata das mudanças de estado físico, calor latente e, no boxe *Algo a +*, discute o funcionamento de um refrigerador, sem aprofundar as transformações gasosas envolvidas, uma vez que esse conteúdo conceitual não foi tratado. Por fim, trata a dilatação nos sólidos e líquidos e, posteriormente, nos gases.

O capítulo 3, intitulado *Máquinas térmicas*, introduz brevemente um histórico das máquinas térmicas e, na sequência, as transformações gasosas em um motor de automóvel. O cálculo do trabalho do gás é mostrado no boxe *Algo a +*. No tópico seguinte apresenta a 1ª lei da termodinâmica como sendo um balanço energético da máquina térmica, e, no boxe *Algo a +*, apresenta a história da experiência de Joule sobre o equivalente mecânico do calor. Em outro boxe, chamado *Texto e interpretação*, relata os aprimoramentos das máquinas térmicas e o ciclo de Carnot, juntamente com a equação para seu rendimento. Ainda nesse boxe discute a questão da irreversibilidade de alguns fenômenos e a ideia de Thomson sobre a diminuição da energia útil disponível. Em seguida, comenta sobre a 2ª lei, indicando o sentido das transformações de energia, a irreversibilidade de alguns processos e o surgimento do conceito de entropia a partir das ideias de Clausius. No último caso, salienta que “(...) quanto maior for a entropia, menor será a quantidade de energia disponível” (GONÇALVES FILHO & TOSCANO, 2013, p. 91). Finaliza o capítulo com a reinterpretação do conceito de entropia por Boltzmann, ou seja, trata dos estados de menor e maior desorganização.

- **A entropia em L5**

O **L5** está dividido em três volumes. O volume 2 organiza-se em dez capítulos, sendo os quatro primeiros com potencial para discussão da entropia. A Figura 3.8 apresenta a organização desses capítulos.



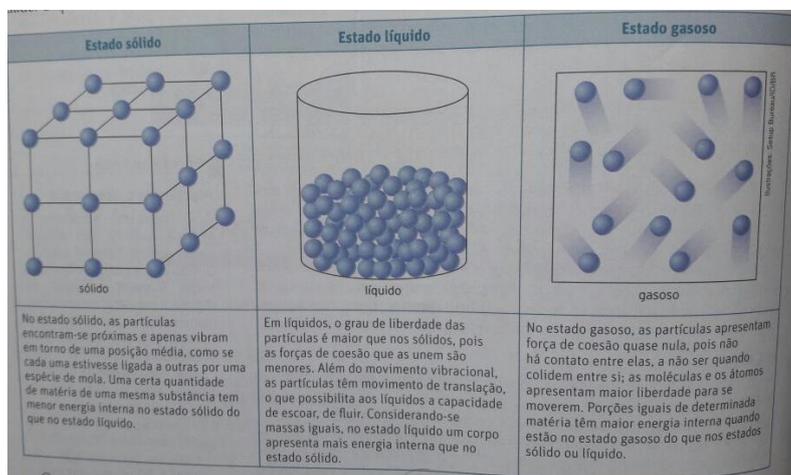


**Figura 3.8:** Organizações conceituais de L5.

Fonte: autoria própria.

O capítulo 1, intitulado *Temperatura e calor*, discute a temperatura a partir da teoria cinético-molecular. Não há nenhuma referência à teoria do calórico e seu desenvolvimento histórico. Na sequência define equilíbrio térmico entre dois ou mais corpos e conceitua o calor como sendo a “*transferência espontânea de energia* entre corpos que se encontram em diferentes temperaturas” (VÁLIO *et.al.*, 2013, p.11). Essa transferência espontânea é tida como um processo natural que ocorre sempre do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. Trata-se claramente de um processo irreversível no qual o sistema está buscando o equilíbrio no estado de maior entropia.

Adiante, a energia interna de um corpo é definida como sendo a soma da energia cinética e da energia potencial de ligação, além de serem apresentados os estados físicos da matéria, evidenciando a energia interna em cada caso (Figura 3.9).



**Figura 3.9:** A energia interna e os estados físicos da matéria, em L5.  
Fonte: VÁLIO et. al., 2013 p. 12.

Em seguida, a obra apresenta as escalas termométricas e suas transformações; e discute os processos de transferência de calor (condução, convecção e irradiação).

O capítulo 2, intitulado *Transferência de calor*, relaciona transferência de calor com variação de temperatura e define capacidade térmica como a relação entre o calor transferido e a variação de temperatura. Em seguida, apresenta calor específico e equação para o cálculo do calor sensível. Atenção é dada ao calor específico da água e sua característica de reduzir a amplitude térmica de uma região. Para finalizar essa etapa da discussão, apresenta o calorímetro e trata do termo adiabático para nomear a superfície externa do calorímetro que não troca calor com o meio externo. Na sequência retoma as fases da matéria dando maior ênfase às mudanças de fase e sua dependência com a pressão. Define calor latente e curva de aquecimento, bem como o diagrama de fases. Por fim, apresenta os conceitos de dilatação térmica em sólido, líquidos e gases.

O capítulo 3, intitulado *Estudo dos gases*, se inicia definindo as características do gás ideal, trazendo uma série de transformações termodinâmicas presentes desde o aquecimento do ar atmosférico até a formação de estrelas. Em seguida, discute as transformações gasosas (isotérmica, isobárica e isovolumétrica), o princípio de Avogadro, a equação de Clapeyron e a Lei geral dos gases ideais. Também retoma a teoria cinético-molecular para tratar de difusão e da interpretação cinética da pressão e temperatura. Ao final do capítulo é apresentado um Box intitulado *Física tem história* que trata da descoberta do fogo e sua utilização ao longo da

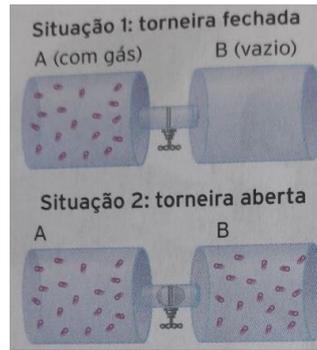
história. Cita o uso do fogo para aquecer água das máquinas a vapor durante a Revolução Industrial.

O capítulo 4, intitulado *Leis da termodinâmica*, introduz a Revolução Industrial com os estudos em termodinâmica. Define conceitualmente o calor trocado com o meio e o trabalho realizado pelo gás e retoma a energia interna do gás juntamente com a equação para seu cálculo. O exemplar apresenta situações em que a energia interna do gás aumenta, diminui ou permanece constante. Em seguida, discute a 1ª lei da termodinâmica, considerando que,

“A variação da energia interna  $\Delta U$  de um gás ideal é obtida pela diferença entre a quantidade de calor  $Q$  recebida do ambiente externo ou fornecida para ele e o trabalho  $W$  realizado nesse processo.” (VÁLIO, *et. al.*, 2013, p. 99)

A obra também trata das transformações gasosas, incluindo a transformação adiabática, sob a luz da 1ª lei da termodinâmica aborda as transformações cíclicas e, de modo genérico, trata do motor térmico e da máquina refrigeradora. Por fim, discute a 2ª lei da termodinâmica a partir das limitações inerentes à 1ª lei como, por exemplo, a impossibilidade de transformar todo calor em trabalho (rendimento de 100%) e do calor passar espontaneamente do corpo mais frio para o mais quente. Também apresenta o ciclo de Carnot e seu rendimento máximo teórico e finaliza exemplificando com situações que ocorrem em nosso dia a dia e que retratam processos irreversíveis que, segundo os autores “(...) são aqueles nos quais o sistema não retorna espontaneamente à situação inicial” (VÁLIO, *et al.*, 2013, p.113).

Nessa mesma página as palavras “energia degradada” aparecem em negrito e significam a parte da energia que foi transferida para o reservatório de menor temperatura e, portanto, não está mais disponível para realizar trabalho. O próximo tópico começa relacionando os processos irreversíveis com uma grandeza chamada entropia a partir do crescimento da desordem nesses processos (Figura 3.10). Assim, a entropia é interpretada como sendo uma medida da desordem do sistema, ou melhor, como sendo relativa ao número de configurações microscópicas que um sistema pode apresentar.

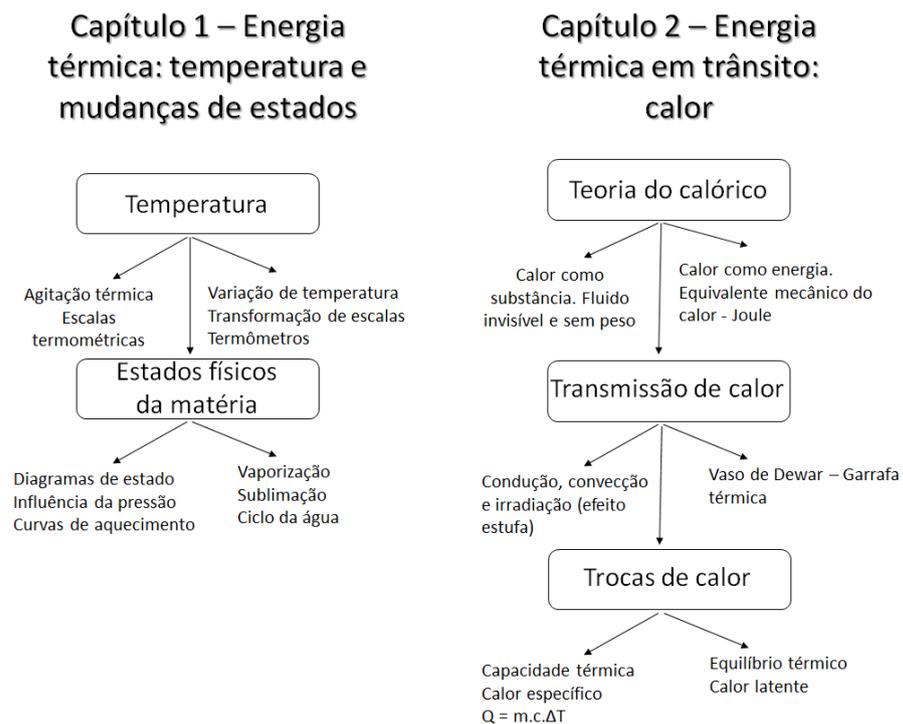


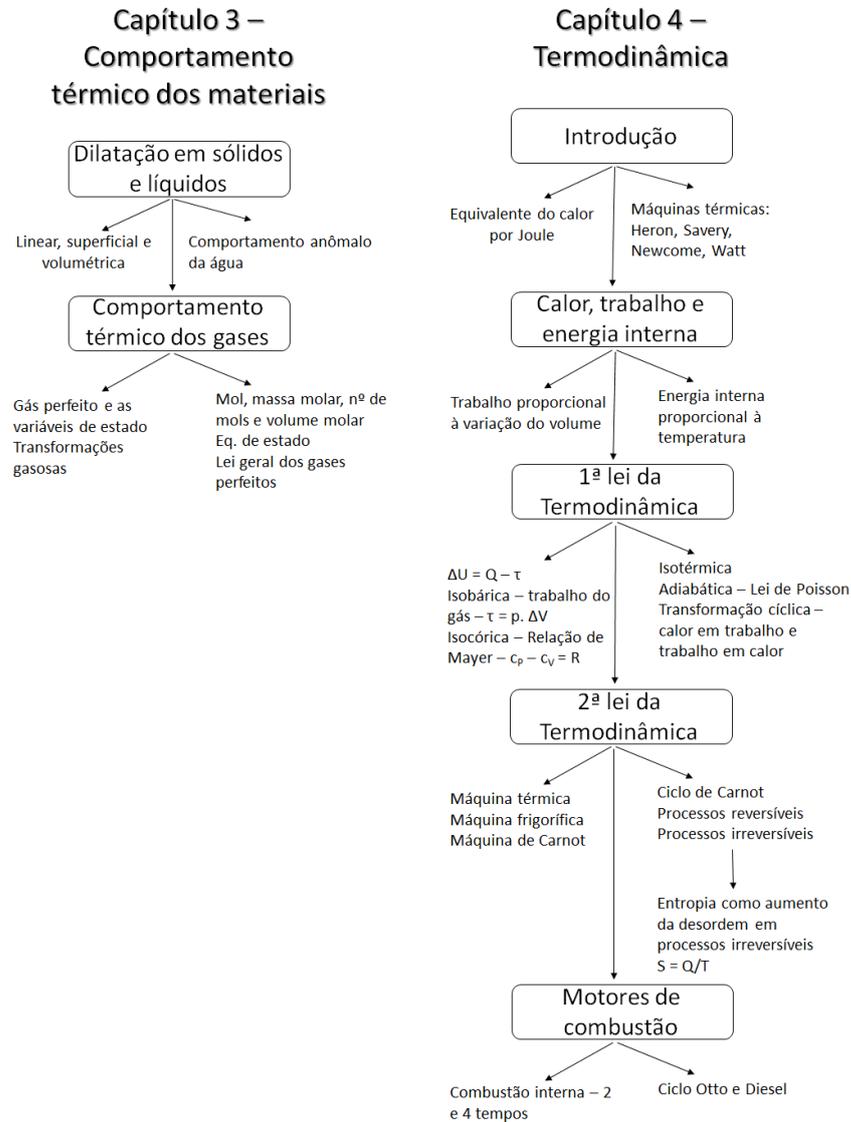
**Figura 4.10:** Ordem - desordem em processos irreversíveis.  
Fonte: VÁLIO, et. al., 2013, p. 114.

A obra busca relacionar a entropia com a 2ª lei da termodinâmica, finalizando a apresentação com a expressão matemática para o cálculo da variação da entropia. O capítulo encerra com as discussões sobre a turbina a vapor, motores a combustão e máquinas refrigeradoras. Em nenhum dos casos é mencionado o conceito de entropia e muito vagamente se fala da 2ª lei da termodinâmica.

- **A entropia em L6**

O L6 está dividido em três volumes. O volume 2 possui dez capítulos, sendo os quatro primeiros com potencial para tratar a entropia. A Figura 3.11 apresenta a organização conceitual desses capítulos.





**Figura 3.11:** Organizações conceituais de L6.

Fonte: autoria própria.

No capítulo 1, intitulado *Energia térmica: temperatura e mudanças de estados* é abordado, sucintamente, a teoria cinética da matéria, definindo a energia térmica e calor. A temperatura é apresentada e utilizada para definir macroscopicamente o equilíbrio térmico e conceituar o zero absoluto. O tópico seguinte traz os estados físicos da matéria e os diagramas de fases, mostrando a influência da pressão nas mudanças de estado físico.

O capítulo 2, intitulado *Energia térmica em trânsito: calor é* traz uma breve abordagem histórica da teoria do calórico e relata as ideias de Benjamin Thompson, conhecido como Conde Rumford, durante sua tarefa de supervisão na perfuração de canhões. Discute-se o experimento de Joule para o equivalente mecânico do calor e define o calor como sendo a energia que se transfere entre corpos com temperaturas diferentes. Ainda nesse tópico um box que trata da energia dos alimentos, apresenta diversos alimentos e seus respectivos valores calóricos. Em seguida trata-se dos processos de transmissão de calor (condução, convecção, irradiação). Na discussão sobre a convecção térmica, especificamente no fenômeno da inversão térmica, cita-se a poluição atmosférica como um dos problemas dos grandes centros urbanos. O tópico seguinte é destinado para a calorimetria abordando os conceitos de capacidade térmica, calor específico e calor latente. Salienta-se que, para as trocas de calor, o mesmo será cedido pelo corpo quente e recebido pelo corpo frio. Novamente o conceito de equilíbrio térmico aparece, sendo definido como o “estado no qual dois ou mais corpos de um mesmo sistema mantém sua temperatura inalterada e num mesmo valor comum”. (TORRES *et.al.*, 2013, p.61).

O capítulo 3, intitulado *Comportamento térmico dos materiais*, explica a dilatação térmica dos sólidos, o comportamento anômalo da água e dos gases. Para finalizar, apresenta-se as variáveis dos gases, suas transformações, além da equação de um gás perfeito

No capítulo 4, intitulado *Termodinâmica*, a página de abertura apresenta uma das obras de Salvador Dalí, *Natureza-morta animada*, juntamente com uma frase proferida por ele, a saber: “A entropia de uma natureza-morta é um meio de corrigir a natureza” (TORRES *et.al.*, 2013, p.95). A obra utiliza a obra de Dalí para questionar a ordem das coisas (seta do tempo) atribuindo esse papel à entropia que sempre aumenta. Em seguida, realiza um apanhado histórico das máquinas térmicas desde a eolípila de Heron até as máquinas a vapor que impulsionaram a Revolução Industrial. Apresenta-se os conceitos de trabalho, calor trocados entre o gás e o meio e a energia interna de um gás ideal. Em seguida, a 1ª lei da Termodinâmica é apresentada como um princípio de conservação da energia e discute-se as diferentes transformações gasosas (analisando o trabalho realizado, o calor trocado e a variação da energia interna) e a transformação cíclica, chegando na 2ª lei da Termodinâmica. Segundo a obra, a 2ª lei delimita as transformações que podem ocorrer de fato, algo que a 1ª lei não faz. O enunciado da 2ª lei é apresentado de acordo com as ideias de Max Planck e Lord Kelvin: “É impossível a construção de uma máquina térmica que opere em ciclos, tendo como único efeito retirar calor de uma fonte térmica e convertê-lo integralmente em

trabalho”. (TORRES *et.al.*, 2013, p. 117). Em seguida, apresenta-se o princípio de funcionamento das máquinas térmicas, das máquinas frigoríficas e do ciclo de Carnot.

Salienta-se que a obra inicia a discussão sobre entropia a partir da irreversibilidade dos processos naturais, o que permite dar outra formulação à 2ª lei da Termodinâmica. Nesse sentido, destaca-se que “A quantidade de energia utilizável do Universo diminui à medida que ele evolui”. (TORRES *et.al.*, 2013, p. 117). A entropia é então associada com o aumento da desordem e com a diminuição da energia útil nos processos naturais o que nos levaria inevitavelmente à morte térmica do Universo. Para finalizar, entropia é definida como sendo a relação entre a quantidade de calor trocada no processo e a temperatura absoluta em que esse processo ocorre ( $S = Q/T$ ). Num boxe *O que diz a mídia*, a entropia é associada à ideia de caos e desordem e posteriormente, associada à vida a um sistema que tende a se manter em baixa entropia aumentando a entropia de seu entorno. Por fim, apresenta-se os motores a combustão de 2 e 4 tempos e os ciclos Otto e Diesel.

### 3.2. Articulações entre elementos de uma visão mais complexa com a organização curricular presente no LD

A partir da amostra analisada nota-se que a maioria dos LD apresentam uma estrutura ainda linear da organização do conhecimento. Especificamente, no contexto dos potenciais espaços para tratar a entropia, nota-se que há distintos enunciados sobre a 2ª lei da termodinâmica. O Quadro 3.2 resume aspectos da entropia encontrados nos LD.

	Diferentes enunciados da 2ª Lei	Ordem e desordem	Interpretação estatística	Degradação da energia	Processos reversíveis e irreversíveis	Entropia em outros contextos
L1	SIM	SIM	PARCIAL	SIM	SIM	NÃO
L2	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO
L3	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	PARCIAL
L4	SIM	PARCIAL	NÃO	NÃO	PARCIAL	NÃO
L5	SIM	SIM	PARCIAL	SIM	SIM	NÃO
L6	NÃO	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM

**Quadro 3.2:** Resumo dos principais conceitos envolvendo entropia.

Fonte: Autoria própria

A partir dessa análise foi possível identificar alguns espaços de trabalho e aprofundamento dos assuntos energia e entropia. Como já dito, a identificação desses espaços se faz necessário para que uma abordagem mais complexa e próxima da realidade dos(as) estudantes seja contemplada. Nessa perspectiva, o **Quadro 4.3** sistematiza os espaços e aponta as possibilidades de inserções de algumas discussões do tema. Nele estão dispostos espaços nos LD e potencialidades de inserções.

Espaços nos LD	Potencialidades de inserções
1ª lei da termodinâmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- olhar para os processos de transformação de energia em conversores em geral para identificar as transformações de energia envolvidas.</li> <li>- diferenciar energia útil de energia não útil em situações cotidianas.</li> </ul>
2ª lei da termodinâmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 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.</li> <li>- a poluição das águas e do ar, salientando o aumento da entropia e sua irreversibilidade;</li> <li>- tratar da neguentropia, de forma que a questão, por exemplo, da economia de energia se reverte na economia da entropia;</li> </ul>
A Entropia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- partir da visão microscópica como forma de definir temperatura e calor.</li> <li>- discutir a entropia sob a óptica dos microestados (ordem e desordem)</li> <li>- relacionar a flecha do tempo com o aumento da entropia do Universo.</li> <li>- discutir a morte térmica do universo;</li> <li>- discutir a vida, dando espaço para tratar a auto-organização do sistema.</li> </ul>

Máquinas Térmicas	- abordar a limitação de eficiência das máquinas térmicas a partir do conceito de entropia e exergia <sup>1</sup> .
Fontes de energia	- trazer a história dos conversores de energia e seus impactos ambientais. - tratar da crise dos conversores e do esgotamento das fontes de energia como forma de conscientização pelo uso racional de energia.
Educação ambiental	- permitir a reflexão, sob o olhar da termodinâmica, acerca da sustentabilidade, consumo e pegada ecológica.

**Quadro 3.3:** Espaços encontrados nos LD e possibilidades de outras abordagens do tema entropia  
Fonte: Autoria própria.

A discussão da 1ª lei da termodinâmica se dá em torno do princípio da conservação da energia, tema tipicamente abordado em mecânica e que, dificilmente, encontra conexão com a termodinâmica. Como a primeira lei da termodinâmica versa sobre o princípio da conservação de energia pode-se olhar para as diversas transformações de energia que temos em nosso cotidiano direcionamento para os conversores de energia de larga escala (usinas nucleares, hidrelétricas, termoelétricas, solares, eólicas etc). A 1ª lei limita-se a descrever as transformações de energia sem colocar restrições ao sentido dessas transformações, o mesmo vale para a esfera da mecânica.

Dentro do bloco da segunda lei da termodinâmica, a discussão da poluição das águas permite exemplificar, de forma prática, a diferença entre processos reversíveis, irreversíveis e reversíveis a partir de uma ação. Estima-se que o planeta Terra possui 1,3588 bilhões de km<sup>3</sup> de água, mas apenas 0,0333 bilhões de km<sup>3</sup> de água doce. (Jórgensen e Vollenweider, 1988, *apud* Sperling, 2006). Watanabe (2008) realizou uma pesquisa com professores e alunos do curso de pedagogia de uma faculdade particular, em que 77,4% responderam que a água irá acabar, ignorando por completo o ciclo da água no planeta. Outra questão interessante diz respeito a poluição das águas (“Essa poluição é eterna? Por quê?”), no qual 39% dos professores/alunos responderam que sim, a poluição das águas é eterna. A temática da água pode servir como fio condutor para discutir questões ligadas à conservação de energia, sistemas abertos e fechados, degradação da energia, ordem a partir da desordem, processos

<sup>1</sup> “A exergia é a medida da capacidade máxima de um sistema energético de realizar trabalho útil enquanto prossegue em direção ao equilíbrio com o ambiente.” (Brzustowsky & Golem, 1978; Ahern, 1980 *apud* Schneider & Kay, 1997).

reversíveis e irreversíveis. A água poluída representaria um sistema reversível, irreversível ou reversível por meio de uma ação? Essa pergunta permite uma discussão acerca da despoluição “natural” de rios ao longo de seu percurso. Quais devem ser os agentes necessários para despoluição “natural” de um rio? Neste caso pode-se dizer que a entropia do rio diminui? Esse fato violaria a 2ª lei da Termodinâmica? Se a despoluição se der a partir da aplicação de uma ação, pode-se discutir os custos envolvidos e os impactos ambientais dessa despoluição.

Ainda considerando o tema água é possível realizar outros recortes, tal como mostrado por Watanabe (2008). Ela utiliza a organização temática e a organização conceitual para embasar a construção de percursos temáticos por alunos(as) e professores(as). A título de exemplo, a autora desenvolve três percursos temáticos tendo como ponto de partida a possível escassez futura da água e representações do ciclo da água, além de ser possível estabelecer uma reflexão sobre o uso da água na cadeia produtiva de alimentos, como o uso em plantações de soja, cuja finalidade é alimentar o gado, que por sua vez alimenta apenas uma pequena fração da humanidade.

Dentro do bloco de entropia pode-se tratar da vida que, sob o olhar da física, parece ser uma violação a segunda lei da termodinâmica, uma vez que ela gera ordem a partir da desordem, portanto, observa-se um decréscimo da entropia. Não somente a vida parece contradizer a segunda lei mas também se observa em sistemas dinâmicos de não equilíbrio como por exemplo redemoinhos, reações de Zhabotinsky e célula de Bérnard (KAUFFMAN, 1997). Nesta abordagem é possível discutir o conceito de sistemas abertos e fechados, sendo a vida um sistema aberto, pois troca energia e matéria com o meio. Em seu livro “O que é vida?”, Edwin Schrödinger trata dos sistemas que criam ordem a partir da ordem e a ordem a partir da desordem. Segundo Schrödinger a ordem a partir da ordem deveria ser criada por alguma estrutura capaz de armazenar uma espécie de código que seria usado para se replicar sendo passível de pequenas flutuações que dariam conta da adaptação e evolução das espécies, tais como sugerido por Darwin em seu livro “A origem das espécies”. Essa estrutura foi descoberta em 1953 pelo biólogo molecular James Dewey Watson e pelo físico Francis Harry Compton Crick o qual deram o nome de DNA (BASSALO, 2014).

No bloco de máquinas térmicas e fontes de energia é possível abordar questões relacionadas à crescente escassez dos recursos não renováveis, como o petróleo e seus derivados, bem como discutir o aprimoramento dos conversores de energia utilizados pela humanidade, dando conta de observar o limite para eficiência das mesmas. Aqui também há

espaço para discutir o papel da ciência e a crença de que se trata de uma questão de tempo para que ela encontre soluções para os diversos problemas que assolam a humanidade.

O bloco educação ambiental não aparece como um capítulo à parte em nenhum LD analisado. No entanto, em LD3 e LD5, a questão ambiental é mostrada de forma auxiliar em boxes ou em abertura de capítulos. O tema da educação ambiental, pois permite o diálogo com diversas disciplinas e exige um pensamento mais complexo frente aos problemas e as possíveis soluções. Em física é possível discutir questões ambientais sob a óptica da entropia, pois toda atividade humana se dá tomando a energia de baixa entropia da natureza e a devolvendo com alta entropia. Segundo Cavalcanti (2012),

“... com tal visão, passa-se a pensar o sistema econômico com aparelho digestivo: nele, matéria e energia (de alta qualidade, ou baixa entropia, a verdadeira riqueza do mundo) são engolidas, viram artefatos e terminam derradeiramente como dejetos (de alta entropia). Quer dizer: o que nós produzimos mesmo, em última instância, é lixo – nada de riqueza duradoura. Um carro zero é pré-sucata.” (CAVALCANTI, 2012)

Essa breve análise aponta para algumas das possibilidades que encontramos para discutir a entropia a partir de uma visão mais complexa. Não pretendeu-se aqui apontar caminhos, mas exemplificar possibilidades. No capítulo que segue discute-se uma proposta de aula que procura se inserir nos espaços encontrados nos LD.

## Capítulo 4

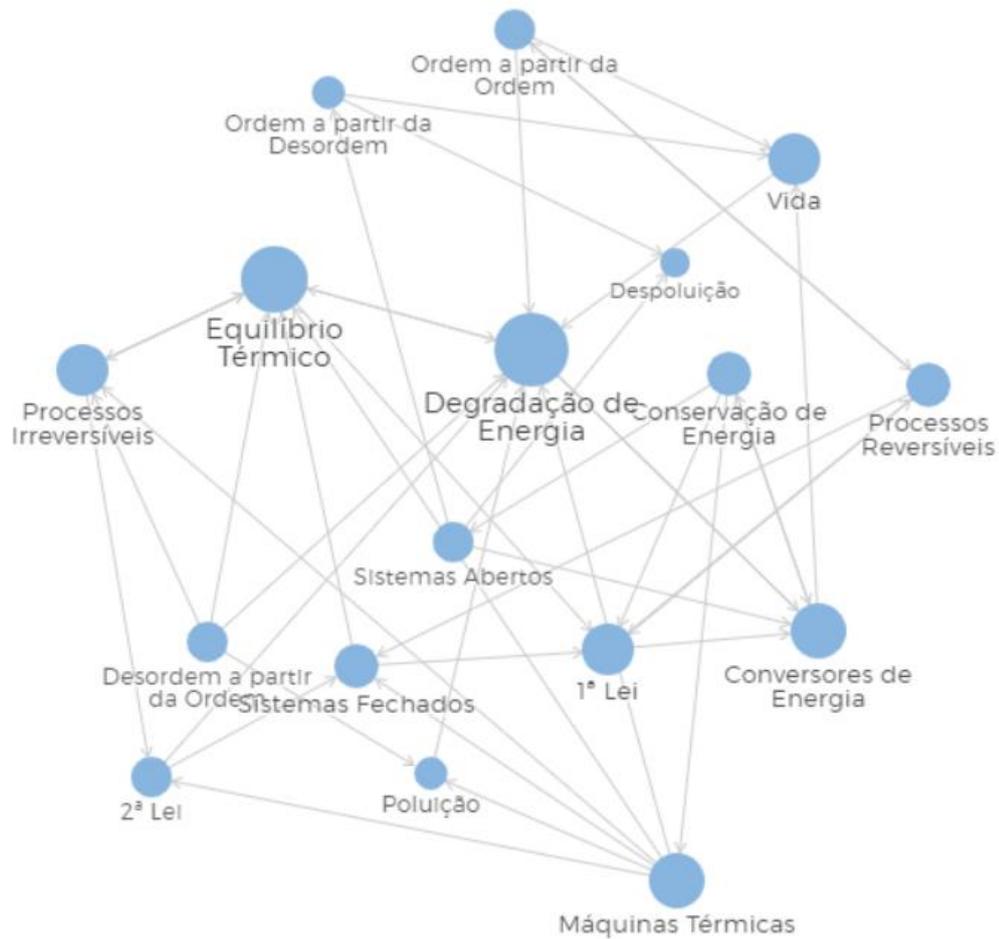
### Proposta de aulas: a entropia como saber complexo

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 suplantando 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, tal como já salientamos, 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 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. E foi com essa preocupação que no capítulo 3 tomamos o cuidado de identificar espaços possíveis nos LD.

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, neste capítulo propõe-se desenvolver o conceito de entropia de forma não sequencial, não linear. Para tanto, teceremos uma rede 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, dos 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, como vimos, no capítulo 1 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. A rede de conceitos (Figura 4.1) que se relacionam entre si uni ou bilateralmente surge a partir dos resultados dos capítulos 1 e 3.



**Figura 4.1** - Rede de conceitos relacionados à entropia<sup>2</sup>.

Fonte: autoria própria

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 4.1) e dos dados sistematizados no Quadro 3.3, optamos por tratar os seguintes elementos nas aulas propostas:

<sup>2</sup> 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.

Potencialidades	Conceitos - Rede	Questões orientadoras
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Olhar para os processos de transformação de energia em conversores em geral para identificar as transformações de energia envolvidas.</li> <li>- Diferenciar energia útil de energia não útil em situações cotidianas.</li> </ul>	1ª Lei, conservação de energia, conversores de energia, degradação de energia, processos irreversíveis,	<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>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tratar da crise dos conversores e do esgotamento das fontes de energia como forma de conscientização pelo uso racional de energia.</li> </ul>	Máquinas térmicas, equilíbrio térmico, conversores de energia, equilíbrio térmico.	<i>Quais transformações de energia estão presentes no seu dia a dia? O que acontece com a energia que não utilizamos? O modo como usamos energia afeta o meio ambiente? de que forma?</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 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.</li> <li>- relacionar a flecha do tempo com o aumento da entropia do Universo.</li> <li>- Abordar a poluição das águas e do ar, salientando o aumento da entropia e sua irreversibilidade.</li> </ul>	Processos reversíveis e irreversíveis, 2ª lei, sistemas fechados, sistemas abertos, degradação de energia, desordem a partir da ordem, poluição e despoluição.	<i>Como obter trabalho mecânico a partir de uma caldeira a vapor? Esse processo é reversível ou irreversível? Explique. De que forma pode-se incorporar o conceito de entropia nos processos reversíveis e irreversíveis?</i>

**Quadro 4.1:** Questões orientadoras vinculadas à rede de conceitos e as potencialidades no LD.  
Fonte: Autoria própria

#### 4.1 Uma proposta de aula sobre entropia

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 consideram-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.

A aula, em sua **primeira etapa de complexificação**, 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. Essa pergunta será central nessa proposta e retornará em outros dois momentos, permitindo ao(a) estudante respondê-la 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 texto<sup>3</sup>, que trata do funcionamento de uma bateria recarregável para ampliar as reflexões, pode trazer elementos para essa reflexão. O Apêndice 1 apresenta um esquema que pode ajudar a sistematizar o caminho percorrido pela energia.

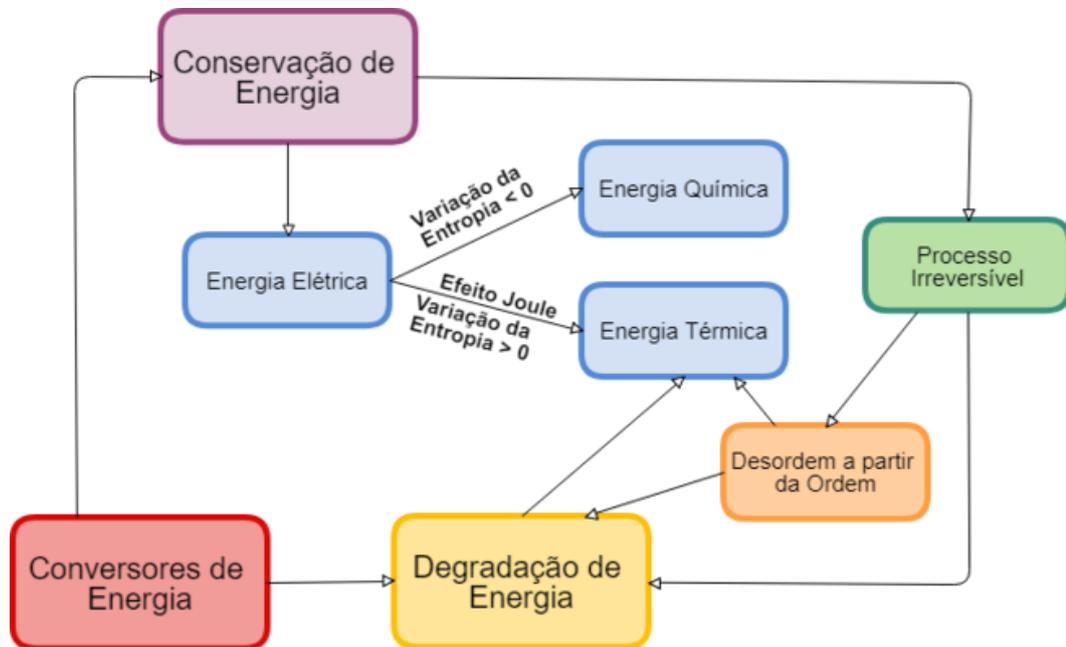
O carregamento da bateria do celular é apenas um exemplo que pode ser usado para essa problematização. O importante é trazer situações cotidianas, próximas à realidade dos(as) estudantes. Salienta-se que o intuito geral dessa atividade é tratar os conceitos de conservação de energia, “perdas”, transformações, custos, rendimento, eficiência e a degradação de energia (ainda que não seja explicitado dessa forma).

Nesta atividade o destaque está voltado para os conceitos de *Conservação de Energia*, *Conversores de Energia* e *Degradação de Energia*. A Figura 4.2 é um exemplo de como esses

---

<sup>3</sup> (<https://cienciaetecnologias.com/bateria-recarregavel-funcionamento/>)

conceitos podem se organizar, dando ênfase às transformações envolvidas e introduzindo o caráter da organização (baixa entropia) e da desordem (alta entropia).



**Figura 4.2:** Mapa de conceitos - 1ª Complexificação

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 4.2 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 o assunto das máquinas térmicas, desde a máquina de Newcomen até chegar no 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.

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.

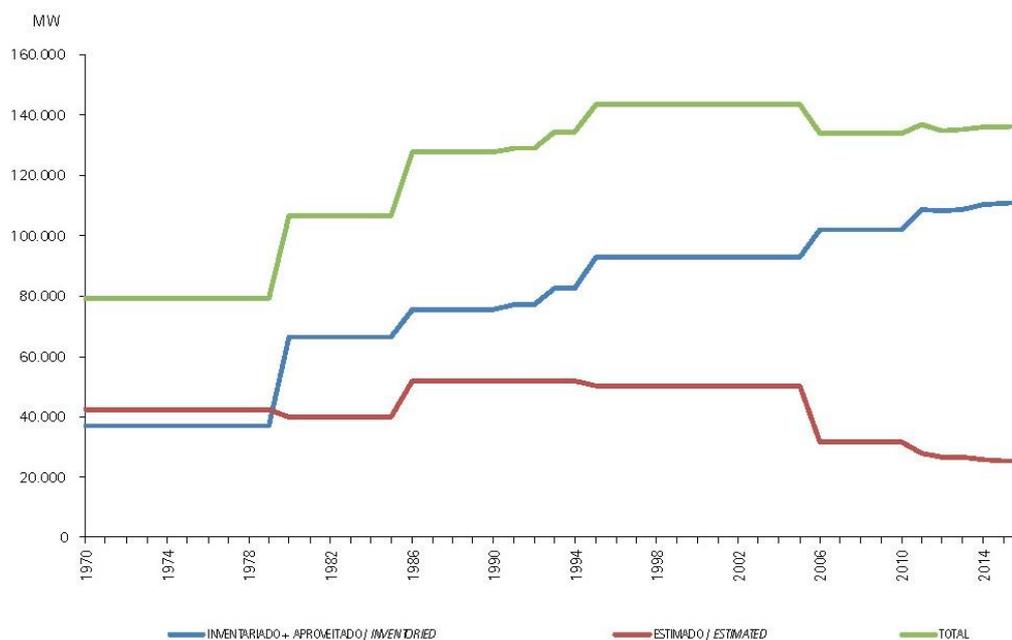
Ainda nesse contexto, a partir do Balanço Energético Nacional (BEN) (BRASIL, 2017), pode-se discutir os dados das tabelas e gráficos, possibilitando a ampliação das reflexões e debates. A Tabela 4.1 mostra os recursos hídricos do Brasil, tanto o inventariado + aproveitado, que “corresponde ao montante 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.

<i>ANO</i>	<i>INVENTARIADO + APROVEITADO</i>	<i>DISPONÍVEL</i>	<i>TOTAL</i>
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 4.1** - Recursos hidráulicos (Valores em MW).

Fonte: BEN 2017, editado.

A Tabela 4.1 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 4.1 permite melhor visualização desse possível esgotamento.

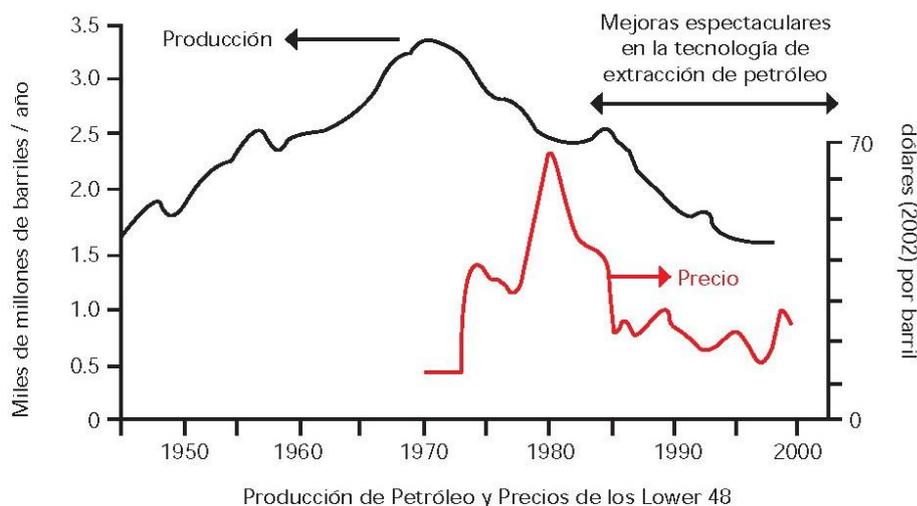


**Gráfico 4.1** - Potencial elétrico.

Fonte: BEN 2017.

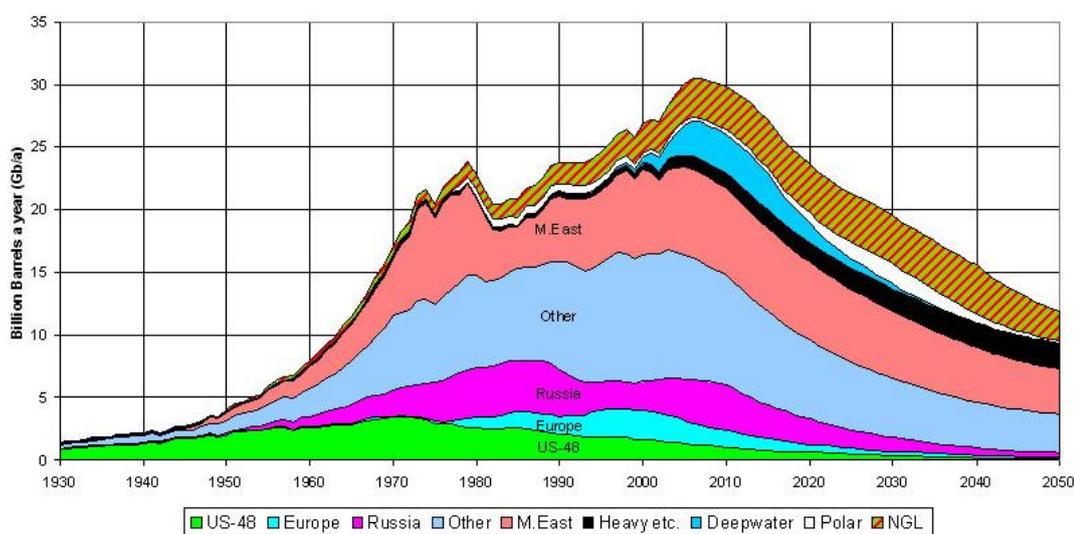
Em relação aos combustíveis fósseis<sup>4</sup>, em 1956, Marion King Hubbert, geofísico estadunidense, estimou que o pico de produção mundial de petróleo se daria em 50 anos enquanto que o de Texas e Estados Unidos ocorreria entre 1966 e 1971. Mesmo sabendo que os recursos não renováveis são finitos 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 4.2 e 4.3 mostram o ápice da produção de petróleo nos EUA em 1970 e, no mundo, por volta de 2005 (GARCÍA & BALLEENILLA, 2008).

<sup>4</sup> O blog “The Oil Crash” traz dados mais atualizados sobre a questão da escassez do petróleo.



**Gráfico 4.2** - Produção de petróleo nos EUA.

Fonte: García & Ballenilla, 2008.



**Gráfico 4.3** - Produção de petróleo mundial.

Fonte: García & Ballenilla, 2008.

O Gráfico 4.3 é composto por dados reais e projeções futuras, enquanto que o Gráfico 4.2 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 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** discute-se o conceito de irreversibilidade, 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. Como dito no **Capítulo 1**, 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 proposta consiste então em, a partir de alguns objetos dados, imaginar uma forma de obter trabalho mecânico. 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. As situações são apresentadas no Apêndice 3. Para contribuir com as discussões e reflexões propõe-se a leitura de um texto sobre reversibilidade e irreversibilidade (**Anexo 1**). 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?*

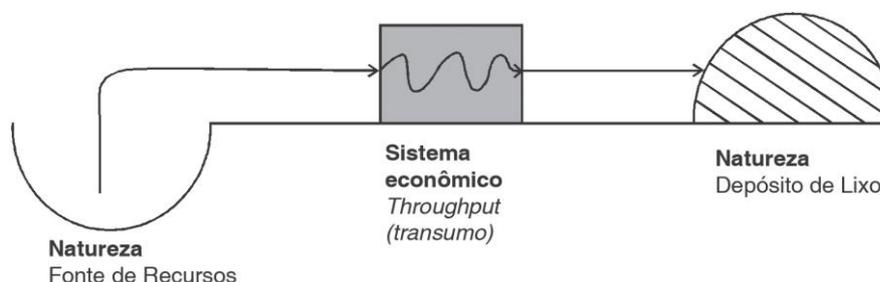
Ao longo dessa atividade pode-se evidenciar as limitações da 1ª lei da termodinâmica (conservação de energia), ao inverter o sentido de funcionamento do dispositivo criado. No caso da caldeira, não será possível fazer com que o trabalho mecânico retorne o vapor para dentro da mesma, tão pouco fazer com 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, todo o processo natural 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’”.

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.

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 4.3, que mostra, de forma esquemática e simplificada, a cadeia produtiva linear.



**Figura 4.3:** 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). 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.

## Capítulo 5

### As falas dos e das estudantes nas aulas sobre entropia: níveis de complexificação alcançados

Neste capítulo analisamos os dados coletados durante a aplicação da proposta de aula apresentada no **Capítulo 4**. A partir da ATD foram obtidas três categorias que correspondem a uma escala crescente do nível de complexidade identificado nas respostas coletadas. O nível de complexidade foi determinado a partir de palavras-chaves e ideias postas em seus contextos [ou seja, analisam-se as palavras no contexto das ideias expostas pelos(as) estudantes] que apontam para complexidade a partir de seus argumentos.

Os níveis de complexificação foram identificados em três momentos distintos da aplicação da proposta de aula, considerando as seguintes perguntas: É preciso economizar energia? Por quê? Ao todo foram coletadas 44 folhas de respostas sendo que 4 foram descartadas, pois os respectivos alunos não estavam presentes nas últimas aulas.

A partir dessas ações, três níveis de complexificação foram identificados, a saber: (i) **aspectos fatalistas** (primeiro nível): apoia-se em discursos de senso comum presentes no *mesocosmo* com tom fatalista, defendendo, por exemplo, que a economia de energia está vinculada estritamente ao fator econômico e ao esgotamento dos recursos naturais; (ii) **aspectos conservacionistas** (segundo nível): traz uma visão mais global (*macrocosmo*) apoiada em uma perspectiva conservacionista dando, por exemplo, enfoque na escassez dos recursos não renováveis e nos usos de energias renováveis como solução ao problema da energia; (iii) **aspectos relacionais e sistêmicos** (terceiro nível): apresenta uma percepção sobre as relações estabelecidas nos sistemas com foco no conhecimento científico escolar e, em menor grau, pauta-se em aspectos sociais, trazendo, por exemplo, explicação sobre a diferença entre conservação e degradação de energia ou usando o conceito de entropia para argumentar a questão da degradação e perda da capacidade de se obter trabalho a partir da energia (exergia).

Em (i) - **aspectos fatalistas** (primeiro nível) - encontramos argumentos que vão de encontro a uma visão fatalista sobre o uso da energia e o esgotamento dos recursos naturais do planeta. Há também menções à questões de ordem econômica, associando a economia de energia com seu preço o que nos leva a entender que a visão de energia restringe-se à energia elétrica. Nessa linha estão resposta como:

A1: “É preciso **economizar energia** porque a conta está ficando cada vez mais cara. ”

A4: “É preciso **economizar energia**, pois além de ser **caro**, os recursos naturais já estão **limitados**. ”

A5: “Sim, porque a energia que usamos é **finita**, conseqüentemente uma hora ela irá **acabar**, portanto devemos **economizar**. ”

A13: “**Economizar** energia é necessário devido ao impacto **ruim** da maioria das suas formas de produção no meio ambiente. ”

A22: “É preciso **economizar** energia, pois a energia **gasta** muitos recursos para ser produzida, na maioria das vezes poluindo o nosso planeta, além de também ser **cara** para se pagar. ”

A31: “[Sim] porque é um recurso **finito**, pois na sua produção em massa é desperdiçado ou mal utilizado diversos recursos naturais também finitos. ”

A35: “É preciso **economizar** energia, porque tudo que é feito em **excesso** acaba sendo **ruim**, ou seja, para que **gastar** mais energia do que o suficiente? **Economizar** é essencial, a energia deve ser tratada de maneira correta. ”

Os exemplos mostram que a energia é compreendida como sendo algo a ser consumido e que, portanto, deve ser economizada para evitar seu esgotamento. A preocupação de ordem financeira acompanha esse raciocínio pautado na economia de energia, assim como, a questão ambiental, mesmo de forma bem superficial, também é colocada como uma preocupação ao se utilizar a energia.

Outras respostas nos parecem avançar um pouco mais em relação a questão ambiental quando colocam a questão dos impactos ambientais como um dos motivos para se economizar energia, como podemos observar em A21 e A24:

A21: Sim. Além de ser necessário para não vir uma **conta** de luz exorbitante no fim do mês, existe o motivo sustentável: a maioria das formas de geração de energia causam algum tipo de **impacto** na natureza. ”

A24: “Sim, é necessário **economizar** energia porque além da conta sair mais **barata**, isso ajuda o planeta. Tudo aquilo que é produzido e extraído do planeta gera muitos impactos ambientais e se cada um **economizar** um pouco, uma grande quantidade de riquezas naturais pode ser preservada. ”

Em (ii) - **aspectos conservacionistas** (segundo nível) - nota-se preocupação em situar o problema da energia num contexto mais global, que deixa de ser apenas elétrica e, com isso,

dá-se importância a questão do esgotamento de recursos não renováveis. Permanece ainda a visão ingênua acerca do uso dos recursos renováveis em substituição aos recursos não renováveis. Para esse nível de complexidade os argumentos também se apoiam em elementos relacionados às transformações de energia que levam em consideração às perdas de energia ao longo das transformações. Para exemplificar transcrevemos alguns trechos de respostas a seguir.

A9: “É preciso economizar quase **todas as formas de energia**, pois os recursos utilizados para sua obtenção podem **não ser renováveis**, que, para muitos desses recursos, **ainda não há uma substituição encontrada, tão eficiente quanto**. Também é necessário ressaltar de que para chegar ao objetivo final ocorrem processos **prejudiciais ao meio ambiente**, por isso economizar e diminuir sua demanda pode auxiliar na **preservação do meio**. ”

A12: “Para mim, é preciso economizar as **energias não renováveis**, porque talvez elas sejam muito necessárias. Mas caso ocorra que essas energias se esgotem, as **energia renováveis (como o sol) seriam muito úteis**. As energias renováveis deveriam ser mais utilizadas para que as não renováveis não se esgotem. ”

A13: “Economizar energia é necessário devido ao **impacto ruim** da maioria das suas formas de produção no meio ambiente. Apesar de existirem **fontes de energia “limpa”**, elas não são tão **eficientes** quanto as mais poluentes. ”

A14: “Não, pois como a energia se renova **ela nunca irá acabar**, apenas não vai conseguir suprir nossas necessidades. Para isso não acontecer precisamos **innovar nas técnicas de extração de energia** ou achar novos meios de extração de energia de natural utilizando os ciclos de nosso planeta.”

A39: “Em meio a **novas técnicas de produção de energia** como energia eólica e solar que causam menores impactos ambientais seria viável pensar em descartar a necessidade de economizar, porém deve-se pensar que para a produção destas novas técnicas de obtenção de energia, são gastos inúmeros materiais que **impactam** o nosso meio, por isso acredito que sim deve haver economia de energia, pois como respondido da primeira vez todo o uso em excesso causa impactos, e não é diferente com a energia. ”

A40: “É importante **poupar energia** porque ela provém de recursos naturais que em sua maioria são **não renováveis**. Cabe a nós enquanto sociedade e indivíduos buscarmos formas de atenuar o inevitável **impacto** que nossa existência provoca na natureza.

É possível notar, nessas respostas, uma visão mais ampliada dos tipos de energia que consumimos, mas ainda permanece o foco na energia elétrica e os meios de se obtê-la. Nota-se uma preocupação com as fontes de energia não renováveis e os diversos impactos do uso excessivo dessas fontes. Em muitas respostas, as fontes renováveis se apresentam como uma possível solução para a “falta” de energia e para a conservação do meio ambiente.

Em (iii) - **aspectos relacionais e sistêmicos** (terceiro nível) - se destacam as respostas que incorporaram os conceitos de energia útil, perdas, degradação da energia, rendimento e entropia vinculando-a à ideia diminuição da energia útil disponível. Também foi possível identificar a relação entre o equilíbrio térmico com a máxima entropia e, conseqüentemente, a incapacidade de se obter trabalho. Observamos que o foco das respostas se deslocou em direção à perda de qualidade da energia sem abandonar a ideia de conservação da energia. As respostas que podem exemplificar esse nível de complexidade são:

A8: “Sim, pois como os sistemas tendem ao **equilíbrio (alta entropia)**, em algum momento faltará **energia útil**, encontrada em sistemas com **baixa entropia**, por exemplo em um sistema formado por uma caneca com líquido quente e outra com líquido frio, haverá a troca de calor, porém quando os dois recipientes **equilibram** suas temperaturas, não há mais **energia útil** no sistema.”

A10: “A energia deve ser economizada, pois apesar de a energia se **conservar** e não poder ser criada ou destruída, ela se transforma e durante essas transformações há uma tendência de ela se **equilibrar**, deixando de ser **útil** e atingido um nível mais elevado de **entropia**. Devido o fato de a entropia não poder ser invertida, deve-se economizar energia.”

A13: “Economizar energia é necessário, mesmo que ela se conserve e transforme, há **perdas** dela onde não conseguimos repor (**térmica por exemplo**). Além disso, os **meios** usados para a produção de energia, em sua maioria, são **poluentes** visto que as fontes de energia limpa não são tão **eficientes** quanto as outras.”

A17: “Sim, acredito que a energia precise ser economizada, mesmo que ela se transforme e nunca desapareça, algumas **perdas** se tornam **irreversíveis**. Além de que para gerar energia **desgasta recursos** e paisagens naturais, e isso aumentaria proporcionalmente a uma maior **demand energética** urbana.”

A21: “Sim. Apesar de que a **energia não vai sumir** do ambiente se for “gasta”, ela vai se **transformar em calor (energia térmica)** e vai ser difícil conseguir convertê-la novamente para voltar a ter **utilidade...**”

A28: “Sim, porque apesar de a **energia nunca ser perdida**, ela pode se **transformar** em um tipo de **energia inútil, em um processo irreversível.**”

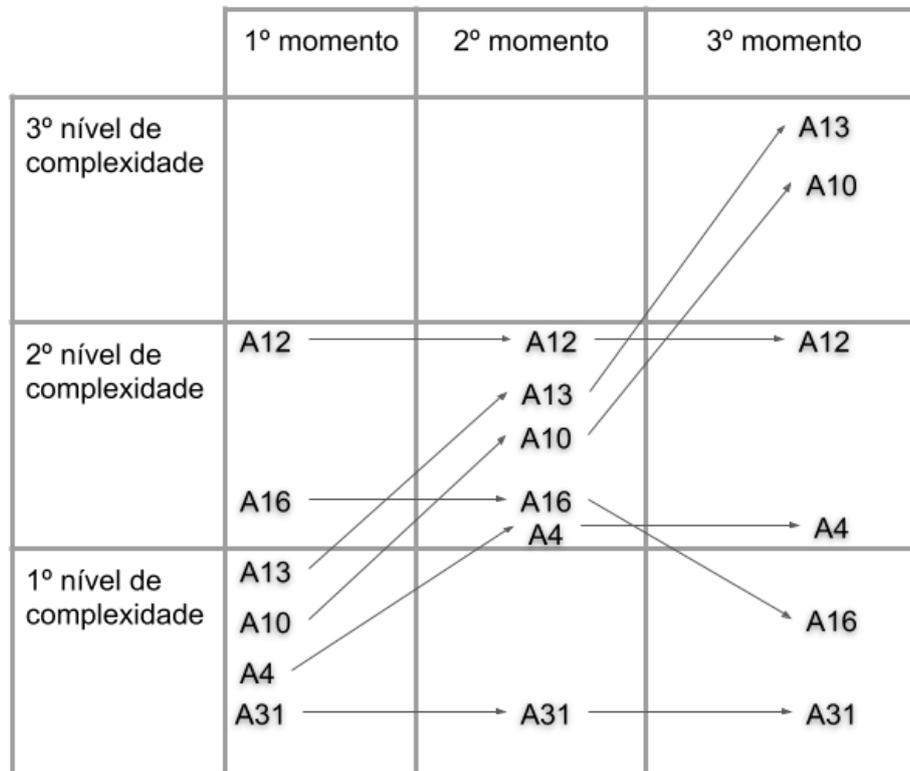
A29: “Sim, porque a energia utilizada vai se virar térmica e entrar em **equilíbrio (entropia máxima)** e assim, temos que economizar.”

A32: “Ao longo do tempo, a energia vai sendo utilizada e **degradando**. Assim, muda-se o grau de complexidade dessa energia. Ela continua lá, a **energia não diminui em quantidade, mas diminui em complexidade**, dessa forma, a quantidade de **energia útil** para nós diminui também.”

A37: “É necessário economizar, pois, mesmo que ela se **consERVE** em outras formas, muitas delas não serão **úteis**, já que se encontrarão em estado de **entropia**, ou seja, **desordem**”

Esse nível de complexificação apresenta uma visão mais sistêmica da energia no momento em que se colocam outras relações para além de questões de ordem financeira e ambiental. Surge a preocupação sobre a qualidade da energia em substituição à conservação de energia puramente dita. O conceito de entropia já se mostra presente em algumas falas, mesmo que, em alguns casos, não estejam explicitamente verbalizada. Muitos conceitos de física começam a ser incorporados nos pensamentos e nas falas, tais como: irreversibilidade, energia útil, energia degradada, energia térmica, rendimento, entropia, equilíbrio térmico.

A partir dessas respostas foi possível identificar, ainda que preliminarmente, as trajetórias de alguns sujeitos da pesquisa, apontando os seus níveis de formulação (García, 1998a; Rodríguez-Marín, 2014; Carvalho 2016), bem como, suas idas e vindas dentro desses níveis.



**Figura 5.1:** Exemplo de evolução do nível de complexidade de alguns alunos(as).

Fonte: Autoria própria.

As respostas de A10 e A13 são exemplos de aumento contínuo no grau de complexificação do conhecimento ao longo da proposta de aula. Suas respostas incorporaram elementos da física para defenderem seus argumentos e se posicionarem frente a questão sugerida. Por outro lado A31 e A12 não modificaram significativamente suas respostas nos três momentos solicitados. Em especial A31 não conseguiu avançar além daquilo que classificamos como senso comum ou *mesocosmos*. Já A16 acabou por diminuir o grau de complexificação da sua resposta ao longo da proposta de aula apresentada.

Essa breve análise apenas traz alguns elementos que podem justificar, ainda que de forma preliminar, a característica complexa e pouco linear da aprendizagem.

## Considerações finais

Nesta dissertação buscou-se entender e discutir a complexidade como elemento estruturante na escolha de conteúdos capazes de romper com o paradigma simplificador, que encontra terreno fértil no currículo do Ensino Médio (EM), pautado na dissociação dos saberes em disciplinas que pouco dialogam entre si. Para tanto, num primeiro momento, procuramos conhecer alguns referenciais teóricos que viessem de encontro às nossas aspirações e que pudessem elucidar nossas inquietações. Desse modo, optamos por considerar as ideias de Morin (2007) que aponta que o paradigma simplificador leva a uma visão fragmentada da realidade, em especial dos problemas sociais; e García (1988, 1998b, 2005) que considera que o conhecimento escolar possui natureza própria, não se resumindo a uma simples transposição do conhecimento científico, e defende que a complexificação do conhecimento escolar (tendo a educação ambiental um forte apelo para isso) como um caminho para promover a transição para o pensamento complexo.

Num segundo momento analisamos alguns livros didáticos (LD) com a intenção de analisar a forma como os conceitos de entropia e energia são organizados e apresentados na escola básica. Isso nos permitiu encontrar espaços para abordar os conceitos de conservação de energia e entropia de forma mais orgânica e menos compartimentada.

Num terceiro momento fizemos um resgate histórico da física térmica, começando com a natureza do calor (corpúsculo/energia), passando pela influência da conservação de energia advinda da mecânica e da construção das máquinas térmicas até chegar na ideia de irreversibilidade que afasta a termodinâmica da mecânica clássica e faz surgir o conceito de entropia em suas diversas interpretações.

Por fim elaboramos uma proposta didática que viesse ao encontro das nossas intenções em relação a um ensino mais complexo, que pudesse ampliar os conceitos da física para outras áreas do conhecimento, tais como de ordem social, ambiental, econômica e política. A análise da proposta de aula que foi aplicada em duas turmas de terceiro ano do EM também foi objeto desse trabalho de pesquisa no sentido que foi sendo alterada no transcorrer da sua aplicação.

Salienta-se que a elaboração da proposta de aula exigiu uma abordagem diferente daquelas encontradas comumente nos LD. Esta abordagem teve que levar em consideração a complexificação do conhecimento escolar e contemplar os interesses dos(as) alunos(as). As escolhas dos temas, dos textos, das atividades e das perguntas em cada etapa da proposta

foram desafiadores, pois representaram uma visão de mundo, um posicionamento frente ao ensino e seus objetivos dentro da sociedade que vivemos e esperamos formar para o futuro.

A nossa proposta de aula teve como pergunta central: *É preciso economizar energia? Por quê?* A intenção foi promover uma visão sistêmica do tema energia, para ir além da questão da conservação, possibilitando a discussão da qualidade da energia a partir de uma visão entrópica. A entropia, assim, surge como um complemento à questão energética e permite enxergar os limites das transformações daquilo que é abstrato e ao mesmo tempo essencial à vida, a energia.

A construção da proposta de aula a partir de um tema central, que foi sendo enriquecido de modo a promover um ensino mais complexificado, foi analisada a partir da ATD, em que se buscou olhar para as respostas, dadas à questão central, em três momentos distintos. A análise dessas respostas visou compreender a forma como os conteúdos foram assimilados e se houve uma complexificação ao longo das aulas. É importante destacar que esses alunos e alunas sempre foram expostos, cobrados e avaliados dentro de uma estrutura curricular rígida, fechada e positivista, no qual a simples transmissão do conhecimento é tido como suficiente para promover sua formação escolar.

Ao olharmos para a questão do ensino, entendemos que uma proposta de aula que consiga, a partir de um tema central, incorporar diversos elementos de modo a privilegiar as relações entre conceitos e também reconectar diferentes áreas do saber, estará alinhada com a transição para o paradigma da complexidade. Para Morin (2007), os alunos e as alunas, quando submetidos a discussões pautadas por questões abertas são levados a formularem respostas utilizando-se de diferentes visões, relacionando-as de modo a se posicionarem frente a questão apresentada, o que, em resumo, se aproxima do próprio pensamento complexo.

Em suma, os resultados dessa pesquisa apontam para a necessidade de se repensar a forma como os conteúdos são abordados pela escola, entendendo que a simples transmissão de conhecimento sem a devida sistematização e conexão com outras áreas do saber, empobrece o debate e enfraquece o conhecimento escolar que fica submetido ao conhecimento escolar científico. Além disso, notou-se que uma proposta de aulas complexificada que discuta os conceitos em diversos contextos (no nosso caso tratando a entropia/energia em um contexto socioambiental) dá margem para que os e as estudantes construam respostas mais complexas e com significados para si, relacionadas com outros objetos de conhecimento.

Para nós, essa pesquisa não se esgota aqui. A discussão apontada no final do item anterior mostra umas das aberturas para o aprofundamento da temática aqui iniciada. Assim,

por exemplo, a forma que o(a) estudante aprende deve ser respeitada a fim de se oportunizar espaços democráticos de aprendizagens mais complexas; espaços que formem sujeitos mais críticos e conscientes como já apontava Freire (1977).

Para finalizar, espera-se que esse trabalho contribua para um maior entendimento do ensino e das potencialidades de abordagem, mesmo considerando um currículo mais rígido é possível promover a complexificação do conhecimento, aproximando-o de temas de interesse socioambiental capazes de proporcionar reflexões mais profundas e transformadoras.

## Anexo 1

### Processos Irreversíveis e leis da termodinâmica

Texto extraído de COVOLAN, S. C. T., SILVA, D. da, 2005.

Os processos irreversíveis são aqueles que possuem um sentido preferencial no tempo, não havendo meios de serem executados “de trás para frente”. Quando um mergulhador pula em uma piscina, sua energia de movimento (energia cinética) é convertida em calor, aquecendo a água. O processo é irreversível, pois o resfriamento da água não é capaz de fazer com que o mergulhador volte ao trampolim. Também é irreversível o resfriamento de uma xícara de café ou a queima de lenha em uma lareira. Seria possível observar a fumaça voltando pela chaminé, enquanto a sala se resfria e a lenha sendo reconstituída a partir das cinzas?

Podemos citar uma série de processos como esses: copos que se quebram ao cair no chão, pilhas de lanterna que se descarregam, gelo que derrete no copo de refrigerante, enfim. E o que todos eles têm em comum? Eles só ocorrem espontaneamente em um sentido. Estes processos, no entanto, poderiam acontecer nos dois sentidos, sem contrariar a *1ª Lei da Termodinâmica*, isto é, sem violar o princípio da conservação da energia. Este princípio foi enunciado primeiramente por Julius F. Mayer (1814 – 1878) sob a seguinte forma:

Quando uma quantidade de energia de qualquer natureza desaparece numa transformação, então se produz uma quantidade igual em grandeza de uma energia de outra natureza. (Gilbert, p. 234, 1982)

Se, no processo do movimento mecânico, a energia do corpo diminui devido à ação das forças de atrito (por exemplo, um tijolo deslizando sobre uma superfície), isso ocorre porque esta se transforma em calor; os corpos que se atritam se aquecem. Transforma-se em calor a energia elétrica, a energia da luz, a energia das reações químicas etc. Qualquer forma de energia, no processo de transformação, pode passar através de muitas formas de energia, contudo, o resultado final de todas essas transformações inevitáveis é a energia térmica. Embora, de acordo com a *1ª Lei*, a energia seja conservada enquanto ocorrem as transformações, *ela perde a sua utilidade à medida que o calor se difunde pelo ambiente.*

Veja, por exemplo, o caso das canecas com o mesmo volume de água, mas com temperatura diferentes (20 °C e 80 °C): uma certa quantidade de energia térmica (calor) passa da água mais quente (a 80°C), para a outra mais fria (a 20°C) até que ambas se encontrem à mesma temperatura (50°C), isto é, até que atinjam o equilíbrio térmico. Como o calor cedido por uma caneca foi recebido pela outra, garante-se aí a conservação da energia. No entanto, não há como reverter espontaneamente esse processo. A energia trocada entre as canecas, na forma de calor, não pode ser colocada em uso novamente, tornando-se irreversível.

A 2ª Lei da Termodinâmica expressa um sentido para os processos naturais espontâneos. Existem algumas formas diferentes de se enunciar esta Lei e uma delas, apresentada em meados do século XIX, por Rudolf Clausius (1822 – 1888) em um trabalho publicado em 1850, dizia ser impossível haver transferência espontânea de calor de um objeto frio para outro mais quente. Nas palavras do próprio Clausius:

O calor não pode nunca passar de um corpo mais frio para um corpo mais quente, sem que ocorram mudanças associadas. Tudo o que sabemos em relação às trocas de calor entre dois corpos de temperaturas diferentes confirma isso, pois o calor em toda parte manifesta uma tendência em igualar diferenças de temperatura e conseqüentemente, em passar numa direção contrária, isto é, do corpo mais quente para o mais frio. (“From Watt to Clausius”, 1971, *apud*. Aurani, 1986)

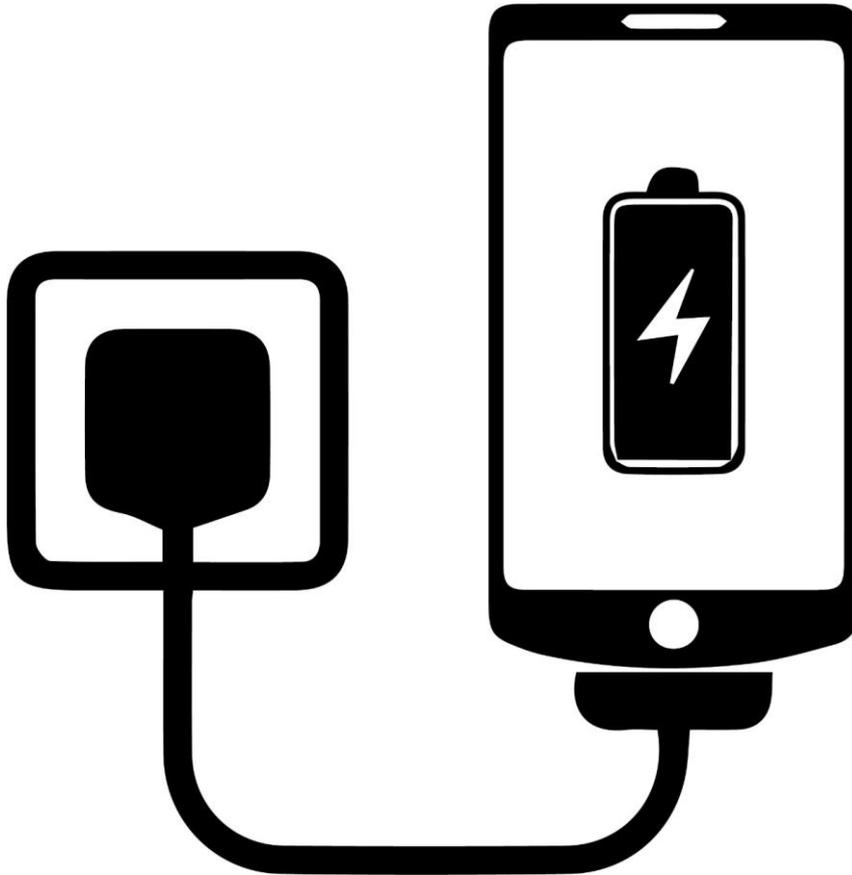
Observe a condição “espontânea”. Em sua geladeira, por exemplo, a todo instante, calor é transferido dos tubos em seu interior (no congelador), à sua vizinhança (cozinha), necessitando, para isto, que o refrigerador esteja ligado à tomada e funcionando, ou seja, consumindo energia elétrica. Sendo assim, o processo não é espontâneo, mas sim induzido. Da mesma forma, retornando ao exemplo das canecas com água, ambas a 50°C, seria necessária uma “contribuição externa”, uma “dose de energia” para que estas voltassem à condição inicial de 80°C e 20°C. Uma delas deveria receber energia térmica (calor) de uma fonte externa, enquanto a outra deveria perder energia térmica até que sua temperatura voltasse a ser 20°C.

Como saber se um processo viola ou não a 2ª Lei da Termodinâmica? Em outras palavras: como decidir se esse processo está na mão certa e é um processo natural ou não? Clausius, em 1865, distinguiu processos reversíveis de processos *irreversíveis* e introduziu o conceito de *entropia*: uma grandeza que aumenta com a dissipação e atinge o seu valor

máximo, quando todo o potencial de transformação da energia está esgotado. Sendo assim, todo processo que ocorre naturalmente deve ser acompanhado de um aumento de entropia.

## Apêndice 1

### O caminho da energia ao se carregar a bateria de um celular



## Apêndice 2

### As energias em nosso cotidiano

A tabela abaixo pode ser utilizada como forma de melhor organizar as ideias dos(as) estudantes durante a atividade 2 da proposta de aulas.

	Transformações envolvidas	Energias não utilizadas
Dispositivos eletrônicos		
Eletrodomésticos e máquinas em geral		
Meios de transportes		
Usinas de transformação de energia		

## Apêndice 3

### Dispositivos de conversão de energia

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.

2º 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 Michaelis<sup>5</sup> caldeira é: recipiente metálico de qualquer tamanho para aquecer qualquer líquido, produzir vapor, cozinhar alimentos etc.



**Figura 1:** Caldeira a vapor

Fonte: <http://www.asintsol.com/imagens/Central-de-vapor/Caldeiras/10103.png>

---

<sup>5</sup> <http://michaelis.uol.com.br>

## Apêndice 4

### Transcrição das respostas dos alunos(as)

	1º momento	2º momento	3º momento
A1	É preciso economizar energia porque a conta está ficando cada vez mais cara	Além da conta estar ficando cara, eu acho que é bom economizar energia para não diminuir mais rápido as “descargas” dos elétrons, que por causa disso pode fazer os elétrons realizarem o mesmo trabalho produzindo menos carga (bateria de celular). Mas eu acredito que se no caso fosse usado energia solar, não necessitaria economizar energia.	Existem vários tipos de energia, sobre a questão elétrica eu continuo com a mesma opinião. Sobre a questão sobre entropia e a “energia” usada em todos os processos feitos pelo universo, eu acredito que não exista um meio de esse tipo de energia ser economizada, pelo simples fato de que a cada “etapa” essa energia só é utilizada em uma quantidade menor do que no processo anterior.
A2	Não estava presente no dia	Sim, pois existem tipos de energia que provém de recursos não renováveis, assim sendo necessário o uso controlado e consciente para poder economizar.	Dentro das novas informações adquiridas a energia supostamente não acaba, mas também pode acabar, tudo depende da fonte, no entanto para mim é relativo
A3	Não estava presente no dia	Devemos economizar energia porque além de diminuir o gasto no final do mês, ajudamos o planeta. Por exemplo as hidrelétricas que funcionam com geradores que são movimentados pela liberação de água, isso desequilibra ecossistemas e ocupam terras que poderiam ser mais produtivas e os recursos naturais são limitados.	Sim, pois a energia se conserva e se o Sol sumir todos nós morreremos pois ficamos sem comida e os rios podem congelar.
A4	É preciso economizar energia, pois além de ser caro, os recursos naturais já estão limitados.	É preciso economizar energia, pois os recursos naturais estão limitados e caso haja um enorme gasto e os recursos esgotarem, eles podem recorrer a meios mais poluentes para produzir energias, sem contar que a energia é cara, então seria prejudicial.	É preciso economizar energia, mesmo que ela se conserve, pois algum dia os recursos de fonte de energia podem acabar.
A5	Sim, porque a energia que nós usamos é finita, consequentemente uma hora ela irá acabar, portanto devemos economizar.	Sim, é preciso economizar energia, pois a capacidade da Terra de se regenerar é um processo mais lento do que a capacidade dos seres vivos, que nela vivem, utilizarem a energia	Sim, devemos economizar, mesmo tendo fontes sustentáveis de energia, porque a capacidade do planeta de se regenerar demora mais do que os seres vivos gastam.

		que tem disponível no planeta.	
A6	Depende da situação, porque há muitos casos que o consumo excessivo de energia é necessário, como em empresas e indústrias onde suas máquinas funcionam com eletricidade, e para produzir produtos é quase que obrigatório gastar energia em excesso. Já em moradias as pessoas costumam gastar menos energia para pagar menos também e assim ajuda com o meio ambiente também.	É preciso economizar energia sim. Pois quando você economiza você está reduzindo sua conta de luz, e poupando um gasto de energia desnecessário, e com essa diferença de custo pode se usar para outras coisas e ainda contribui para o meio ambiente.	A energia é um meio que sempre existirá enquanto houver sol e por isso não é tão importante o seu consumo pois talvez a humanidade não irá existir quando todas as fontes se esgotarem.
A7	Sim, pois economizando energia prejudica menos o meio ambiente, sendo nossa fonte de energia principal as hidrelétricas, no Brasil. Nós também podemos gerar um número limitado de energia, por isso mesmo tendo fontes sustentáveis devemos economizar.	Nós podemos gerar um número limitado de energia, por isso, mesmo tendo fontes sustentáveis de energia, devemos economizar	Devemos economizar energia, pois podemos usar uma quantidade limitada de energia.
A8	Não estava presente no dia	Sim, pois durante os processos de transformação de energia, parte dela é perdida, se tornando uma forma de energia que não será utilizada, geralmente na forma de energia térmica. Portanto, ao ter parte da energia convertida em algo “inútil”, os gastos com energia serão maiores e a necessidade de produção dela também. O problema com esse ciclo é que se pensarmos em energia como algo que não é criado, nem destruído, mas sim transformado, a produção de energia para compensar as perdas pode se tornar algo inviável em algum momento.	Sim, pois como os sistemas tendem ao equilíbrio (alta entropia), em algum momento faltará energia útil, encontrada em sistemas com baixa entropia, por exemplo em um sistema formado por uma caneca com líquido quente e outra com líquido frio, haverá a troca de calor, porém quando os dois recipientes equilibram suas temperaturas, não há mais energia útil no sistema.
A9	É preciso economizar quase todas as formas de energia, pois os recursos utilizados para sua obtenção podem não ser renováveis, que, para muitos desses recursos, ainda não há uma substituição encontrada, tão eficiente quanto. Também é necessário ressaltar de que para chegar ao objetivo final ocorrem processos prejudiciais ao meio ambiente, por isso economizar e diminuir sua demanda pode	Por mais que seja um assunto complexo e abrangente, ainda considero que algumas energias devem ser economizadas, pelo seu impacto, durante sua obtenção em sua forma útil. Porém há outros tipos, como térmica, que não acho que seja válido, já que não apresenta grandes aplicações, ou muita capacidade de armazenamento, em nosso cotidiano, tanto quanto outras, por exemplo	

	auxiliar na preservação do meio.	hidrelétrica.	
A10	Depende do tipo de energia em questão. Por exemplo a energia elétrica proveniente de fontes não renováveis deve-se economizar para que essas fontes não se esgotem. Porém, a palavra energia é um conceito muito abrangente e há tipos de energia que não se é necessário economizar.	A energia deve ser economizada porque as formas de obtê-la de maneira que essa energia seja útil para nós é cara e agride o meio ambiente de alguma forma. Sem contar que a porcentagem de energia útil proveniente de processos que a transformam é muito baixa.	A energia deve ser economizada, pois apesar de a energia se conservar e não poder ser criada ou destruída, ela se transforma e durante essas transformações há uma tendência de ela se equilibrar, deixando de ser útil e atingido um nível mais elevado de entropia. Devido o fato de a entropia não poder ser invertida, deve-se economizar energia.
A11	Não estava presente no dia	Sim é preciso poupar energia pois a energia precisa de tempo para se renovar. Se há muito gasto não há muito tempo para ela se renovar.	Economizar ou não, não faz diferença pois a energia depende de uma série de fatores (sol recursos finitos) e é com isso que deve-se preocupar e utilizar conscientemente.
A12	Eu acho que é necessário economizar energia, principalmente as que provém da natureza e não são renováveis (como o gás natural, o petróleo etc), se algumas dessas fontes se esgotarem, a vida daqui a muito tempo será “difícil”, pois algumas dessas energias podem se tornar necessária para nossa sobrevivência.	Para mim, é preciso economizar as energias não renováveis, porque talvez elas sejam muito necessárias. Mas caso ocorra que essas energias se esgotem, as energia renováveis (como o sol) seriam muito úteis. As energias renováveis deveriam ser mais utilizadas para que as não renováveis não se esgotem.	Se a energia for conservada, ela não será utilizada 100%, então tanto faz se a energia for economizada ou não (o único problema em não economizar é que os recursos naturais serão utilizados em grande escala).
A13	Economizar energia é necessário devido ao impacto ruim da maioria das suas formas de produção no meio ambiente. Apesar de existirem fontes de energia “limpa”, elas não são tão eficientes quanto as mais poluentes.	Economizar energia é necessário, mesmo que ela se conserve e transforme, há perdas dela onde não conseguimos repor (térmica por exemplo). Além disso, os meios usados para a produção de energia, em sua maioria, são poluentes visto que as fontes de energia limpa não são tão eficientes quanto as outras.	Apesar da energia ter a tendência a se conservar, nós não conseguimos aproveitá-la por inteiro, pois algumas de suas formas tendem a entrar em equilíbrio, como a térmica por exemplo. Sendo assim, economizar energia é necessário apenas no quesito de preservar o meio ambiente, visto que a maioria das fontes mais eficientes são poluentes.
A14	Sim, pois economizando energia você acaba não prejudicando o meio ambiente, e também diminuirá sua conta de energia.	Sim, pois você pode prejudicar menos o ambiente, assim preservando os recursos naturais para outras funções mais importantes para nossa sobrevivência, mas não adianta nada somente uma pessoa economizar e as outras não, para ter um retorno positivo de não prejudicar o meio ambiente	Não, pois como a energia se renova ela nunca irá acabar, apenas não vai conseguir suprir nossas necessidades. Para isso não acontecer precisamos inovar nas técnicas de extração de energia ou achar novos meios de extração de energia de natural utilizando os ciclos de nosso planeta.

		todas as pessoas devem entender que economizar é algo extremamente importante.	
A15	Sim, é preciso. Pois as fontes de energia não são infinitas, com o aumento da população mundial, consequentemente aumentará o uso de energia, então se não souber usar conscientemente, corre o risco de alguma hora essa energia acabar.	Sim, é preciso. Apesar de existirem algumas fontes de energia que são praticamente inesgotáveis, como a água, o sol, o vento, correm o risco de se esgotar, e a produção de energia em uma usina hidrelétrica, por exemplo, gera muitos impactos no meio ambiente, então quanto mais energia precisar produzir, maior o impacto na natureza.	Não, não é preciso. A energia é algo renovável, ao utilizar uma energia, outra irá se “formar”, sendo assim não irá se esgotar, só se tornará mais difícil de obter, porém deve ser sempre usada com sabedoria.
A16	Sim, pois essa energia dependendo de sua fonte não será renovável (ou limpa), portanto o consumo deve ser diminuído.	Sim é preciso economizar energia, principalmente se o meio de obter essa energia for um método não renovável ou que precise de uma grande quantidade de tempo para que se restaure. Pode ser citado a energia gerada pelo petróleo.	Não, pois a energia vai se renovar e será suficiente para suprir as necessidades diárias.
A17	Não estava presente no dia	Sim, acredito que a energia precise ser economizada, mesmo que ela se transforme e nunca desapareça, algumas perdas se tornam irreversíveis. Além de que para gerar energia desgasta recursos e paisagens naturais, e isso aumentaria proporcionalmente a uma maior demanda energética urbana.	Continuo achando que sim pois muitos processos utilizados na produção são irreversíveis.
A18	Sim, porque algumas fontes de energia que usamos não são renováveis então é necessário fazer bom uso dela e tentar economizar para continuarmos tendo no futuro.	A resposta continua a mesmo e mais reforçada pois tem transformações de energia que ao serem aquecidas não dá para reutilizá-la, então, sim, é necessário economizar.	A resposta prevalece e que é importante ter essa diferença de energia.
A19	Depende. Se estamos falando de energia que iriam se esgotar, como é o gás natural ou o petróleo, devemos usá-las menos ou tentar substituí-las por outras. É aí que entram as energias renováveis que são, de certa forma, inesgotáveis e que são limpas, como por exemplo, a energia solar, a eólica, a das marés.	Sim, apesar de termos as fontes de energia renováveis, que são de certa forma “ilimitado”, é sempre bom fazer um uso consciente das coisas, afinal, talvez elas não sejam totalmente ilimitadas, porque eu acredito que tudo tem um limite.	Não mudei minha opinião, ainda acho que temos que economizar energia porque tudo tem um limite.
A20	É preciso economizar energia para evitar gastos desnecessários com luz, televisão e aparelhos eletrônicos	Sim, é necessário economizar energia pois o dano ambiental que ocorre quando uma usina elétrica ou alguma forma de	Sim é necessário economizar energia pois o consumo que estamos fazendo está chegando cada vez mais perto do total

	em geral. E para as usinas elétricas de todos os tipos serem feitas, a degradação de ambiente é muito grande, sendo por queimas, rios inundados ou poluição tanto no ar como no solo.	gerar energia é construída é muito grande, gerando desde o desmatamento, até enchentes em rios. E dessa forma a terra e a natureza não conseguirá se renovar.	que temos disponível, e se o que consumimos for o mesmo número que o total a energia irá ser difícil de se conseguir. Nossa energia deve ser usada com sabedoria e sabiamente até acharmos uma energia limpa e renovável.
A21	Sim. Além de ser necessário para não vir uma conta de luz exorbitante no fim do mês, existe o motivo sustentável: a maioria das formas de geração de energia causam algum tipo de impacto na natureza*. Quanto mais energia for necessária, mais usinas serão construídas e maior será o possível impacto. Ex: Usina hidrelétrica => mais usinas para abastecer a população => mais áreas alagadas. Usina nuclear => mais usinas => maior risco de um acidente nuclear. *produzir os instrumentos que captam energia também polui.	Sim. Apesar de que a energia não vai sumir do ambiente se for “gasta”, ela vai se transformar em calor (energia térmica) e vai ser difícil conseguir convertê-la novamente para voltar a ter utilidade. Nem sei se é possível recuperar a energia térmica do ambiente. Por isso, é preciso, sim, economizá-la, porque já foi convertida e desperdiçá-la implicaria em ter que usar outros recursos (a maioria não renováveis) para convertê-la novamente.	Sim. A energia que a gente gasta é a energia útil. Depois que usamos parte dela se converte em ruído e calor e é “perdida” porque fica inútil para nós. Se desperdiçarmos, teremos que “produzir” mais energia útil, e como o consumo continua aumentando e a população mundial também, em algum momento, todo potencial para converter em energia útil estará sendo usado, ou pelo menos grande parte dele. E também tem o fato que, para a energia ser convertida em alguma forma que possa ser utilizada, vários recursos naturais são usados.
A22	É preciso economizar energia, pois a energia gasta muitos recursos para ser produzida, na maioria das vezes poluindo nosso planeta, além de também ser cara para se pagar.	É preciso economizar energia, pois a energia gasta muitos recursos para ser produzida, na maioria das vezes poluindo nosso planeta, além de também ser cara para se pagar.	É preciso economizar energia, pois a energia gasta muito recursos para ser produzida, e depois de produzida, essa energia não pode voltar a ser o que era (facilmente).
A23	Sim, é preciso economizar luz para não gastar a toa os recursos naturais do planeta, e energia elétrica para não gastar dinheiro.	Sim, é preciso economizar a energia, ela não acaba mas se transforma, causando dano ao nosso planeta e sociedade.	Sim, é preciso economizar já que a energia vai se transformando prejudicando o ambiente.
A24	Sim, é necessário economizar energia porque além da conta sair mais barata, isso ajuda o planeta. Tudo aquilo que é produzido e extraído do planeta gera muitos impactos ambientais e se cada um economizar um pouco, uma grande quantidade de riquezas naturais pode ser preservada.	Sim, é preciso economizar energia para cuidar do meio ambiente e preservar aquilo que já é tão explorado.	Os processos de transformação de energia são essenciais, mesmo que muito deles sejam irreversíveis, eles nos ajudam a realizar as coisas na nossa rotina, é importante preservar porque se não uma hora pode acabar.
A25	Em minha opinião é necessário economizar, pois, para produção de qualquer energia é necessário um gasto podendo variar de energias diferentes porém sempre um gasto, e creio que muitas vezes esse gasto é “perdido” pois a energia se	Minha opinião continua sendo que sim é necessário economizar energia, pois na produção de energia apesar de nada se perder totalmente, parte se torna de impossível aproveitamento para o ser humano, o que acaba por	A energia nunca se perde isso é fato, porém pode se tornar de difícil aproveitamento para nós e devido a isso é necessário economizar a mesma pois a energia total disponível no mundo não é a mesma disponível para nossa

	dissipa no meio, por isso é necessário manter um consumo moderado de energia para evitarmos o gasto exagerado da matéria errada para sua criação.	representar um gasto bem maior da mesma.	utilização.
A26	Sim, se começarmos a economizar energia muitas coisas irão melhorar, como por exemplo o meio ambiente, o ar não vai ser tão poluído, mas hoje em dia é bem complicado, pois temos muitos eletrônicos e não adianta tanto só algumas pessoas economizarem e o resto utilizar o dobro dessa energia.	Sim, pois economizando muita coisa começa a melhorar, vai ter mais energia para ser utilizada, mas a maioria tem que economizar. O meio ambiente irá cada vez mais melhorar.	Sim pois a energia se torna caro e é muito melhor nós economizá-la, pois a energia é finita.
A27	É preciso economizar energia para, no caso da elétrica no Brasil, economizar água.	É preciso economizar, em alguns casos, no caso da elétrica no Brasil, economizar água.	É preciso, no caso da elétrica no Brasil para economizar água, porque a energia pode até se transformar em alguma outra, não se perder, mas do mesmo jeito há um uso de água nesses casos.
A28	Sim, é preciso economizar energia, pois a maior parte das formas de gerá-la causa algum dano ao meio ambiente, como por exemplo, as termelétricas, que liberam gases poluentes.	Sim, porque apesar de a energia nunca ser perdida, ela pode se transformar em um tipo de energia que não é útil em determinado momento e situação, em um processo irreversível.	Sim, porque apesar de a energia nunca ser perdida, ela pode se transformar em um tipo de energia inútil, em um processo irreversível.
A29	Na minha opinião, sim, é preciso economizar energia. Vale ressaltar que nem todas fontes de energia atuais, são renováveis, mas todas são prejudiciais ao meio ambiente, quanto mais se usa a energia mais grave, ferimos a Terra.	Com mais aulas obtidas tratando sobre energias, me deparei que todas as energias, até mesmo as renováveis, em seu uso, tem uma parte transformada em energia térmica (energia que nos dias atuais não é utilizada), sendo assim uma hora, as energias não renováveis vão acabar e se não souberem reutilizar a térmica ferrou-se! Sim, acredito que devemos economizar energia, pois ela não é infinita.	Sim, porque a energia utilizada vai se virar térmica e entrar em equilíbrio (entropia máxima) e assim, temos que economizar.
A30	Sim, é preciso economizar energia. Toda a sociedade consome produtos em excesso, o que causa impactos ambientais. Economizar energia é reduzir seu uso e usá-la de forma consciente, usando apenas o necessário.	Sim, é preciso economizar energia porque deve-se usar apenas o necessário, para reduzir os impactos ambientais.	Sim, é preciso economizar energia para que se evite que o sistema entre em equilíbrio. O sistema em equilíbrio torna a energia inutilizável, o que traria grandes consequências para a humanidade.
A31	Sim, porque é um recurso finito, pois na sua produção em massa é desperdiçado ou mal utilizado	Sim. Pois além de ser um recurso finito, feito a partir de recursos finitos, e que são caros	A energia consumível é algo finito, pois não podemos aproveitar todas as formas de

	diversos recursos também finitos.	para conseguir, e a energia torna-se assim algo caro para a produção, fazendo assim o seu desperdício algo ruim para a economia.	energia, porém outros corpos podem se aproveitar dela para produzir outro tipos de energia que possamos utilizar, então é tudo renovável. Porém tem de ser controlado o consumo para que não fiquemos em um hiato com pouco aproveitamento.
A32	Sim. Toda energia utilizada pelo homem, diretamente ou não, vem de recursos naturais. Algumas energias são limpas e não agredem o meio ambiente na mesma proporção que outros tipos de energias. Economizando energia, criamos uma consciência coletiva de não desperdício, preservamos recursos naturais importantes para o homem e garantimos que as gerações futuras terão a mesma abundância energética que nós temos.	Não estava presente no dia	Ao longo do tempo, a energia vai sendo utilizada e degradando. Assim, muda-se o grau de complexidade dessa energia. Ela continua lá, a energia não diminui em quantidade, mas diminui em complexidade, dessa forma, a quantidade de energia útil para nós diminui também.
A33	É preciso economizar energia pois a fonte para tudo isso vem da natureza, ou seja, de um recurso não renovável e que é de extrema importância para a sobrevivência humana. Economizando energia consequentemente diminui a exploração dos recursos naturais.	Sim, porque toda obtenção de energia envolve um gasto de recursos sejam eles renováveis ou não renováveis. E esse processo quando realizado em grande escala e por meio de métodos não sustentáveis danificam ou afetam negativamente o meio ambiente e o próprio indivíduo.	É preciso economizar energia pois essa energia passa por transformações e ao longo do tempo pode transformar-se em uma energia que não poderá ser reaproveitada, ou seja, será inútil. Além disso, toda energia é dissipada de alguma forma e utiliza recursos naturais do ambiente em suas transformações. Apesar da energia não se perder ou sumir do nada, ela pode transformar-se em algo insustentável.
A34	Sim, porque algumas formas de obter energia não são renováveis, ou seja, um dia vão acabar. Além disso muitas vezes a construção de mecanismos para sua obtenção muitas vezes são muito agressivas para a natureza.	Sim, apesar da energia não acabar e sim se transformar a forma como se obtém elas seja prejudicial ao meio ambiente e sem contar que apenas delas se transformarem na maioria das vezes ela não é utilizada novamente.	Sim, pois a energia não acaba, se transforma, mas não em uma energia útil que pode ser transformada novamente.
A35	É preciso economizar energia, porque tudo que é feito em excesso acaba sendo ruim, ou seja, para que gastar mais energia do que o suficiente? Economizar é essencial, a energia deve ser tratada de maneira correta.	Pode-se dizer que é tão bom economizar quanto gastar energia, ou seja, economizando você ajuda a ter mais futuramente e gastando você utiliza para fazer suas coisas.	Sim, porque se a energia entrar em equilíbrio vai acabar.
A36	Devemos economizar energia pois a produção de energia	Continuo achando que a produção de energia elétrica	A energia é algo que não se perde, apenas se transforma e é

	elétrica pode ser muito prejudicial ao meio ambiente, como é o caso das usinas termelétricas. Devemos também economizar os outros tipos de energia pois, ao ser gasta em uma situação, parte é transformada em calor e é perdida.	pode ser prejudicial ao meio ambiente e que temos que tomar cuidado com a energia perdida em forma de calor.	apenas uma questão de aprendermos a utilizar a energia dissipada.
A37	É necessário economizar energia, pois o uso desta demanda recursos, muitos deles finitos, então, se não quisermos que as gerações futuras fiquem sem nada, é necessário que economizemos, pelo menos até acharmos uma fonte de energia potente, barata e sustentável, se isso um dia acontecer.	É necessário economizar energia, pois o uso desta demanda recursos, que são finitos, e, se não quisermos que eles acabem, devemos economizar.	É necessário economizar, pois, mesmo que ela se conserve em outras formas, muitas delas não serão úteis, já que se encontrarão em estado de entropia, ou seja, desordem.
A38	O consumo de energia no mundo vem aumentando e isso pode causar sérios problemas (no meio ambiente e sociedade), então é necessário que o alto consumo diminua nos próximos anos. As pessoas deveriam pensar na pegada ecológica que estão deixando no planeta e que a velocidade com que alguns recursos se renovam é bem menor do que a de consumo (o planeta não tem capacidade de suportar essa alta demanda).	Sim, já que é necessário pensar nos impactos que elas deixam no planeta.	A energia não irá sumir, ela se transforma em outros tipos ao longo do tempo e uso, mas para os recursos naturais da terra sofrerem esse processo é deixado uma pegada ecológica no planeta e que a velocidade com que os recursos se renovam é bem menor do que a de consumo (o planeta não tem capacidade de suportar essa alta demanda). É necessário consumir com consciência.
A39	Sim, é necessário economizar energia, em meio a uma sociedade em que tudo é usado em excesso, o uso exagerado das coisas ? a causar impactos ao planeta.	Em meio a novas técnicas de produção de energia como energia eólica e solar que causam menores impactos ambientais seria viável pensar em descartar a necessidade de economizar, porém deve-se pensar que para a produção destas novas técnicas de obtenção de energia, são gastos inúmeros materiais que impactam o nosso meio, por isso acredito que sim deve haver economia de energia, pois como respondido da primeira vez todo o uso em excesso causa impactos, e não é diferente com a energia.	A energia se conserva, porém ela pode ser transformada em um tipo de energia que não pode ser utilizada, temos de realizar a economia de energia para não aumentar o nosso nível de consumo e equipararmos nossos gastos ao total de produção.
A40	É importante poupar energia porque ela provém de recursos naturais que em sua maioria são não renováveis. Cabe a nós enquanto sociedade e indivíduos	Sim, é preciso economizar energia, já que na maioria das vezes os recursos naturais esgotáveis ou que de certa forma causam algum impacto	É importante economizar energia porque, por mais que a energia se conserve, após algumas transformações é impossível de utilizá-la.

	buscamos formas de atenuar o inevitável impacto que nossa existência provoca na natureza.	no seu processo de obtenção. Em uma sociedade movida pelo lucro e pelo consumo, é necessário poupar todo e qualquer tipo de recursos envolvidos na longa cadeia produtiva.	Devemos poupar para que a energia se mantenha na forma que melhor podermos aproveitá-la, sem degradar o ambiente.
--	---	--	---

## **Apêndice 5**

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

Neste apêndice encontra-se o produto educacional, parte integrante deste trabalho de mestrado.

# 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

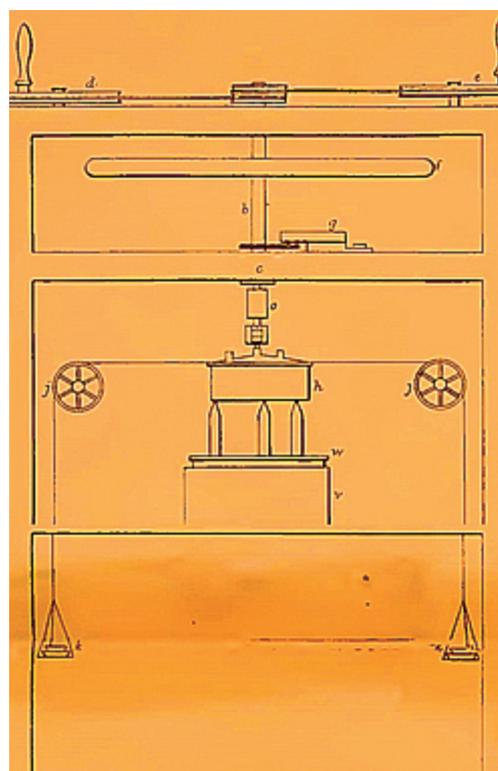
°F em outro recipiente e deixando-os dentro de uma sala fechada a 47 °F, verificou que em meia hora a temperatura da água já alcançava 40 °F enquanto que o gelo precisou de 5 horas para derreter e, somente 10,5 horas depois, atingiu a temperatura de 40 °F, levando-o a entender que o gelo precisou de 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.



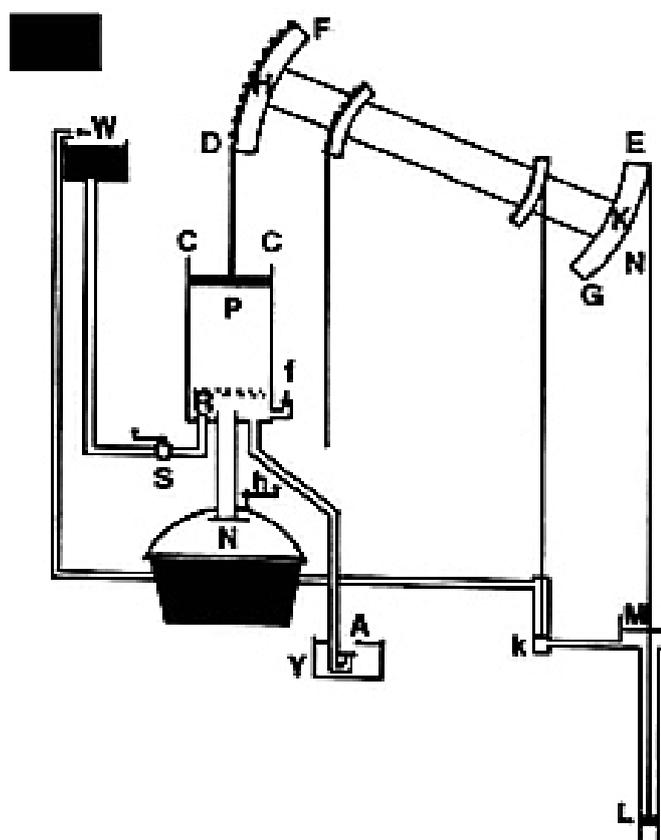
**Figura 1.1:** aparato experimental criado por Joule.

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);

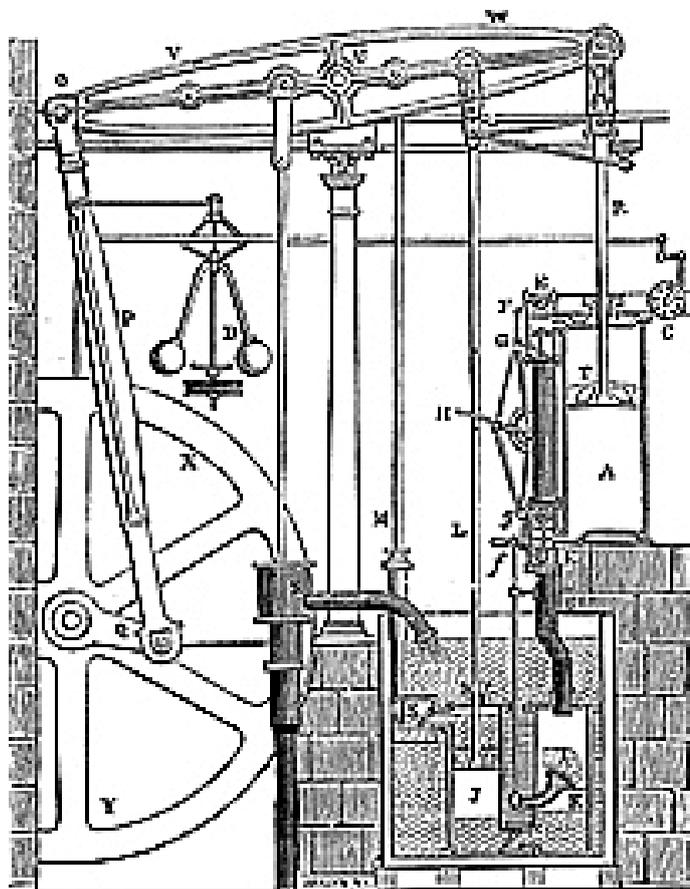


**Figura 1.2:** Máquina térmica de Newcomen.

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](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 bequeme 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 *ητροπη*, 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.

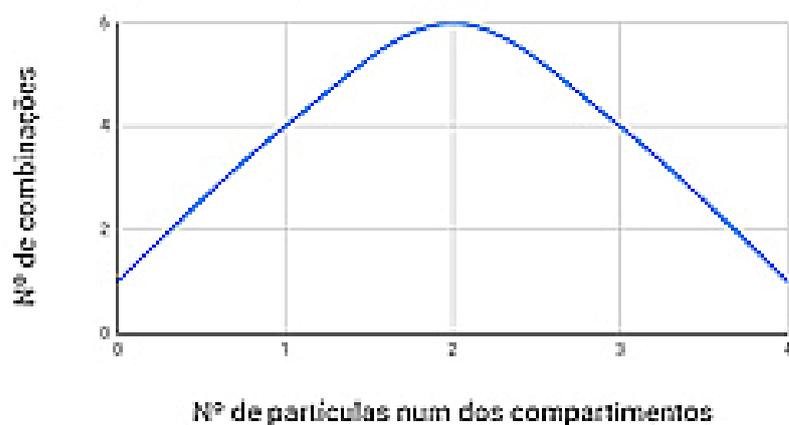
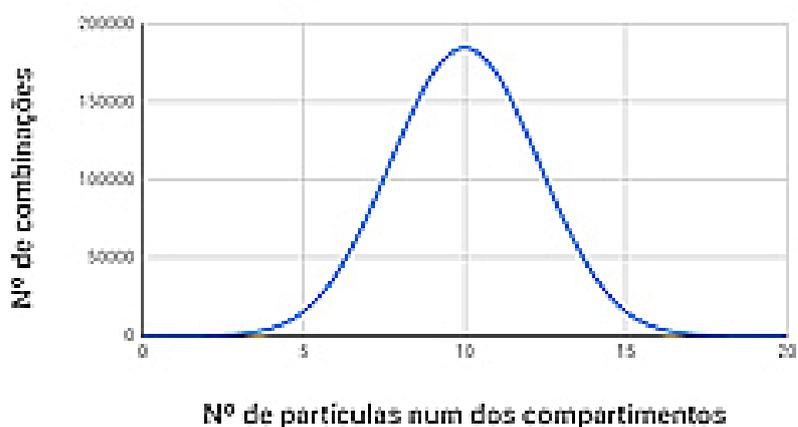
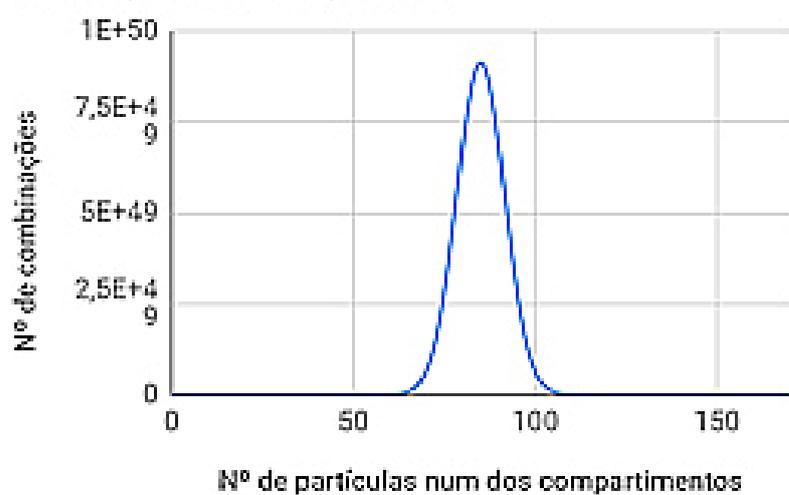
Combinções de  $N = 4$  partículasCombinções de  $N = 20$  partículasCombinções de  $N = 170$  partículas

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

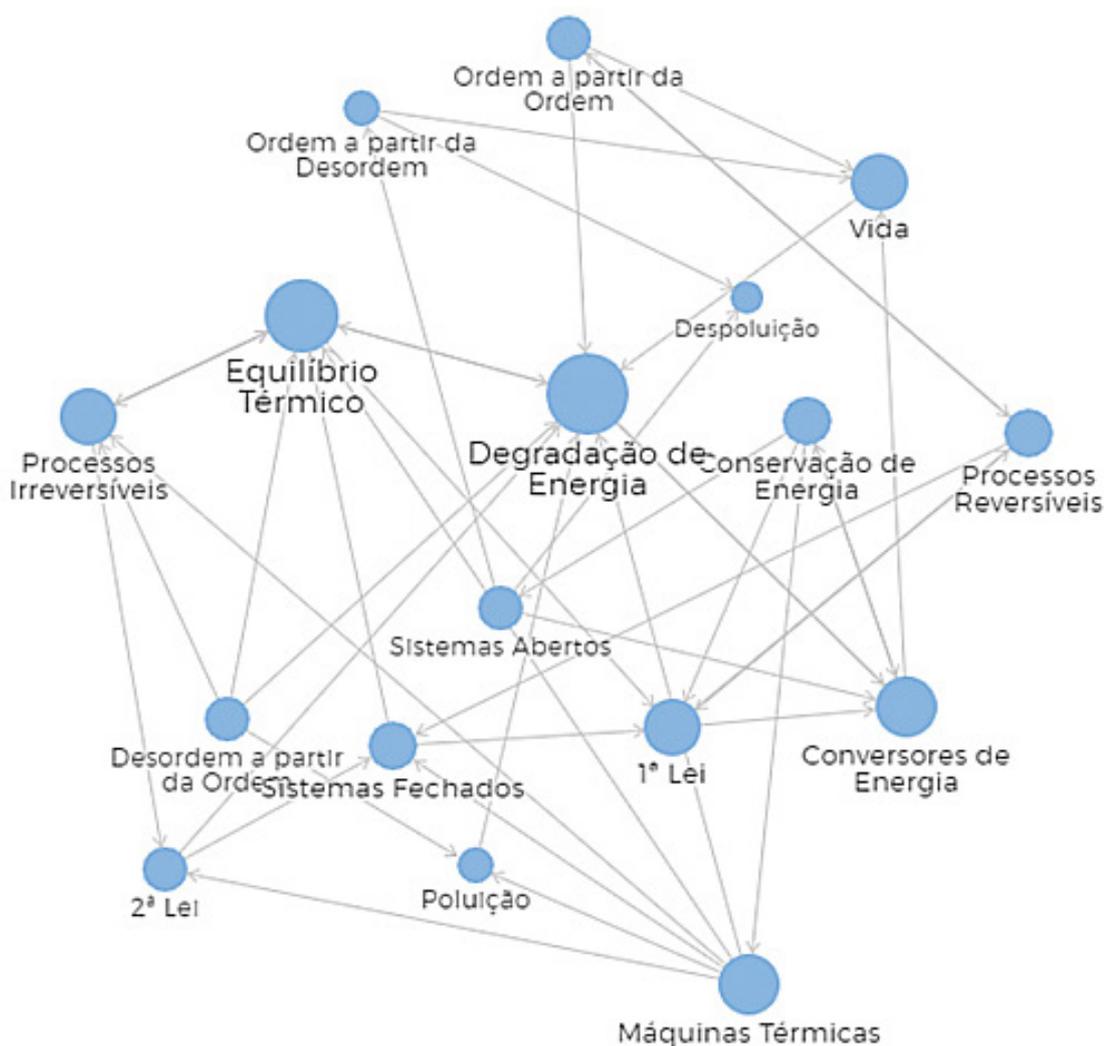
## Proposta de aula – Comentários iniciais

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 entropia<sup>5</sup>.

Fonte: autoria própria

<sup>5</sup> 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"> <li>- Olhar para os processos de transformação de energia em conversores em geral para identificar as transformações de energia envolvidas.</li> <li>- Diferenciar energia útil de energia não útil em situações cotidianas.</li> </ul>	1ª Lei, conservação de energia, conversores de energia, degradação de energia, processos irreversíveis,	<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>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tratar da crise dos conversores e do esgotamento das fontes de energia como forma de conscientização pelo uso racional de energia.</li> </ul>	Máquinas térmicas, equilíbrio térmico, conversores de energia, equilíbrio térmico.	<i>Quais transformações de energia estão presentes no seu dia a dia?</i>  <i>O que acontece com a energia que não utilizamos?</i>  <i>O modo como usamos energia afeta o meio ambiente? de que forma?</i>

<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>
--	---	--

Tratar da entropia, como já dissemos, exige cuidado para que o conceito não seja

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

Fonte: Autoria própria

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

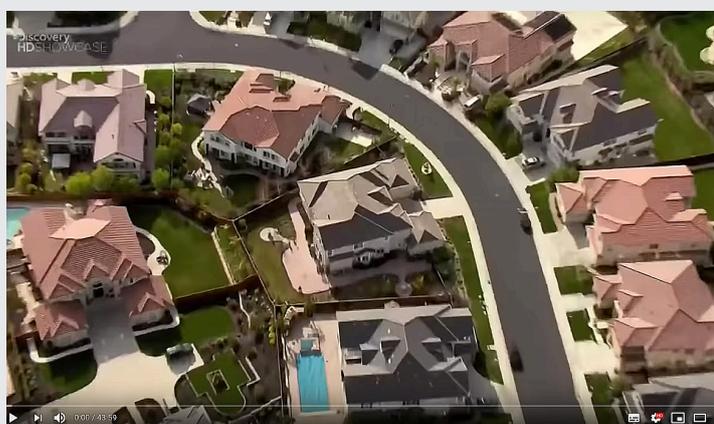
Como já discutimos, a sequência de aulas a seguir tem como objetivo permitir que o(a) professor(a) aborde o ensino de entropia de forma mais aberta e complexificada. Entende-se como complexificação do conhecimento quando incorporamos elementos de outras disciplinas, do conhecimento cotidiano e científico, 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>



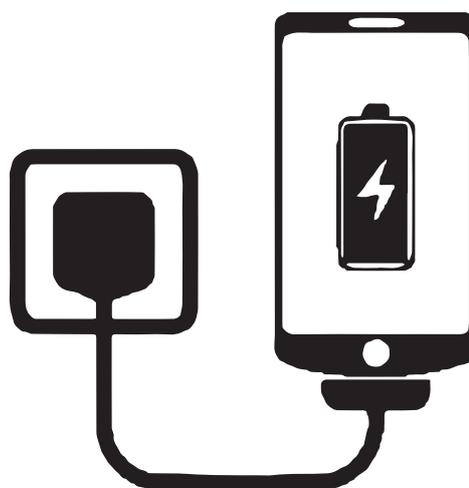
Parte 3/3: [https://youtu.be/KQOj\\_VqB\\_Eg](https://youtu.be/KQOj_VqB_Eg)

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 texto<sup>6</sup>, 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).

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

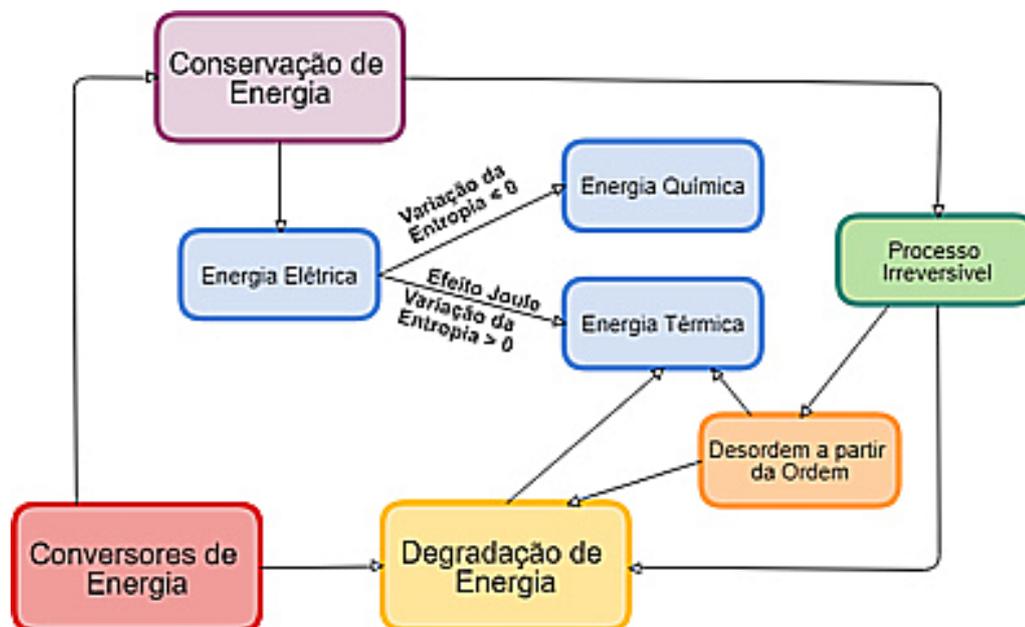


Figura 2.3: Mapa de conceitos.

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](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.

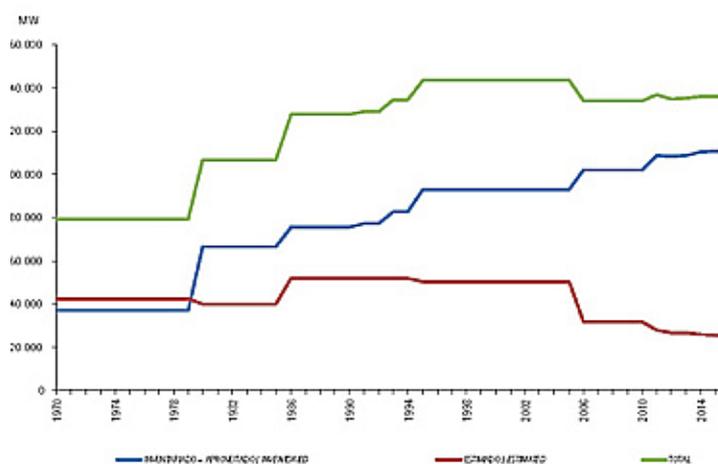
Ainda nesse contexto, a partir do Balanço Energético Nacional (BEN) (BRASIL, 2017), pode-se discutir os dados das tabelas e gráficos, possibilitando a ampliação das reflexões e debates. A Tabela 2.1 mostra os recursos hídricos do Brasil, tanto o inventariado + aproveitado, que 'corresponde ao montante 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).

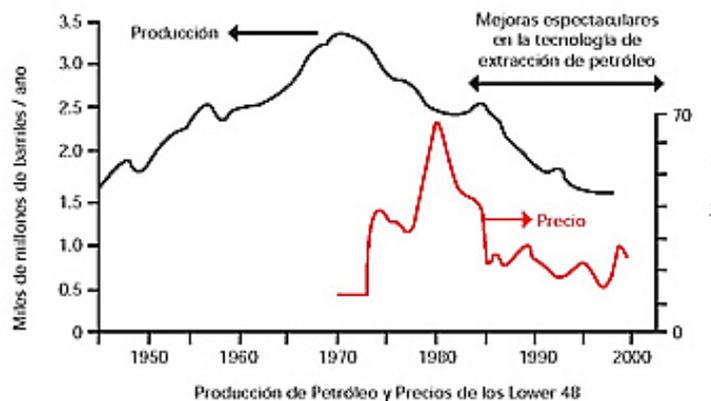


Gráfico 2.2 - Produção de petróleo nos EUA.

Fonte: García & Ballenilla, 2008.

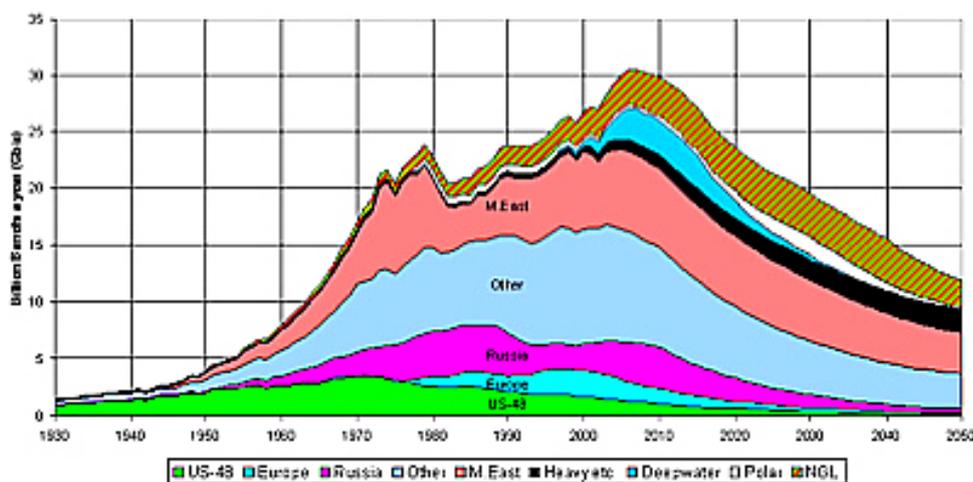


Gráfico 2.3 - Produção de petróleo mundial.

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 esses 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 Michaelis<sup>4</sup> caldeira é recipiente metálico de qualquer tamanho para aquecer qualquer líquido, produzir vapor, cozinhar alimentos etc.



Figura 2.4: Conversores energéticos

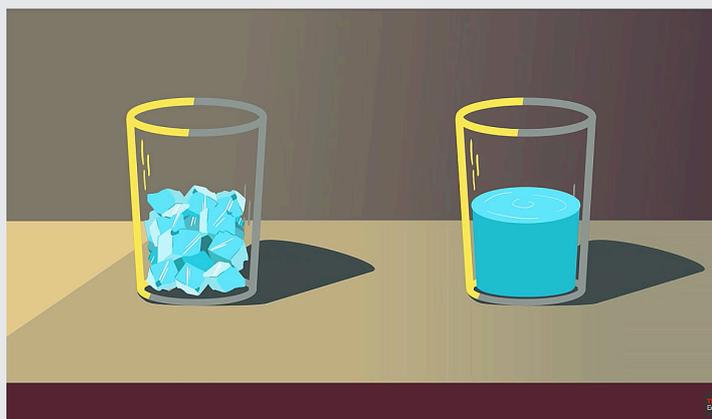
Fonte: Autoria própria.

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.



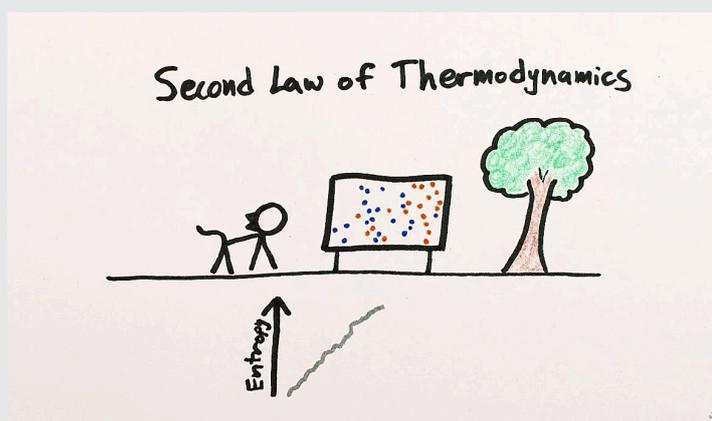
Link: [https://youtu.be/YM-uykVfq\\_E](https://youtu.be/YM-uykVfq_E)

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.

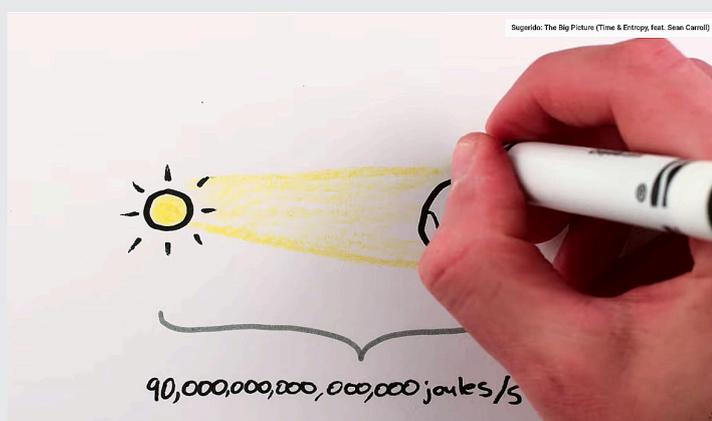


Link: <https://youtu.be/yKbJ9leUNDE>

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.

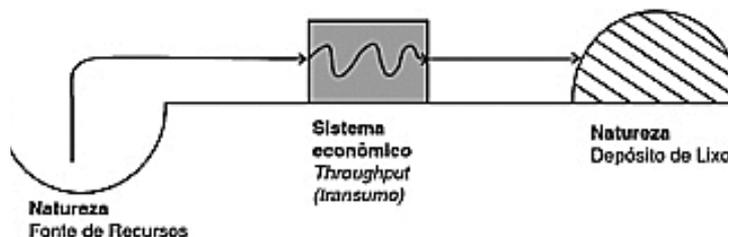


Link: <https://youtu.be/sAMIGyaUz4M>

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 2.5, que mostra, de forma esquemática e simplificada, a cadeia produtiva linear.



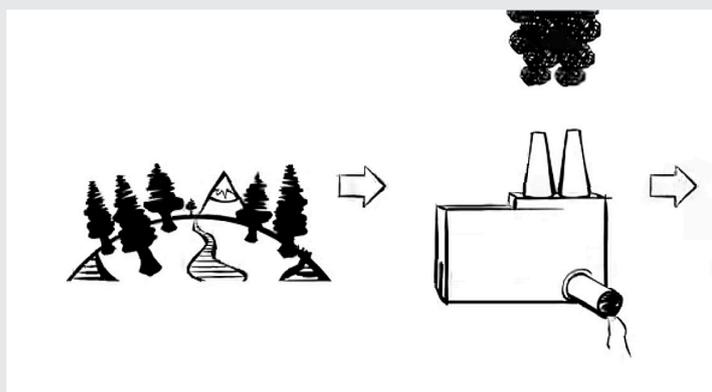
**Figura 2.5:** Cadeia produtiva linear (natureza como fonte de recursos e depósito de lixo).

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/Se12y9hSOMO>

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.

## Referências Bibliográficas

- ÁVILA, R., et. al., **Concepções sobre complexidade: os argumentos dos pesquisadores, professores e alunos**. Revista Enseñanza de la Ciencias,
- BALDOW, R., MONTEIRO JR, F. N., **Os livros didáticos de física e suas omissões e distorções na história do desenvolvimento da termodinâmica**. Alexandria Revista de Educação em Ciência e Tecnologia, v.3, n.1, p.3-19, 2010.
- BASSALO, J. M. F., **A Crônica do Calor: Calorimetria**. Revista Brasileira do Ensino de Física, v. 14. n. 1, 1992.
- \_\_\_\_\_. **Schrödinger / Bassalo & Caruso**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.
- BRASIL. **Guia de livros didáticos: PNLD 2015: física: Ensino Médio**. Brasília : Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, 2014.
- \_\_\_\_\_. **Balanco Energético Nacional 2017: ano base 2016**. Empresa de pesquisa energética, Rio de Janeiro, 2017.
- BRITO, A. A. S., **“Flogisto”, “Calórico” & “Éter”**. Ciência & Tecnologia dos materiais, v. 20, n. 3/4, 2008.
- CAVALCANTI, C., **Sustentabilidade: mantra ou escolha moral? uma abordagem ecológico-econômica**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 35-50, 2012.
- CLAUSIUS, R., **On the Application of the Theorem of the Equivalence of Transformations to the Internal Work of a mass of Matter**. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. Londres, v. 4, 1862.
- COVOLAN, S. C. T, SILVA, D. da, **A entropia no Ensino Médio: utilizando concepções prévias dos estudantes e aspectos da evolução dos conceitos**. Ciência & Educação, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 98-117, 2005.
- DIAS, P. M. D., **Sadi Carnot: pré história e histórias**. Revista USP, São Paulo, n. 7, p. 61-78, 1999.
- \_\_\_\_\_. **À procura do trabalho perdido**. Revista Brasileira do Ensino de Física, v. 29, n. 4, p. 493-498, 2007a.
- \_\_\_\_\_. **Sobre uma tendência universal da natureza para a dissipação de energia (On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy)**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 4, p. 491-492, 2007b.
- DINCER, I.;CENGEL, Y.A. **Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles**. Thermal Engineering. *Entropy*, 3, 116-149, 2001.

- FLORES-CAMACHO, F.; ULLOA-LUGO, N. **¿Cómo enseñan la entropía los profesores universitarios?** Revista Eletrónica de Enseñanza de las Ciencias, 13(2), 201-221, 2014.
- GADOTTI, M., **Perspectivas atuais da educação.** São Paulo em Perspectiva, 14(2), 02-11, 2000.
- GARCÍA, J. E., **Fundamentos para la construcción de un modelo sistémico del aula.** In: PORLÁN, R.; GARCÍA, J. E., CANÁL, P., orgs. *Constructivismo y Enseñanza de las Ciencias.* Sevilla, Díada Editora S. L., 1988.
- \_\_\_\_\_. **Hacia una teoría alternativa sobre los contenidos escolares.** Espanha: Díada Editora S. L., 1998a.
- \_\_\_\_\_. **A natureza do conhecimento escolar: transição do cotidiano para o científico ou do simples para o complexo?** In: RODRIGO, M. J.; ARNAY, J. (org). *Conhecimento cotidiano, escolar e científico: representação e mudança.* São Paulo: Ática, 1998b.
- \_\_\_\_\_. **Las ideas de los alumnos,** In. Cuadernos de Pedagogía, nº 276, *enero.* Editora: Ciss Praxis. Espanha. 1999.
- \_\_\_\_\_. **Educación Ambiental, Constructivismo y Complejidad.** 1ed. Espanha: Díada Editora S. L., 2004.
- \_\_\_\_\_. **Complejidad y Construcción del Conocimiento.** Enseñanza de las Ciencias, número extra, VII Congreso. 2005.
- GARCÍA, J. E., BALLEÑILLA, F., **Hasta cuándo podremos derrochar energía? El tratamiento didáctico de las crisis energética.** Cuadernos de Pedagogía, n. 384, 2008.
- GERHARDT, T. E., SILVEIRA, D. F., **Métodos de pesquisa.** coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.
- GOMES, L. C., **A ascensão e queda da teoria do calórico.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 29, n. 3, p. 1030-1073, 2012.
- JOULE, J. P, **The scientific papers of James Prescott Joule.** Physical Society of London, v. 1, 1884.
- KAUFFMAN, S. A., **“O que é vida?” 50 anos depois. Especulações sobre o futuro da biologia** / Michael P. Murphy, Luke A. J. O’Neil, organizadores; tradução Laura Cardellini Barbosa de Oliveira. – São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1997.
- HOBBSAWN, E. J., **A era das revoluções, 1789-1848.** São Paulo, ed. Paz e Terra, 25ª edição, 1977.

- MAGIE, W. F. **A Source Book in physics**. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1935.
- MELO, M. T. R. R. H., **Energia e Medicina em Robert Mayer**. Mestrado em História e Filosofia das Ciências, Universidade de Lisboa, 2012.
- MONTEIRO, M. A. A., **Proposta de atividade para abordagem do conceito de entropia**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 26, n. 2: p. 367-378, 2009.
- MORAES, R.; GALIAZZI, M. C. **Análise Textual Discursiva**. Ijuí, Editora Unijuí, 2007.
- MORIN, E., **Terra-Pátria** / Edgar Morin e Anne-Brigitte Kern / traduzido do francês por Paulo Azevedo Neves da Silva. Porto Alegre, Sulina, 2003a.
- \_\_\_\_\_. **A cabeça bem-feita: repensar a reforma, reformar o pensamento**. Tradução: Eloá Jacobina, 8ª ed., Rio de Janeiro, 2003b.
- \_\_\_\_\_. **Introdução ao pensamento complexo**; tradução de Eliane Lisboa. Porto Alegre, Sulina, 3ed, 2007.
- OLIVEIRA, M. J., **Termodinâmica**. Editora Livraria da Física, São Paulo, ed. 2, 2012.
- PASSOS, J. C., **Em torno de Carnot e sobre a Segunda Lei da Termodinâmica**. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa - PB, 2002.
- PETRAGLIA, Izabel, **Educação complexa para uma nova política de civilização**. Educar em Revista, (Julho-Dezembro) : [Acessado em: 17 de fevereiro de 2018]. Disponível em:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=155013363004>> 2008.
- PRIGOGINE, I.; STENGER, I. **A nova aliança**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1984.
- RODRIGUEZ-MARÍN, F; FERNÁNDEZ-ARROYO, J; GARCÍA, J. **Las hipótesis de transición como herramienta didáctica para la educación ambiental**. Enseñanza de Las Ciencias, p.300-318. 2014.
- SANTOS, Z. T. S., **Conteúdo de entropia na física do Ensino Médio: análise do material didático e abordagem histórica**. Revista HOLOS, v. 3, p. 75-84, 2008.
- \_\_\_\_\_. **Ensino de Entropia: um enfoque histórico e epistemológico**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.
- SILVA, D. N., **A Termodinâmica no Ensino Médio: ênfase nos processos irreversíveis**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2009.
- \_\_\_\_\_. **Ensino e Aprendizagem da Termodinâmica: questões didáticas e contribuições da história da ciência**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2013.
- SPERLING, E. von, **Afinal, quanta água temos no planeta?**, Revista brasileira de recursos hídricos, v.11 n.4, out/dez, p. 189-199, 2006.

THOMSON, W., **Sobre uma tendência universal da natureza para a dissipação de energia** (*On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy*), traduzido por Penha Maria Cardoso Dias. *Philosophical Magazine* n. 304, série 4, v. 4. 1852.

WATANABE, G., **Elementos para uma abordagem temática: a questão das águas e sua complexidade**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2008.

\_\_\_\_\_. **Aspectos da complexidade: contribuições da Física para a compreensão do tema ambiental**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2012.

WATANABE, G., KAWAMURA, M. R. D., **Articulações entre Complexidade e meio ambiente: propostas para o ensino de física**. IX Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias. Girona, Espanha. 2013.