

História da física no século XIX: discutindo natureza da ciência e suas implicações para o ensino de física em sala de aula

History of physics in the 19th century: Discussing the nature of science and its implications for physics teaching in the classroom

NATHALY BARBOZA DE BRITO

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca | CEFET/RJ

UESLEI VIEIRA DOS REIS

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca | CEFET/RJ

IVAN LUIS MIRANDA TALON

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca | CEFET/RJ

JOSÉ CLAUDIO DE OLIVEIRA REIS

Universidade do Estado do Rio de Janeiro | UERJ

RESUMO Este artigo busca discutir a importância de trabalhar-se a história e a filosofia da ciência no ensino. Para isso, contempla alguns aspectos da física do século XIX. São abordados os debates ocorridos em torno do conceito de energia, do conceito de tempo e da natureza da luz como forma de discutir o desenvolvimento da física como um conhecimento historicamente construído. Considera-se que uma abordagem histórica referente à construção do conhecimento científico, constitui uma forma de incluir no contexto educacional debates que podem levar a uma compreensão do conhecimento científico de forma menos ingênua e que contemple aspectos relevantes da natureza da ciência.

Palavras-chave história da ciência – ensino de ciências – natureza da ciência.

ABSTRACT *This paper discusses the importance of working with the history and philosophy of science in science education. For this end, it contemplates some aspects of nineteenth-century physics. We consider debates that took place in that period around the concept of energy, the concept of time and the nature of light as a way to discuss the development of physics as a historically constructed form of knowledge. We consider that an historical approach to the construction of scientific knowledge is a way to include in the educational context discussions that may lead to a less naïve understanding of scientific knowledge and that contemplates relevant aspects of the nature of science.*

Keywords *history of science – science education – nature of science.*

Introdução

Compreender os processos envolvidos na construção do conhecimento científico não se trata de uma tarefa trivial. Com frequência, vemos esse conhecimento supostamente vinculado a certas personalidades científicas, tais como Isaac Newton (1643-1727), cuja história é cercada por lendas e conclusões geniais acerca de fatos corriqueiros, que, conseqüentemente, fomentam no imaginário popular uma visão de que a ciência, assim como a sua compreensão, fazem parte apenas do domínio de gênios abençoados com um conhecimento acima do normal. Torna-se imprescindível adequar essa visão. Deve-se ter clareza quanto ao fato de que a História da Ciência (HC) não é uma simples história de gênios descobridores de leis e teorias, as quais são tidas como absolutas e eternas; de indivíduos alheios ao resto da comunidade científica, das questões econômicas, filosóficas, religiosas, alheios à sociedade como um todo¹. Com o avanço do positivismo, fez-se prevalecer uma visão de ciência matematicamente objetiva, segundo a qual, divagações filosóficas eram rejeitadas, rechaçadas². Segundo Luiz Elias Quintero Samaniego³, o objetivo de caracterizar de maneira geral a ciência, de defendê-la e distingui-la do discurso metafísico de modo que o real, o verdadeiro, seja tão somente o dado sensível concreto – os fatos –, relaciona-se aos ideais positivistas. Essa caracterização tem a pretensão de ser universal e a-histórica, ou seja, busca uma explicação dos métodos e padrões aplicáveis a toda e qualquer ciência, válidos tanto às teorias científicas produzidas no passado, presente ou futuro⁴. Lamentavelmente, certas concepções positivistas acerca do empreendimento científico permanecem correntes até os dias de hoje⁵. Vemos isso refletido numa educação em ciências excessivamente dogmático-instrumental e, por conseguinte, na imagem científica de grande parcela da sociedade⁶.

Notadamente, boa parte do ensino formal de ciências contemporâneo ainda transmite visões demasiadamente empírico-indutivistas, empobrecidas, supostamente relacionadas à produção dos saberes científicos, que distanciam-se bastante das maneiras como são construídos e evoluem esses saberes⁷. A ciência é concebida como produtora de verdades acabadas, conquistadas por meio de um Método Científico universal, se fala demasiadamente em termos de descobertas de grandes gênios, sendo apresentada uma ciência que não existe, neutra, sem espaço para controvérsias e questões de cunho especulativo ou metafísicas, por exemplo⁸. Há muitos educadores, sabemos, que promovem constantes atividades voltadas para a reflexão acerca do processo de produção do conhecimento científico, contudo, ainda podemos notar a presença, em tantas salas de aula, de uma doutrinação sem muito significado prático, quando muito, o mero adestramento dos educandos para os exames de acesso às universidades. No que tange à ciência, transmite-se uma visão restrita, alienada, alheia à influência diversa (sociais, econômicas, políticas, religiosas, culturais), cujo objetivo aparentemente restringe-se à descoberta de leis naturais e teorias absolutas⁹. Segundo Antônio Francisco Carrelhas Cachapuz e colaboradores¹⁰, a transmissão de visões inadequadas, como essa supracitada: contribui para o insucesso escolar, estimula atitudes de rejeição por parte dos educandos e, por conseguinte, implica na carência de candidatos para estudos de nível superior em cadeiras científicas. Assim, a superação das visões deformadas da ciência constitui-se como requisito essencial para a renovação da educação em ciências. Fica evidente a necessidade de uma reorientação das estratégias educativas, de desviarmos das tradicionais abordagens que primam quase exclusivamente pela memorização dos conteúdos e aplicação de fórmulas, de pensarmos sobre como o ensino de ciências pode oferecer uma visão mais ampla e rica sobre o empreendimento científico¹¹.

Nos últimos cinquenta anos, os estudos em HC buscaram desconstruir certas concepções ingênuas sobre as ciências, abrindo nossos olhos para as práticas científicas. Contudo, não houve uma adequada propagação desses estudos para a educação científica¹². Ao menos desde a década de 1960, tem-se discutido sobre a necessidade de inserir a HC nos currículos de disciplinas científicas. Documentos de grande relevância para o contexto educacional nacional, como os Parâmetros Curriculares Nacionais¹³, incentivam a implantação da HC no ensino de ciências como alternativa adequada, favorável ao cumprimento de inúmeros propósitos pedagógicos na formação dos alunos, futuros cidadãos. Argumenta-se sobre a importância da inserção da HC para que com isso sejam clarificados certos aspectos relativos à natureza da ciência (NdC)¹⁴. Sabemos que diversas são as ciências e que cada qual possui sua natureza específica, que por sua vez muda muito ao longo do tempo. Entretanto, em meio a essa diversidade, podemos assinalar alguns

pontos de concordância entre filósofos, historiadores e pesquisadores do ensino de ciências acerca do empreendimento científico¹⁵. Segundo Thaís Cyrino de Mello Forato, Maurício Pietrocola e Roberto de Andrade Martins¹⁶, a ideia de que a HC contribui positivamente para o entendimento da atividade científica já é, há algum tempo, muito mais do que uma suposição razoável. Através de análises histórico-epistemológicas atenta-se para o fato de que o conhecimento científico é influenciado por diversos fatores durante o seu complexo processo de elaboração. Esses fatores vão muito além daqueles considerados habitualmente como científicos. Além disso, segundo Andreia Guerra de Moraes e colaboradores¹⁷, em um mundo tecnocientífico, saber como a ciência se construiu historicamente e conhecer seus pressupostos filosóficos é basilar aos educandos para que tornem-se cidadãos participativos. Segundo Thaís Forato¹⁸, conhecer sobre as ciências por meio de seus pressupostos, limites de validade e influências contextuais, permite uma crítica ao dogmatismo quase sempre presente no ensino e em divulgações científicas. A seguir, citaremos alguns episódios referentes ao processo de construção do conhecimento científico concernente à física do século XIX, que podem, de alguma forma, ser relevantes ao ensino dessa disciplina no contexto do ensino médio.

Este trabalho não é uma síntese de toda a física desenvolvida no período supracitado, já que se trata de um campo muito amplo para ser abordado em um único artigo. O objetivo principal deste trabalho é apresentar algumas ideias gerais acerca da construção histórica do princípio da conservação da energia, da irreversibilidade termodinâmica e das teorias concernentes à natureza da luz, já que são temas que possibilitam evidenciar a ciência como um saber historicamente construído e que tais discussões podem ser levantadas em sala de aula.

Uma breve contextualização

A HC mostra que em um contexto de grandes transformações na sociedade europeia, no período que se estende do início do século XVII até o final do século XIX, houve significativas mudanças na filosofia natural. Esse período, concernente àquela que chamamos de Ciência Moderna, caracterizou-se principalmente pela nova forma de produção do conhecimento, num processo que pretendia criar um caminho seguro para a obtenção de supostas verdades¹⁹. Nesse ínterim, destacamos os trabalhos de alguns dos participantes da chamada Revolução Científica, tais como Nicolau Copérnico (1473-1543), Galileu Galilei (1564-1642), Johannes Kepler (1571-1630) e René Descartes (1596-1650), além daqueles dos herdeiros diretos dessa revolução, tais como Christiaan Huygens (1629-1695), Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) e, principalmente, Isaac Newton (1643-1727). Os trabalhos de Newton merecem uma atenção especial, visto que, apesar de não se limitarem à filosofia natural – já que escreveu sobre alquimia, teologia e sobre muitos outros assuntos que hoje não são considerados como científicos –, apresentam um universo preciso, com medidas exatas e determinações rigorosas, características do período pós-revolucionário²⁰. A partir do século XVIII, há uma consolidação, uma valorização da atividade científica²¹. Já ao final desse século, a **visão de natureza newtoniana encontrava-se como o paradigma dominante na ciência**. O Iluminismo dominou o pensamento Europeu do século XVIII. Tal conjunto de ideias, valores e conceitos foi compartilhado em diversos países pelas mais variadas correntes filosóficas. Alguns preceitos propostos pelos iluministas, como o liberalismo social, político e econômico, acabaram culminando na revolução política francesa e na industrial inglesa do final do século XVIII e início do século XIX²².

