
LIVROS DIDÁTICOS: MAXWELL E A TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA DA LUZ COMO ONDA ELETROMAGNÉTICA⁺*

Sonia Krapas

Programa de Pós-graduação em Educação – UFF
Niterói – RJ

Resumo

Longe estamos dos tempos em que a luz foi encarada, pela primeira vez, como onda eletromagnética (OEM). Hoje banalizada, essa é a definição que encontramos no dia a dia. Na escola, também há a naturalização do saber ensinado, segundo Chevallard, “a evidência incontestável das coisas naturais”. O saber ensinado é protegido pela “clausura da consciência didática”. Essa proteção se rompe quando ocorre a transposição didática, caracterizada pelo fluxo entre esses saberes, isto é, quando elementos do saber sábio passam ao saber ensinado. Com vistas a compreender melhor a especificidade do tratamento didático do saber relativo à luz como OEM, vamos analisar livros didáticos do Ensino Médio (LDEM) e do Ensino Superior (LDES) e duas edições do livro de Ganot. O artigo “On physical lines of force” será analisado com vistas a identificar os primeiros argumentos que, mais tarde, levaram Maxwell a concluir que a luz é uma OEM. Nos livros da atualidade, é possível identificar seis etapas: pré, introdução, existência das OEM, matemática das OEM, velocidade das OEM e pós. Concluiu-se que há, nos manuais, zonas de afastamento entre o saber sábio e o saber a ser ensinado: a relação de precedência/ primazia

⁺ Textbooks: Maxwell and the didactic transposition of light as electromagnetic wave

^{*} Recebido: maio de 2011.
Aceito: outubro de 2011.

de Hertz sobre Maxwell em Ganot, a reverência a Maxwell (ou Hertz), o aproveitamento do fato de que as OEM, hoje, estão vulgarizadas, os artifícios de linguagem usados pelos LDEM para substituir a matemática de Maxwell, a adoção de um experimento como ponto de partida para caracterizar a luz como uma OEM. Apontamos fatores internos e externos, que podem ter influenciado a organização da disciplina escolar Física, no que concerne às OEM. Implicações didáticas são apresentadas.

Palavras-chave: *Transposição didática. Maxwell. Ondas eletromagnéticas. Livros didáticos.*

Abstract

Gone are the days when light was seen for the first time as an electromagnetic wave (EMW). Trivialized today, this is the definition we find in everyday life. At school, there is also the naturalization of knowledge taught which is “the incontestable evidence of natural things”, according to Chevallard, the knowledge taught is protected by the “enclosure of didactic consciousness”. This protection is broken when the didactic transposition occurs, characterized by the flow of this knowledge, i.e. when elements of wise knowledge pass to knowledge taught. In order to better understand the specificity of didactic treatment of knowledge related to light as EMW, this study analyses High School textbooks (HSTB) and Higher Education ones (HETB) and two editions of Ganot's book. The article “On physical lines of force” will be also analyzed with the purpose of identifying the first arguments that later influenced Maxwell to conclude that light is an EMW. It is possible to identify in current textbooks five stages, besides the stage characterized by the reverence for Maxwell, that are: introduction, existence of EMW, mathematics of EMW, speed of EMW and finalization. It was concluded that there are gap areas in the manuals between wise knowledge and knowledge to be taught. They are: the relation of precedence/priority of Hertz over Maxwell in Ganot's book, the reverence for Maxwell, the use of the fact that the EMW today are vulgarized, the language artifices used by HSTB to replace Maxwell's

mathematics, the adoption of an experiment as a starting point for characterizing light as an EMW. We point out internal and external factors that may have influenced the organization of the Physics school subject with respect to the EMW. Educational implications are presented.

Keywords: *Didactic transposition. Maxwell. Electromagnetic waves, Textbooks.*

I. Introdução

Pesquisadores perseguem uma baleia e, com um arpão, colocam nela um radiotransmissor. O aparelho ajuda a monitorar a rota migratória do animal (Época, 22 de fevereiro de 2010).

Nos tempos atuais, caracterizados pela popularização de fenômenos ópticos envolvendo sinais de rádio e TV, controles remotos, fornos de microondas, entre outros, a luz parece não ser problemática. Assim, a revista semanal não peca na comunicação, ao fazer menção, de forma tão naturalizada, a aparelhos como radiotransmissores implantados em baleias: como afirma Época, “os sinais [emitidos pelo radiotransmissor] são captados por satélites, convertidos em coordenadas geográficas e enviados pela *internet*”.

Longe estamos do tempo em que a luz foi encarada, pela primeira vez, como onda eletromagnética. Hoje banalizada, essa é a definição que encontramos em dicionários.

Na escola também há a naturalização do saber ensinado, “a evidência incontestável das coisas naturais” (CHEVALLARD, 1998, p.18). Afinal, o saber ensinado é protegido pela “clausura da consciência didática – este distanciamento, tão eminentemente funcional, do resto do mundo” (CHEVALLARD, 1998, p. 25-26). É dessa forma que se observa, no interior do sistema didático, “verdadeira capacidade de produção de saber com o fim de autoconsumo”, a *criatividade didática* (CHEVALLARD, 1998, p. 26). Na mesma linha de argumentação, Chervel (1990, p. 180) defende que os conteúdos de ensino são “entidades *sui generis*, próprios da classe escolar, independentes, numa certa medida, de toda realidade cultural exterior à escola”, o que confere um “caráter eminentemente criativo” ao sistema escolar.

A proteção à qual se refere Chevallard se rompe quando ocorre a *transposição didática*, caracterizada pelo fluxo entre saberes, isto é, quando elementos do

saber sábio, aquele produzido na academia, passam ao *saber ensinado*, aquele que é veiculado na sala de aula sob a responsabilidade do professor. Porém, como alerta o autor, se desejamos compreender melhor a especificidade do tratamento didático do saber, é necessário que, na confrontação entre o saber sábio e o saber ensinado, consideremos a “distância que os separa, mais do que aquela que os aproxima” (CHEVALLARD, 1998, p. 22). Em outras palavras, quando se confronta a produção de cientistas com o tratamento didático que o professor dá a essa produção, há que se ter em mente que, no fluxo entre essas duas instâncias de produção, o saber original sofre transformações tão peculiares que é mais importante que consideremos as diferenças do que as semelhanças.

Entre esses saberes existe uma cadeia de etapas de negociação que vão impor marcas sucessivas ao saber em fluxo. É assim que, na transposição do saber sábio ao saber ensinado, há o que é designado por *saber a ensinar*, que é consubstanciado em programas, manuais de ensino, projetos e livros didáticos.

É sobre esses últimos que nosso estudo recairá. Segundo Freitag (*apud* GARCÍA *et al*, 2002), o livro didático “não é visto como um instrumento auxiliar na sala de aula, mas como a autoridade, a última instância, o critério absoluto da verdade, o modelo da excelência a ser adotado em classe”. Chervel (1990, p. 202) entende que, entre os diversos componentes de uma disciplina escolar, “o primeiro na ordem cronológica, senão na ordem de importância”, é a exposição pelo manual – ou pelo professor – de um conteúdo de conhecimento. Assim, não é à toa que Gaspar e Mattos (2002) propõem a necessidade de se considerar uma “ciência do livro didático”.

Nas três últimas décadas, como enfatiza o muito frequentemente citado artigo de Choppin de 2004, livros didáticos “vêm suscitando um vivo interesse” entre pesquisadores, especialmente no que diz respeito ao estudo historiográfico dos livros e das edições didáticas (CHOPIN, 2004). Na área de educação em ciências, Ferreira e Selles (2004), em um artigo do mesmo ano e que considera o mesmo intervalo de tempo, analisaram 17 artigos de autores brasileiros encontrados em revistas nacionais. Após 2004, a situação não mudou. Citando apenas alguns artigos relativos à física, temos, no cenário nacional, Nicioli Junior e Mattos (2008), Silva (2007a), Silva e Pimentel (2008), Ribeiro e Martins (2007), Krapas (2008a), Fanaro e Otero (2007), Braga, Guerra e Reis (2008), Araújo e Silva (2009), sendo que muitos deles tomam a perspectiva da história da ciência.

O objetivo deste trabalho é compreender a transposição didática realizada por livros didáticos sobre o tema da identificação da luz como uma onda eletromagnética (OEM). Para isso, vamos confrontar o saber a ser ensinado aí veiculado com o saber sábio via textos originais de Maxwell – nome invariavelmente associ-

ado à unificação do eletromagnetismo com a Óptica –, buscando responder à seguinte pergunta: Em que medida o tratamento didático que os livros dão ao saber sábio tem uma especificidade tal que dele o distancia?

II. Metodologia

Os livros didáticos foram submetidos à análise de conteúdo. Essa análise, esclarece Moraes (1999, p. 9), “conduzindo a descrições sistemáticas, qualitativas ou quantitativas, ajuda a reinterpretar as mensagens e a atingir uma compreensão de seus significados num nível que vai além de uma leitura comum”.

A análise de conteúdo foi guiada pelos seguintes aspectos: como a luz é concebida; quais cientistas são explicitamente ligados a essa concepção e qual o papel que desempenham; que aspectos da obra de Maxwell ainda se fazem presentes nesses livros; como foram contornadas as dificuldades da matemática inerente ao tratamento de Maxwell; qual o encaminhamento utilizado para definir uma OEM; qual o argumento para se afirmar que a luz é uma OEM; e que papel desempenha as experiências de Hertz sobre OEM.

Esses aspectos foram buscados em capítulos ou sessões cujos títulos incluem termos como equação de onda, equações de Maxwell, ondas eletromagnéticas, radiações eletromagnéticas ou similares. O trecho analisado vai aproximadamente do início do capítulo ou da seção até ao redor da identificação da luz com uma OEM. Legendas de figuras e tabelas e textos em *Box* também foram levados em conta.

Sabendo que há relações estreitas entre o Ensino Médio e o Ensino Universitário, analisamos tanto livros didáticos do Ensino Médio (LDEM) como livros didáticos do Ensino Superior (LDES), o que permitirá comparar as especificidades de seus tratamentos didáticos. Outra comparação interessante se dá com livros destinados ao ensino secundário editados em período próximo à publicação dos trabalhos de Maxwell.

II.1 Livros antigos

A escolha dos livros se baseou no conceito de vulgata de Chervel. Para ele, “em cada época, o ensino dispensado pelos professores é, grosso modo, idêntico, para a mesma disciplina e para o mesmo nível”. Continua Chervel:

Quando uma nova vulgata toma o lugar da precedente, um período de estabilidade se instala (...). Os períodos de estabilidade são separados por períodos “transitórios” ou de “crise”, em que a doutrina ensinada é submetida

a turbulências. O antigo sistema ainda continua lá, ao mesmo tempo em que o novo se instaura (...) Mas pouco a pouco, um manual mais audacioso, ou mais sistemático, ou mais simples (...) se impõe. É ele que doravante se imita, é ao redor dele que se constitui a nova vulgata (Chervel, 1990 p. 204).

Editado em vários idiomas, o *Traité Élémentaire de Physique* de Ganot pode ser considerado a materialização da vulgata para o Ensino Secundário por um longo período de tempo¹. No Brasil, ele era “sugerido em inúmeros programas, desde o Colégio Pedro II até a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo” (NICIOLI JUNIOR; MATTOS, 2008). Com o objetivo de constatar quando e como Maxwell foi transposto para o livro, escolhemos duas edições entre as disponíveis. A décima nona edição, de 1884², interessava por ter sido publicada após os trabalhos de Maxwell sobre a teoria eletromagnética da luz. A vigésima quarta, de 1908, foi vista porque já se passara algumas décadas desde então, sem que tivesse passado tempo suficiente para que tivessem ocorrido as adequações ao trabalho de Einstein de 1905. A edição dos livros esteve a cargo do próprio autor até 1882, quando ele cedeu os direitos a Hachette, em Paris.

II.2 Livros didáticos do Ensino Médio

A amostra de LDEM foi obtida usando-se como um dos critérios a avaliação realizada no âmbito do Programa Nacional do Livro para o Ensino Médio – PNLEM 2009³. Assim, ficamos com *Física* de Máximo e Alvarenga, publicado pela Scipione em 2002, *Física* de Gonçalves e Toscano, de 2003, também da Scipione, e *Física, Ciência e Tecnologia* de Penteado e Torres, publicado pela Moderna em 2005.

Outro critério foi a opção por coleções de três volumes, caso estivessem disponíveis as duas modalidades de publicação pelo(s) mesmo(s) autor(es). Assim,

¹ Há registros no Google Books de edições de 1931, 1939 e 1941, ainda que se afirme (Sampaio, 2004, p. 95) que a primeira edição é de 1851. A última edição encontrada no Google Books é de 1931. Uma edição em espanhol, de 1852, pode ser encontrada na Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes. Na 3ª edição em inglês, disponível no Google Books, é feita menção à sua tradução para o alemão, além do espanhol. Segundo a *Wikipédia L'encycloedie Libre*, as obras de Ganot foram traduzidas também para o holandês e o russo.

² No que tange ao assunto aqui estudado, a décima terceira edição, de 1868, – disponível na página da *Gallica Bibliothèque Numérique* – quase não se diferencia da edição de 1884.

³ Portaria Nº 366, de janeiro de 2006. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/port366_pnlem.pdf>.

entre os dois títulos de Sampaio e Calçada aprovados pelo PNLEM, optamos pelo de três volumes, *Universo da Física*, lançado pela Atual Editora, em 2001, e substituímos o livro de Gaspar, de volume único, pelo de três volumes, *Física* da Editora Ática, de 2000, apesar de esta versão não ter sido submetida à avaliação pelo PNLEM.

Também não avaliada pelo PNLEM, a coleção *Física* de Guimarães e Fonte Boa, editada pela Futura em 2001, foi incluída. Nascida no reduto de uma escola experimental de Niterói, a proposta de ensino se expandiu para o estado do Rio de Janeiro e para o Brasil, na forma dessa coleção que chegou a ser editada pela Editora Harbra. Prolongados por longo período, seu desenvolvimento, sua experimentação e seus ajustes puderam contar, tal como esclarecem seus autores, com “sugestões, referências bibliográficas e discussões esclarecedoras” por parte do Grupo de Pesquisa em Ensino de Física da UFF (Guimarães e Fonte Boa, p. XI). Uma evidência do reconhecimento da coleção pela comunidade nacional de ensino de física foi a participação de Marcelo Fonte Boa na Mesa Redonda *Análise de Livros Didáticos de Física para o Ensino Médio* no XVII SNEF, ao lado de renomados autores como Beatriz Alvarenga e Alberto Gaspar.

II.3 Livros didáticos do Ensino Superior

Lançada na década de 1960, pode-se afirmar que a coleção de Halliday e Resnik, atualmente também assinada por Walker, personifica a vulgata para o ensino de física básica na universidade. Segundo o que se afirma na página web da editora, “cerca de sete milhões de alunos ao redor do planeta estudam com *Fundamentos da Física*” (GRUPOGEN, 2010). Por esse motivo, elegemos o livro *Fundamentos de Física. Volume 4: Óptica e Física Moderna*, de Halliday, Resnik e Walker, editado pela LTC em 2009.

A acessibilidade foi outro critério adotado na escolha dos LDES que costumam ser adotados nesse nível de ensino. A partir da busca em editora de livros técnicos, em sites de livrarias virtuais e em bibliotecas de algumas universidades públicas do Grande Rio, encontramos autores recorrentes, dos quais vamos analisar as seguintes edições: de 1999, *Física* de Alonso e Finn, editora Addison-Wesley; de 2007, *Física Básica: Eletromagnetismo* de Chaves, editora LTC; de 1999, *Física, volume 2* de Keller, Gettys e Skove, editora Makron; de 2007, *Física Básica: Eletromagnetismo* de Nussenzveig, editora Edgard Blucher; de 1996, *Física 3 para Cientistas e Engenheiros* de Serway, editora LTC; de 2006, *Física para Cientistas e Engenheiros: Eletricidade e Magnetismo; Óptica*, de

Tipler e Mosca, editora LTC; de 2004, *Sears e Zemansky Física III: Eletromagnetismo* de Young e Freedman, editora Addison-Wesley.

III. Maxwell e a teoria eletromagnética da luz

Antes de sua obra máxima, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, publicada pela primeira vez em 1873 (MAXWELL, 1954), Maxwell produziu três importantes artigos sobre o eletromagnetismo, sendo que, em dois deles, é desenvolvida a teoria eletromagnética da luz: *On physical lines of force* de 1861-62 (MAXWELL, 1952a) e *A dynamical theory of the electromagnetic field* de 1864 (MAXWELL, 1952b). Sobre essa teoria, interessa, ainda, ver a nota expressa no título do artigo *On a method of making a direct comparison of electrostatic with electromagnetic force; with a note on the electromagnetic theory of light* de 1868 (MAXWELL, 1952c).

É vasta a bibliografia e amplo o espectro de interesses dos estudos historiográficos dedicados a essas obras de Maxwell. Em artigo de 1898, Boltzmann (apud SIEGEL, 2002) tece comentários sobre *On physical lines*. Em 1902, Duhem examina criticamente esses trabalhos (DUHEM, 1902). Há autores que tratam da história do éter, dedicando espaço apreciável a Maxwell. É o caso da obra clássica de Whittaker (1958) e dos livros de Berkson (1981), Nersessian (1984a) e Darrigol (apud SILVA, 2002), entre outros. Everitt escreve um verbete sobre Maxwell em *Dictionary of Scientific Biography*, verbete expandido na forma de livro (EVERITT, 1975). Alguns autores exploram questões de ordem filosófico-cognitiva, como os “métodos” utilizados por Maxwell e o papel das analogias na construção do conhecimento (ABRANTES, 1998; BEZERRA, 2006; CHALMERS, 1973; CUSHING, 1998; NERSESSIAN, 1984a, 1984b e 1992). Outros põem maior ênfase na formulação conceitual/matemática (BORK, 1967; MARTINS, 2005; SILVA, 2002 e 2007b). Siegel (2002) dedica um livro ao artigo de 1861-2.

O objeto da presente investigação nos leva a focalizar apenas dois aspectos da obra de Maxwell: a dedução das equações de onda, suas justificativas e sua consequência e a concordância entre a velocidade de propagação das OEM e a velocidade da luz.

Esses aspectos são abordados nos trabalhos de 1864 e 1868 e em *A Treatise*. Amplamente difundido no século dezenove no reduto da mecânica, o método de Lagrange é, nesses trabalhos, aplicado ao eletromagnetismo. Maxwell parte de equações relativas aos fenômenos eletromagnéticos, deriva equações de onda e mostra que a velocidade de propagação concorda com a velocidade da luz.

As equações básicas são diferentes nos diferentes trabalhos o que, portanto, acarreta diferenças nas derivações das equações de onda correspondentes. Apenas para exemplificar, no artigo de 1864, Maxwell se baseou em “vinte equações ao todo, envolvendo vinte variáveis” (MAXWELL, 1952b, p. 534). Bork (1967) exhibe e discute essas deduções, que diferem das realizadas posteriormente por Hertz e Heaviside, sendo essa última a utilizada por muitos livros didáticos da atualidade. As diferenças também aparecem na extensão das equações de onda: em *A dynamical*, ela diz respeito apenas à ação magnética. É por esse motivo que Bork acredita que o famoso diagrama que mostra a evolução do campo elétrico e magnético com o tempo apareceu somente na sua obra final (*A Treatise*), quando ele possivelmente estava “completamente consciente de que ambos os campos obedecem às equações de onda” (BORK, 1967, p. 849). A título de síntese, o diagrama (Fig. 1) aparece, nesta obra, depois da obtenção das equações de onda:

Os valores da força magnética [B na nomenclatura atual] e da intensidade eletromotiva [E na nomenclatura atual] em um dado instante em diferentes pontos do raio são representados na figura 67, para o caso de um distúrbio [oscilação na nomenclatura] harmônico simples em um plano (MAXWELL, 1954, p. 440).

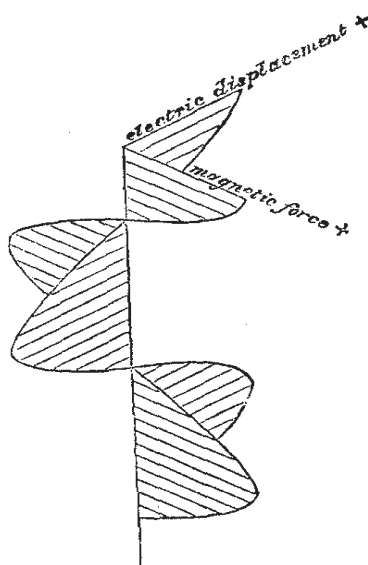


Fig. 1: Figura 67 de *A Treatise* (MAXWELL, 1954, p.439).

Falta entender por que Maxwell teria investido na demonstração das equações de onda. Para isso, é necessário ir ao seu artigo anterior *On physical lines of force*, sendo interessante, também, ver seus antecedentes, ainda que de forma breve.

III.1 Antecedentes

O trabalho de Oersted de 1820 teve importantes implicações para os estudos que o sucederam. Além de apresentar um novo tipo de força, uma força circular distribuída no espaço que envolve questões de simetria (MARTINS, 1988; SILVA, 2002), abria a possibilidade de explorar a integração de fenômenos de diferentes áreas da física. Universalmente aceita, a agenda de Oersted deu origem a duas distintas escolas na teoria eletromagnética: a escola Continental, de Ampère, e a Britânica, provinda de Faraday, que, por tradição, são identificadas, respectivamente, com a perspectiva da *ação à distância* e da *ação mediada* por um meio interveniente, o éter⁴.

Em finais de 1820, Ampère expressa matematicamente os resultados experimentais de Oersted, na forma da conhecida relação da força de atração/repulsão entre elementos de corrente. Entre 1830 e 1840, uma série de experiências realizadas por Faraday, entre elas a que evidencia o fenômeno da indução eletromagnética, abre novas possibilidades de integração. Para interpretar tal fenomenologia, Faraday introduz o conceito de linha de força.

Seguindo os passos de Ampère, em 1846, Weber contribui para essa integração, expandindo a lei de Coulomb com vistas a dar conta dos recém evidenciados fenômenos eletromagnéticos:

$$F = \frac{ee'}{r^2} \left(1 - \frac{v^2}{c_w^2} + \frac{2ra}{c_w^2} \right)$$

⁴ Segundo Siegel (2002, p. 7), a designação tradicional da escola Continental como escola da ação à distância é “alguma coisa oblíqua”. Como Newton, Ampère foi visto por muitos seguidores como partidário da ação à distância, mas ambos, de fato, concebiam a interação “como mediada por um meio interveniente – um ‘éter’”. Siegel prefere, por uma questão de precisão, denominar essa escola por “escola da carga-interação”, uma vez que “a ênfase se encontra claramente na interação de cargas de acordo com uma lei matemática de força”. Para a escola Britânica, Siegel prefere a denominação “escola da primazia do campo”.

onde F é a magnitude da força central agindo entre as cargas elétricas e e e' , r é a distância entre elas, v é sua velocidade relativa, a sua aceleração relativa, c_w é uma constante que estabelece a razão entre unidades elétricas e magnéticas⁵.

Coube a Thomson e Maxwell – seguidores de Faraday – desenvolver uma teoria matemática unificada para competir com a de Weber. Conhecedor de trabalhos matemáticos desenvolvidos por Laplace e Poisson sobre eletrostática e por Fourier sobre calor, Thomson, em seu trabalho de 1842 sobre eletrostática, inova porque é capaz de “desenvolver um método de encontrar teoremas através de analogias formais entre duas teorias físicas” (SILVA, 2002, p. 22). Em 1846, a inovação está em analisar as tensões do meio elástico onde se propagam as forças elétrica e magnética – tensões previstas por Faraday – com a matemática dos meios contínuos em voga desde o começo do século XIX⁶. Referindo-se a Darrigol (apud SILVA 2002, p. 28), Silva afirma que, em caderno de anotações de 1858, Thomson especula que a “atração magnética resultaria de uma força centrífuga dos rodamos [infinitas rotações do fluido universal] combinada com uma pressão do fluido”. E continua: “Estas foram as primeiras tentativas de Thomson de entender toda a física em termos de movimento de vórtices em um fluido”.

Maxwell se apropriou dessas inovações. É, pois, compreensível que Siegel (1999, p. 15) tenha afirmado que Thomson “definiu o programa de pesquisa em eletricidade e magnetismo que Maxwell devia, uma década mais tarde, assumir e realizar tão exitosamente”⁷.

III.2 On physical lines of force

Maxwell também tratou o éter eletromagnético como um sólido elástico. No artigo de 1861-2, ele estendeu a *hipótese dos vórtices moleculares*, desenvolvi-

⁵ Como Siegel (2002), vamos usar c_w para identificar o que hoje é conhecido como fator de Weber.

⁶ No início dos anos mil e oitocentos, quando propuseram a transversalidade da luz, Fresnel e Young atribuíram ao éter luminífero o “poder de resistir a tentativas de distorcer sua forma”, comportando-se como um sólido elástico (WHITTAKER, 1958, p. 128). Em 1821, Navier desenvolve, pela primeira vez, um método geral para investigar matematicamente as propriedades dos corpos sólidos. Foi seguido por Cauchy, Rankine, MacCullagh e Poisson, entre outros.

⁷ Segundo Siegel, a influência de Thomson sobre Maxwell não se reduziu apenas aos aspectos científicos e matemáticos, mas também ao aspecto metodológico, isto é, à atitude frente à “representação mecânica” da situação física. Para Thomson, o uso de analogias é “possivelmente um passo em direção à caracterização da real situação física; essa virada do pensamento de Thomson viria a ser paradigmática para Maxwell” Siegel (2002, p. 27).

da por Rankine em *Mechanical Action of Heat* para estudar matematicamente gases e vapores (RANKINE apud RANKINE 1850), ao domínio do eletromagnetismo, mais especificamente no estudo da indução eletromagnética em dielétricos. A Fig. 2 ilustra o modelo de Maxwell. Essa figura mostra a secção transversal de um modelo tridimensional: a corrente AB é representada pela fiada de partículas (pequenos círculos); quando a corrente AB varia, as partículas giram em torno de seu eixo, “de maneira que as superfícies contíguas das partículas e dos vórtices compartilhem o mesmo movimento” (MAXWELL, 1952a, p. 468); os vórtices (hexágonos) giram no sentido horário na parte inferior e no sentido anti-horário na parte superior⁸ em torno de eixos que coincidem com linhas de força circulares que, na parte inferior, “entram” no plano do desenho e “saem” na parte superior; a série de vórtices *kl* faz, então, girar a fileira de partículas *pq* da direita para a esquerda, o que constitui a corrente induzida.

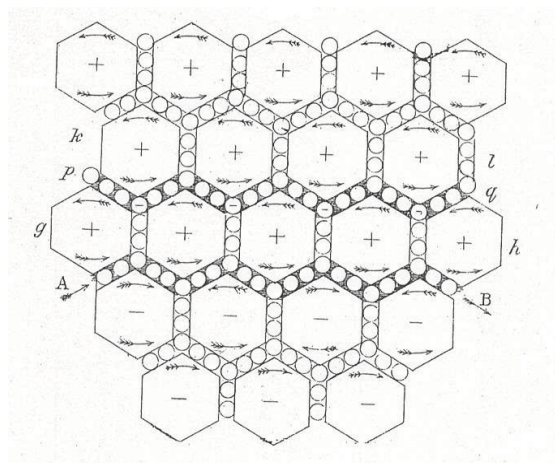


Fig. 2 - Modelo dos vórtices moleculares para o meio eletromagnético (MAXWELL, 1952a)

⁸ Além do sinal de + e -, Maxwell utiliza setas indicando a direção de rotação dos vórtices. Nessa figura, há um erro na orientação das setas do segundo e quarto hexágono da primeira fileira abaixo de AB. Esse erro persiste em Abrantes (1998, p. 194), mas está corrigido na coleção *Física* de Tipler, publicado pela Guanabara Dois.

A modelagem matemática dos vórtices moleculares⁹ permitiu que Maxwell chegasse à seguinte relação entre a velocidade de propagação c das ondas mecânicas no éter e o fator de Weber c_W :

$$c = \frac{c_W}{\sqrt{2}}$$

Em 1855, Weber e Kohlrausch, medindo experimentalmente c_W , haviam encontrado um valor que, a menos do fator $1/\sqrt{2}$, era muito próximo do valor da velocidade da luz medida por Fizeau¹⁰. A concordância numérica entre a velocidade das ondas no meio etéreo e a velocidade da luz leva Maxwell a concluir¹¹:

A velocidade das ondulações transversais em nosso meio hipotético, calculada dos experimentos eletromagnéticos de MM. Kohlrausch e Weber, concorda tão exatamente com a velocidade da luz calculada a partir de experimentos ópticos de M. Fizeau, que dificilmente podemos evitar a inferência de que a luz consiste de ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos (MAXWELL, 1952a, p. 500)¹².

Nersessian (1984a, p.84) aponta para a reticência associada à expressão “evitar a inferência” e Abrantes (1998, p. 196) nota a cautela de Maxwell, ao concluir “apenas que os dois meios de propagação possivelmente constituem um *único*

⁹ Abrantes (1998) sumariza essa modelagem; Siegel (2002), entre outros, a explora em seus detalhes.

¹⁰ Eles não deram especial atenção a essa concordância (WOODRUFF, 1976; D’AGOSTINO, 1986; SIEGEL, 2002), o que é compreensível, já que, como partidários da ação à distância, não seria trivial dar interpretação física a essa velocidade. Vale notar, no entanto, que, em 1857, Kirchhoff previu, a partir da eletrodinâmica de Weber (de quem era discípulo), que sinais eletromagnéticos se propagam ao longo de um fio (como sinais telegráficos) com uma velocidade próxima à da luz. Sobre essa velocidade, ele afirma: “É independente da seção reta, da condutividade do fio e, finalmente, da densidade de carga; seu valor é de 41950 milhas alemãs em um segundo, portanto, muito aproximadamente igual à velocidade da luz no vácuo.” (KIRCHHOFF, apud ASSIS; HERNANDES, 2009, p. 225)

¹¹ Entre historiadores da ciência há a controvérsia sobre quanto surpreso Maxwell ficou com essa concordância (NERSESSIAN, 1984a, p. 83).

¹² A conexão entre fenômenos elétricos e magnéticos e a luz não foi introduzida por Maxwell. Essa ideia foi abordada em uma variedade de contextos nos séculos XVII e XVIII. No século XIX, Ampère, Faraday e Thomson elaboram modelos sobre essa conexão. Isso, no entanto, “não teria influenciado Maxwell de forma imperativa em direção à unificação da teoria eletromagnética e da óptica com base em um único éter” (SIEGEL, 2002, p. 124).

meio”. Com o tratamento lagrangiano do éter em *A dynamical*, essa concordância leva Maxwell à conclusão mais contundente, a saber, a luz é uma OEM:

Esta velocidade [de propagação da perturbação magnética] é tão próxima à da luz que parece que temos uma forte razão para concluir que a própria luz (incluindo o calor radiante e outras formas de radiações, se houver) é um distúrbio eletromagnético na forma de ondas propagadas através do campo eletromagnético, de acordo com leis eletromagnéticas (MAXWELL, 1952b, p.535).

Explicado está, pois, o investimento na dedução das equações de onda: sem precisar explicitar modelos para o éter, essa dedução representou um argumento mais robusto a favor da unificação do eletromagnetismo com a óptica.

Vale acrescentar, no entanto, que a “inferência” do texto de 1861-2 e o “concluir” do texto de 1864 não têm caráter lógico, mas se trata de um recurso de argumentação típico das analogias, herança deixada por Thomson.

IV. Análise dos livros

A análise se inicia pelos livros de Ganot. A seguir, aparecem os LDEM e os LDES, cuja apreciação é feita em conjunto para melhor desenvolver a comparação entre eles. Na argumentação, que culmina com a identificação da velocidade de propagação das OEM com a velocidade da luz, discriminamos seis etapas. A etapa *pré*, assim denominada porque, geralmente, localiza-se no início do texto, é caracterizada pela reverência a Maxwell (ou a Hertz); o que define a etapa I, denominada *Introdução*, são os anúncios; na etapa II, apresentam-se argumentos – de ordem teórica e de ordem experimental – a favor da existência das OEM, argumentos que nos LDEM substituem o tratamento matemático que é feito nos LDES; a etapa III, *Matemática das OEM*, diz respeito a esse tratamento. Finalmente, na etapa IV, a luz é identificada com uma OEM. Alguns autores sentem a necessidade de acrescentar mais argumentos, abordando aspectos localizados, em outros autores, em etapas anteriores. Assim, ficou definida a etapa *Pós*. Em cada uma dessas etapas são apontados aspectos da argumentação que a caracterizam, aspectos detalhados adiante.

Os quadros 1 e 2, localizados ao final desta seção, sintetizam a análise. Neles, Gas, Gon, Gui, Max, Pen e Sam indicam, respectivamente, os livros de Gaspar, Gonçalves e Toscano, Guimarães e Fonte Boa, Máximo e Alvarenga, Penteado e Torres e Sampaio e Calçada; Ga designa Ganot na edição de 1908; Alo, Cha, Hal, Kell, Nu, Ser, Ti e You indicam respectivamente os livros de Alonso e

Finn, Chaves, Halliday, Resnik e Walker, Keller, Gettys e Skove, Nussenzveig, Serway, Tipler e Mosca e Young e Freedman.

Os números que aparecem nas células da tabela indicam a ordem em que os aspectos da argumentação surgem no texto. No processo de análise, foram feitos sucessivos ajustes na definição das etapas e dos aspectos, de forma a conseguir que uma sequência de passos estivesse localizada em uma única etapa. Em geral, isso ocorreu. Em *Ti*, por exemplo, os passos de 1 a 8 localizam-se na etapa I.

IV.1 Ganot

Em Ganot de 1884, Maxwell ainda não aparece. Como o calor, a luz “admitida atualmente” é concebida como uma “ondulação”. Sustentam essa hipótese importantes cientistas: Descartes, Grimaldi, Huygens, Euler, Young, Malus e Fresnel. Propagando-se em um meio material “perfeitamente elástico” – o éter –, a luz é comparada com o som. A diferença está no fato de que, no caso da luz, a onda é transversal:

Para explicar a origem da luz, adotamos sucessivamente as mesmas hipóteses para o calor: aquela da emissão e aquela das ondulações. Essa última, somente admitida atualmente, tem sido sustentada por Descartes, Grimaldi, Huygens, Euler, Thomas Young, Malus e Fresnel. Supomos que as moléculas dos corpos luminosos são animadas de um movimento vibratório infinitamente rápido, que se comunica ao meio perfeitamente elástico, penetrando intimamente todos os corpos, que chamamos éter. Um estremeamento em um ponto qualquer do éter se propaga em todos os sentidos sob a forma de uma onda esférica luminosa, da mesma forma que o som é propagado no ar através de ondas sonoras. Contudo, as vibrações não se produzem perpendicularmente à superfície das ondas luminosas, como no caso da propagação do som, mas seguindo essa própria superfície, quer dizer perpendicularmente à direção que segue a luz em propagação; isso que exprimimos dizendo que as vibrações são transversais (Ganot, 1884, p. 569).

Em 1908, o livro de Ganot já tem outro formato: a citação acima desaparece; a luz é, agora, uma onda eletromagnética¹³. Depois de descrever detalhadamente as experiências de Hertz, Ganot (1908, p. 980) conclui que “os efeitos do oscilador se propagam com uma velocidade finita (...) igual à velocidade da luz.

¹³ Vale lembrar que o trabalho de Einstein que considerou o “éter supérfluo” é de 1905, e que, portanto, em Ganot, o éter é suporte dessas ondas.

Assim, o aparelho de Hertz transmite no espaço verdadeiras ondas, ditas eletromagnéticas”. Maxwell, relacionado no índice¹⁴, aparece depois de Hertz:

A descoberta de Hertz trouxe um testemunho explosivo em apoio a uma teoria anterior de Maxwell, a teoria eletromagnética da luz. De acordo com essa teoria, Maxwell supõe que, ao longo de um raio luminoso polarizado, se propaga um campo magnético oscilante, perpendicular ao raio e, ao mesmo tempo, um campo elétrico oscilante e igualmente perpendicular ao raio, mas perpendicular ao campo magnético. As oscilações hertzianas concretizam precisamente tal fenômeno, e nós acabamos de ver que têm as mesmas propriedades e a mesma velocidade de propagação da luz (Ganot, 1908, p. 981).

Da confrontação entre o saber sábio, representado pelo trabalho de Maxwell, e o saber a ensinar, corporificado por Ganot, algo pode ser inferido acerca do fluxo entre eles: é notável a presença nula de Maxwell na primeira edição e quase insignificante na seguinte. Dificuldades com a matemática inerente à teoria de Maxwell – tanto as de 1861-2, como as associadas ao formalismo lagrangiano do artigo de 1864 – não podem ser responsabilizadas por essas ausências. Afinal, no caso da transversalidade da luz proposta por Fresnel e Young, os subsequentes desenvolvimentos matemáticos foram abstraídos e o éter luminífero foi descrito.

A ausência é ainda mais visível na precedência de Hertz sobre Maxwell, precedência que pode ser lida como primazia, se forem comparadas as descrições alongadas sobre as experiências de Hertz com a breve referência à teoria de Maxwell.

IV.2 Livros didáticos do Ensino Médio e Superior

Etapa pré: Reverências

Em Alonso e Finn, Hertz é reverenciado. Sua foto é mostrada; fala-se sobre a “longa série de experiências” por ele realizadas, a “forma definitiva” com que suas experiências confirmaram a teoria eletromagnética de Maxwell e a forma “contudente” de suas “demonstrações”. Hertz “estabeleceu a relação entre as ondas eletromagnéticas e a luz”¹⁵.

¹⁴ Com exceção daquela que segue no texto, as outras citações a Maxwell não estão no reduto da Óptica.

¹⁵ Num *Box* dedicado a Maxwell (localizado em capítulo anterior), este estabelecimento, no entanto, é imputado a Maxwell.

Nos outros livros, a situação é diferente. A referência a Hertz é breve; seu nome aparece sempre depois de Maxwell; em Halliday, Resnik e Walker, Nussenzweig e Tipler e Mosca ele não aparece no índice; sua experiência, tida como “inspirada” na teoria de Maxwell (HALLIDAY; RESNIK; WALKER, p. 2), é descrita apenas por Serway, Young e Freedman, Penteado e Torres e Gaspar, embora este último (p. 277), em um Box a ele dedicado, diz que seus resultados foram obtidos “quase casualmente”. Chaves (p. 189) diminui ainda mais o valor de seus experimentos: “com o trabalho de Maxwell, o processo pelo qual podem ser geradas as ondas eletromagnéticas ficou evidente”. Nussenzweig o cita apenas no volume 4 da coleção: *Ótica, Relatividade, Física Quântica*.

Maxwell tem presença marcante em todos os livros. Há reverências a ele, tais como a indicação de sua origem e anos de nascimento e morte, o nome completo, uma foto. Comparam-no a Newton e Einstein. Dotado de “uma formidável habilidade matemática”, Maxwell é visto como “o maior físico teórico do século XIX”. Além disso, não faltam adjetivos elogiosos à sua teoria, tais como “perfeita e completa” e “robusta e duradoura”, como sendo um dos “grandes momentos da história da física”. Nussenzweig e Gonçalves e Toscano transcrevem trecho de seus escritos. Alonso e Finn, Serway, Chaves, Máximo e Alvarenga e Gaspar reservam um *box* para falar de sua vida e de suas realizações; um “esboço biográfico”, segundo Serway. No corpo do texto, Chaves afirma que “Até hoje, nenhum fenômeno eletromagnético foi descoberto que não obedeça àquele conjunto de leis [as leis de Maxwell]”. Transcrevendo um trecho de uma carta de Maxwell, Keller, Gettys e Skove enfatizam como o próprio Maxwell julgava sua teoria: “Tenho ainda um trabalho sobre a teoria eletromagnética da luz, que, até que me convença do contrário, julgo ser revolucionário” (p. 386).

Etapa I: Introdução

Nesta etapa, há anúncios¹⁶ das equações de Maxwell e da sua consequência, as OEM:

(...) este cientista [Maxwell] estruturou um conjunto de equações, atualmente denominadas equações de Maxwell. (...) A consequência mais importante obtida dessas equações foi a previsão da existência das ondas eletromagnéticas (...) (MÁXIMO; ALVARENGA, p. 321-2).

¹⁶ Nos LDES não se trata de anúncio, mas de retomada das equações, às vezes, na forma de sumário.

Muitos autores anunciam a confirmação experimental por Hertz da previsão teórica de Maxwell. Os LDES chegam a anunciar a equação de onda, a coincidência entre o valor da velocidade das OEM e o valor da velocidade da luz e o fato de que a luz é uma OEM. Outros, ainda, apresentam as falhas com a analogia com uma onda mecânica e o anúncio de propriedades das OEM.

De certo modo, essa forma argumentativa não se afasta muito do saber sábio, mas há novidades didáticas: o aproveitamento do fato de que as OEM, hoje, estão vulgarizadas. Ainda que de forma tímida em Máximo e Alvarenga (“*ondas eletromagnéticas*, atualmente muito conhecidas e amplamente empregadas na ciência e tecnologia”), as OEM aparecem com mais ênfase em Penteado e Torres, Gonçalves e Toscano, Halliday, Resnik e Walker, Serway e Young e Freedman. Alguns deles iniciam o texto usando este recurso:

A tecnologia desenvolvida no século XX tornou corriqueiros aparelhos de rádio ou TV, que nos permitem acompanhar uma guerra distante, um jogo de futebol ou um desenho animado (GONÇALVES; TOSCANO, p. 381).

(...) estamos imersos em ondas eletromagnéticas por causa das transmissões de televisão, rádio e telefone (HALLIDAY; RESNIK; WALKER).

Halliday, Resnik e Walker terminam essa fase explorando uma série de situações nas quais estão presentes as OEM no seu largo espectro.

Etapa II: Existência das OEM

Esta etapa é a que melhor caracteriza os LDEM. Ela aparece em alguns livros de LDES, mas como uma argumentação secundária. Guimarães e Fonte Boa pulam essa etapa. Sem o poder retórico conferido pelas ferramentas matemáticas disponíveis no Ensino Superior, os outros autores dos LDEM alongam sua argumentação. Iniciam reportando-se à indução de E pela variação do campo B , seguida pela indução de B por E , sendo essa última indução, com exceção em Gonçalves e Toscano, explicitamente apresentada como um argumento de simetria atribuído a Maxwell¹⁷:

Maxwell concluiu que, se a variação do fluxo do campo magnético dá origem a um campo elétrico, uma variação do campo elétrico deve originar um campo magnético, completando a simetria que estava presente em todos os

¹⁷ Vale observar que, no artigo de 1884, essa simetria ainda não existia: “Maxwell está dizendo que a onda eletromagnética é uma perturbação magnética se propagando, mas não uma perturbação elétrica” (BORK, 1967, p. 846).

fenômenos eletromagnéticos descobertos até aquela época (GASPAR, p. 273).

Há, então, um “processo de sucessiva indução de campo elétrico em campo magnético, e vice-versa”, que aparece com expressões, tais como “e assim sucessivamente” e “e assim por diante”. Esse “encadeamento sucessivo” de campos é identificado com a propagação de ondas, as OEM¹⁸.

Maxwell concluiu por meio desse encadeamento sucessivo que os campos elétricos e magnéticos deveriam propagar-se pelo espaço, como se fossem ondas, as ondas eletromagnéticas (GASPAR, p. 274).

Essa afirmação é, talvez, a mais enigmática de todas. Afinal, em Maxwell, a identificação da luz com uma OEM surge das equações de onda para E e B resultantes de manipulações algébricas de equações relativas a fenômenos eletromagnéticos. A tarefa de substituir equações por palavras é árdua. Por isso, os autores de LDEM não medem esforços para esclarecer afirmações tais como a citação acima.

Gonçalves e Toscano propõem que o “processo de sucessiva indução” ocorre em uma antena, aparato muito conhecido hoje em dia. Isso porque lhes interessa compreender como se dá a transmissão do som pelo rádio através de radiações eletromagnéticas¹⁹:

Utilizando a teoria de Maxwell, podemos interpretar o que ocorre com um capacitor e com uma bobina, em seu processo de carga e descarga e, assim, compreender como ocorrem a emissão e a captação de som e imagens através do espaço (GONÇALVES FILHO; TOSCANO, p. 382).

Da mesma forma que esses autores, Gaspar lança mão de esquemas que mostram o enlace dos campos elétrico e magnético (Fig. 3). Como se isso não bastasse, ele ainda se vale de um recurso de autoridade, dizendo que a existência de OEM é fundamentada nas equações de Maxwell.

¹⁸ Este tratamento didático é generalizado: basta dizer que livros tão distanciados no tempo e no espaço de contextualização como o PSSC e *Física conceitual* de Hewett, editado no Brasil pela Artmed, também o adotam.

¹⁹ Apesar de, no capítulo dedicado à óptica, os autores se referirem à luz como uma onda, neste capítulo, eles preferem falar em radiação.

Em geral, o diagrama de Maxwell fecha a argumentação dos LDEM. Penteado e Torres, Máximo e Alvarenga e Sampaio e Calçada apresentam o diagrama de Maxwell, fazendo uso da analogia com uma onda mecânica²⁰:

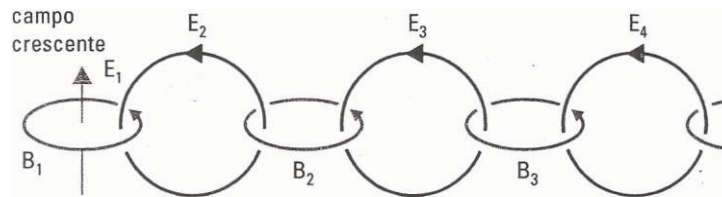


Fig. 3 - Esquema didático (GASPAR, p. 274).

Quando uma onda mecânica passa por um ponto, a partícula que se encontra nesse ponto oscila com a mesma frequência f e o mesmo período T da onda. No caso da onda eletromagnética, são os campos elétrico e magnético que aumentam e diminuem periodicamente suas intensidades. Ora num sentido, ora no sentido oposto (por analogia com as ondas mecânicas, dizemos que os campos oscilam) (SAMPAIO; CALÇADA, p. 501).

Pode-se concluir que, em geral, a argumentação tem como *ponto de partida um resultado teórico*, a saber, a mútua indução dos campos E e B genéricos. Halliday, Resnik e Walker e Serway, seguindo a rota de aproveitar a vulgarização das OEM, adotam como *ponto de partida o resultado de um experimento*, a emissão de ondas de rádio por uma antena que se encontra acoplada a um circuito LC. Gonçalves e Toscano mesclam teoria com experimento.

Da confrontação entre o saber sábio e o saber a ensinar é possível ver proximidade em certos aspectos. Young e Freedman e Máximo e Alvarenga são fiéis à nomenclatura utilizada por Maxwell: o que se propaga é um “distúrbio”, uma “perturbação”, constituídos pelos campos variáveis E e B .

No *box* reservado a Maxwell, Gaspar afirma que, para determinar a velocidade das OEM, Maxwell fez uso da “analogia com as ondas mecânicas, transversais em meios elásticos”. Nussenzveig descreve o modelo dos vórtices molecula-

²⁰ Gaspar faz o mesmo, porém, ao final do texto, a título de síntese.

res²¹, quando trata da corrente de deslocamento. Sendo apenas históricas, tais referências não chegam a contribuir para o entendimento do conteúdo propriamente dito, podendo ser entendidas como mais uma forma de reverência a Maxwell.

O diagrama de *A Treatise* (Fig. 1), ainda que de forma estilizada em Gonçalves e Toscano, aparece em todos os LDEM. Este pode ser considerado o maior tributo do saber sábio aos livros didáticos (no quadro 2, é possível ver que todos os LDES também o utilizam).

Por outro lado, o afastamento do saber sábio é patente na substituição da linguagem matemática pela linguagem natural, embora esta se valha de argumento usado por Maxwell, a simetria com respeito a E e B . Serway e Halliday, Resnik e Walker se afastam do saber sábio porque aproveitam a vulgarização das OEM e porque adotam como ponto de partida um experimento, o que caracteriza uma inversão da ordem dos acontecimentos históricos. É interessante observar que, guardadas as diferenças entre obras tão distantes, essa é a forma adotada por Gannot.

Etapa III: Matemática das OEM

Nussenzweig parte das equações de Maxwell na sua forma diferencial e mostra que E e B satisfazem a equação de onda:

$$\partial^2 f / \partial^2 - (1/v^2) \partial f / \partial t^2 = 0$$

Ele faz isso para mostrar que a velocidade v de propagação da onda, sendo igual a $1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, tem um valor numérico próximo à velocidade da luz c .

Trabalhando com a forma integral das equações de Maxwell, os outros autores as transformam na sua forma diferencial. Para isso, eles “postulam”, “admitem” uma configuração de campo simples que possui comportamento ondulatório. Na verdade, o tratamento matemático desses livros começa “antecipando o resultado”, isto é, antecipando a solução da equação de onda. Assim, a OEM é plana, polarizada e senoidal, tal como aparece no diagrama de Maxwell, geralmente utilizado na argumentação. Os livros mostram, então, que essas ondas são compatíveis com as equações de Maxwell. Daí, chegam aos mesmos resultados de Nussenzweig, sendo que Halliday, Resnik e Walker e Chaves não explicitam a equação de onda.

²¹ Em 1986, quando Tipler ainda publicava sozinho pela Guanabara Dois, em um box dedicado a Maxwell, *On physical lines* é citado e o modelo é descrito, inclusive com a apresentação do seu desenho.

Dessa forma, esses livros se afastam de Maxwell. Ainda que o desenvolvimento matemático de Nussenzweig não seja exatamente o que se encontra nos trabalhos de Maxwell, a argumentação por ele utilizada se aproxima daquela usada por Maxwell: tomar as equações de Maxwell, deduzir a equação de onda, retirar daí as propriedades das OEM, para, finalmente, apresentar o diagrama de Maxwell, que “dá uma ideia da forma da onda num dado instante” (p. 274).

Vale, ainda, mais uma observação: Apesar das semelhanças, existe, no entanto, uma grande diferença entre os LDES e Maxwell: a *justificativa para a busca por uma equação de onda* a partir de equações de natureza eletromagnética. Em Maxwell, ela é justa. Afinal, no artigo *On physical lines*, de 1861-2, ele parte da *hipótese* de que a ação eletromagnética se propaga como uma onda no éter eletromagnético, trata o éter como um sólido elástico e mostra que a velocidade de propagação dessa onda tem um valor próximo à velocidade da luz.

Com a retirada do éter do eletromagnetismo de Maxwell, disparada pelo trabalho de Einstein sobre a relatividade restrita, essa justificativa desaparece. Questões como as que se seguem caberiam: Se as equações de Maxwell são obtidas a partir do estudo de fenômenos eletromagnéticos, por que os campos E e B deveriam satisfazer uma equação de onda? De que onda se trata? Onde se encontra tal onda na fenomenologia do eletromagnetismo?

Claro está que os autores dos livros contam com a inferência do leitor²² de que se trata das tão conhecidas OEM. Talvez seja por isso que são lacônicos no anúncio: “As equações de Maxwell implicam que E e B obedecem às equações de onda similares à Equação 30-16 [equação de onda]” (TIPLER; MOSCA, p. 353).

Nussenzweig também é lacônico, mas isso, talvez, faça parte de sua retórica para argumentar que a luz é uma OEM, tal como se vê adiante.

Etapa IV: Velocidade das OEM

Nussenzweig inicia de forma abrupta: “Vamos procurar soluções [para as equações de Maxwell] tão simples quanto seja possível” (NUSSENZWEIG, p. 268). Também de forma abrupta ondas aparecem (anunciadas apenas no título da seção): “todas as componentes dos campos eletromagnéticos satisfazem a *equação de ondas* unidimensionais” (p. 270). Com ênfase, conclui que, a partir de ϵ_0 e μ_0 , “obtidos por medidas *puramente eletromagnéticas*”²³, se chega à velocidade da luz

²² Ao leitor, seria poupada esta inferência, se os autores adotassem como ponto de partida o experimento tal como o fazem Serway e Halliday, Resnik e Walker.

²³ Grifo do autor.

no vácuo. Reporta-se a fatos históricos, reproduzindo o conhecido trecho do artigo de 1981-2 – transcrito em seção anterior – sobre a concordância entre os valores da velocidade da luz e das OEM e, com uma exclamação, conclui: “Ou seja, a luz é uma onda eletromagnética!” (p. 271).

Os outros autores dos LDES, de alguma forma, anunciam as OEM na etapa I e, por isso, não dão tanta ênfase à concordância entre a velocidade dessas ondas e a velocidade da luz. Keller, Gettys e Skove e Serway são os únicos que, a partir da concordância, concluem que a luz é uma OEM. Em Alonso e Finn, essa concordância nem aparece como conclusão da dedução da equação de onda.

Ao contrário, todos os LDEM concluem que a luz é uma OEM a partir da concordância entre as velocidades, resultado que é apresentado como uma previsão teórica da teoria de Maxwell (a maioria dos autores se referem explicitamente às suas equações):

(...) segundo suas [de Maxwell] previsões teóricas, [as OEM] deveriam se propagar pelo espaço com uma velocidade de $3,0 \cdot 10^8$ m/s, ou seja, a mesma velocidade da luz. Tal “coincidência” o levou, naturalmente, a propor que a luz seria uma onda desse tipo (GUIMARÃES; FONTE BOA, p. 218).

Gonçalves e Toscano chegam a reproduzir o conhecido trecho do artigo de 1864 – transcrito em seção anterior. Como forma de ainda mais destacar essa concordância, a grande maioria dos LDEM se reportam à confirmação dessa previsão teórica pelos resultados experimentais de Hertz, coisa que os LDES não fazem.

Nesta etapa, a transposição didática realizada por Nussenzveig é a que mais se aproxima do saber sábio. Tal como em *On physical lines* e *A dynamical*, este autor mostra que, a partir de valores de ϵ_0 e μ_0 “obtidos por medidas puramente eletromagnéticas”, isto é, no reduto do eletromagnetismo, chega-se a um valor para a velocidade de propagação da OEM que se aproxima da velocidade da luz, que está no reduto da óptica. Daí, ele conclui que a luz é uma OEM. Presente em todos os LDEM, essa última conclusão também os aproximam do saber sábio.

Há, no entanto, um afastamento que deve ser ressaltado. Em Maxwell, a conclusão de que a luz é uma OEM a partir da concordância entre as velocidades vem de argumentações que as analogias possibilitam – legitimadas por Thomson. No caso dos livros didáticos, a legitimidade do argumento não é explicitada.

Quadro 1: Ordem de aparecimento em Ganot e nos LDEM dos diversos aspectos nas diversas etapas.

Etapa	Aspectos	LDEM						Ga
		Gas	Gon	Gui	Max	Pen	Sam	
Pré	Reverência a Maxwell	2B	3	1	3B	2	1	
	Reverência a Hertz							1
I	Anúncio, retomada, sumário das equações de Maxwell	6		2	1	3		
	Anúncio das OEM	3		3	2			
	Vulgarização das OEM		1		4	1		
	Anúncio da equação de onda							
	Anúncio da confirmação experimental das OEM	7			5			
	Anúncio de $v \cong c$	4						
	Anúncio da luz como OEM	5						
	Analogia com onda mecânica							
II	Anúncio de propriedades das OEM							
	B induz E	1	2		6	5	2	
	E induz B	8	4		7	6	3	
	Experimento: antena		5					2
	Indução sucessiva de E e B	9	6		8	7	4	
	Propagação de campos	10	7		9*	8	5	
	Existência das OEM	11			10	10	7	4
	Enlaces de E e B	12	8					
	Sumário das equações de Maxwell	13				4		
	Propriedades das OEM							5
	Previsão teórica: antena							
	Analogia com onda mecânica				12	9	6	
Diagrama de Maxwell		9		11	11	8		
III	Sumário das equações de Maxwell							
	Antecipação da relação entre as equações de Maxwell e as OEM							
	Diagrama de Maxwell							
	Propriedades das OEM							
	Analogia com onda mecânica							
	Dedução da equação da onda							
IV	Dedução de $v=1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$							
	$v \cong c$	14	10	4	13	12	9	3
	Luz é OEM	15	11	5	14	13	10	
Pós	Experimento de Hertz	16	12	6	15	14		
	Analogia com onda mecânica	17		7				
	Antena	18				15		
	Propriedades das OEM							
	Diagrama de Maxwell	19		8				

Legenda: (*) Propagação de distúrbio/perturbação; (B) *Box*; (Gas) Gaspar, (Gon) Gonçalves e Toscano, (Gui) Guimarães e Fonte Boa, (Max) Máximo e Alvarenga, (Pen) Penteado e Torres; (Sam) Sampaio e Calçada; (Ga) Ganot de 1908.

Quadro 2: Ordem de aparecimento nos LDES dos diversos aspectos nas diversas etapas.

Etapa	Aspectos	LDES							
		Alo	Cha	Hal	Kell	Nu	Ser	Ti	You
Pré	Reverência a Maxwell	1B	2 B	2	4	1	4B	4	11
	Reverência a Hertz	2B					15B		
I	Anúncio, retomada, sumário das equações de Maxwell		1		1		3 11	2	2
	Anúncio das OEM				2			3	3
	Vulgarização das OEM	6 8		1 6			1 7 10	1	1 4
	Anúncio da equação de onda	7					12		
	Anúncio da confirmação experimental das OEM	3		4			6	5	
	Anúncio de $v \cong c$	4		5			5 13	6	
	Anúncio da luz como OEM	5	3	3	3		8 14	7	
	Analogia com onda mecânica						2		6
	Anúncio de propriedades das OEM						9		5
	II	B induz E							
E induz B									8
Experimento: antena				7			16		14
Indução sucessiva de E e B									
Propagação de campos				8					9*
Existência das OEM				9			17		10
Enlaces de E e B									
Sumário das equações de Maxwell									12
Propriedades das OEM									
Previsão teórica: antena									13
Analogia com onda mecânica									
Diagrama de Maxwell									
III		Sumário das equações de Maxwell		4		5	2	21	8
	Antecipação da relação entre as equações de Maxwell e as OEM	9			6		19	9	16
	Diagrama de Maxwell	11	5	12			22	10	
	Propriedades das OEM	10	6	11	7		20	11	17 21
	Analogia com onda mecânica			13					20
	Dedução da equação da onda	12			8	3	23	12	22
	Dedução de $v=1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$	13	7	14	9	4	24	13	18 23
IV	$v \cong c$		8	10 15	10	5	18 25	14	15 19
	Luz é OEM				11	6	26		
	Experimento de Hertz								
Pós	Analogia com onda mecânica								
	Antena								
	Propriedades das OEM					7			
	Diagrama de Maxwell				12	8			24

Legenda: (*) Propagação de distúrbio/perturbação; (B) Box; (Alo) Alonso e Finn, (Cha) Chaves, (Hal) Halliday, Resnik e Walker, (Kell) Keller, Gettys e Skove, (Nu) Nussenzveig, (Ser) Serway, (Ti) Tipler e Mosca, (You) Young e Freedman

V. Discussão

Estudos sobre a história das disciplinas escolares têm mostrado que os saberes escolares não constituem vulgarizações, isto é, não são produto da simplificação/adaptação, para um público jovem, do saber produzido na academia. Esse é o caso, por exemplo, da matemática moderna, estudada por Chevallard (1998), e da gramática vista por Chervel. Para este autor,

(...) a “teoria” gramatical ensinada na escola não é expressão das ciências ditas, ou presumidas “de referência”, mas ela foi historicamente criada pela escola, na escola e para a escola (CHERVEL, 1990, p. 181).

No caso aqui em estudo, pudemos identificar algumas criações, isto é, constatamos nos manuais zonas de afastamento entre o saber sábio e o saber a ser ensinado: a relação de precedência/ primazia de Hertz sobre Maxwell em Ganot, a reverência a Maxwell (ou Hertz), o aproveitamento do fato de que as OEM, hoje, estão vulgarizadas, os artifícios de linguagem usados pelos LDEM para substituir a matemática de Maxwell, a adoção de um experimento como ponto de partida para caracterizar a luz como uma OEM.

Os fatores que influenciam a organização das disciplinas escolares, segundo Santos (apud LOPES, 1999, p. 181), podem ser classificados em *internos* e *externos*. Os primeiros são “referentes à ciência de referência, aos critérios epistemológicos, bem como organização de sociedades científicas, associações profissionais, política editorial na área”. Os segundos são “referentes à estrutura política, social e econômica e a critérios sociológicos”.

Nos livros da atualidade, é fácil ver que, entre os fatores externos que os modulam, está a vulgarização das OEM, o que resulta na tomada do experimento como ponto de partida, uma inversão na ordem dos acontecimentos históricos. Fruto dos tempos atuais também é o fenômeno recente da “secundarização” do Ensino Superior²⁴ Chervel (1990, p. 186). Assim, se Nussenzveig é o que mais se

²⁴ Para Chervel (1990, p. 185), o que caracteriza o ensino de nível superior é a transmissão direta do saber: “O mestre ignora aqui a necessidade de adaptar a seu público os conteúdos de acesso difícil” isso porque, “alcançada a idade adulta, ele [o aluno] não reivindica didática particular à sua idade”, diferentemente do que acontece com o ensino secundário. A

afasta dos LDEM, Halliday, Resnik e Walker, Young e Freedman e Serway são os que mais se aproximam: basta ver que estes livros são os únicos LDES que desenvolvem a etapa II, mais próprias dos LDEM.

A reverência a Maxwell (ou Hertz) pode ser entendida como produto de fatores internos que organizam a disciplina física naquilo que está expresso nos seus manuais. Para Martins (1990, 2006), muitas vezes, essa reverência é uma forma de recurso de autoridade, que soa como “intimidação” e “imposição de crenças”. Allchin (2003) fala em “arquitetura dos mitos científicos”²⁵. Entre as características que constituem esses mitos está a “grandiosidade”, isto é, a atribuição de aspectos grandiosos aos cientistas: não apresentam falha de caráter, não erram, são virtuosos, são “heróis, lendas e, algumas vezes, deuses”, tal como suas contrapartes na ficção literária²⁶.

É certo que a categoria *reverência a Maxwell (ou Hertz)* definida no presente trabalho não corresponde exatamente à categoria *grandiosidade*, mas também é certo que todos os livros – de forma explícita ou implícita – creditam a uma única pessoa o trabalho realizado por várias pessoas²⁷.

É bom que se esclareça que, para Allchin, mito não significa uma “falsa crença”, mas “é sempre uma narrativa, uma forma, um estilo ou um gênero literário” (ALLCHIN 2003). Como “parábolas, os mitos funcionam como explicações e/ou justificativas” (BAUER apud ALLCHIN, 2003; MILKE, apud ALLCHIN, 2003). Dessa forma, o mito “ganha legitimidade do poder explanatório das narrativas” (ALLCHIN, 2003). Narrativas que apelam para a grandiosidade “engajam o leitor”, “inspiram estudantes”. Compreende-se, então, a insistência dos livros didáticos em apelar para este tipo de artifício retórico. Correm o risco de veicular “falsas ideias sobre como a ciência funciona” (ALLCHIN, 2004), ou seja, concepções inadequadas sobre a *natureza da ciência* (KOHLEIN; PEDUZZI, 2005; FORATO; PIETROCOLA; MARTINS, 2011; ALLCHIN, 2004; ALLCHIN, 2003). Pa-

secundarização do ensino superior denota, sob este ponto de vista, uma forma de tornar este ensino mais parecido com o Ensino Secundário.

²⁵ Seguindo Allchin, Pagliari (2007) analisa LDEM de física e põe em evidência tal arquitetura.

²⁶ Para a tendência de romantizar cientistas como santos-heróis, de relatar apenas o que lhes é favorável, Allchin (2004) usa o termo *hagiografia*, um tipo específico de whiggismo, leitura do passado em termos de normas vigentes ou *standars*.

²⁷ É o caso de Maxwell. Vale citar os trabalhos de D’Agostino (1989) e Phipps (2006) que atribuem a Hertz um papel bem mais importante do que de costume.

rece, no entanto, que o preço que pagam é pequeno, se comparado com os ganhos. Vale, aqui, a observação de Kuhn (1982, p. 176):

Whitehead captou o espírito a-histórico da comunidade científica ao escrever: “A ciência que hesita em esquecer seus fundadores está perdida”. Contudo, Whitehead não estava absolutamente correto, visto que as ciências, como outros empreendimentos profissionais, necessitam de seus heróis e reverenciam suas memórias. Felizmente, em vez de esquecer esses heróis, os cientistas têm esquecido ou revisado somente seus trabalhos.

O distanciamento do saber sábio constatado nos livros didáticos mostra em que medida os trabalhos dos “fundadores” da ciência foi “revisado”. Por outro lado, dada a reverência a esses fundadores, arriscamos afirmar que, assim como a ciência, seu ensino também necessita de heróis. Os saberes escolares cumprem a exigência de despersonalização, isto é, se desvinculam do saber de seu produtor (CHEVALLARD, 1989, p. 24), mas admitem como uma das componentes de sua retórica – em especial a dos manuais – reverenciar as memórias destes produtores.

Mas, vejamos como é possível interpretar o deslocamento da atenção de Hertz para Maxwell. A partir de finais do século XIX, reformas curriculares, marcadas pelo rompimento com a tradição humanista de ensino, têm moldado o ensino de ciências e, em particular, o ensino de física, no sentido de responder a demandas de uma sociedade cada vez mais dominada pela ciência e pela tecnologia. A mudança nas finalidades do ensino tem desarranjado o curso dessa disciplina (CHERVEL, 1990). Assim, essas reformas podem se constituir em um dos fatores externos que explicam a diferença fundamental entre o livro de Ganot e os LDEM da atualidade: da ênfase na técnica, caracterizada por desenhos e descrições de máquinas e experimentos estanques, à ênfase conceitual, que privilegia teorias. Mudanças curriculares mais recentes têm incorporado experimentos, mas de forma articulada com a teoria. Assim, mantém-se o deslocamento da atenção de Hertz para Maxwell, mesmo quando o experimento é tomado como ponto de partida por conta da vulgarização das OEM.

No entanto, há em jogo fatores internos mais importantes que o explicariam. Afinal, como enfatiza Santos (apud LOPES, 1999, p. 181), o peso dos fatores internos é tanto maior quanto maior for a tradição da disciplina e o nível de organização dos profissionais da área. Daí, conclui-se com facilidade que, nas disciplinas das ciências naturais, pesam mais os fatores internos. Além disso, comparativamente ao Ensino Fundamental, o Ensino Médio fica mais sujeito às demandas da Universidade, reduto da ciência de referência.

Sabe-se que a assimilação da teoria de Maxwell pela comunidade científica do continente foi lenta e tardia²⁸. Sua rejeição tem a ver com o consenso dessa comunidade em torno de um programa concorrente – progressivo e consistente –, o da ação à distância²⁹. Iniciado com Ampère nos anos 20 dos oitocentos, esse programa triunfa, nos anos 70, com os trabalhos de Helmholtz, que davam conta dos fenômenos conhecidos à época. É compreensível, pois, que Maxwell não apareça em Ganot de 1884.

De forma paradoxal, o feito de apresentar as ideias de Maxwell no continente coube a Helmholtz. Em seu trabalho de 1870, ele tenta assimilar as inovações de Maxwell, especialmente a teoria eletromagnética da luz, ao programa da ação à distância. Em 1879, ele sugere à Academia de Ciência de Berlim que fosse oferecido um prêmio para a realização de experiências que testassem as hipóteses auxiliares de sua teoria, hipóteses adicionadas com o objetivo de dar substância à teoria de Maxwell. Ao mesmo tempo, ele incita seu discípulo Hertz a aceitar o desafio. Concluída por Hertz em 1888, essa experiência, por ironia, “viria a ser considerada como a evidência empírica decisiva a favor da abordagem maxwelliana” e “despertou, efetivamente, um grande interesse da comunidade científica [do continente]” (ABRANTES, 1998, p. 210).

Hertz se converte ao programa de pesquisa de Maxwell e se dedica a reinterpretá-lo, dando-lhe novas equações. O papel de Maxwell cresce ainda mais após 1905, quando a comunidade aderiu à teoria da relatividade de Einstein (que impunha a invariância das equações de Maxwell sob as transformações de Lorentz). A nova teoria possibilitou novas interpretações da teoria de Maxwell, o que resultou em transposições didáticas que mantiveram e engrandeceram o nome de Maxwell.

VI. Implicações didáticas

Segundo Chevallard (1998, p. 18), “o saber que a transposição didática produz será (...) exilado de suas origens e separado de sua produção histórica na

²⁸ As primeiras alusões significativas a Maxwell na França datam de 1873, quando ocorreu a publicação do *A Treatise*; não há, praticamente, referências aos artigos anteriores (ABRANTES, 1989, p. 221).

²⁹ O programa de Maxwell fica caracterizado não apenas pela forma como é concebida a transmissão física – ação mediada/contígua –, mas também pelo seu ideal de explicação mecânica, que será diferente na tradição continental (ABRANTES, 1998, p. 185).

esfera do saber sábio”. É o que Chevallard (1998, p. 69) identifica como a “dessincronização do saber”³⁰. Astolfi e Develay esclarecem:

A designação de um elemento do saber sábio como objeto do ensino modifica-lhe muito fortemente a natureza, na medida em que se encontram deslocadas as questões que ele permite resolver, bem como a rede relacional que mantém com os outros conceitos. Existe, assim, uma “epistemologia escolar” que pode ser distinguida da epistemologia em vigor nos saberes de referência (ASTOLFI; DEVELAY, 1990, p. 48).

Da mesma forma, Verret (apud FORQUIN, 1992) afirma que o processo didático se beneficia de todas as proteções que precisamente faltam ao pesquisador: proteção contra os erros e os impasses de pesquisas desencaminhadas, proteção contra as descontinuidades das pesquisas interrompidas, proteção contra a dispersão do objeto. Explica-se, assim, a ausência de qualquer menção à controvérsia ação à distância *versus* ação mediada nos livros didáticos analisados, controvérsia que imperava nos tempos em que houve a aproximação entre o eletromagnetismo e a óptica³¹.

Esse aspecto do saber escolar é passível de críticas “por contribuir para a imagem de uma ciência sem rupturas e conflitos, na qual a positividade do erro não é explorada” (LOPES, 1999, p. 179-180). Essas críticas provêm também – e muito frequentemente – da comunidade que estuda a história da ciência e seu ensino. Nas últimas décadas, essa comunidade vem defendendo que a exploração didática do erro, além de bem contribuir para ilustrar a natureza da ciência, é igualmente positiva para o próprio entendimento do conteúdo da ciência.

Há um estado de tensão – essencial – entre a forma como é encarado o processo de constituição das disciplinas escolares e as argumentações em favor da inclusão da história da ciência no seu ensino (MATTHEWS, 1995). Assim, se neste trabalho fomos capazes de identificar algumas criações didáticas tendo como padrão a história da ciência, também é possível apresentar questionamentos sobre a didática presente nos manuais, questionamentos que, como outros, esperamos que estabeleçam novos fluxos entre o saber sábio e o saber a ensinar, fazendo emergir novas criatividades didáticas.

³⁰ Em Astolfi e Develay (1990, p. 48), aparece o termo *descontemporialização*; em Krapas (2008b) foi usado *descontextualização*.

³¹ Na transposição do conceito de campo – central nesta controvérsia –, a situação é semelhante (KRAPAS, 2008a).

Segundo Martins (2005, p. 43), os “Físicos usualmente louvam Maxwell pelas suas quatro equações (que ele nunca escreveu), e o perdoam por suas crenças no éter (que era central em seu trabalho)”. Acrescentamos: podem perdoar, mas não conseguem esquecer. A retirada do éter deixou um problema inesquecível: mostrar onde a analogia com as ondas mecânicas falha.

É exemplar a fala de Guimarães e Fonte Boa:

Uma onda eletromagnética não é tida como uma onda numa corda, na água, ou mesmo o som; enquanto que essas existem m função da vibração das partículas do meio em que a onda se propaga, a onda eletromagnética é constituída de oscilações de campos elétricos e magnéticos (por isso, as ondas eletromagnéticas podem se propagar no vácuo) (GUIMARÃES; FONTE BOA, p. 218).

Halliday, Resnik e Walker (p. 5-6) vão além, alertando para possíveis interpretações errôneas do diagrama de Maxwell:

É preciso tomar cuidado, ao interpretar a Fig. 33-5b [adaptação do diagrama de Maxwell]. Os desenhos semelhantes para uma corda esticada, que discutimos no Capítulo 16, representavam os deslocamentos para cima e para baixo de partes da corda com a passagem da onda (havia algo realmente em movimento). A Figura 33.5b [diagrama de Maxwell] é mais abstrata. (...) as setas e as curvas senoidais que unem as extremidades dos vetores [não] representam qualquer tipo de movimento (...)

Dizer apenas que as OEM não precisam de meio para se propagar é pouco. As OEM não precisam de meio *material* para se propagar, mas se propagam no vácuo, vácuo que não é simplesmente ausência de matéria, vácuo que, na atualidade, possui uma série de propriedades. Não é, pois, sem razão que Whittaker (1958, p. v) defende: “Parece absurdo reter o nome ‘vácuo’ para uma entidade tão rica em propriedades físicas, sendo que a palavra histórica ‘éter’ pode ser mais adequadamente mantida”. Hoje, assim como em Maxwell, também se diz que as OEM se propagam no campo, campo que armazena energia. Mas há que se considerar que, depois da teoria da relatividade restrita, o *status* ontológico do conceito de campo se alterou³², “não é mais o estado de algum tipo de matéria [como nos tempos de Maxwell], mas está ontologicamente em par com a matéria” Nersessian (1984a, p.

³² Nos manuais, no entanto, há polissemia deste conceito (KRAPAS, 2008a).

134). Isto, portanto, muda o significado de se afirmar que o campo armazena energia.

Dirigidos a uma parcela restrita da população – alunos de escolas como o Pedro II e a Escola politécnica da USP (NICIOLI JUNIOR; MATTOS, 2008) –, os livros de Ganot não problematizavam a luz como uma OEM. Na medida em que o Ensino Médio vem se universalizando, isso passa a importar. “Por que eu devo aprender que a luz é uma OEM?” é, com certeza, um questionamento – nem sempre explícito – feito pelos estudantes da atualidade. Estão em jogo, pois, as finalidades da educação.

Se, para o nível médio, entre essas finalidades está a alfabetização científica ou, como prefere Shamos (1995), a *consciência sobre a ciência*, seguramente saber dimensionar a complexidade histórica associada à natureza eletromagnética da luz constitui uma grande contribuição. Porém, em tempos de discussão sobre os componentes curriculares desse nível de ensino, é necessário admitir que enfrentar o desafio dessa complexidade histórica talvez não seja prioridade. Resta ao professor ter clareza sobre suas escolhas, com vistas a responder aos questionamentos de seus alunos.

Referências

- ABRANTES, P. **Imagens de natureza, imagens de ciência**. Campinas: Papirus, 1998.
- ALLCHIN, D. Scientific Myth-Conceptions. **Science Education**, v. 87, n. 3, p. 329-351, 2003.
- ALLCHIN, D. