

Irreversibilidade e tempo: historicizando a segunda lei da termodinâmica para o ensino de ciências^{+*}

Louise Trivizol¹

Mestra em Ensino de Ciências e Matemática – Universidade de Campinas

Silvia F. de M. Figueirôa¹

Universidade de Campinas

Campinas – SP

Resumo

O objetivo do artigo é apresentar conceitos termodinâmicos ligados à segunda lei que revelam a inerente historicidade das ciências e a filosofia da física que a acompanham. Tais conceitos participam, também, do pensamento complexo, segundo Edgar Morin, considerado valioso para o ensino de ciências deste século. Para situar a pertinência desse enfoque, problematizamos a mentalidade mecanicista e extrativista, que desloca o humano da responsabilidade por suas ações sobre o planeta, colocando-o como espectador de acontecimentos. Visando superar esse descolamento do real pela via educacional, propomos uma abordagem histórico-filosófica da segunda lei da termodinâmica na ciência escolar. O intuito é valorizar os aspectos metacientíficos a partir dos debates envolvidos na abordagem em Natureza das Ciências a fim de atingir os objetivos da Alfabetização Científica.

Palavras-chave: *Irreversibilidade; Entropia; História das Ciências; Ensino de Física; Complexidade; Incerteza.*

Abstract

This article aims to present thermodynamic concepts linked to the second law, which are integral to a philosophy that acknowledges the historicity

⁺ Irreversibility and time: historicizing the second law of thermodynamics for science teaching

^{*} *Recebido: 18 de janeiro de 2024.*

Aceito: 23 de maio de 2024.

¹ E-mails: lui.t.assis@gmail.com; silviamf@unicamp.br

inherent to the sciences. Also, these concepts play a role in complex thinking, according to Edgar Morin, and are valuable for science education in this century. In order to contextualize the relevance of this approach, we problematize the mechanistic and extractive mentality, which displaces humanity from responsibility for its actions on the planet, positioning it as mere spectator of events. We propose a historical-philosophical approach to the second law of thermodynamics in science education to overcome this detachment from reality through an educational path. We intend to emphasize the metascientific aspects arising from the debates involved in the Nature of Science approach, for the sake of Scientific Literacy objectives.

Keywords: *Irreversibility; Entropy; History of Science; Physics Teaching; Uncertainty; Complexity.*

I. Introdução

O presente artigo volta-se sobretudo a professores em formação, inicial ou continuada. Abordar a segunda lei da termodinâmica pela via da história, filosofia e sociologia das ciências pode servir ao Ensino Básico, por meio da mediação do professor, ou ao ensino superior em cursos de licenciaturas correlatas à Física. O objetivo é, pois, reunir e sistematizar aspectos histórico-filosóficos das ciências que possam ser úteis ao aprofundamento da segunda lei da termodinâmica e às características metacientíficas das ciências. Ou seja, contar uma história da passagem do determinismo à incerteza, considerando que as estruturas conceituais das ciências físicas exigem descrições mais complexas, que incorporem história, filosofia e aspectos sociais aos produtos científicos. Tencionamos a apresentação de uma história possível da termodinâmica, a partir da leitura de materiais primários e secundários, selecionando conteúdos julgados pertinentes aos debates sócio-científicos no EC.

A termodinâmica clássica foi desenvolvida substancialmente a partir do século XIX e, ao final desse, aprofundou fundamentos, desenvolveu novas aplicações e incorporou formulação microscópica via mecânica estatística. Atualmente, o conteúdo da termodinâmica clássica está difundido entre as ciências contemporâneas, teoria da informação, sistemas dinâmicos, biológicos etc., por meio do conceito de entropia, principalmente. Esse conceito foi aprofundado teoricamente e ganhou terrenos em outras áreas de aplicação. Por exemplo, o artigo de Shannon *A Mathematical Theory of Communication* (1948), é considerado o marco teórico de fundação da Teoria da Informação e essencial ao desenvolvimento de sistemas de comunicação e tecnologia de armazenamento de dados. Ressaltamos aqui como os fundamentos de termodinâmica clássica têm potencial para estabelecer pontes com o presente. A *informação* é muito cara à sociedade contemporânea. Uma discussão bem embasada por

aspectos históricos e filosóficos do conceito de entropia e sua relação com informação e incerteza permite uma entrada em debates sócio-científicos de alta relevância em sala de aula. Nesse sentido, consideramos que a História, Filosofia e Sociologia das Ciências (HFSC) contribui para debates atuais, não se restringindo somente ao passado. A proposta com a qual nos alinhamos adota estratégias que ajudem a evitar anacronismos ao discutir teorias de séculos passados e, ainda, mantêm a fidelidade aos tópicos pertinentes à física escolar, como fundamentos da física e aplicações contemporâneas.

Esse artigo está organizado como um “recorte temático” (Silva *et al.*, 2013). Ao optar por um período histórico amplo durante a pesquisa, visamos trazer um quadro de desenvolvimento de conceitos em detrimento de uma micro-história. Com atenção às premissas da escrita historiográfica (Pestre, 1996; Videira, 2007), tomamos vários cuidados para apresentar devidamente o conteúdo selecionado. Mantivemos sob perspectiva as simplificações necessárias para tal e indicamos leituras de aprofundamento, quando pertinentes, já que não se trata de um artigo de História da Ciência no sentido estrito, mas sim prioritariamente voltado ao Ensino. Buscamos apresentar uma história dos conceitos com a intenção de mostrar um desenvolvimento do conhecimento científico contextualizado com os debates contemporâneos.

A pesquisa contou com uma etapa inicial de busca na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) pela palavra-chave “ensino de Termodinâmica” e refinamento dos resultados para trabalhos voltados explicitamente ao ensino de Física na Educação Básica e/ou Superior. Buscou-se reunir referenciais e observar produções com tema similar ao nosso, procurando identificar possíveis lacunas. Encontramos, para o período entre 2009 e 2022, o total de 47 teses e dissertações. Dentre elas, 11 se dedicam à elaboração de unidades ou sequências didáticas para o ensino de Termodinâmica, sendo nove dessas a partir de Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS), uma a partir da Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP) e uma a partir da Taxonomia Revisada de Bloom. Três pesquisas fazem análise de livros didáticos sobre o tema, cinco tratam explicitamente de História da Ciência no contexto do ensino de Física, 11 propõem abordagem investigativa e/ou via experimentação com máquinas térmicas e duas pesquisas analisam experiências de ensino já realizadas.

O tema mais amplo e com mais pesquisas são estratégias didáticas. São 17 pesquisas que propõem estratégias variadas para melhorar a compreensão de alunos de Ensino Básico e Superior de alguns conceitos específicos em termodinâmica, como temperatura, calor e a segunda lei. Algumas das pesquisas que reunimos sob essa categoria apresentam sobreposição com tópicos das demais pesquisas, mas focam na exposição das estratégias didáticas para formação de professores. História e Filosofia da Ciência, por exemplo, são trazidas como estratégia em cinco das 17 pesquisas. A grande problemática comum são as dificuldades de compreensão e/ou compreensão incipiente de conceitos termodinâmicos de estudantes do Ensino Básico e/ou Superior. Notamos a predominância de temas relativos à primeira lei da termodinâmica, ao ciclo de Carnot e ao conceito de calor. Assim, a exploração histórico-

filosófica da segunda lei segue relevante, posto que ainda é tematicamente minoritária, com espaço para aprofundamento e elaboração de produtos educacionais direcionados à mitigação da problemática mencionada.

Este trabalho possui a “ênfase entrópica” e se insere na Dimensão Epistemológica da inclusão da complexidade na formação científica escolar, conforme elaborado por Watanabe & Kawamura (2020): “a ênfase entrópica no contexto da complexidade implica explicitar que tudo tem uma história e essa história é irreversível” (p. 438). Apresentamos os conceitos de irreversibilidade e entropia visando a um material que possa: (a) melhorar a compreensão de conceitos termodinâmicos que são considerados difíceis no ensino de física; (b) divulgar e introduzir esses conceitos como fundamentos do pensamento complexo; (c) exibir aspectos de Natureza das Ciências contextualizados com a história da termodinâmica. Tecendo correlações entre o conhecimento científico a partir de sua história com uma filosofia contemporânea, acreditamos oferecer um material que seja substancial do ponto de vista do conteúdo científico e conectado a uma nova visão de mundo.

II. Breve revisão da História, Filosofia e Sociologia das Ciências no Ensino

A perspectiva associada a concepções ultrapassadas sobre o funcionamento das ciências, já largamente superadas pelos campos especializados no debate, permanece presente no Ensino de Ciências (EC) sob a forma do chamado “currículo oculto” – *i.e.*, suposições implícitas trazidas nos programas e manuais que influenciam a construção do saber sobre as ciências (Hodson, 1985; Cachapuz *et al.*, 2004). Geralmente, tais suposições conduzem a uma compreensão superficial, influenciada por anos de investimento na ideologia do determinismo tecnológico durante os períodos de guerra no século passado (Auler; Delizoicov, 2001). Por conseguinte, o senso comum considera que as ciências são um empreendimento descolado das realidades culturais, focado no acúmulo de produtos finalizados e a-históricos, realizado por cientistas isolados.

Tal crença no determinismo tecnológico e na suposta superioridade da “Ciência” baseia-se nas teses da neutralidade científica e do progresso linear das ciências. Nesse caso, os cientistas não partilhariam de valores sociais em suas práticas e estariam isentos de responsabilidade, uma vez que o conhecimento produzido teria um fim benéfico em si mesmo (Oliveira, 2008). Esses e outros “mitos”, como o da unicidade do método científico (Woodcock, 2014), p. ex., caracterizam a visão empírico-indutivista, a qual ainda predomina na compreensão pública das ciências e marca o senso comum (Gil-Pérez *et al.*, 2001; Pereira; Gurgel, 2020). Tais visões, consideradas distorcidas, não condizem com os últimos 60 anos de estudos nos campos que investigam a história, as características sociais e epistêmicas das ciências.

A revisão empreendida por Sasseron & Carvalho (2011) mostra que teóricos da Alfabetização Científica (AC) convergem para critérios que possam determinar se um indivíduo compreende bem as ciências, ou seja, se é alfabetizado cientificamente. São eles:

compreender as relações entre a Ciência e Sociedade; saber diferenciar Ciência de Tecnologia; saber que existe uma ética, acordada em comunidade, que supervisiona a atividade científica; conhecer as características das ciências ou a “Natureza das Ciências”; observar a relação das ciências com outras esferas do saber; e, não menos importante, ter conhecimento sobre os conceitos básicos do conteúdo científico. Fica claro, portanto, que as ciências são mais do que produtos, sendo imprescindível conhecer suas características sociais, processos de legitimação histórica das práticas e praticantes, características internas ao funcionamento das ciências e a estruturação e relação entre seus objetos de estudo, por exemplo.