As máquinas térmicas, a Revolução Industrial e o conceito de energia

O interesse pelas máquinas ou motores durante a Revolução Industrial (de meados do século XVIII a meados do XIX e, primeiramente, no Reino Unido), ocasionado pela mecanização da produção, pelo surgimento das fábricas e, por conseguinte, pela necessidade de otimização e redução de custos dos processos de produção da emergente burguesia industrial²³ figurou como um dos elementos necessários à formulação quantitativa da conservação da energia²⁴. Com

o avanço das máquinas, houve certa profusão de um grupo específico de atores sociais que surgia, os técnicos-engenheiros, dentre esses, destacamos a figura de John Smeaton (1724-1792), que dedicou-se ao estudo das rodas hidráulicas²⁵, um artefato já à época conhecido, que, atrelado à correnteza de um rio, era utilizado para o acionamento de um conjunto de máquinas²⁶. Numa configuração social capitalista, como a do período supracitado, temos também a figura do trabalhador, que vende sua força de trabalho ao empresário, outra figura relevante nesse contexto. Esse último, por sua vez, lucra de acordo com a produção daquele trabalhador. Numa sociedade configurada dessa forma, parece óbvia a necessidade de pensar-se em como medir o trabalho realizado e de estabelecer-se um conceito de eficiência, intimamente relacionado ao de produtividade – conceitos relativos tanto ao operário, quanto às máquinas –, visto que o aumento dessa implica no crescimento do lucro do empregador. Notadamente, esses conceitos consolidam-se na física por conta de uma demanda industrial²⁷.

Nesse ínterim, podemos dizer que o conceito de trabalho mecânico – tomado como o produto da força aplicada sobre um corpo pelo deslocamento provocado por essa nesse corpo – figurou como contribuição fundamental²⁸ cuja formulação contou com a participação de Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), Gaspard-Gustave Coriolis (1792-1843), Jean-Victor Poncelet (1788-1867), dentre tantos²⁹. O conceito de calor, à época considerado um fluido imponderável, o fluido calórico de Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), que suplantou o flogisto de Georg Ernst Stahl (1659-1734), também foi crucial na busca por máquinas mais eficientes e, conseqüentemente, menos dispendiosas. A construção de uma ciência do calor, cujas bases alicerçaram-se sobre os trabalhos de muitos, como Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), S. Carnot e Benoît Paul-Émile Clapeyron (1799-1864), foi imprescindível para que se avançasse das máquinas à termodinâmica³⁰ e, conseqüentemente, à conservação da energia. Apesar de assunto controverso, quanto ao processo de desenvolvimento do conceito de conservação da energia, processo esse favorável à doutrina da unidade e (inter)conversibilidade dessas que hoje consideramos como formas de energia³¹, pode-se dizer que certas crenças metafísicas foram determinantes³², como a crença *a priori* em princípios de conservação na natureza³³: para S. Carnot (1824), a quantidade de calor conserva-se, algo definido aprioristicamente, assim como a “força” (distinta da força newtoniana) descrita por Julius Robert Von Mayer (1814-1878) em seu trabalho de 1842, que mais adiante tornou-se a grandeza energia. Em seu trabalho de 1843, James Prescott Joule (1818-1889) justifica a indestrutibilidade dessa mesma “força” por meio de afirmações religiosas por ele nutridas³⁴.

217

O período aproximado de 1800 a 1900 caracterizou-se pelo aumento do domínio da quantificação; pela procura por leis matemáticas que pudessem ser estabelecidas; pela emergência de uma física unificada, baseada no programa de explicações mecânicas; pela busca de explicações para os fenômenos físicos em termos de leis do movimento, concernentes à estrutura do sistema mecânico³⁵, contudo, no que tange à conservação da energia, a forte matematização da ciência à época não foi o fator mais determinante, mas sim o uso de especulações relativas à ideia de unidade da natureza. Notadamente, podemos dizer que não houve uma conscientização voltada para a inter-relação dos fenômenos causada por quaisquer dados adquiridos experimentalmente, mas, antes disso, o contrário, reforçando uma consciência que já existia³⁶. Não há com isso a intenção de dizer que a experimentação e a matematização não foram importantes para o estabelecimento desse produto científico. É bem sabido que com a ciência moderna, a matemática tornou-se a linguagem pela qual ideias eram expressas e modelos descritivos dos fenômenos elaborados, assim como à experimentação coube o papel de interrogar a natureza e de procurar por corroborações desejáveis às ideias e modelos construídos pelos filósofos naturais³⁷. Pode-se dizer que o último “nó” para “amarrar” a teoria da conservação da energia foi a quantificação de um fator de interconversão entre calor e trabalho, um equivalente mecânico para o calor, algo que surgiu em diversos trabalhos do século XIX³⁸, contudo, devido ao fato do princípio de conservação da energia envolver a ideia de conservação de certa grandeza, mediante uma conversão, ele pressupõe não somente certa sofisticação técnica, por meio da qual a sua invariabilidade ao converter-se pudesse ser experimentalmente estabelecida, mas também um quadro conceitual no qual fosse atribuído um significado a essa grandeza conservada³⁹. Segundo José Luis de Paula Barros Silva e Edilson Fortuna de Moradillo⁴⁰, somente em conseqüência disso houve condições plenas para o estabelecimento de uma relação quantitativa de cunho prático e, assim, dados experimentais envolvidos puderam ser adequadamente interpretados como correspondência de equivalência.

Um provável plano de fundo para energia: a *Naturphilosophie*

No que tange aos conhecimentos construídos no século XIX, enquadrados naquilo que entendemos como concernente à física – e poderíamos estender à ciência como um todo –, a omissão da *Naturphilosophie* da análise historiográfica empobrece a compreensão dos mesmos. De fato, não será alcançada uma adequada compreensão histórica ignorando-se o contexto cultural específico que rendeu significado a algo produzido por determinado indivíduo ou grupo de indivíduos⁴¹. Esse movimento intelectual, fortemente influenciado pelo Romantismo alemão, atingiu seu apogeu nas duas primeiras décadas do século XIX⁴². Difundida inicialmente por filósofos naturais alemães, a *Naturphilosophie* espalhou-se por diversos países como tendência filosófica, sendo bastante provável que tenha exercido uma maior influência no pensamento científico à época do que usualmente se reconhece⁴³. Essa é melhor entendida em termos das ideias, métodos e atitudes dos indivíduos envolvidos com esse movimento intelectual; melhor representada em termos de um grosseiro conjunto de seus principais e mais característicos conceitos e pressupostos, para o qual, segundo Kenneth Lawrence Caneva⁴⁴, o ponto de partida deve ser os trabalhos de Friedrich Wilhelm Joseph Von Schelling (1775-1854) do período aproximado de 1797 a 1800.

Em suas obras, Schelling falou bastante dos diversos fenômenos da natureza (luz, eletricidade, magnetismo, calor) como diferentes manifestações de uma “força” polar subjacente comum ou de um dualismo que percorre a natureza. Pode-se dizer que a crença na unidade ou interconexão dos fenômenos naturais é uma das características mais exaltadas quando há referência à *Naturphilosophie*⁴⁵. Os filósofos adeptos desse movimento – a exemplo de Schelling – criam na existência de um princípio unificador, comum às distintas manifestações da natureza; na existência de algo essencial a todos os diversos processos de conversão disponíveis à época⁴⁶; numa interconexão subjacente a todos esses, de forma que pudessem ser coerentemente correlacionados⁴⁷. Esses adeptos procuravam por uma grandeza que pudesse ser associada ao supracitado princípio unificador e, segundo Marco Antonio Barbosa Braga et al.⁴⁸, encontraram terreno fértil nas ideias de Leibniz. Segundo Gildo Magalhães dos Santos Filho⁴⁹, de fato, certos aspectos desse movimento filosófico podem ser vistos como herança de Leibniz e, dentre esses, podemos citar a ideia de que às teorias científicas cabe o questionamento acerca da essência das coisas e, por isso, à ciência é necessária a metafísica. Thomas Samuel Kuhn⁵⁰ corrobora essa ideia ao dizer que alguns enunciados leibnizianos podem ser encontrados em literaturas tidas como pertencentes a esse movimento.

Segundo Braga e colaboradores⁵¹, a *Naturphilosophie* surgiu como um movimento intelectual de crítica ao mecanicismo, de busca por explicações para os fenômenos naturais fora do quadro teórico limitado da abordagem mecânica da natureza do final do século XVIII, início do XIX. Nas palavras de um contemporâneo ao movimento, Heinrich Steffens⁵², a física, até então, configurava-se como um agregado sem sentido de particulares sem conexões subjacentes ou significados comuns. Depositava-se excessiva importância nos cálculos, contentando-se com descrições superficiais dos fenômenos e pseudoexplicações em termos de entidades hipotéticas, meras ficções. Ao longo do período de aproximadamente 1830 a 1850, certos elementos, possivelmente condutores a uma nova e relevante visão de natureza, encontravam-se presentes na atmosfera do pensamento científico europeu. Para Kuhn⁵³, um deles era a própria *Naturphilosophie*, acompanhada pelos diversos processos de conversão disponíveis à época e pelo – já citado – grande interesse pelas máquinas, causado pela Revolução Industrial.

A variedade de processos de conversão teve profusão ulterior à construção da pilha de Alessandro Volta (1745-1827), artefato que possibilitou a obtenção de diversos fenômenos anteriormente desconhecidos. Notadamente, muitos desses fenômenos (afinidades químicas, ações moleculares, efeitos termoelétricos) não tinham uma explicação compatível com o quadro teórico mecanicista disponível naquele momento histórico⁵⁴. Com isso, surgiu um intenso questionamento ao paradigma empirista baconiano e à forte matematização da ciência. Certos filósofos naturais, como Humphry Davy (1778-1829), Michael Faraday (1791-1867), dentre outros, buscaram a substituição da filosofia natural mecanicista, tipicamente iluminista (referente ao Iluminismo, movimento do século XVIII), por uma que comportasse um raciocínio primordialmente qualitativo, uma visão orgânica do Universo, da natureza como um todo orgânico, sustentada pela filosofia natural romântica, a *Naturphilosophie* de Schelling⁵⁵.

Esse movimento pode ter fornecido um adequado pano de fundo filosófico⁵⁶ para a construção da estrutura metafísica-qualitativa do princípio de conservação da energia⁵⁷, influenciando diversos indivíduos envolvidos nesse processo - seja essa influência alegada ou declarada⁵⁸. Para Caneva⁵⁹, o indicador diagnóstico primário de uma possível influência da *Naturphilosophie* é a presença nos escritos de alguém de certos conceitos e de alegorias passíveis de distinção relacionados a esse movimento intelectual. Kuhn⁶⁰ corrobora a suposta influência, dizendo que essa poderia ser inferida pela presença nos trabalhos desses indivíduos daquilo que chamou de “saltos mentais”, de algo que sugeria uma predisposição à percepção de uma única e indestrutível “força” subjacente a todos os fenômenos da natureza. Mohr, por exemplo, sem justificativa alguma para tal “passou da defesa da teoria dinâmica do calor para a afirmação de que há apenas uma “força” na natureza e ela é quantitativamente inalterável”. Kuhn também cita Liebig, que “deu um salto similar com o ‘rendimento’ dos motores elétricos quando afirmou que os equivalentes químicos dos elementos determinam o trabalho passível de ser extraído dos processos químicos, seja por meios elétricos ou térmicos”⁶¹. De acordo com Kuhn, Colding “diz que a ideia da conservação lhe ocorreu em 1839, quando ainda era um estudante, mas só fez o anúncio em 1843, para poder reunir evidências”⁶². Algo também parecido ocorre em Helmholtz. E, por último, Kuhn⁶³ cita Séguin, que “aplicou com total confiança seu conceito da conversibilidade do calor e do movimento aos cálculos das máquinas a vapor, ainda que sua única tentativa de confirmar a ideia tenha sido inteiramente vã”⁶⁴.

Reforça a ideia de uma possível influência desse movimento na construção de saberes ditos científicos no século XIX, por exemplo: o fato dessa filosofia natural alemã ter feito parte do ambiente educacional de alguns dos indivíduos citados ao longo desse artigo; de Ludwig August Colding (1815-1888) ter sido protegido de Hans Christian Oersted (1777-1851), cujas ideias acerca dos fenômenos eletromagnéticos foram, consentidamente, influenciadas pela filosofia natural romântica de Schelling; Justus von Liebig (1803-1873) ter estudado por dois anos com Schelling; Gustave-Adolphe Hirn (1815-1890) ter lido obras relacionadas ao movimento, tendo citado em suas obras tanto Lorenz Oken (1779-1851) quanto Immanuel Kant (1724-1804). Esse último com ideias basilares para o movimento, principalmente no que tange à ontologia dinâmica subjacente à *Naturphilosophie*; o pai de Hermann Ludwig Ferdinand Von Helmholtz (1821-1894) ter sido amigo de Johann Gottlieb Fichte (1762-1814) – cujas ideias exerceram forte influência sobre as filosofias de Schelling e Georg Wilhelm Friedrich Hegel (1770-1831) – e adepto do movimento da *Naturphilosophie*⁶⁵.

219

A “Força” como princípio unificador e a quantificação do fator de conversão

Ao longo do século XIX, diversos filósofos naturais fizeram contribuições importantes para o estabelecimento do princípio de conservação da energia como uma lei física fundamental⁶⁶. Esses indivíduos não comunicaram exatamente as mesmas coisas, contudo, todos tratavam de aspectos semelhantes da natureza. Nos trabalhos publicados por eles atenta-se para a presença de uma “força” (aqui temos outras possíveis variações, como “poder”, por exemplo) metafísica, única e indestrutível, subjacente aos diversos fenômenos envolvidos nos processos de conversão⁶⁷. A ideia de algo imutável por trás dos fenômenos naturais, de algo primordial que se conserva, já existe desde os filósofos pré-socráticos⁶⁸. Essa concepção metafísica, apriorística, foi de grande relevância no contexto científico clássico, especificamente no que tange às considerações newtonianas e leibniziana acerca de Deus. Foi ela que levou Descartes (1596-1650) à conceber a hipótese de conservação do movimento⁶⁹, visto que, num primeiro momento, Deus o teria causado na matéria. Nesse ínterim, Descartes estabeleceu os conceitos de conservação da quantidade de movimento – como sendo o produto da massa de um corpo pelo módulo da velocidade desse corpo – e a lei da inércia⁷⁰. Justificava-se a conservação, pois, somente assim, o Universo não tenderia à imobilidade⁷¹. O imutável, assim como o indestrutível, encontrava-se diretamente relacionado à perfeição, ao ideal, ao divino. Podemos dizer que um princípio de conservação traduzia a perfeição de algo que foi criado ou causado, ou a perfeição daquele (ou daquilo) que criou-o ou causou-o⁷². O que é perfeito não pode mudar, pois mudando poderia não mais sê-lo.

Nesse contexto, onde alguns pensadores especulavam sobre uma possível e *a priori* conservação do movimento, Newton (1642-1727) explicitou sua visão, na qual concebe um Deus presente no Universo e ciente de tudo aquilo que nele ocorre, cujo sentido (*sensorium Dei*) é o próprio espaço absoluto. A hipótese newtoniana não depende da conservação de grandeza alguma, visto que Deus poderia interferir em sua obra, efetuando assim possíveis correções no Universo, a todo e qualquer momento que bem quisesse. Leibniz, a exemplo de Descartes, sustentou a conservação de algo. O filósofo germânico acreditava em um Artífice produtor do melhor Universo possível e, por isso, sem a necessidade de nele interferir⁷³. Notadamente, uma noção fundamental disponível em alguns sistemas filosóficos racionalistas à época e presente nas ideias de Leibniz, foi a de causa imanente. De acordo com esse conceito, há identidade completa entre causa e efeito, ou seja, a causa torna-se seu próprio efeito. Assim, ao criar o mundo, Deus tornou-se o próprio mundo e por ser perfeito, por conseguinte, o mundo é necessariamente perfeito. Cabe lembrar que os séculos XVI e XVII ainda estavam impregnados por uma forte influência aristotélica. Cria-se à época numa ligação intrínseca de causalidade entre a *vis* (força) e o movimento dos corpos, sendo a primeira imanente ao segundo e, para que os corpos pudessem ocupar seu lugar natural, tornava-se necessário o esgotamento da *vis*. Leibniz, fortemente influenciado por essa ideia, procurou, como Descartes, por uma melhor forma de estabelecer a medida do movimento da matéria. Para ele, esse movimento era efeito de uma *vis* que lhe foi causa imanente⁷⁴.

Pela análise matemática de uma conhecida situação idealizada do movimento de corpos em queda livre, estabelecida por Galileu (1564-1642) em 1638, Leibniz inferiu que a grandeza conservada poderia ser quantificada como o produto da massa de um corpo pelo quadrado da velocidade desse corpo, nomeando-a *vis viva* (força viva)⁷⁵. Pela hipotética relação de identidade entre a *vis* e o movimento, Leibniz assentou seu princípio de conservação de *vis viva*, corroborando assim a ideia de perfeição de Deus e de sua obra. A justificação do princípio de conservação requeria algo mais do que simples afirmações para estabelecer-se efetivamente. Precisava-se de uma relação quantitativa entre grandezas conhecidas mensuráveis. Somente assim seria possível uma testagem experimental, referente à existência (ou não) de uma relação constante entre tais quantidades⁷⁶. “Além da identificação de uma entidade comum aos vários processos de conversão, era importante também, para a emergência de um princípio de conservação com utilidade prática, a quantificação de um fator de conversão padrão”.⁷⁷

220

No decorrer do século XIX, a *vis viva* de Leibniz passou por uma reformulação matemática. Passou a ser quantificada como sendo a metade do produto da massa de um corpo pelo quadrado da velocidade desse mesmo corpo. Coriolis (em 1829) foi o primeiro a insistir na divisão por dois da *vis viva* estabelecida por Leibniz e assim o fez para que houvesse uma igualdade numérica entre a *vis viva* e o trabalho produzido por essa. Dessa maneira, obteve-se na conservação da *vis viva* uma modelagem conceitual adequada para a quantificação dos processos de conversão; a concepção leibniziana de conservação da *vis viva* foi extrapolada para os fenômenos naturais como um todo, algo que culminou na formulação do princípio de conservação da energia⁷⁸. Entre 1842 e 1847, quatro trabalhos são publicados – por Mayer, Joule, Colding e Helmholtz – nos quais, apesar de com suas respectivas particularidades, discute-se a hipótese da conservação de certa grandeza. Esses trabalhos destacam-se pela apresentação de análises quantitativas concretas relativas a essa conservação – muito embora, já em 1831, Carnot houvesse registrado um valor para o fator ou coeficiente de conversão, um equivalente entre o calor e o trabalho, sem, contudo, publicá-lo. Isso reforçava as convicções nutridas à época – e também registradas, por exemplo, por Marc Séguin (1786-1875) em 1839, Carl Alexander Holtzmann (1811-1865) em 1845 e Hirn em 1854 – acerca da possibilidade desses fenômenos serem quantitativamente intercambiáveis⁷⁹.

No trabalho de Mayer (1842), como dito anteriormente, encontramos a ideia de uma possível conservação de uma “força” indestrutível, mutável e imponderável, subjacente aos diversos fenômenos envolvidos nos processos de conversão. Nesse trabalho, ele calculou o equivalente mecânico do calor (1 cal = 3,6 J). Fez isso a partir do calor liberado na compressão de um gás. Contudo, como nota Martins⁸⁰, é interessante notar que não estava preocupado com uma possível teoria mecânica do calor ao fazê-lo. Mayer queria mostrar a relação causal entre as “forças” – manifestações da grandeza à época chamada de “força”.

Mayer propôs uma “força” que poderia assumir diversas formas, contudo, sem que houvesse variação em sua quantidade, ou seja: a “força” manifesta em uma forma, ao transformar-se em uma forma distinta, deveria respeitar uma

relação de causa e efeito. Assim, quando houvesse mudança de uma forma em outra qualquer, a primeira forma seria, necessariamente, a causa da segunda forma. Quanto à invariabilidade da quantidade de “força”, disse Mayer que essa implica em um princípio de igualdade entre causas e efeitos, havendo conversão de causa em efeito e uma identidade entre ambos. Nada mais do que a ideia de causa imanente, também descrita previamente⁸¹. A ideia de que alguma coisa conserva-se nas transformações físicas é apriorística no trabalho de Mayer de 1842. Segundo ele, sustenta-se essa ideia, pois não faz sentido pensar que “algo possa surgir do nada”, ou que “alguma coisa possa transformar-se em nada”. Além disso, a relação de igualdade entre causa e efeito já era aceita à época⁸². Notadamente, a identidade entre causa e efeito reclamou uma equivalência quantitativa entre quaisquer que fossem os pares de fenômenos envolvidos em um processo de conversão. Essa equivalência fez-se necessária, pois, do contrário, seria possível a criação de fenômenos, algo que poderia culminar em um movimento perpétuo. Ao longo da história do pensamento científico, muito se discutiu sobre a possibilidade ou impossibilidade de um movimento desse tipo. Apesar de controversa, aparentemente a impossibilidade desse movimento tornou-se uma hipótese mais plausível⁸³.

Joule publicou em 1843 seu primeiro trabalho relacionado ao tema – mesmo ano em que Colding também o fez. Nesse trabalho, Joule ocupou-se, fundamentalmente, do estudo do calor que surge em fenômenos eletromagnéticos; procurou estabelecer uma relação de proporcionalidade entre o calor gerado na bobina de um eletroímã e o quadrado da corrente elétrica que percorre essa bobina (basicamente, um estudo quantitativo do “efeito joule”). Joule também explicitou uma relação entre calor e trabalho, estabelecida por meio de estudos de dínamos e motores elétricos. Os valores apresentados por ele, correspondentes a 1 cal, oscilavam entre 3,2 J e 5,5 J, resultados visivelmente inadequados para que sustentasse-se uma possível relação constante entre trabalho e calor⁸⁴. Segundo Martins⁸⁵, a convicção de Joule motivou-o: após mais uma divulgação de resultados semelhantes aos do artigo de 1843, ele disse estar seguro de que os grandes agentes da natureza são indestrutíveis, apelando para justificativas teológicas e metafísicas para tal. Colding explicitou ideias semelhantes às de Mayer acerca da conservação e conversão da “força”. Segundo Colding, toda vez que uma força, aparentemente, extingue-se, por conta de um trabalho mecânico, químico ou de qualquer que seja sua natureza, ela, na verdade, transforma-se, reaparecendo sob uma nova forma, na qual toda a sua grandeza primitiva é conservada. Em seu trabalho, Colding estabeleceu uma relação quantitativa entre calor e trabalho mecânico de 1 cal para 3,4 J⁸⁶. Em 1847, foram publicados os trabalhos de Helmholtz, relativos à conservação da “força”. Nesses, Helmholtz procurou fornecer um panorama teórico aprofundado, detalhado e unificado acerca dos processos de transformação da “força” (mecânicos, térmicos e eletromagnéticos)⁸⁷.

Para citarmos mais exemplos, Karl Friedrich Mohr (1806-1879), Robert Grove (1811-1896) e Faraday (1791-1867) também descreveram a diversidade de fenômenos como manifestações de uma única “força” que, no decorrer das transformações, conserva-se, não havendo a possibilidade de criar-se ou destruir-se “força”⁸⁸. Gower afirma que para Faraday (em trabalho de 1834), por exemplo, “os diversos ‘poderes’ da matéria”⁸⁹ – que poderíamos chamar de fenômenos ou tipos de energia relacionados a esses fenômenos – “estão conectados e são devidos a uma causa comum.” Para Mohr (em obra de 1837), essa causa, “a ‘força’, pode aparecer sob várias circunstâncias, tais como movimento, afinidade química, coesão, eletricidade, luz, calor e magnetismo.” Mohr ainda afirmou que “a partir de qualquer um desses tipos de fenômeno, todos os outros podem ser convocados.” Para Grove (em escritos de 1843), “a ‘vis’, o calor, a luz, a eletricidade, o magnetismo, a afinidade química e o movimento, podem, como ‘forças’, interproduzir-se ou interconverter-se uns nos outros”⁹⁰.

No início dos anos 1850, a “força” supracitada foi renomeada, tornando-se aquilo que conhecemos como energia. William John Macquorn Rankine (1820-1872), William Thomson (1824-1907), dentre outros, estabeleceram essa mudança de “força” para energia, segundo Crosbie Wimperis Smith, motivados por razões mais do que linguísticas. Com relação ao nascimento da ciência da energia, a instauração de uma nova linguagem nada mais era do que “sintomática de uma série de profundas mudanças conceituais que resultaram em uma nova visão científica”⁹¹. Notadamente, algumas das grandezas que hoje em dia reconhecemos como formas de energia, até o fim do século XVIII encontravam-se sem conexão ou eram tão somente pouco relacionadas. É possível citar, por exemplo, a energia cinética, conhecida à época como *vis viva*, e a energia potencial, então conhecida como *vis mortua*. O desenvolvimento

do conceito de conservação de energia configurou-se como um movimento favorável à unificação dessas que hoje consideramos como formas de energia⁹². De certa maneira, a energia também uniu áreas distintas do conhecimento científico - como a física, a química e a biologia⁹³. Pode-se dizer que já há algum tempo o conceito de energia ocupa lugar extremamente importante nessas e em outras ciências contemporâneas. Desde sua consolidação no século XIX, temos, por meio desse conceito, interpretado e resolvido grande número de questões relativas aos fenômenos, de interesse tanto teórico quanto prático.

O conceito de tempo no século XIX

Os trabalhos de Joule, Mayer, Rankine, Thomson, dentre outros, trouxeram um novo entendimento ao estudo da mecânica, do calor, da luz, da eletricidade, do magnetismo etc., principalmente por introduzirem o conceito de conservação e de transformação das diferentes formas de energia. Além disso, ao longo do século XIX surgiram algumas questões referentes a irreversibilidade presente nos processos termodinâmicos. Tal processo acabou trazendo novas compreensões ao conceito de tempo.

Ainda na segunda metade do século XVII, em uma de suas mais importantes obras, os *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, Newton compara o tempo a uma reta geométrica e apresenta características de linearidade, sucessividade e instantaneidade⁹⁴. O tempo da mecânica newtoniana pode ser compreendido apenas como uma forma de conhecer a duração de cada coisa⁹⁵. No entanto, características nesse sentido já haviam sido apresentadas anteriormente por Galileu e Descartes. Contudo, diferente deles, Newton atribuiu ao tempo uma realidade ontológica e o elevou a um novo patamar, afirmando que o tempo da Mecânica é universal, uniforme e absoluto⁹⁶. Newton fez ainda uma distinção quanto à natureza do tempo. Para ele, existia um tempo absoluto, verdadeiro e matemático – que não guardava nenhuma relação com os objetos perceptíveis – mas que poderia haver um tempo relativo, aparente e vulgar, que se tratava de alguma medida de duração perceptível e que é obtida através do movimento⁹⁷.

Contudo, nem todos os filósofos naturais de sua época concordaram com a ponto de vista newtoniano. Leibniz, por exemplo, defendia que o tempo era um meio de ordenação das coisas que existem, seria apenas uma “ordem de sucessão” dos corpos. Para o filósofo, o tempo seria uma entidade puramente relativa⁹⁸, servindo apenas para ordenar os corpos em suas posições sucessivas, possuindo um valor lógico, mas não ontológico. Sendo assim, sem a existência de fenômenos ou criaturas não haveria tempo. Contudo, apesar de não acreditar em um tempo a priori, acreditava que o tempo é algo idealizado, constituído a partir das relações, o que não impede de ser dotado de “quantidade”. Ele ainda acrescenta que entre dois intervalos concebemos uma duração, mas que o tempo não é a duração. A duração seria uma propriedade das coisas extensas, mas o mesmo não pode ser atribuído ao tempo, por ser algo ideal, contínuo e não existir de fato⁹⁹.

Apesar da oposição de Leibniz, a concepção newtoniana acabou sendo mais difundida e aceita pelos homens da ciência¹⁰⁰, principalmente devido ao sucesso da mecânica desenvolvida por Newton¹⁰¹. Entretanto, ao longo do século XVIII, durante o iluminismo, os princípios metafísicos apresentados pelo filósofo natural acabaram sendo abandonados pelos homens da ciência. Seus partidários (mais conhecidos como newtonianos) buscaram apenas perpetuar o caráter experimental e matemático de sua obra¹⁰². Nesse contexto, o conceito de tempo clássico também foi adaptado, adquirindo apenas o caráter de “parâmetro matemático abstrato”, presente nas leis e equações tão familiares aos físicos profissionais.

O tempo da mecânica é linear, contínuo e homogêneo, independente do referencial e da presença de matéria, sendo, juntamente ao espaço, apenas o palco para a ocorrência dos fenômenos físicos. A existência de matéria, não afeta a estrutura do palco, que por sua vez existe mesmo na ausência dos atores¹⁰³. Por ser linear e contínuo, entre dois instantes de tempo quaisquer há infinitos outros instantes. Essa característica do tempo clássico permite representá-lo por meio de uma reta de números reais. Além disso, como o tempo é homogêneo, todas as partes do tempo são iguais

entre si. Ou seja, se dois experimentos (isolados do resto do universo) forem realizados hoje com uma determinada duração e apresentarem um resultado, eles poderão ser repetidos no futuro com igual duração e resultado.

As características de linearidade, continuidade e homogeneidade do tempo não foram muito afetadas no contexto do século XIX, porém, a sua reversibilidade foi grandemente afetada. A mecânica clássica newtoniana é uma teoria reversível no tempo, já que sua construção teórica permite utilizar tanto um tempo positivo (t) quanto um tempo negativo ($-t$)¹⁰⁴. As próprias leis de Newton mostram isso, visto que a variável tempo nem aparece explicitamente em suas equações¹⁰⁵. Entretanto, nesse período de transformações científicas e filosóficas, a concepção de um tempo reversível começou a sofrer alguns problemas, devido, principalmente, ao desenvolvimento da Termodinâmica e da Mecânica Estatística. Pois, afirmar que o tempo é linear contínuo e homogêneo não significa dizer que ele flui necessariamente do passado para o futuro. O tempo newtoniano permite percorrer a linha reta tanto em um sentido como no outro, já que se trata de um tempo reversível¹⁰⁶. Mas com o tempo Termodinâmico essa configuração acaba se tornando muito improvável.

De acordo com André Ferrer Pinto Martins¹⁰⁷, o princípio da conservação da energia não traz grandes problemas ao tempo da mecânica newtoniana, já que não afeta suas características principais, principalmente em relação à reversibilidade. Uma vez que não encontraríamos nenhum tipo de problema com a orientação do tempo se considerássemos apenas os sistemas mecânicos conservativos, nos quais a energia mecânica total permanece constante. Um pêndulo posto a oscilar é um ótimo exemplo de um sistema conservativo, mesmo tratando-se apenas de uma aproximação, visto que a energia mecânica nunca se conserva de fato. Se colocássemos o pêndulo em movimento e gravássemos um vídeo com essa oscilação, no momento da reprodução não saberíamos distinguir se o vídeo está avançando ou retrocedendo. Além disso, a mecânica newtoniana garante a homogeneidade e, principalmente, a reversibilidade do tempo nesse tipo de situação. A divergência em relação à orientação do tempo newtoniano está relacionada aos processos de transformações de energia, principalmente quando ocorrem dissipação e degradação, já que são processos irreversíveis¹⁰⁸.

Nos casos dissipativos, há sempre transformação de energia em formas mais desorganizadas, principalmente a térmica. Um sistema desse jeito pode ser considerado irreversível, mas apenas no sentido de que sua reversão temporal nunca é observada. A não-conservação da energia mecânica acrescenta uma característica fundamental ao tempo: a sua irreversibilidade, ou seja, o fluir do tempo tem um sentido preferencial: do passado para o futuro¹⁰⁹.

Uma das primeiras reflexões sobre a irreversibilidade nos processos termodinâmicos surgiu ainda na primeira metade do século XIX, com a publicação da obra *Reflexões sobre a potência motriz do fogo* de Sadi Carnot em 1824. Nesse trabalho, Carnot explicou o funcionamento das máquinas térmicas e estabeleceu o conceito de ciclos reversíveis, determinando o rendimento máximo que uma máquina térmica poderia atingir funcionando entre duas fontes a diferentes temperaturas, algo que mais tarde viria a constituir o 2º Princípio da Termodinâmica. O ciclo de Carnot, como ficou conhecido, uniu a ideia da conservação da energia com a de propagação do calor¹¹⁰. Refletindo ainda sobre os processos termodinâmicos, em 1852 William Thomson, mais conhecido como Lord Kelvin – utilizando a ideia de que o trabalho mecânico pode se degradar totalmente em calor, mas que o calor não pode se transformar totalmente em trabalho mecânico –, desenvolveu uma nova forma de interpretar os fenômenos térmicos e uma nova cosmologia, tendo como sustentação a irreversibilidade dos processos termodinâmicos¹¹¹.

Para Kelvin, o universo tende, em uma sequência de estados de equilíbrio, para um estado final de equilíbrio térmico em que as trocas de energia cessarão, ocasionando a sua morte térmica¹¹². O equilíbrio térmico ocorre quando dois corpos com diferentes temperaturas são postos em contato, o corpo com maior temperatura esfria enquanto que o corpo com maior temperatura esquenta, até que ambos atinjam a mesma temperatura. Essa circunstância traz novas questões ao entendimento do tempo, visto que, se tivesse um termômetro indicando a temperatura dos corpos e se por acaso o ocorrido fosse filmado, no momento da reprodução seria fácil distinguir se o vídeo está avançando ou retrocedendo. Além disso, depois que os corpos atingissem o equilíbrio térmico dificilmente eles retornariam ao seu estado inicial de forma espontânea¹¹³.

O tempo probabilístico da mecânica estatística

Ainda na década de 1870, Ludwig Boltzmann (1844-1906), publicou uma série de artigos buscando interpretar a Segunda Lei da Termodinâmica de forma estatística e com isso contribuiu para o desenvolvimento de um novo campo da Física, a Mecânica Estatística. Dentre muitos trabalhos, Boltzmann deduziu a equação $S = K \cdot \ln(W)$ – que atualmente é conhecida como equação de Boltzmann. Nesse trabalho, ele mostrou que a entropia de um estado era a medida da sua probabilidade de ocorrência, e, portanto, o seu aumento poderia ser entendido como a evolução de um sistema de estados de menor probabilidade para aqueles de maior probabilidade¹¹⁴.

Tomamos o caso de um leite que seja despejado em uma xícara de café. Aos poucos o leite vai se misturando ao café até que resulte em um único líquido de cor uniforme, e por mais que se misture o conteúdo da xícara ele não retorna ao estado original, quando o café e o leite estavam claramente separados. A Segunda Lei da Termodinâmica, interpretada por Boltzmann, diz que em um sistema fechado tende, de forma automática e espontânea, a um estado em que a distribuição e o movimento das suas partes são completamente aleatórios, pois para um grande número de partes esse é o arranjo mais provável¹¹⁵. A energia transforma-se passando de formas mais organizadas para formas menos organizadas e isso apresenta um aumento de entropia do sistema¹¹⁶. Assim, no caso do café com leite, houve uma evolução temporal no sentido da entropia crescente, partindo-se do contexto mais organizado para uma situação menos organizada. O caráter estatístico da lei do aumento de entropia faz com que a reversão no tempo seja um processo muito pouco provável. Já que dificilmente o leite e o café voltarão a se separar de forma espontânea, algo que na prática se torna impossível. Essa interpretação estatística traz uma nova implicação ao campo da física e ao conceito do tempo: a natureza probabilística¹¹⁷.

Os processos de degradação e dissipação de energia mostraram que o tempo não poderia mais ser considerado reversível, visto que nesses casos sempre há transformação de energia para formas mais desorganizadas. Além disso, os processos térmicos em geral mostram que o universo tende ao equilíbrio térmico, o que também é um indicativo para uma evolução temporal, ou seja, uma irreversibilidade. Por outro lado, Boltzmann, com sua interpretação estatística sobre a segunda lei da termodinâmica, traz uma nova implicação ao conceito de tempo: sua natureza probabilística. Sendo assim, os fenômenos físicos além de estarem presos a uma evolução temporal, agora estariam submetidos a uma probabilidade de ocorrência. Embora a teoria estatística de Boltzmann não forneça uma direção definitiva para a flecha do tempo, já que é um campo de estudo que ainda encontra-se em aberto, o mais importante da Termodinâmica e da Mecânica Estatística foi trazer novas discussões filosóficas quanto a natureza do tempo e a sua irreversibilidade. Além disso, no início do século XX, novas concepções serão atribuídas ao tempo com a teoria da Relatividade de Einstein, principalmente no que tange a homogeneidade e a relatividade¹¹⁸.

A natureza da luz no século XIX

O século XVIII, para a óptica, foi marcado pela consolidação da teoria Newtoniana para os fenômenos referentes à luz e às cores. Neste período, as teorias mecanicistas vigoravam fortemente, dando suporte à concepção de Newton que passou a atribuir à luz um caráter mecânico e corpuscular. No entanto, a este caráter corpuscular, seria necessário sobrepor um movimento oscilatório no éter. Na concepção de Newton a propagação retilínea da luz só poderia ser explicada através da hipótese de corpúsculos deslocando-se em uma grande velocidade ao longo de retas, considerando assim, impossível derivar a propagação retilínea a partir da hipótese vibracional, pois deste modo não seria possível explicar a sombra geométrica¹¹⁹. O impacto da publicação de *Óptica* na comunidade científica da época praticamente se iguala ao impacto causado por sua publicação anterior *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, publicado em 1687. Sua teoria exerceu enorme influência sobre os estudos de óptica desenvolvidos no início do século XVIII em toda a Europa.

A teoria de Newton que anteriormente fora criticada por Robert Hooke (1635 – 1703), volta a ser colocada à prova ainda durante o século XVIII. Os problemas com a teoria newtoniana citados em algumas publicações da época seriam devido à determinação da massa e volume das partículas de luz, com a influência da gravitação no movimento dos raios de luz, com as explicações sobre a inflexão (que atualmente é conhecido como difração) e com a ideia de força de curto alcance entre a luz e os corpos¹²⁰. O fim do século XVIII leva consigo o caráter irrefutável da teoria corpuscular e mecanicista para a Natureza da Luz, cedendo cada vez mais espaço às teorias ondulatórias. Ao fim desse século o abalo da credibilidade da teoria newtoniana fez com que surgissem novos trabalhos que defendiam a teoria vibracional, dentre eles destacam-se os trabalhos de Thomas Young (1773-1829) e posteriormente a teoria ondulatória de Augustin Fresnel (1788-1827). O século XIX é marcado, para a óptica, pela ascensão das teorias ondulatórias para a Natureza da Luz e dos trabalhos de cientistas que passaram a corroborar esta concepção.

Young, no ano de 1804, demonstrou que a luz ao difratar-se através de um pequeno orifício e novamente por outros dois, seria capaz de interferir construtiva e destrutivamente em um anteparo colocado mais a frente. Tal fenômeno somente seria interpretável ao considerar-se a luz como uma onda. De acordo com Young o tratamento ondulatório para a luz também seria de grande relevância para explicar fenômenos relacionados às cores¹²¹. Baseando-se em sua concepção ondulatória para a propagação da luz, Young interpreta sua observação através da ideia de que a luz seria um “fenômeno periódico” produzido através de vibrações do éter e capazes de interferir entre si, reforçando-se ou enfraquecendo-se¹²². Young também interpretava o fenômeno de aberração, que causa um movimento aparente na observação de estrelas, através da teoria ondulatória, no entanto, a explicação para este efeito não era possível unicamente através desta teoria, sendo uma hipótese adicional necessária. Para Thomas Young seria necessário supor o éter totalmente imóvel no espaço e não influenciado pelo movimento da Terra¹²³.

Étienne Malus (1775-1812), um engenheiro militar francês, acreditava que a luz era composta de uma mistura de calórico e oxigênio. Esta concepção baseava-se especialmente no fato de que é possível observar a propagação da luz em decorrência da combustão dos corpos¹²⁴. Em Paris, no ano de 1810, Malus ao olhar através de um prisma de calcário para a luz do sol refletida a partir das janelas do palácio de Luxemburgo, observou que um feixe de luz refletida a partir de vidro com um ângulo de 56°, ou de água de um ângulo de 53°, era totalmente polarizado, tendo o seu plano de polarização paralelo ou coincidente com o plano da reflexão¹²⁵. Mais tarde fizera incidir a luz de uma vela sobre uma superfície d'água e observou a luz refletida sob um ângulo de 36° mais uma vez através de um cristal de dupla refração e notou que a luz refletida estava polarizada. O experimento foi repetido com um espelho e obteve o mesmo resultado¹²⁶. Malus propõe que a dupla refração não seria a única maneira de polarizar a luz, de modo que a luz refletida também apresentaria tal propriedade.

Influenciado pela concepção mecanicista de propagação da luz, Malus concebe, assim como Newton, que as moléculas de luz possuem uma assimetria transversal, que ele descreveu através dos eixos moleculares a, b, c. Malus assume ainda, que a orientação dos eixos transversais b e c depende da direção que as forças de repulsão exercem sobre a matéria¹²⁷. A proposição de Malus pôde ser considerada como uma anomalia na concepção ondulatória, no entanto, Thomas Young propôs posteriormente que esta concepção também poderia explicar a observação feita por Malus. Em relação ao experimento de Malus, Young acreditou que a transversalidade talvez não pudesse ser explicada através da teoria ondulatória, no entanto, posteriormente, baseando-se em uma analogia com ondas mecânicas provocadas na água ou em uma corda estirada, concluiu que a teoria ondulatória deveria contemplar também vibrações transversais^{dx}, propagando-se em direção do raio, com a mesma velocidade¹²⁸. A transversalidade da luz havia figurado anteriormente na teoria de Hooke, ainda que tenha passado despercebida.

Dominique-François Arago (1786-1853), um jovem de vinte e três anos na época de sua eleição para o departamento de astronomia na Academia de Ciência da França, também estava preocupado com a resolução do problema da aberração. Tal problemática colocava à prova os defensores de uma teoria corpuscular, pois, de acordo com as observações realizadas, a velocidade da luz apresentava-se constante, fato este que iria contra a concepção corpuscular para a propagação da luz. Tendo em vista tal concepção, seria possível supor que, assim como fora proposto anteriormente por Newton, a velocidade de propagação dos corpúsculos de luz no espaço deveria depender das dimensões e da

distância dos corpos emissores¹³⁰, ou seja, a velocidade da luz seria incapaz de manter-se constante. Os estudos de Arago, juntamente com Biot (1774-1862), um engenheiro graduado na *École Polytechnique de Paris*, observaram que a velocidade da luz era, de fato, constante, independentemente dos corpos dos quais emana. No entanto, Arago ainda buscava uma explicação para este fato que pudesse ser absorvida satisfatoriamente pela teoria corpuscular. De acordo com Arago, a constância na aberração podia ser fruto de uma compensação entre a variação da velocidade da luz e a forma dos desvios produzidos na refração, esta interpretação valia-se do fato que o movimento da Terra poderia ser composto com a velocidade da luz para produzir variações na velocidade relativa medida num prisma terrestre. Porém, após a realização de experimentos, Arago depara-se com a mesma conclusão que já havia sido proposta anteriormente, que a luz se propaga com uma velocidade constante. Esta conclusão trouxe problemas à visão corpuscular, pois aparentemente negava as consequências diretas da teoria corpuscular aplicáveis ao caso¹³¹.

Fresnel, um engenheiro francês cujo interesse inicialmente estava centrado no estudo da formação das sombras, procurou romper com os conceitos mecanicistas difundidos na França do início do século XIX. Em contraposição à ideia de Malus, Fresnel não acreditava que a combustão do carbono poderia não implicar na emissão de calórico, deste modo, em sua concepção a luz deveria ser consequência de um processo de vibração do calórico e não o próprio calórico em si, como acreditava Malus¹³². A contraposição de Fresnel à teoria newtoniana baseava-se no fato de que se esta fosse verdadeira, o Sol deveria emitir diversas partículas de luz com velocidades distintas¹³³. No entanto, Fresnel ainda se preocupava com a necessidade de explicar o fenômeno da aberração das estrelas através da teoria ondulatória.

No ano de 1819, a Academia de Ciência da França que era predominantemente dominada pelo pensamento de Newton, lança um concurso que põe à prova os defensores da teoria ondulatória. Neste concurso, os concorrentes deveriam escrever trabalhos sobre o fenômeno da difração¹³⁴. Fresnel, que durante muito tempo submeteu artigos que defendiam a teoria ondulatória, teve seu trabalho premiado em março de 1819. Neste artigo Fresnel descrevia uma série de experimentos que corroboravam a concepção ondulatória de propagação da luz¹³⁵. Fresnel firma seus estudos com base na teoria de Young, vislumbrando que a mesma poderia explicar os efeitos conhecidos da luz. Diante de suas concepções, Fresnel buscou também conciliar a interpretação de Young para o fenômeno da aberração ao resultado experimental demonstrado por Arago, no qual o movimento orbital terrestre seria irrelevante para as medidas de refração. Para este fim, em carta a Arago, Fresnel expõe sua teoria que resguarda a imobilidade do éter no espaço, para isto, era necessário supor que uma pequena parte deste éter era arrastado pelos corpos transparentes em movimento com a Terra. Sendo assim, os dois fenômenos poderiam ser interpretados pela teoria ondulatória. Tal proposição ficou conhecida como hipótese de arrastamento parcial do éter luminoso¹³⁶.

Fresnel procurou romper com os conceitos mecanicistas difundidos na França do início do século XIX. Buscou uma analogia entre a luz e o conceito de calórico, de modo que em sua concepção, ambos teriam propriedades ondulatórias e seriam transmitidos através da vibração de um fluido¹³⁷. A teoria de Fresnel ainda não havia sido bem aceita na comunidade científica da época. Membros como Arago, contestavam o comportamento ondulatório da luz, pois se esta apresentasse tal comportamento, deveria comportar-se como o som, ou seja, não seria possível bloqueá-la por um anteparo. Fresnel se defendia supondo que som e luz atuariam em meios diferentes, o primeiro causaria vibrações no ar, ao passo que a luz seria dada através de vibrações do calórico. Futuramente, Fresnel substituiria o calórico pelo éter em seus trabalhos¹³⁸. Além disso, Fresnel acreditava que a obtenção de um padrão de franjas devido à superposição de ondas emitidas por uma fonte luminosa, seria um fator relevante contra a teoria corpuscular¹³⁹. Um novo ponto a favor da teoria ondulatória surge a partir dos experimentos de Foucault (1818–1894) que determinam a velocidade da luz para meios diferentes, mostrando que a velocidade seria menor para meios mais densos ($v=c/n$), contrariando as expectativas dos defensores da teoria corpuscular¹⁴⁰. As teorias vibracionais ganham credibilidade ao passo que se mostram mais consistentes na explicação e na quantificação de fenômenos como os “anéis de Newton”, a polarização e a difração da luz¹⁴¹. No decorrer do século XIX foi possível observar grandes debates na óptica, em relação ao que ocorreria no século anterior, dominado pelo pensamento newtoniano para a propagação da luz. As contestações sofridas pela teoria corpuscular, aliadas aos experimentos realizados durante o século XIX, serviram para corroborar e fortalecer a teoria ondulatória, mesmo que, ainda assim, não a confirmassem definitivamente.

Considerações finais

Ao longo do presente trabalho, se procurou, por meio de alguns episódios históricos, evidenciar a construção do conhecimento científico enquanto um processo sujeito a transformações. Acredita-se que, a partir da perspectiva histórica, seja possível levar ao conhecimento dos alunos uma visão de ciência enquanto uma construção humana, elaborada com o passar do tempo e através da colaboração de diversos atores sociais. A compreensão de ciência como um processo construído historicamente é de extrema relevância, no sentido de desmistificar o sentimento de uma ciência neutra, construída por gênios isolados.

Além disso, é possível, através desse tipo de abordagem, demonstrar que o conhecimento científico não se encontra terminado, mas que é passível de alterações e que trata-se de um conhecimento construído de acordo com a visão de mundo correspondente aos atores presentes nesse processo. Nesse sentido, no entanto, Thaís Cyrino de Mello Forato, Mauricio Pietrocola e Roberto de Andrade Martins¹⁴² alertam que é necessário certo cuidado para que não se incorra ou se fomente o relativismo em sala de aula, visto que essa visão poderia levar o aluno a entender, por exemplo, que as diferentes teorias existentes para explicar um mesmo fenômeno são apenas objetos de opiniões pessoais distintas. Forato; Pietrocola e Martins¹⁴³ citam Maria Eduarda do Nascimento Santos¹⁴⁴ para afirmar ainda que o acréscimo de aspectos históricos no ensino de ciências não se trata de negligenciar à educação em ciências, mas em agregar aos conteúdos específicos os seus aspectos metacientíficos, formativos e culturais, ou seja, trata-se de uma busca por uma educação em, sobre e pela ciência.

Igal Galili¹⁴⁵ compreende que a argumentação construída em sala de aula através da perspectiva da HC deve envolver, simultaneamente, uma discussão e uma reflexão cultural, que devem ser apresentadas através das características contemporâneas, de natureza plural, dialética e dialógica, ao mesmo tempo em que a ciência deve ser apresentada como uma atividade humana de tentativa, porém de conhecimento objetivo e racional da natureza. Além disso, o autor considera que uma abordagem cultural dos conteúdos de HC deve ir além da discussão de textos históricos. Assim, notadamente, defende-se que uma abordagem cultural dos conteúdos históricos referentes à construção do conhecimento científico constitui uma maneira de incluir debates no âmbito educacional que podem levar a uma compreensão do conhecimento científico de forma menos ingênua e que contemple aspectos relevantes da NdC, conforme, por exemplo, os citados por William McComas¹⁴⁶.

A explicitação dos episódios históricos abordados nesse texto, tem por finalidade insistir na necessidade de uma educação em ciências a partir de um viés histórico, e em alguns casos também filosóficos, de tal maneira que aspectos relativos a NdC sejam discutidos em sala de aula. Com isso, espera-se que os educandos adquiram uma compreensão da ciência enquanto um conhecimento indispensável para a compreensão do mundo no qual estão inseridos.

Tal caso é apresentado através das mudanças conceituais relativas ao tempo que ocorreu devido ao desenvolvimento do conceito de entropia e da mecânica estatística. Se na mecânica newtoniana, o tempo matemático se tratava de algo reversível, a física do século XIX trouxe novas concepções ao introduzir a ideia de irreversibilidade temporal e de tempo probabilístico. Discussões como essas estão sendo levantadas para a sala de aula, juntamente ao ensino da 2ª lei da Termodinâmica, através de textos ou debates, mostrando ao aluno que a ciência é um processo dinâmico, construído historicamente e passível de mudanças.

Discutir em sala de aula a Ciência como resultado de um processo de construção humano, pode levar o estudante a uma compreensão mais ampla acerca da superação de uma teoria e a acomodação de outra. O caso das teorias apresentadas para a natureza da luz demonstra que nem sempre o processo de superação de uma teoria, tem relação direta com os argumentos científicos apresentados pela mesma, como é possível observar através da dificuldade encontrada para a consolidação de uma teoria ondulatória enquanto a imagem científica de Newton ainda possuía grande influência. Levar o aluno a refletir acerca deste processo fará com que ele compreenda as mudanças de paradigma que ocorrem também na Ciência atual.

Para a concretização da discussão desses aspectos históricos em sala de aula temos proposto aos alunos produções pictóricas para discutir o impacto do conhecimento do fenômeno luminoso na arte impressionista na segunda

metade do XIX, como isso possibilitamos uma reflexão sobre a importância do conhecimento do contexto cultural para a compreensão da ciência. Temos desenvolvido, também, produções textuais e audiovisuais sobre as concepções de tempo e espaço desde o período medieval até o início do Século XX. Essas produções evidenciam o caráter histórico da produção científica e ajuda os alunos na compreensão dos conceitos trabalhados ao longo do curso regular de física na escola básica.

Notas e referências bibliográficas

Nathaly Barboza de Brito é licenciada em física pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ e mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Educação do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ. E-mail: nathaly.barboza@gmail.com.

Ueslei Vieira dos Reis é licenciado em física pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ e mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Educação do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ. E-mail: uesleifisico@gmail.com.

Ivan Luis Miranda Talon é licenciado em física pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, bolsista CAPES e mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Educação do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ. E-mail: ivantalon@yahoo.com.br.

José Claudio de Oliveira Reis é doutor em História e Filosofia da Ciência pela COPPE/UFRJ, professor adjunto do Instituto de Física da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e professor do Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Educação do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ. E-mail: guerrareis@tekne.pro.br.

- 1 FORATO, Thaís Cyrino de Mello. A Filosofia Mística e a Doutrina Newtoniana: uma discussão historiográfica. *ALEXANDRIA Revista de Educação em Ciências e Tecnologia*, v. 1, n. 3, p. 29-53, nov. 2008.
- 2 MAGALHÃES dos Santos Filho, Gildo. Ciências e filosofia da natureza no século XIX: eletromagnetismo, evolução e ideias. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 10., Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte, 2005.
- 3 SAMANIEGO, Luiz Elias Quintero. O positivismo e as ciências físico-matemáticas no Brasil. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. Florianópolis: UFSC, v. 11, n. 2, p. 105-114, ago. 1994.
- 4 CHALMERS, Alan Francis. *A fabricação da ciência*. Trad. Beatriz Sidou. São Paulo: Editora da UNESP, 1994.
- 5 ALLCHIN, Douglas. Evaluating knowledge of the nature of (whole) science. *Science Education*, 95, p. 918-942, 2011.
- 6 BRAGA, Marco Antonio Barbosa; GUERRA de Moraes, Andreia; REIS, José Claudio de Oliveira. O papel dos livros didáticos franceses do século XIX na construção de uma concepção dogmático-instrumental do ensino de física. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. Florianópolis: UFSC, v.25, n.3, pp. 507-522, dez. 2008.
- 7 GIL PÉREZ, Daniel; MONTORO, Isabel Fernández; ALÍS, Jaime Carrascosa; CACHAPUZ, António; PRAIA, João. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência & Educação*, v.7, n.2, p. 125-153, 2001.
- 8 BRAGA; GUERRA; REIS, op. cit., 2008.
- 9 QUEIRÓS, Wellington Pereira; NARDI, Roberto. História do princípio de conservação da energia: alguns apontamentos para a formação de professores. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 18., 2009, Vitória. *Anais...* Vitória: 2009, 10p.
- 10 CACHAPUZ, António; GIL PÉREZ, Daniel; de CARVALHO, Anna Maria Pessoa; PRAIA, João; VILCHES, Amparo. *A necessária renovação do ensino das ciências*. São Paulo: Cortez, 2005.
- 11 HENRIQUE, Alexandre Bagdonas. *Discutindo a natureza da ciência a partir de episódios da história da cosmologia*. 2011. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências). São Paulo: FEUSP, 2011.
- 12 MARTINS, Roberto de Andrade. A história das ciências e seus usos na educação. In: SILVA, Cibelle Celestino (Org.). *Estudos de História e Filosofia das Ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.
- 13 BRASIL. Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio. Brasília: MEC, SEMTEC, 2002.
- 14 MATTHEWS, Michael. *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. New York: Routledge, 1994.
- 15 HENRIQUE, Alexandre Bagdonas; de ANDRADE, Victória Flório Pires; L'ASTORINA, Bruno. Discussões sobre a natureza da ciência em um curso sobre a história da Astronomia. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia - RELEA*, n. 9, p. 17-31, 2010.
- 16 FORATO, Thaís Cyrino de Mello; PIETROCOLA, Maurício; MARTINS, Roberto de Andrade. História da ciência e religião: uma proposta para discutir a natureza da ciência. In: Simpósio Nacional de Ensino de Física, 17, 2007, São Luiz. *Anais...* São Luiz, 2007, 9 p.
- 17 GUERRA de Moraes, Andreia; FREITAS, Jairo; REIS, José Claudio de Oliveira de Oliveira; BRAGA, Marco Antônio Barbosa. A interdisciplinaridade no ensino das ciências a partir de uma perspectiva histórico-filosófica. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v.15, n.1, p. 32-46, 1998.
- 18 FORATO, Thaís Cyrino de Mello. *A natureza da ciência como saber escolar: um estudo de caso a partir da história da luz*. 2009. Tese (Doutorado em Educação). São Paulo: FEUSP, 2009.
- 19 ROSA, Carlos Augusto de Proença. *História da ciência: o pensamento científico e a ciência no século XIX*. 2ª ed. Brasília: FUNAG, 2012.
- 20 BRAGA, Marco Antonio Barbosa; GUERRA de Moraes, Andreia; REIS, José Claudio de Oliveira. *Breve História da Ciência Moderna*. Rio de Janeiro: Ed. Zahar, 2007, v. 2-4.

- 21 ROSA, op. cit., 2012.
- 22 HOBBSAWN, Eric. *A Era das Revoluções*. São Paulo: Paz e Terra Editora, 2009.
- 23 PRAXEDES, Gilmar; JACQUES, Vinicius. O princípio de conservação da energia: a convergência dos diferentes sentidos. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENSINO DE CIÊNCIA, 7, 2009, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis, 2009.
- 24 KUHN, Thomas Samuel. *A tensão essencial: estudos selecionados sobre tradição e mudança científica*. Trad. Marcelo Amaral Penna-Forte. São Paulo: Editora Unesp, 2011.
- 25 Smeaton aprimorou-as com o objetivo de salvaguardar recursos naturais e potencializar o resultado produtivo – indivíduos que, além de interessados por questões científicas, voltam-se, até os dias de hoje, especialmente, para questões de cunho experimental e prático.
- 26 BARACCA, Angelo. El desarrollo de los conceptos energéticos em la mecánica y la termodinámica desde mediados del siglo XVIII hasta mediados del siglo XIX. *LLULL*, v.25, n.3, p.285-325, 2002.
- 27 Idem.
- 28 KUHN, op. cit., 2011.
- 29 SMITH, Crosbie. *The science of energy: a cultural history of energy physics in Victorian Britain*. Chicago: The University of Chicago Press, 1998.
- 30 BARACCA, op. cit., 2002.
- 31 HARMAN, Peter Michael. *Energy, force and matter*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- 32 SILVA, José Luis de Paula Barros; de MORADILLO, Edilson Fortuna. Sobre o ensino da conservação da energia. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENSINO DE CIÊNCIA, 5., 2005, Bauru. *Anais...* Bauru, São Paulo, 2005, p. 8.
- 33 ELKANA, Yehuda. *The Discovery of the Conservation of Energy*. Massachusetts: Harvard University Press, 1975.
- 34 HEIMANN, Peter. Conversion of Forces and the Conservation of Energy. *Centaurus*, 18, p. 147-161, 1974.
- 35 HARMAN, op. cit., 1982.
- 36 MAGALHÃES, op. cit., 2005.
- 37 GUERRA de Moraes, Andreia; FREITAS, Jairo; REIS, José Claudio de Oliveira; BRAGA, Marco Antonio Barbosa. *Galileu e o nascimento da ciência moderna*. São Paulo: Atual, 1997.
- 38 KUHN, op. cit., 2011.
- 39 GOWER, Barry. Speculation in physics: the history and practice of *Naturphilosophie*. *Studies in History and Philosophy of Science*, v.3, n. 4, p. 301-356, 1973.
- 40 SILVA; MORADILLO, op. cit., 2005.
- 41 CANEVA, Kenneth Lawrence. Physics and *Naturphilosophie*: A reconnaissance. *History of Science*, 35, pp. 35-106, 1997.
- 42 KUHN, op. cit., 2011.
- 43 MAGALHÃES, op. cit., 2005.
- 44 CANEVA, op. cit., 1997.
- 45 Idem.
- 46 BRAGA; GUERRA; REIS, op. cit., 2007.
- 47 MAGALHÃES, op. cit., 2005.
- 48 BRAGA; GUERRA; REIS, 2007, op. cit.
- 49 Idem.
- 50 KUHN, op. cit., 2011.
- 51 BRAGA; GUERRA; REIS, op. cit., 2007.
- 52 CANEVA, op. cit., 1997.
- 53 KUHN, op. cit., 2011.
- 54 BRAGA; GUERRA; REIS, op. cit., 2007.
- 55 MAGALHÃES, 2005, op. cit.
- 56 KUHN, op. cit., 2011.
- 57 GOWER, op. cit., 1973.
- 58 CANEVA, op. cit., 1997.
- 59 Idem.
- 60 KUHN, op. cit., 2011, p. 117-118.
- 61 Idem.
- 62 Idem.
- 63 Idem.
- 64 Idem.
- 65 Idem.
- 66 GOWER, op. cit., 1973.

- 67 KUHN, op. cit., 2011.
- 68 PONCZEK, Roberto Leon. A polêmica entre Leibniz e os cartesianos: mv ou mv²? *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v.17, n.3, p. 336-347, 2000.
- 69 BRAGA; GUERRA; REIS, op. cit., 2007.
- 70 MARTINS, Roberto de Andrade. Mayer e a conservação da energia. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 6, p. 63-95, 1984.
- 71 BRAGA; GUERRA; REIS, op. cit., 2007.
- 72 PONCZEK, op. cit., 2000.
- 73 BRAGA; GUERRA; REIS, op. cit., 2007.
- 74 PONCZEK, op. cit., 2000.
- 75 Idem.
- 76 MARTINS, op. cit., 1984.
- 77 PRAXEDES; JACQUES, op. cit., 2009, p.5.
- 78 BRAGA; GUERRA; REIS, op. cit., 2007.
- 79 KUHN, op. cit., 2011.
- 80 MARTINS, op. cit., 1984.
- 81 Idem.
- 82 Idem.
- 83 KUHN, op. cit., 2011.
- 84 MARTINS, op. cit., 1984.
- 85 Idem.
- 86 Idem.
- 87 Idem.
- 88 KUHN, op. cit., 2011.
- 89 GOWER, op. cit., 1973, p.349.
- 90 Idem.
- 91 SMITH, op. cit., 1998.
- 92 SILVA; MORADILLO, op. cit., 2005.
- 93 QUEIRÓS; NARDI, 2009, op. cit.
- 94 MARTINS, André Ferrer Pinto. *Tempo Físico: a construção de um conceito*. Natal: Editora da UFRN, 2007.
- 95 GUINEVERE de Melo Silva, Elaine. A Temporalidade do Pensamento em Descartes. In: V Encontro Interinstitucional de Filosofia. In: ENCONTRO INTERINSTITUCIONAL DE FILOSOFIA, 5, 2007, João Pessoa. *Anais... João Pessoa*, 2007, p. 27-44.
- 96 NEWTON, Isaac. *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*. São Paulo: EDUSP, 2002.
- 97 Idem.
- 98 LEIBNIZ, Gottfried Wilhelm. *Novos ensaios sobre o entendimento humano*. Trad. Carlos Lopes de Mattos. São Paulo: Nova Cultural, 1988. (Os pensadores, 15)
- 99 MARTINS, 2007, op. cit.
- 100 FITAS, Augusto José dos Santos. Uma Controvérsia na História da Física, *Vértice*, n. 56, p. 49-71, 1993.
- 101 FORATO, op. cit., 2009.
- 102 BRAGA; GUERRA; REIS, 2007, op. cit.
- 103 MARTINS, op. cit., 2007.
- 104 Idem.
- 105 BRAGA; GUERRA; REIS, op. cit., 2007.
- 106 OLIVEIRA, Luiz Alberto. Imagens do Tempo. In: DOCTORS, Márcio (Org.). *Tempo dos Tempos*. Rio de Janeiro: Jorge ZAHAR Ed., 2003, v. 1, p. 33-68.
- 107 MARTINS, op. cit., 2007.
- 108 Idem.
- 109 MARTINS, op. cit., 2007.
- 110 BRAGA; GUERRA; REIS, op. cit., 2007.
- 111 BRITO, Armando de Sousa e Brito. "Flogístico", "Calórico" e "Éter". *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 20, n.3, p.51-63, 2008.
- 112 BRAGA; GUERRA; REIS, op. cit., 2007.
- 113 OLIVEIRA, op. cit., 2003.
- 114 DAHMEN, Sílvio Renato. Boltzmann: Vida e Obra. *Gazeta de Física*, v. 30, pp. 16-24, 2007.
- 115 WHITROW, Gerald James. *O que é tempo?* Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2005.
- 116 MARTINS, op. cit., 2007.
- 117 WHITROW, op. cit., 2005.

- 118 STACHEL, John. *O Ano Miraculoso de Einstein*. Rio de Janeiro: UFRJ Editora. 2. ed. 2008.
- 119 FORATO, op. cit., 2009.
- 120 SILVA, Cibele Celestino; MOURA, Breno Arsioli. A natureza da ciência por meio do estudo de episódios históricos: o caso da popularização da óptica newtoniana. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n.1, 2008.
- 121 YOUNG, Thomas. **The Bakerian lecture: On the theory of light and colours**. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v.92, p. 12-48, 1802.
- 122 ROSA, op. cit., 2012.
- 123 PIETROCOLA, Mauricio. Fresnel e o arrastamento parcial do éter: a influência do movimento da terra sobre a propagação da luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v.10, n.2, p. 157-172, 1993.
- 124 DARRIGOL, Olivier. *A History of Optics: From Greek Antiquity to the Nineteenth Century*. Oxford University Press, Oxford, 2012.
- 125 BREWSTER, David; BACHE, Alexander Dallas. *Treatise on optics*. Blanchard and Lea, 1854.
- 126 SILVA, Fabio Wellington Orlando. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.29, n.1, p. 149-159, 2007.
- 127 DARRIGOL, op. cit., 2012.
- 128 MASON, Stephen Finney. *Historia de las Ciencias 4: La Ciencia del Siglo XIX*. Madrid: Alianza Editorial, 1986.
- 129 SILVA, op. cit., 2007.
- 130 PIETROCOLA, op. cit., 1993.
- 131 Idem.
- 132 DARRIGOL, op. cit., 2012.
- 133 BRAGA; GUERRA; REIS, op. cit., 2007.
- 134 SILVA, op. cit., 2007.
- 135 CROSLAND, Maurice. *Science under control: the French Academy of Sciences 1795-1914*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- 136 PIETROCOLA, 1993, op. cit.
- 137 BRAGA; GUERRA; REIS, 2007, op. cit.
- 138 Idem.
- 139 DARRIGOL, 2012, op. cit.
- 140 SILVA, 2007, op. cit.
- 141 SILVA; MOURA, 2008, op. cit.
- 142 ORATO, Thaís Cyrino de Mello; PIETROCOLA, Mauricio; MARTINS, Roberto de Andrade. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011.
- 143 Idem.
- 144 SANTOS, Maria Eduarda do Nascimento Vaz Moniz. Encruzilhadas de mudança no limiar do século XXI: construção do saber científico e da cidadania via ensino CTS de ciências. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS. Valinhos, 1999, p. 14.
- 145 GALILI, Igal. Promotion of Cultural Content Knowledge Through the Use of the History and Philosophy of Science. *Science & Education*, v. 21, n. 9, p. 1283-1316, 2012.
- 146 MCCOMAS, William. Seeking historical examples to illustrate key aspects of the nature of science. *Science & Education*, v. 17, n. 2-3, p. 249-263, 2008.

[Recebido em Dezembro de 2013. Aprovado para publicação em Setembro de 2014.]