Tomando esses indicadores como objetivos educacionais para o Ensino de Ciências, existe uma grande variedade de metodologias e abordagens possíveis para mobilizar os debates que trabalham tais indicadores. Em nosso caso, tomamos o caminho da HFSC, com base na vasta literatura que versa sobre os benefícios da inclusão das dimensões históricas, filosóficas e sociais do saber no ensino de forma explícita (dentre muitos outros, Abd-El-Khalick; Lederman, 2000; El-Hani, 2006; Teixeira *et al.*, 2009; Praia *et al.*, 2007; Forato *et al.*, 2011; Moura, 2014; Clough, 2017; Peduzzi; Raicik, 2020). Essa literatura concorda com a síntese de Mathews (1992), explicitada abaixo, de que a HFSC no ensino contribui para:

- Humanizar o trabalho científico e contextualizá-lo no momento histórico, locais de produção e sujeitos de enunciação das teorias e dos experimentos. Esses fatores (sociais, geográficos, culturais, etc.) se misturam ao conhecimento produzido e muitas vezes desempenham papéis decisivos para a aceitação ou rejeição das teorias/experimentos;
- Ensinar sobre as estruturas que compõem e organizam o conteúdo das teorias científicas. Como discernir entre conceitos, observações, experimentos, modelos, postulados, leis, teorias científicas, p. ex.;
- Desfazer o mito dos cientistas gênios isolados e os estereótipos de gênero, étnicos, etc., mostrando que ciência é uma atividade altamente colaborativa realizada por pessoas de diversas culturas;
- Desfazer o mito do “Método Científico” unívoco, algorítmico e infalível. Ao longo da história, é possível mostrar métodos diversos usados em diferentes ciências – até mesmo dentro da mesma ciência –, a falibilidade e limitações de cada método;
- Demonstrar que o conhecimento não cresce apenas linear e cumulativamente. Erros e acertos precisam estar historicamente situados. Algo que se acreditava ser um fato científico pode ser provado errado, assim como um “erro” pode ser eventualmente aproveitado em teorias futuras e se transformar num conceito fundamental para uma nova teoria ou modelo científico;
- Auxiliar o desenvolvimento do pensamento crítico, mostrando as perguntas em aberto, com implicações filosóficas e sociais. Observar historicamente questões que tinham diferentes soluções possíveis e cuja comunidade científica precisou dispor de formas intersubjetivas de resolver o conflito entre teorias, o que pode lançar luz sobre como a comunidade científica necessita de valores morais, em contato com a sociedade e com o ambiente, além de valores “objetivos” para decidir sobre uma melhor teoria.

As discussões que podem ser suscitadas a partir dos tópicos acima contêm o que se chama de elementos *metacientíficos*. Trata-se de uma abordagem científica que busca sistematizar particularidades comuns à variedade de práticas, métodos e critérios estabelecidos nas instituições responsáveis sobre o que é intrínseco ao “fazer ciência”. Nos entrecruzamentos das disciplinas de História das Ciências e da Filosofia das Ciências (e os Estudos Sociais das Ciências, de modo geral), emergiu no âmbito educacional uma área chamada “Natureza da Ciência” (NdC), que reúne tais elementos e é considerada metacientífica desde sua formação, visto que é uma investigação de cunho científico cujo objeto de estudo são as ciências e suas estruturas. Esse campo específico de investigação muito se nutre dos debates na Filosofia das Ciências acerca dos critérios epistemológicos e ontológicos que organizam e estruturam o conhecimento científico. No entanto, se diferencia dele pela intenção de reter o que é imprescindível à ciência *ensinada*. A NdC discute que os processos de aceitação de novos consensos científicos dependem de fatores internos epistêmicos (o método utilizado, as relações entre teoria e experimento, p. ex.), fatores relativos à organização social da comunidade científica (credibilidade acadêmica dos pesquisadores envolvidos) e externos à comunidade (cultura, economia, política, religião). É importante ressaltar que todos esses fatores estão conectados a projetos social e historicamente situados. Aceitamos, portanto, que o estudo da Natureza das Ciências (como campo de pesquisa) via HFSC auxilia compreender o que é uma ciência e como ela se diferencia de um saber não-científico e, ainda, das pseudociências (Moura, 2014; Peduzzi; Raicik, 2020; Pereira; Gurgel, 2020), contribuindo para um debate mais bem informado sobre as condições de produção da ciência. Atualmente, o EC é uma área interdisciplinar que, além de reunir contribuições de diferentes campos, produz um novo conhecimento, com características próprias. A capacidade de incorporar “abordagens interdisciplinares [é] que deve estar no centro da promoção de uma cultura científica dos cidadãos” (Fourez, 1995, *apud* Cachapuz, 2004, p. 365).

Argumentamos neste artigo que a episteme da ciência moderna (desenvolvida pós-Renascimento) não consegue resolver todos os problemas sócio-científicos contemporâneos e mesmo alguns de sua época, já que ela opera com subdivisões do todo e análise das partes – à semelhança de operações matemáticas do cálculo diferencial (Latour, 2020). O ensino feito nos moldes de tal visão de mundo, que disjunta os saberes em benefício da especialização e do acúmulo de seus produtos, tampouco conseguirá abarcar a complexa teia de dinâmicas do real. Dado o crescente intrincamento entre as relações humanas *per se* e delas com o planeta, um dos principais desafios da educação no século XXI é apresentar ao indivíduo os conhecimentos historicamente construídos para evidenciar que as fronteiras criadas entre o conhecimento são artificiais, operacionais (Gallo, 1995; Morin, 2005).

Apesar de recentes reformas curriculares e de avanços nas pesquisas em EC, o saber escolar ainda é fragmentado em disciplinas e compartimentado. Reintegrar saberes, promover a interdisciplinaridade e propor ações que fundamentem ligações entre o conhecimento

escolar e o cotidiano são desafios recorrentes. O cotidiano requer dos estudantes habilidade de identificar, nos segmentos disciplinares, quais conhecimentos podem auxiliá-los nas tomadas de decisão e na construção da cidadania. Essa não é uma tarefa trivial, pois a maneira como o conhecimento é apresentado em “caixas” e a estrutura tradicional das aulas dificultam a reconstituição de sentido dos fenômenos do mundo real. Na dimensão global, os problemas contemporâneos mais urgentes têm se caracterizado por sua crescente *complexidade*, isto é, integrados por diferentes saberes que se interferem mutuamente. Há assuntos que são irredutíveis à abordagem fragmentada presente na cultura escolar. O pensamento complexo vem sendo indicado como estratégia para currículos mais abertos, adequado à construção de uma visão ampla e multidimensional que possa oferecer soluções reais para problemas reais (Angotti, 1999; Almeida, 2005; Watanabe; Kawamura, 2020). Por isso, estratégias didáticas e modelos curriculares que favoreçam uma “religação dos saberes” nos parecem de extrema relevância no cenário atual (Morin, 2000; Gallo, 2015).

É vasta a literatura que apresenta a colaboração profícua entre a história, filosofia e sociologia e como os desafios da educação contemporânea podem se nutrir dos debates presentes em campos metateóricos como a História das Ciências e a Filosofia das Ciências (dentre vários trabalhos, veja-se Forato *et. al.*, 2011; Damasio; Peduzzi, 2017; Moura, 2021; Lima & Guerra, 2022). No entanto, a utilização de histórias das ciências para o ensino não deve ser acessória. Reiteramos que as ciências *são* históricas, socialmente construídas e permeadas pelas crenças de seus realizadores. Portanto, a História das Ciências não tem função de “disciplina auxiliar” para justificar *a posteriori* os caminhos racionais tomados pelas ciências (Videira, 2007). O professor é mediador de um processo crítico no qual oferece os subsídios para que o estudante consiga perceber as dimensões extra e metacientíficas, como “as bases epistemológicas, históricas, políticas e axiológicas sobre as quais os discursos históricos são construídos.” (*ibidem*, p. 122).

Os referenciais teórico-metodológicos utilizados na pesquisa que origina este artigo justificam a relevância da pesquisa histórica e a escolha por essa modalidade para a compreensão do objeto de estudo. A metodologia utilizada para chegar às conclusões apresentadas foi a revisão bibliográfica de fontes primárias e secundárias em História das Ciências do período escolhido (meados do século XIX e XX), em diálogo com a bibliografia de HFSC no EC. A partir de leituras críticas, discussões em grupo de pesquisa e reflexão junto aos referenciais adotados, trouxemos uma história possível de ser contada sobre a termodinâmica. Metodologicamente, optamos por ressaltar e guiar a escrita pelos conceitos que são os fios condutores da narrativa que para alcançar os objetivos de inclusão de HFSC no EC. A saber: incerteza, irreversibilidade, história e complexidade. Todos esses termos, compartilhados entre os referenciais utilizados de diferentes campos de pesquisa, se entrecruzam na produção de sentidos para o Ensino de Ciências.

Em termos teóricos, valemo-nos também do pensamento complexo, difundido por Edgar Morin (1921–), e da filosofia da física de Ilya Prigogine (1917-2003). Acreditamos

que tais linhas teóricas são preciosas para a sociedade contemporânea, que se depara com um futuro incerto, atravessada por crises socioambientais de escalas sem precedentes (Guerra *et al.*, 2020). O pensamento complexo tem grande relevância na cultura escolar para formação de cidadãos equipados com estratégias cognitivas para abordar os desafios deste século. Igualmente, o quadro epistemológico elaborado por Prigogine e Stengers (1991) propõem um olhar por e sobre as ciências que inspira vida e criatividade para a resolução desses desafios. Mais adiante apresentamos algumas bases conceituais dessas concepções.

III. O mundo autômato do paradigma newtoniano

No item anterior, situamos um percurso do Ensino de Ciências no Brasil e indicamos que há uma perspectiva de ciência que persiste em orientar e coordenar objetivos educacionais – a ciência moderna. Essa perspectiva, como veremos, é fundada no racionalismo mecanicista da Física Clássica, epitomizado no paradigma newtoniano. Para ilustrar aspectos desse paradigma, partimos de um objeto idealizado da história do pensamento que, dentre outras características, denotamos ser um paradigma *extrativista*. Este objeto de análise são as máquinas de moto-perpétuo. Observar a ideia por trás dessas máquinas oferece um ponto de partida para reconstruir o caminho que levou à elaboração da segunda lei da termodinâmica e permite ilustrar os impactos científico, cultural, econômico e político da mecânica clássica na ciência produzida na Europa no século XVIII.

Tal máquina idealizada aparece como uma antiga curiosidade ou mesmo uma obsessão em se criar um objeto que sustentasse um movimento *ad aeternum*. Simon Schaffer, em artigo intitulado *The Show That Never Ends: Perpetual Motion in the Early Eighteenth Century* (1995) narra um episódio ocorrido na década de 1720 na Inglaterra pelo qual é possível traçar proximidades ideológicas entre o momento político e econômico inglês setecentista e as máquinas de movimento perpétuo. Trata-se de um relojoeiro saxão que alegava ter construído uma máquina giratória que manteria seu movimento indefinidamente, sem necessidade de propulsores externos, atraindo atenção de membros da *Royal Academy* britânica. Ressaltamos a figura do relojoeiro, pois os relógios, em constante aprimoramento desde o século XIV, tinham forte impacto como reguladores de dinâmicas sociais e econômicas. O apelo pela contagem e uniformização do tempo durante a instauração do capitalismo industrial na Europa nos séculos XVII e XVIII colocava os relógios como monumentos literais em praças públicas. Não por acaso, relógios são frequentemente trazidos na historiografia das ciências como objeto-modelo que sintetiza a cosmovisão produzida pela aclamação das teorias newtonianas na sociedade europeia (Prigogine; Stengers, 1991, Prigogine, 1996; Rosa, 2006; Paty, 2004a). Importa destacar a agitação que então havia no mundo econômico, a incentivar a busca por tais máquinas que pudessem reproduzir movimento eternamente. (Hobsbawn, 2009) Era esperado que o potencial motriz de uma máquina de moto-perpétuo pudesse ser revertido em trabalho e gerar ainda mais lucros, numa lógica de investimento do mercado financeiro já posto na Inglaterra do século XVIII. Ainda,

de modo mais abstrato, a verificação de existência de um moto-perpétuo determinava um novo marco para a mensuração de valor do trabalho para outras máquinas. Segundo Schaffer:

Os traumas decorrentes dos novos mecanismos de moeda e crédito, muito intensos durante o colapso das trocas entre Paris e Londres no começo dos anos 1720, só amplificaram o desafio de fixar valores seguros na sociedade mercadológica. Nesse período, termos tais como “crédito”, “cálculo” e “especulação” deslocavam rapidamente seus significados entre problemas do conhecimento e de finanças² (1995, p. 161).

Portanto, não era sem boa dose de desconfiança e alguma preocupação social que tais invenções eram avaliadas. Em 1775, a publicação de supostas invenções de moto-perpétuo foi finalmente banida quando a Academia de Ciências de Paris reconheceu que a construção de uma máquina de moto-perpétuo seria impossível (Schaffer, 1995). O banimento baseava-se em argumentos morais, que buscavam unir os princípios da mecânica clássica com os princípios da sociedade. A perseguição do movimento perpétuo causava uma agitação que poderia perturbar a ordem, desestabilizar sistemas de crédito, confiança, seguridade social, uma vez que se ligava diretamente à noção de trabalho. De modo pragmático, se fosse alcançado o movimento perpétuo, a técnica poderia ser aplicada em substituição ao trabalho braçal de homens e mulheres, diminuindo os custos de produção e aumentando drasticamente os lucros, conseqüentemente produzindo impactos sociais tremendos. Poderia, também, mover rodas d'água, retirar água de poços de extração mineral inundados (como de carvão, p. ex.) e, ainda, representar o modelo cosmológico ordenado e infinito: o mundo-relógio que, a partir do impulso primordial, manteve seu movimento eternamente.

As máquinas de moto-perpétuo, portanto, eram objetos de disputa ideológica, econômica e sobre os limites do conhecimento. Sábios, engenheiros, investidores e políticos estavam envolvidos no enigma da aparente impossibilidade de um movimento eterno, movidos por desejos diversos: tanto o puro prazer da experimentação e da descoberta, da expansão das fronteiras do conhecimento, como a possibilidade de novas formas de trabalho e mensuração de valor, a promessa de lucro inesgotável ou a reafirmação da ordem divina. Ainda participavam da circulação de conhecimentos as estreitas relações pessoais entre cientistas e figuras relevantes dos Estados absolutistas. A prática científica era estimulada e financiada por membros das Cortes e, nos casos de sucesso, os artefatos científicos eram usados para fazer referências explícitas ao poder desses mecenas³.

² The traumas of new monetary systems and credit mechanisms, very intense during the collapses of the exchanges of Paris and London in the early 1720s, only dramatized the puzzle of fixing secure values in market society. In this period, terms such as 'credit', calculation' and 'speculation' shifted their senses rapidly between problems of knowledge and of finance.

³ A exemplo disso, em 1678, Gottfried Leibniz (1646-1716) propôs erigir um obelisco com um relógio de moto-perpétuo como homenagem ao poder de sua protetora, Sofia de Hanôver (Schaffer, 1995).

A síntese entre teoria (matemática) e prática (experimental) realizada por Newton e o sucesso da estratégia de proposição de perguntas e respostas para a natureza resultou na compreensão do mundo como um relógio, um mundo *autômato* (Prigogine; Stengers, 1984; Prigogine, 1996). Um autômato é uma máquina que, devido à intrincada organização de componentes, por vezes escondidos, produz o que seriam movimentos aparentemente próprios. A visão de um *mundo-máquina* é uma característica que emergiu do esquema de mundo cartesiano e inspirou profundamente o paradigma newtoniano. O determinismo, como veremos, advém da causalidade como uma série de engrenagens conectadas. Conhecidas as condições iniciais do movimento, seria possível determinar o caminho futuro e reconstruir o passado de qualquer ponto material sujeito às leis universais do movimento. Tratava-se de uma nova metodologia experimental. As leis mecânicas do movimento, elaboradas por Isaac Newton (1642-1727), alinhavam-se à filosofia de René Descartes⁴, cujas bases filosóficas permitiram o desenvolvimento do mecanicismo. Tais eventos foram, simultaneamente, produtos e reprodutores da mentalidade com a qual se presumia compreender o Universo a partir da sua captura em quadros estáticos. Uma operação que consistia em selecionar os objetos inanimados e examiná-los em partes. E foi com grande êxito que o recorte do mundo sobre um tempo e espaço absolutos passou a ser descritível: desenhado por curvas no espaço cartesiano (trajetórias) percorridas por pontos abstratos que concentram a massa dos corpos rígidos extensos (centro de massa), movidos pela ação de forças centrais que atuam à distância (gravitação universal).

Contudo, para que o relógio comece a contar o tempo, ou o autômato possa se movimentar, é necessária a existência de um “motor primeiro” que estaria fora, “acima”, do sistema descritível pela teoria newtoniana. A física newtoniana combina-se, então, com a narrativa cristã do criador que dá a vida, que teria animado o mundo-máquina, que teria dado corda ao relógio. A religiosidade na Europa permanecia, desde a Alta Idade Média, fortemente influenciada pela Igreja Católica. Por isso, a vacância de explicações sobre a origem da vida no quadro da mecânica racional pôde ser convenientemente preenchida pela ideia do deus cristão criador, produzindo um acoplamento que amplificou a aceitação mútua dos discursos, o cristão e o da mecânica clássica. Não nos aprofundaremos nessa relação entre ciência e religião, mas gostaríamos de destacá-la como mais um indício da permeabilidade entre as crenças vigentes e as teorias científicas.

Afirmam Isabelle Stengers e Ilya Prigogine (1991): “A ciência [moderna] é produto da exigência vital de tirar partido do mundo, e seus conceitos são determinados pela necessidade de fabricar e manipular os objetos, de prever e agir sobre os corpos naturais.” (p. 74). Essa necessidade de manipulação e predição sobre os corpos naturais encontra-se na fundação da mecânica racional e dos trabalhos posteriores influenciados por ela. Não por

⁴ René Descartes (1596-1650) e o racionalismo: a excelência da *razão* para alcançar a verdade e o descolamento do espírito (*razão, res cogitans*) do corpo (*experiência, res extensa*). “Para Descartes, o *cogito ergo sum* (“penso logo existo”) é o primeiro princípio da filosofia, inaugurando uma revolução que consiste em partir da presença do pensamento e não da presença do mundo.” (Japiassú; Marcondes, 2008, p. 65)

acaso, um dos traços mais marcantes da epistemologia mecanicista é o *determinismo*, que aparece no paradigma newtoniano com o desenvolvimento da mecânica por figuras como Pierre Laplace (1749-1827).

Nos parágrafos anteriores, tomamos o exemplo das máquinas de moto-perpétuo como ilustração do desejo humano de extrair trabalho sem custo. Ou seja, de obter *recursos* do meio e fazer o esforço empreendido tender a zero. Chamamos essa postura de uma *mentalidade extrativista* presente no ideal moderno. Lima e Guerra (2022) argumentam, nos mesmos termos, que há uma concepção extrativista presente no discurso oficial da ciência moderna, “que percebe a natureza como fonte de *recursos naturais*” (p. 389). O humano teria direito de exploração e acúmulo de bens naturais pelo acoplamento com o discurso judaico-cristão, o qual mencionamos. Assim, fundam-se sistemas econômicos que permitem o aparecimento de uma sociedade do consumo, narcísica e hedonista, que objetifica a natureza e se enxerga acima e, sobretudo, *fora* dela (Latour, 2020; Lima; Guerra, 2022).

Quais as implicações da visão determinista nas formas de inquirição do humano com o mundo? É necessário observar historicamente as limitações da epistemologia mecanicista e evidenciar a insuficiência em descrever com precisão relações não-lineares e solucionar problemas com variáveis interdependentes, mesmo os de sua própria época. Trata-se de uma epistemologia que preza, principalmente, pela acumulação, pelo crescimento linear, pela separação em partes e pela busca de invariantes. Portanto, parece inadequada para abordar os problemas do mundo contemporâneo, crescentemente complexos, não-lineares, altamente interdependentes e em constante transformação.

O determinismo é uma das categorias que podemos considerar, à luz da filosofia e da história das ciências, como fundantes para o pensamento científico moderno. Ainda que o significado inicial de *determinismo* tenha sido colocado ao lado do conceito de *causalidade* de forma quase indissociável, é possível e útil distingui-los. De acordo com Michel Paty (2004a), esses *meta-conceitos* estão tão fortemente ligados, entre si e à história da física, que até hoje são confundidos com o próprio ideal de *cientificidade*, reforçando para as ciências uma imagem de que são estáticas e cumulativas. No entanto, tais categorias são historicamente situadas e, portanto, apresentam um contexto de validade e limitações. Ao explicitá-los, é possível mostrar que as ciências não são exclusivamente qualificadas pela causalidade e pelo determinismo, como veremos com o caso do caos determinista.

A *causalidade newtoniana* decorre da compreensão que relaciona *causas* e *efeitos* da dinâmica de movimento dos corpos, tal como elaborado por Newton. Isto é, a descrição da mudança de movimento de um corpo, assumindo explicitamente o tempo como uma variável contínua e absoluta, e a formulação do cálculo diferencial e integral. Dentro do escopo deste artigo, colhemos as noções de determinismo e causalidade para falar das *condições iniciais*. Conforme o quadro epistemológico da mecânica racional, de posse das condições iniciais de um sistema em um dado instante t , a partir de incrementos diferenciais e uniformes ($t + dt$), em virtude da causalidade newtoniana e uma vez conhecidas as leis da natureza ao qual o

corpo está sujeito, deve ser possível *determinar* o estado posterior de qualquer sistema dinâmico. A causalidade, então, é uma categoria (ou meta-conceito) que precede a noção de determinismo. Ademais, a palavra “causa” tem significado de origem jurídica, relacionado à ideia de lei. Ou seja, a causalidade supõe a possibilidade de determinar a maneira com que todas as coisas se movem a partir de uma *lei global*.

O princípio do *determinismo universal* é aquele segundo o qual todos os fenômenos naturais estão ligados por relações invariáveis ou leis. Este princípio afirma que o conhecimento do estado do universo num momento dado (condições iniciais), e o conhecimento das leis da mecânica permitem prever rigorosamente todos os estados futuros, porque não há nenhuma independência das séries causais (Paty, 2004a):

Devemos considerar o estado presente do universo como efeito de seu estado anterior e como a causa daquilo que vai seguir-se. Uma inteligência que, por um instante dado, conhecesse todas as forças de que a natureza é animada e a situação respectiva dos seres que a compõem, englobaria na mesma fórmula os movimentos dos maiores corpos do universo e os do mais leve átomo; nada seria incerto para ela, e o futuro, como o passado, seria presente a seus olhos (Laplace, 1990 apud Japiassú; Marcondes, 2008).

Nesse fragmento está uma implicação filosófica da visão de mundo que acabamos de descrever. Aliar as leis causais do movimento ao tempo absoluto e contínuo leva à conclusão de que, para um observador que dispõe de um ponto de vista de conhecimento objetivo e acabado, toda realidade já estaria posta (Paty, 2004b). Assim, a modelagem matemática que aproxima problemas por meio de probabilidades seria apenas um paliativo à ignorância e às limitações da percepção humana (*ibidem*). Esse ser hipotético, com capacidade infinita de raciocínio, ficou conhecido como o “demônio de Laplace” e lançou sérias questões sobre limites epistemológicos e implicações filosóficas do determinismo universal, como o livre-arbítrio, por exemplo. O demônio de Laplace foi refinado posteriormente por James C. Maxwell e usado como experimento mental para explorar os significados dos conceitos termodinâmicos. Por isso, também é conhecido como o “demônio de Maxwell”⁵.

Argumentamos que é na termodinâmica clássica que se veem melhor as rachaduras do paradigma newtoniano e a instabilidade das certezas e necessidades supostas pelo determinismo. No início do século XX, com o desenvolvimento da mecânica quântica e o princípio da incerteza de Heisenberg, criou-se espaço ainda maior na comunidade científica para aceitar a incerteza como característica indelével da natureza e a estrutura probabilística da realidade. No entanto, ainda no século XIX a lei da entropia impôs novos limites aos fenômenos físicos, que outrora seriam impossíveis nas bases do pensamento mecanicista. É o problema de três corpos de Laplace que coloca as primeiras fundações para a teoria do caos e

⁵ Esse experimento mental pode ser útil ao ensino de física, pois carrega características metacientíficas, como a investigação sobre os limites do conhecimento, da medida e da informação, o significado de entropia e implicações filosóficas do saber. Para aprofundamento, veja-se Mattos e Hamburger (2004).

abre portas aos conceitos que começam a escapar ao quadro conceitual da mecânica clássica, tal qual a imprevisibilidade, como vemos a seguir.

O determinismo laplaciano é fruto da matematização e da sofisticação da causalidade newtoniana no tratamento algébrico das equações do movimento por Laplace. A sofisticação atinge um nível tal que Laplace pôde descrever a dinâmica de três corpos sob a força de atração gravitacional – p. ex., o sistema Sol, Terra e Lua –, um problema bastante refinado. No entanto, Laplace não encontrou solução analítica geral e fechada para o problema de três corpos, porque para esse problema há apenas soluções numéricas⁶. Cabe salientar que solução alguma teria sido possível sem adotar convenções por categorias de semelhança (suposições sobre a massa dos corpos, p. ex.). A prática científica não prescinde da elaboração de hipóteses, sejam elas conscientes ou inconscientes. Nesse processo, o cientista imprime sobre o problema as características pessoais e do estilo de pensamento de sua comunidade científica, delimitando assim os resultados. Essa característica das ciências pode ser chamada de “*theory-ladenness*” – algo como “carregado de teoria” em tradução direta do inglês – ou a inexistência de observações neutras (Peduzzi; Raicik, 2020). O prêmio Rei da Suécia em 1889 foi dado a Henri Poincaré (1854-1912) por demonstrar que a estabilidade do Sistema Solar não pode ser rigorosamente obtida sem tais aproximações (Paty, 2004b). Esse é apenas um exemplo simples de delimitação do problema a partir de hipóteses teóricas para fazer observações significativas. Porém, ressaltamos que há suposições subjacentes a qualquer observação científica, nem sempre de forma consciente (Peduzzi; Raicik, 2020).

Quaisquer pequenas variações nas *condições iniciais* de problemas dessa natureza levam à amplificação das perturbações a valores arbitrários e indeterminados, produzindo uma evolução incontrolável e imprevisível. Ou seja, o problema de três corpos é tal que as relações entre os corpos são bem determinadas pela gravitação universal, mas a *previsão* de suas trajetórias é impossível, devido à alta sensibilidade às condições iniciais. O problema de três corpos é, portanto, o primeiro exemplo de *caos determinista* estudado e representa um momento em que a *capacidade preditiva* da mecânica clássica falha dentro do seu próprio escopo de aplicação. Mas a mecânica newtoniana não está incorreta, pelo contrário, é muito robusta e segue relevante na física contemporânea. É a natureza não-linear (complexa) da interação entre os corpos que produz os efeitos imprevisíveis. Em situações dessa natureza, qualquer flutuação ou diferença infinitesimal é amplificada ao longo do tempo e resulta numa trajetória muito diferente do que seria outro sistema preparado em estado inicial praticamente idêntico. A não-linearidade aliada às flutuações são precisamente o que podem produzir a *diferença*, o inesperado e o novo, contrariando as expectativas de um mundo cujos movimentos estariam todos revelados por Newton. O problema de três corpos segue como

⁶ Uma solução numérica é obtida a partir de tabelas de valores estimados por meio de aproximações e algoritmos computacionais. Em contrapartida, uma solução analítica é uma solução exata, obtida por meio de equações matemáticas definidas por teoria.

problema em aberto na física contemporânea, sendo objeto de estudo de simulações para obtenção de soluções numéricas.

O próximo tópico é dedicado à segunda lei da termodinâmica em abordagem histórica e epistemológica, oferecendo uma interpretação da lei para aplicação no Ensino de Ciências e para a construção de um pensar mais complexo e integrado. Os princípios apresentados podem enriquecer, dentre outros temas relevantes, o debate das mudanças climáticas e da transição energética. Sabe-se que a queima de combustíveis fósseis é um processo irreversível que aumenta a entropia ao liberar gases com alta capacidade calorífica na atmosfera, amplificando o efeito estufa. A urgente transição das matrizes energéticas para fontes mais renováveis pode ser pautada a partir de sistemas abertos que diminuem a entropia localmente, produzindo um balanço mais equilibrado na produção (inevitável) de entropia durante a transformação de energia.

IV. A Segunda Lei da Termodinâmica

A teoria física que primeiro revela as rachaduras no mecanicismo é a termodinâmica clássica, em especial a segunda lei da termodinâmica, devido ao seu tratamento das transformações (Prigogine; Stengers, 1991). Os trabalhos com a segunda lei lançam luz sobre novos conceitos científicos relacionados à experiência e à intuição: o tempo corre em uma única direção. Lembramos que na mecânica clássica o tempo é uma variável absoluta e independente do espaço e exatamente por isso as leis do movimento são reversíveis. Isto é, se tomássemos um movimento “de trás para frente” a descrição matemática seria equivalente, bastando trocar o sinal da variável. Porém, se o tempo é reversível para as leis universais da mecânica, por que é irreversível para tudo o que é vivo? Qual a relação entre vida e decaimento, irreversibilidade e história? Apresentaremos os conceitos de irreversibilidade e entropia a partir das noções de transformação e incerteza para evidenciar o fator histórico incorporado às leis científicas.

A segunda lei da Termodinâmica é uma *lei fenomenológica*. Isto é, todo enunciado que descreva corretamente um fenômeno que decorre da relação entre calor e trabalho que a segunda lei impõe é considerado um enunciado válido. Encontramos diferentes formulações da segunda lei ao longo da história, mas a mais adotada em livros de ciências é a formulação de Kelvin-Planck, como segue: “*É impossível construir uma máquina que trabalhe em um ciclo completo, cujos únicos efeitos sejam o levantamento do peso e o resfriamento de um reservatório térmico*” (Planck, 1945, p. 89, *apud* Nóbrega *et al.* 2009). Ou seja, não é possível transformar todo o calor de um reservatório em trabalho mecânico, nem promover a passagem de calor de uma fonte quente a uma fonte fria sem que haja outro efeito associado – no caso, a dissipação de calor. Max Planck (1858-1947), em *Treatise on Thermodynamics* (1945), escreve: “o princípio de Clausius afirma que o calor não pode por si só passar de um

corpo frio a um quente”⁷, em seguida, destaca: “o calor não pode, de nenhuma maneira e por nenhum processo, ser transportado de uma fonte fria a uma fonte quente sem deixar transformações, i.e., sem *compensação*”⁸ (p. 85, tradução nossa). O grifo no original em “compensação” é um indício de que o significado é bastante útil para explorar o conceito de entropia. Mesmo que seja um sentido que tenha sido gradativamente abandonado por livros didáticos e manuais de ensino, a ideia de compensação permanece válida para entender o que é entropia no contexto de aplicação da termodinâmica clássica (Aurani, 2018). Por essa razão, escolhemos destacar a compreensão de Rudolf Clausius (1822-1888) pela natureza das suas contribuições ao campo e pelo conjunto de suposições de que ele dispunha à época da elaboração do conceito. A entropia ensinada a partir da interpretação de Clausius pode ser útil ao Ensino Básico porque não necessita de aprofundamento em teorias mais sofisticadas sobre a composição da matéria e física estatística.

Rudolf Clausius iniciou suas investigações nas implicações do ciclo de Carnot com as descobertas de conservação de energia. Foi Clausius quem elaborou a nomenclatura para a variável *entropia* (“*en*” + “*tropos*”) a partir de uma etimologia que dava a ela, intencionalmente, o mesmo estatuto de importância da *energia* (Clausius, 1865 *apud* Magossi; Paviotti, 2019). De origem grega, a palavra “*tropos*” (*τρόπος*) é uma palavra polissêmica que vem de “*trepo*” (*τρέπω*), que significa virar, girar. No grego moderno e na filosofia, *tropos* ganhou significado de “modo”, “maneira”. Mas, pela origem da palavra em “virar, girar”, o significado também carrega uma noção de *transformação*. Esse foi precisamente o sentido que Clausius quis invocar para nova variável (*ibidem*). Ao longo dos trabalhos publicados entre 1854 e 1867, ele demonstrou que há uma quantidade associada a uma transformação essencial de sistemas que passam pelos processos de: (a) conversão de calor em trabalho; (b) conversão de calor a uma temperatura em calor a outra temperatura; e; (c) alterações no arranjo interno (modos de organização) dos constituintes do sistema. A essa última possibilidade de transformação, Clausius associou a palavra “desagregação”⁹, que permanece também como uma compreensão válida para o conceito de entropia e com potencial para aplicação na formação de professores e no Ensino Básico (Aurani, 2018).

Apesar de não ter formulado de forma explícita uma teoria da matéria, Clausius assumiu premissas atomistas durante o processo¹⁰. A ideia de que há algo que é indivisível e que constitui as demais coisas do Universo – o átomo – se repete e se atualiza em diversas culturas na história do pensamento e pode ser considerado como exemplo de uma

⁷ “The principle of Clausius states that *heat cannot of itself pass from a cold to a hot body.*”

⁸ “[...] heat can in no way and by no process be transported from a colder to a warmer body without leaving further changes, i.e. without *compensation*.”

⁹ “[...] um novo conceito, o de desagregação, que diz respeito ao arranjo dos constituintes das substâncias, e que cresce por efeito do calor, à medida que aumenta a dispersão no corpo.” (Aurani, 2018, p. 159)

¹⁰ Devido ao espaço limitado, não vamos explorar esse ponto. A afirmação é feita com base na leitura do artigo de Clausius traduzido para o inglês, *On the Nature of the Motion which we call Heat* (1857).

*protoideia*¹¹. A suposição sobre a natureza da matéria não é necessária aos resultados da termodinâmica clássica, o que faz dela uma teoria fenomenológica, não explicativa. Mas a hipótese atomista é bastante útil para aprofundar-se a ideia de entropia, além de essencial na descrição estatística das variáveis termodinâmicas¹². Clausius aceitou a validade dos experimentos de James Joule (1818-1889) sobre o princípio de equivalência mecânica entre trabalho e calor e rejeitou a ideia de “conservação do fluido calórico”, isto é, Clausius assumiu que o calor era associado ao movimento das partículas. Ambas teorias – calor como fluido (calórico) ou como movimento de partículas – coexistiram e produziram erros e acertos (Silva *et al.*, 2013). No entanto, podemos dizer que os cientistas defensores do calórico foram morrendo e a teoria deixou de ganhar adesão, quando em comparação com a teoria concorrente. O acúmulo de evidências que observam a relação entre calor e trabalho gerou novos adeptos ao calor como movimento de partículas, fazendo essa visão sobressair. Cabe ressaltar que suposições sobre a natureza do calor tampouco eram condições necessárias para o sucesso da demonstração da eficiência das máquinas térmicas, uma vez que o próprio Sadi Carnot (1796-1832) supunha o calor um fluido (Santos, 2009; Silva *et al.*, 2013).

O artigo original *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*¹³ foi publicado em 1824. Mesmo que não tenha sido difundido e reconhecido amplamente na sua época, atualmente a literatura o toma como um marco temporal da termodinâmica clássica. Destacamos a data a fim de apontar o tempo decorrido entre as investigações sobre moto-perpétuo e a formalização teórica sobre as máquinas térmicas publicada por Carnot. Como teorizado por ele, é impossível que uma máquina térmica obtenha 100% de rendimento, mesmo que opere em transformações reversíveis sem atrito, *i.e.*, em processos idealizados. Conclui-se disso que não é por uma limitação técnica que não se pode produzir trabalho integralmente a partir de uma fonte de calor. Na natureza, por meio de observação ou experimentos controlados, jamais houve registro de fenômeno no qual a energia térmica (calor) fosse totalmente convertida em energia mecânica útil (trabalho). A formalização proposta por Carnot sustentou essa observação no domínio teórico, onde se testam hipóteses e realizam experimentos em situações idealmente controladas. Logo, *mesmo em uma situação ideal*, a relação entre os tipos de energia descritos não permite operar uma transformação integral de um tipo a outro. Há sempre uma parcela de energia dissipada, perdida. A intuição que pairava há cerca de um século entre as academias

¹¹ “As protoideias devem ser consideradas como pré-disposições histórico-evolutivas de teorias modernas e sua gênese deve ser fundamentada na sociologia do pensamento” (Fleck, 2010 [1935], p. 66).

¹² Para uma exposição mais detalhada sobre a hipótese atomista da matéria e a recepção da comunidade científica das ideias difundidas por Ludwig Boltzmann (1844-1906) acerca do atomismo, ver Videira (2006).

¹³ Convém mencionar que a motivação de Carnot para estudar a eficiência de máquinas térmicas era encontrar formas de melhorar o desempenho da França frente à potência esmagadora das máquinas a vapor da Inglaterra (Santos, 2009). A beligerância entre França e Inglaterra impulsionou o jovem cientista a buscar uma forma de servir à sua nação através da ciência. Ele tomou a abordagem teórica, na contracorrente da maioria dos trabalhos que focaram no refino de técnicas que reduzissem as perdas por dissipação.

de ciências de que o moto-perpétuo era, de fato, um empreendimento irrealizável é assim reforçada.

A decorrência dos trabalhos de Carnot impacta na mentalidade extrativista que descrevemos na seção anterior porque ratifica a impossibilidade de obter trabalho da natureza de modo espontâneo, irrestrito, sem ação externa e sem produção de entropia – *i.e.*, sem *compensação*. E adiciona uma sutileza: é possível pensar motos-perpétuos que não violam o princípio de conservação de energia, mas violam a lei da entropia. Estes são conhecidos como “moto-perpétuo de segundo tipo” e são, precisamente, as máquinas térmicas de rendimento integral. Esse raciocínio demonstra que a lei de conservação de energia sozinha não é suficiente para descrever a totalidade dos fenômenos proibidos na natureza (Santos, 2009), reforçando a relevância da segunda lei para a compreensão do mundo físico. A *dissipação* e *degradação* de uma parte da energia são inevitáveis e necessárias, pois “a produção de calor sozinha não é suficiente para dar origem à potência motriz do fogo; é necessário haver o frio; sem isso o calor seria inútil” (Carnot, 1824 *apud* Aurani, 2018, p. 156).

Para melhor entendimento da particularidade do ciclo de Carnot, composto apenas de processos reversíveis, cabe uma exposição da reversibilidade e irreversibilidade à luz dos referenciais trazidos. Conforme a formulação de Clausius, em uma transformação *reversível*, o estado final e o estado inicial estão em arranjos internos *equivalentes*, de tal maneira que não há *transformação de natureza* do sistema, pois não houve desagregação. As transformações (compressões e expansões isotérmicas e adiabáticas) sucedem de modo que a somatória das compensações de cada uma resulta em zero. Na linguagem atual, essa é uma maneira de enunciar a segunda lei: *em processos reversíveis, a variação de entropia é igual a zero*. No caso de processos cíclicos, portanto, o arranjo inicial é recuperado com um arranjo final equivalente. No entanto, há a lei empírica que exibe um sentido privilegiado para algumas transformações, como a passagem de calor de uma temperatura mais alta a uma temperatura mais baixa (princípio de Clausius). Nesse caso, o processo ocorre *espontaneamente*, sem necessidade de haver transformação em outra parte da natureza, e a compensação tem valor positivo. Em outras palavras: *a variação de entropia dos processos espontâneos – portanto, irreversíveis –, é sempre positiva*. Exemplos notáveis de processos irreversíveis são: expansão livre de um gás, dissolução de substâncias, queima de combustíveis e a dissipação de calor por atrito.

Necessariamente, um processo irreversível é tal que é impossível recuperar o estado anterior do sistema, *por quaisquer vias da natureza* (Planck, 1945). Ou seja, é uma transformação essencial do arranjo interno¹⁴, uma desagregação produzida pela degradação de parte da energia utilizável. O estado inicial não poderá ser integralmente reconstruído a partir do estado final com um arranjo equivalente *sem um agente externo*. Desse modo, ainda que o

¹⁴ O arranjo interno é o modo de organização dos constituintes básicos do sistema, relativo às variáveis de posição, momento, energia, etc. No contexto da física estatística é chamado de *microestado*. Um microestado corresponde a um macroestado particular (pressão, volume, temperatura) e um mesmo macroestado pode ser obtido por diferentes microestados.

sistema possa ser recolocado em um estado equivalente ao inicial, o gasto de energia para realizar a ação (trabalho) produzirá uma transformação irreversível em outra parte (pela dissipação de calor, p. ex.), somando valor positivo à compensação total. Isto é, ainda que o valor da entropia possa ser reduzido em um sistema aberto – que troca matéria e energia com o meio externo –, é sempre possível encontrar um sistema fechado nas vizinhanças no qual a entropia é positiva e maior que a entropia negativa, mantendo a desigualdade da segunda lei.

Reforçamos que a pedra angular da segunda lei da termodinâmica é que existem sentidos privilegiados para alguns fenômenos naturais. “A segunda lei, portanto, fornece uma relação entre as quantidades relacionadas com os estados iniciais e finais de qualquer processo natural”¹⁵ (Planck, 1945, p. 87). Essa sentença nos permite dizer, portanto, que a segunda lei pode criar uma distinção entre intervalos de tempo, ancorando em termos científicos uma noção de “antes” e “depois”. Considerando a expressividade dos processos irreversíveis, podemos nos perguntar se os reversíveis sequer ocorrem na natureza. Max Planck argumenta que é possível considerar a reversibilidade sob a condição de que o atrito possa ser evitado. No entanto,

*Como não há na natureza nenhum processo inteiramente livre de atrito ou condução de calor, todos os processos que realmente ocorrem na natureza, se a segunda lei for correta, são na realidade irreversíveis. Processos reversíveis compõem somente um caso ideal limítrofe. Eles são, no entanto, de considerável importância para demonstração teórica e para aplicação em estados de equilíbrio*¹⁶ (Planck, 1945, p. 88).

Concluimos então que os fenômenos reais, presentes em nosso cotidiano, são irreversíveis. Essa é uma das contraposições que a termodinâmica coloca em relação ao tempo newtoniano, supostamente reversível e absoluto. É a irreversibilidade, pois, que permite a distinção entre um estado inicial (antes) e um estado final (depois) em decorrência de uma transformação essencial da natureza. Cabe ressaltar que as leis da termodinâmica clássica só podem ser aplicadas no *limite termodinâmico*. Apesar das leis microscópicas serem determinísticas, a trajetória individual de uma partícula não pode ser traçada com precisão, de modo similar ao que ocorre com o mencionado problema de três corpos.

E, enfim, como definir a entropia? Além de uma medida de compensação das transformações, de desagregação dos constituintes, uma palavra que pode agrupar tais significados é a *incerteza*. Assumindo premissas atomistas como Clausius fez, a entropia mede o quanto *não sabemos* sobre a configuração interna de um sistema. Portanto, um

¹⁵ “The second law, therefore, furnishes a relation between the quantities connected with the initial and final states of any natural process.”

¹⁶ Since there exists in nature no process entirely free from friction or heat-conduction, all processes which actually take place in nature, if the second law be correct, are in reality irreversible. Reversible processes form only an ideal limiting case. They are, however, of considerable importance for theoretical demonstration and for application to states of equilibrium.

sistema com alta entropia pode estar em uma variedade de modos (microestados) que se apresentam como um mesmo estado macroscópico (macroestado). Ao passo que um sistema com baixa entropia tem menos modos de organização que correspondem a um mesmo macroestado definido por esses. Um pedaço de carvão mineral é tal porque tem configuração molecular definida. À medida que ocorre a queima do carvão (transformação irreversível), os átomos, confinados em posições particulares, são liberados para a atmosfera e podem ocupar uma variedade maior de posições na forma de gases resultantes da queima. Portanto, a entropia de um volume de carvão mineral é menor do que a entropia do volume de gases produzidos após a queima desse material. Isso porque se tem mais informação e, conseqüentemente, menos incerteza sobre os átomos quando estão organizados em moléculas do que quando difundidos na atmosfera sob a forma de gases.

Salientamos que *incerteza* é não somente uma palavra que pertence ao vocabulário científico, mas também uma palavra de ordem nos paradigmas informados pela irreversibilidade que exibimos nesse artigo. Por exemplo, a imprevisibilidade, a abertura ao acaso e a possibilidade do erro são essenciais na construção do pensamento complexo (Morin, 2005). Nos estudos reunidos em NdC, também não faltam afirmações sobre o caráter conjectural do pensamento científico, da mutabilidade das ciências, da presença de intersubjetividades na criação e escolha de teorias, entre outras características que impõem um grau de incerteza necessário ao empreendimento científico (dentre outros, Forato *et al.*, 2011; Moura, 2014; Peduzzi; Raicik, 2020).

É comum que o conceito de entropia seja associado à “desordem” e ao caos progressivo, dado que a segunda lei impõe uma tendência espontânea à dissipação de energia e ao decaimento. No entanto, o par ordem/desordem é uma classificação altamente subjetiva e ambígua e precisa ser pensada contextualmente, sem trivialidades. “A *desordem é simplesmente a ordem que não buscamos*” (Bergson *apud* Japiassú; Marcondes, 2008). Isso porque, se existe uma tendência natural à “desordem”, como explicaríamos o aparecimento de moléculas orgânicas com organizações cada vez mais intrincadas ao longo do tempo? Em um quadro conceitual que entende a lei da entropia apenas como desordem crescente, a vida continua sendo intangível.

Por isso, propomos uma interpretação para a entropia que desloque o foco da desordem para a possibilidade de *outras ordens* e *auto-organização* (Prigogine, 1996). Ilya Prigogine, a partir da segunda metade do século passado, publicou pesquisas em físico-química de sistemas abertos longe do equilíbrio, chegando a resultados sobre o comportamento da matéria que chamou de *estruturas dissipativas*. São estruturas cuja ordem depende da relação de dissipação de energia e matéria com os arredores, oscilando entre diversas configurações dinâmicas. Dentre a variedade de potencialidades científicas e filosóficas, salientamos a *historicidade* presente no comportamento dessas estruturas. A sucessão de transformações atravessadas pelo sistema permite observar um verdadeiro “elemento histórico”, com quebras de simetria temporal e estruturas auto-organizadas. As

flutuações desempenham papel crucial para auto-organização em regiões de instabilidade e nos forçam a abandonar o regime determinista, de modo semelhante ao que descrevemos com o problema de três corpos, no qual qualquer flutuação nas condições iniciais conduz a trajetórias radicalmente distintas. Por exemplo, ao exceder parâmetros críticos, para recuperar o equilíbrio dinâmico o sistema longe do equilíbrio “escolhe” soluções mais estáveis, dando origem a bifurcações que expressam uma história de evolução do sistema (Prigogine, 1996, p. 71-73).

Dadas essas características, as estruturas dissipativas são úteis à modelagem de sistemas caóticos, biológicos, climáticos, entre outras aplicações. A vida, no entanto, mesmo em suas formas mais simples, chega a níveis de organização e funções ainda mais complexas do que os sistemas físico-químicos estudados. No livro *O fim das certezas* (1996), Prigogine expõe detalhadamente tanto o conteúdo científico dos seus estudos quanto a filosofia da física que emerge do paradigma da irreversibilidade e da incerteza. Sem diminuir a pertinência da descrição por trajetórias, ele expande o panorama das ciências para abarcar regiões fora do equilíbrio, a não-linearidade e a incerteza como forças criadoras. Conta também que o interesse por sistemas longe do equilíbrio não foi bem recebido pela comunidade à época, que julgava infrutífero o estudo de objetos tão imprevisíveis. O paradigma mecanicista, como tal, segue orientando a escolha de objetos de estudo e as práticas consideradas legítimas. No entanto, o interesse de Prigogine é exatamente a pergunta sobre uma das características mais flagrantes da vida: a impermanência.

Esperamos haver delineado o poder da irreversibilidade e da dissipação para uma noção mais histórica das ciências.

V. Alinhavando conexões com o Ensino de Ciências

A termodinâmica clássica fundamenta cientificamente a intuição cotidiana: a distinção entre o antes e o agora não é uma limitação da percepção, senão uma lei fundamental que governa as transformações entre matéria e energia. Ao menos, no nível da experiência humana, a velocidades não-relativísticas e em sistemas macroscópicos. O tempo unidirecional foi finalmente cientificizado e as ciências são históricas em sua própria natureza.

Para os objetivos do ensino de ciências, acreditamos na irreversibilidade como um convite a um reposicionamento mais crítico das ações humanas na teia de relações com o mundo. Durante o ensino da termodinâmica, cabe ressaltar a diferença entre sistemas idealizados (reversíveis, isolados) e sistemas reais (irreversíveis, abertos) e a maciça presença dos últimos no cotidiano. Valorizar o estudo das transformações irreversíveis, cujos efeitos são o aumento de entropia, degradação da energia aproveitável e o aumento de incerteza. Explicitar que, ainda que sempre haja crescimento de entropia global, há uma variedade de sistemas abertos na natureza cujo funcionamento pode diminuir a entropia localmente, criando outras ordens. Por exemplo, o processo de fotossíntese, que fixa um volume de gás

carbônico diluído no ar atmosférico em moléculas orgânicas que servem a funções vitais das plantas. A dissipação é parte essencial na manutenção da vida, posto que seres vivos são sistemas abertos que consomem energia.

O tratamento por temas, por exemplo, contempla a interdisciplinaridade que assinala o caráter interdependente e complexo das questões sócio-científicas e da Natureza das Ciências. Watanabe e Kawamura (2017), visando contornar possíveis dificuldades na inserção da organização por temas na cultura escolar, propõem os “percursos abertos”, que mesclam elementos das abordagens tradicional e temática. Pode-se dizer que ambos os caminhos estão em contato com o paradigma da incerteza quando assumem a abertura para a escolha docente em função da realidade de sua prática. Além disso, a estrutura sugerida por eles permite a adequação do conteúdo científico ao longo do percurso didático, que recebe inevitavelmente estímulos dos estudantes e reajusta objetivos educacionais em função disso. Ou seja, presumem a importância da *imprevisibilidade* e da incerteza na criação de novos conhecimentos.

Além da perspectiva histórica do funcionamento das ciências, o paradigma da irreversibilidade pode contribuir para um pensar mais complexo porque desvela a teia de relações presentes entre cada ação que toma parte na Terra. Nos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, em inglês) consta que desde 1970 a temperatura média do planeta cresceu mais rápido do que em qualquer período de 50 anos anterior a isso. O nível de concentração de gás carbônico na atmosfera é o mais alto dos últimos 2 milhões de anos. É considerada inequívoca a participação humana no aumento da concentração de gases que produzem o efeito estufa que acarretam o aumento da temperatura média da Terra (IPCC, 2023). Os padrões de consumo sustentados por uma visão de mundo que coloca Terra à disposição como uma fonte de recursos e que supõem um crescimento progressivo é insustentável do ponto de vista socioambiental.

A menção às máquinas térmicas, além de necessária aos conceitos apresentados, é uma escolha consciente por trazê-las junto ao tema das mudanças climáticas e transição energética. Afinal, as máquinas a vapor foram o principal motor da I Revolução Industrial europeia, um período de alteração substancial nos modos de produção capitalista. Máquinas térmicas são o exemplo canônico de técnica que surgiu antes da teoria e podem servir de ensejo a ricos debates sobre usos do conhecimento técnico e impactos não calculados desse uso. Por exemplo, as máquinas a vapor de Newcomen, modelo mais utilizado antes da máquina de Watt, tinham uma eficiência ao redor de 1%. O que significa que apenas 1% da energia contida em uma massa de carvão era aproveitada para geração de trabalho. Os 99% restantes eram perdidos na forma de calor dissipado e os gases lançados à atmosfera (Santos, 2009).

IV. Conclusão

Vimos que o homem mecanicista é um indivíduo que observa o mundo “de cima” na tentativa de alcançar uma lei geral, aplicável a toda parte (Latour, 2020). Essa perspectiva desimplicada, ao mesmo tempo em que “revela” os segredos da Natureza, a fez parecer subitamente inerte, pois estaria inteiramente determinada por um observador externo. Como já pontuamos, as ciências seriam tão mais bem sucedidas quanto mais suscetíveis à imobilização, à dissecação dos objetos de estudo e da quantificação “sob a forma de elementos manipuláveis e calculáveis.” (Prigogine; Stengers, 1991, p. 75) A ciência moderna marca a passagem da *contemplação* e *meditação* aristotélicas para a *manipulação* e *dominação* da mecânica racional (Rosa, 2006; Oliveira, 2008).

“A ciência”, no geral, é referida na literatura como uma fonte de feridas narcísicas para o ser humano moderno quando, em três momentos, o obrigou a se reposicionar: no universo, como espécie, e diante de si mesmo, com a revolução copernicana, a evolução darwiniana e pelo inconsciente freudiano, respectivamente (Prigogine, 1996; Rosa, 2006; Latour, 2020). Nathan Lima e Andreia Guerra (2022) propõem uma ciência menos narcísica, que possa se identificar *como* mundo, não como algo à parte dele. No artigo intitulado “*Superando Narciso: história das ciências para adiar o fim do mundo*”, os autores sugerem que o “fim do mundo” – o conjunto de colapsos e crises que experienciamos atualmente – é fruto do discurso extrativista como o que descrevemos nesse artigo, que se efetivou em diferentes formas de exploração da natureza durante séculos” (Oliveira, 2008; Lima; Guerra, 2022).

Na introdução do livro *A nova aliança* (1991), Prigogine e Stengers se referem a um *desencantamento do mundo* que supostamente teria sido produzido devido aos êxitos do diálogo experimental. Aliados, o controle dos segredos da natureza e o triunfo da técnica justificariam a postura extrativista que expusemos na primeira seção:

A ciência desencantada, neste sentido, afeta duplamente as relações do homem com a natureza: ela não só legitima a postura de dominação, mas também fornece, através da tecnologia, os meios para ampliar e tornar a dominação mais eficiente (Oliveira, 2008, p. 99).

Indicamos a leitura de Oliveira (2008) para maior detalhamento dos termos “desencantamento da natureza”, “dominação” e “manipulação”, aos quais cabe cautela. Tanto Prigogine e Stengers quanto Oliveira não associam simples e diretamente o “mundo desencantado” com a ciência moderna, argumentando que esses não são sinônimos e não estão inevitavelmente interligados. A posição de superioridade do humano diante da natureza foi favorecida por um conjunto de fatores culturais, econômicos, políticos, religiosos, entre outros, pela qual não se pode responsabilizar exclusivamente as ciências. Houve um acoplamento entre o modelo cosmológico newtoniano, o discurso judaico-cristão e o modo de produção e acumulação capitalista que puderam ser largamente aplicados a uma natureza

imobilizada pelas estratégias experimentais e pelo sucesso preditivo das teorias (Oliveira, 2008; Lima; Guerra, 2022). Porém, a concepção extrativista que emergiu desse arranjo particular da ciência moderna europeia não é a única maneira com a qual podemos nos relacionar com o mundo. E hoje essa maneira está a nos cobrar um preço alto, talvez demasiadamente alto.

Mergulhando na história das ciências encontramos diversos episódios nos quais a prática científica não se sustentou apenas no paradigma moderno (Lima; Guerra, 2022). Exemplificamos com o problema de três corpos e com a segunda lei da termodinâmica. Vimos que, mesmo em sistemas governados pelas leis de Newton, é possível ter caos determinista e imprevisibilidade devido à natureza não-linear das interações. Discutimos a lei da entropia do ponto de vista da irreversibilidade, das transformações de natureza, da compensação e incerteza. A partir desses fundamentos, vislumbramos novos sentidos para as ciências como postos por Ilya Prigogine, com os sistemas longe do equilíbrio, que reiteram a importância da irreversibilidade, das flutuações e do imprevisível como forças criadoras de novas ordens. A irreversibilidade consiste em não poder restaurar um estado final a um estado anterior sem deixar uma mudança equivalente em alguma outra parte. Não é tão somente não conseguir restituir o sistema a um estado anterior; é não poder fazê-lo sem que algo se transforme. Portanto, uma transformação em uma porção do universo acarreta uma transformação na porção vizinha, criando um encadeamento de acontecimentos e uma direção que ficou identificada como flecha do tempo. Constitui-se, então, um sentido de historicidade, de devir, inerente à natureza.

Devido à incerteza intrínseca à matéria, acontecimentos são possíveis, porém não necessariamente determinados de forma completa. Há uma qualidade dita *contingência*, que surge como um contraponto ao determinismo, destacando a *não-necessidade*. No entanto, pode haver graduações entre a contingência e a necessidade. A presença de probabilidades introduz uma medida de previsibilidade, indicando que, embora não estejamos totalmente restritos à determinação, há uma certa propensão ou regularidade nos eventos que podem influenciar seu curso. Inspiramo-nos na ideia de contingência para propor que, ainda que as transformações feitas pelo humano na natureza sejam irreversíveis, a maneira como elas foram feitas até então não é a única possível. A contingência é uma característica presente nas ciências (Peduzzi; Raicik, 2020) e pode nos auxiliar na recusa ao determinismo científico e tecnológico.

Quanto ao suposto desencantamento do mundo, as ciências podem reencontrar encanto em seus próprios objetos de estudo. Enquanto a mecânica clássica retém dos fenômenos características imutáveis, qualidades simétricas e as invariantes, a termodinâmica lida com a mudança, a diferença, o fluxo e as quebras de simetria. Mesmo na dissipação (e por causa dela) e longe do equilíbrio, há a emergência de estruturas auto-organizadas, que se reconfiguram em arranjos mais estáveis para perdurar mediante estímulos desestabilizantes, semelhantes à lógica da vida. Ressaltamos o fator historicidade em sistemas longe do

equilíbrio e como eles incorporam às ciências um desenvolvimento mais criativo, aberto ao acaso e de reorganização contínua que busca estabilidade, características que já foram dadas às ciências por inúmeros historiadores e filósofos das ciências.

Esperamos ter apresentado uma crítica à concepção de mundo como recurso passível de dominação e extração sem consequências. Interrogamos o discurso de epistemologias reducionistas que ignoram a complexidade da natureza e evidenciamos algumas de suas limitações. Propusemos superar as mentalidades que, no fascínio pela abstração e busca do absoluto e universal, acabam por perder de vista a beleza da realidade permeada pela incerteza e imprevisibilidade. A cisão cartesiana humano-natureza, sujeito-objeto, característica do pensamento moderno, obstrui a apreensão da teia dos acontecimentos do real. Não estamos no mundo, mas somos, também, mundo. Tomamos parte nele como produtos e reprodutores de transformações irreversíveis que escrevem uma história planetária, um devir comum da humanidade (Morin, 2000). O pensamento complexo advoga por uma religação dos saberes até a recuperação de uma identidade menos narcísica e mais ecológica, que pode reconstituir sentidos mais críticos na participação humana no ambiente e para com a sociedade.

Evidentemente, nossa crítica se fez a partir de nossa visão de mundo e de nossas concepções, algo inescapável. No que essa visão de mundo tange ao Ensino de Ciências, recuperamos a relevância do pensamento complexo na elaboração de estratégias didáticas, currículos e por uma reforma na cultura escolar. A alfabetização científica para a ação cidadã inclui, necessariamente, ensinar de que modos as concepções epistemológicas e sobre as ciências influenciam o pensamento no cenário global atual. Não se trata de culpar as ciências, mas de problematizar um discurso que as presume neutras e desimplicadas de responsabilidades socioambientais. Os principais desafios do mundo contemporâneo exigem posicionamento ético e crítico ao consumo e ao desenvolvimento tecnológico desenfreado. Do ensino espera-se, sobretudo, a difusão de um conhecimento que permita a tomada de decisões informadas sobre as ciências em suas múltiplas dimensões e a urgência dos problemas contemporâneos globais. Também, o oferecimento de subsídios às ações críticas e inovadoras no percurso de um futuro incerto, em construção constante. O que se almeja é que, em tempos de crise – e além – os alunos possam ter agência sobre seus processos de aprendizagem, com vistas inclusive ao longo da vida, beneficiando a si próprios e seu entorno. Os currículos de modelo tradicional – *i.e.*, disciplinas focadas na transmissão do conteúdo “objetivo” sem menções a elementos metacientíficos – tendem a produzir uma versão bidimensional das ciências que não comporta nuances e divergências. O pensamento crítico (e científico) requer habilidade de ponderar sobre interpretações diversas, concorrentes e, por vezes, contraditórias. Uma versão das ciências que exclui a importância do erro, das suposições e da diversidade de opiniões reduz a complexidade do empreendimento científico somente ao uso instrumental.

Podemos dizer que alcançamos as reflexões propostas aos leitores desse artigo usando uma metodologia de cunho complexo: buscamos *tecer* uma história possível para a

termodinâmica com reflexões originadas em história das ciências e em filosofia das ciências, principalmente, construindo um saber que transborda o conteúdo propriamente dito da termodinâmica e que pode impregnar uma visão de mundo. Como um texto de caráter teórico e reflexivo, não se propõe apresentar propostas ou exemplos à exaustão, mas sim provocar reflexões e inspirar mudanças (possíveis) no Ensino de Ciências.

Agradecimentos

A primeira autora agradece aos colegas Frederik pela leitura crítica e Maira pela consultoria e apoio no processo de escrita.

Referências bibliográficas

ABD-EL-KHALICK, F.; LEDERMAN, N. G. Improving science teachers' conceptions of nature of science: a critical review of the literature. **International Journal of Science Education**, v. 22, n. 7, p. 665-701, jul. 2000.

ALMEIDA, M. da C. X. DE. Educar para a complexidade: o que ensinar, o que aprender. **APRENDER - Caderno de Filosofia e Psicologia da Educação**, n. 5, 2005. Disponível em: <https://periodicos2.uesb.br/index.php/aprender/article/view/3179>.

ANGOTTI, J. A. P. Ensino de ciências e complexidade. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 2, 1999, Valinhos. **Anais...** São Paulo, 1999.

AULER, D.; DELIZOICOV, D. Alfabetização científico-tecnológica para quê? **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 3, p. 122-134, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/epec/a/XvnmrWLG4qqN9SzHjNq7Db/>.

AURANI, K. M. Ideias iniciais de Clausius sobre entropia e suas possíveis contribuições à formação de professores. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 11, n. 1, p. 155-163, jun. 2018. Disponível em: <https://rbhciencia.emnuvens.com.br/revista/article/view/67>.

CACHAPUZ, A.; PRAIA, J.; JORGE, M. Da educação em ciência às orientações para o ensino das ciências: um repensar epistemológico. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 10, n. 3, p. 363-381, 1 dez. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/dJV3LpQrsL7LZXykPX3xrwj/>

CLAUSIUS, R. XI. On the nature of the motion which we call heat. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 14, n. 91, p. 108-127, 1857.

CLOUGH, M. P. History and Nature of Science in Science Education. *In*: TABER, K. S.; AKPAN, B. (Eds.) **Science Education: New Directions in Mathematics and Science Education**, Brill, 2017, cap. 3, p. 39-51. Disponível em: <https://brill.com/display/book/edcoll/9789463007498/BP000004.xml>.

DAMASIO, F.; PEDUZZI, L. O. Q. História e filosofia da ciência na educação científica: para quê? **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 19, n. 0, 2017.

EL-HANI, C. N. Notas sobre o ensino de história e filosofia das ciências na educação científica de nível superior. *In*: SILVA, C. C. (Org.). **História e Filosofia da Ciência no Ensino de Ciências: Da Teoria à Sala de Aula**. São Paulo: Livraria da Física, 2006. p. 3-21.

FLECK L. **Gênese e desenvolvimento de um fato científico**. Tradução: Otto e Camilo de Oliveira. Belo Horizonte: Fabrefactum [1935], 2010.

FORATO, T. C. DE M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. A. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002259848>.

GALLO, S. Conhecimento, transversalidade e currículo. *In*: REUNIÃO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM EDUCAÇÃO, 18, 1995, Caxambu. **Anais...**

GIL-PÉREZ, D. G. *et al.* Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/DyqhTY3fY5wKhzFw6jD6HFJ/>.

GIL-PÉREZ, D.; VILCHES, A. Educación ciudadana y alfabetización científica: mitos y realidades. **Revista Iberoamericana de Educación**, v. 42, n. 1 p. 31-54, 2006. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2259852>.

GUERRA, A.; MOURA, C. B.; GURGEL, I. Sobre Educação em Ciências, Rupturas e Futuros (Im)possíveis. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 37, n. 3, p. 1010-1019, dez. 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/issue/view/3108>.

HOBBSAWM, E. **A Era das Revoluções: 1789-1848**. São Paulo: Paz e Terra, 2009.

HODSON, D. Philosophy of Science, Science, and Science Education. **Studies in Science Education**, v. 12, n. 1, p. 25-57, jan. 1985.

IPCC. **Summary for Policymakers** [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, p. 3-33, 2022.

JAPIASSÚ, H.; MARCONDES, D. **Dicionário básico de filosofia**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2008.

LATOURE, B. **Diante de Gaia: oito conferências sobre a natureza no Antropoceno**. São Paulo: Ubu Editora, 2020. 421 p.

LIMA, N. W.; GUERRA, A. Superando Narciso: história das ciências para adiar o fim do mundo. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 15, n. 2, p. 386-399, 17 dez. 2022. Disponível em: <https://rbhciencia.emnuvens.com.br/revista/article/view/806>.

MAGOSSI, J. C.; PAVIOTTI, J. R. Incerteza em entropia. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 12, n. 1, p. 84-96, 15 jun. 2019. Disponível em: <https://rbhciencia.emnuvens.com.br/revista/article/view/47>.

MATHEWS, M. História, Filosofia e Ensino de Ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensinos de Física**, v.12, n. 3, p. 164-214, dez. 1995.

MATTOS, C.; HAMBURGER, A. I. História da ciência, interdisciplinaridade e ensino de física: o problema do demônio de Maxwell. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 10, n. 3, p. 477-490, dez. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/bp88Dmb4fBxbNKxk6YChSWw/>.

MOREIRA, M. A. Ensino de física no Brasil: retrospectiva e perspectivas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. São Paulo, v. 22, n. 1, p. 94-99, mar. 2000.

MORIN, E. **Introdução ao pensamento complexo**. Porto Alegre: Sulina, 2005, 120 p.

MOURA, B. A. O que é natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência? **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 7, n. 1, p. 32-46, 2014. Disponível em: <https://rbhciencia.emnuvens.com.br/revista/article/view/237>.

MOURA, C. B. Para quê história da ciência no ensino? Algumas direções a partir de uma perspectiva sociopolítica. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 4, n. 3, p. 1155-1178, 1 set. 2021. Disponível em: <https://seer.upf.br/index.php/rbecm/article/view/12900>.

NÓBREGA, M. L.; FREIRE JR., O.; PINHO, S. T. R. Max Planck e os enunciados da segunda lei da termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, set. 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/bYh7fjF7QhXgqTW4cgyd3qS/?lang=pt>.

OLIVEIRA, M. B. Neutralidade da ciência, desencantamento do mundo e controle da natureza. **Scientiae Studia**, v. 6, n. 1, p. 97-116, mar. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ss/a/NsP3WxpnsjzbZkHt8DwSW5K/>.

PATY, M. A gênese da causalidade física. **Scientiae Studia**, v. 2, p. 9-32, 1 mar. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ss/a/HBL6vGLYvctFGz9dFszsrZD/>

PATY, M. A noção de determinismo na física e seus limites. **Scientiae Studia**, v. 2, n. 4, p. 465-492, 1 dez. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ss/a/Lf9R3Y5g6HTvQNxysFDCJ4C/?lang=pt>.

PEDUZZI, L. O. Q.; RAICIK, A. C. Sobre a Natureza da Ciência: asserções comentadas para uma articulação com a História da Ciência. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 25, n. 2, p. 19, 31 ago. 2020. Disponível em: <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/1606/0>.

PEREIRA, F. P. C.; GURGEL, I. O ensino da Natureza da Ciência como forma de resistência aos movimentos Anticiência: o realismo estrutural como contraponto ao relativismo epistêmico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 37, n. 3, p. 1278-1319, 2020.

PESTRE, D. Por uma nova história social e cultural das ciências: novas definições, novos objetos, novas abordagens. **Cadernos IG/Unicamp**, v. 6, n. 1, p. 3-56, 1996.

PLANCK, M. **Treatise on Thermodynamics**. Nova York: Dover Publications, 1945. 297 p.

PRAIA, J.; GIL-PÉREZ, D.; VILCHES, A. O papel da natureza da ciência na educação para a cidadania. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 13, n. 2, p. 141-156, ago. 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/t9dsTwTyrrbz5qC3y5gCVGb/>.

PRIGOGINE, I. **O fim das certezas**. Tradução: Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora UNESP, 1996. 199 p.

PRIGOGINE, I; STENGERS, I. **A nova aliança**. Tradução: Miguel Faria e Maria Joaquina Machado Trinciera. Brasília: Editora UnB, 1984. 245 p.

ROSA, L. P. **Tecnociências e Humanidades: Novos paradigmas, velhas questões**. São Paulo: Paz e Terra, 2006. 498 p. v. 2.

SANTOS, Z. T. S. **Ensino de Entropia: um enfoque histórico e epistemológico**. 2009. 169 f. Tese (Doutorado em Educação) – Centro de Ciências Sociais Aplicadas, UFRN, Rio Grande do Norte.

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. DE. Alfabetização Científica: uma revisão bibliográfica. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 16, n. 1, p. 59-77, 2011. Disponível em: <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/246>.

SCHAFFER, S. The show that never ends: perpetual motion in the early eighteenth century. **The British Journal for the History of Science**, v. 28, n. 2, p. 157-189, jun. 1995.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **The Bell system Technical Journal**, v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948.

SILVA, A. P. B.; FORATO, T. C. D. M.; GOMES, J. L. D. A. M. C. Concepções sobre a natureza do calor em diferentes contextos históricos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 30, n. 3, out. 2013.

TEIXEIRA, E. S.; FREIRE JR.; O.; EL-HANI, C. N. A influência de uma abordagem contextual sobre as concepções acerca da natureza da ciência de estudantes de física. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 15, n. 3, p. 529-556, 2009.

VIDEIRA, A. A. P. Boltzmann, física teórica e representação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, p. 269-280, 2006.

VIDEIRA, A. A. P. **Historiografia e história da ciência**, [s.n.], 2007.

WATANABE, G.; KAWAMURA, M. R. D. Abordagem temática e conhecimento escolar científico complexo: organizações temática e conceitual para proposição de percursos abertos.

Investigações em Ensino de Ciências, v. 22, n. 3, p. 145, 16 dez. 2017. Disponível em: <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/736>.

WATANABE, G.; KAWAMURA, M. R. D. Contribuições das produções sobre a complexidade: aportes para a educação científica escolar. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 37, n. 2, p. 428-454, 12 ago. 2020.

WOODCOCK, B. A. “The scientific method” as myth and ideal. **Science & Education**, v. 23, n. 6, p. 2069-2093, 2014.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](#).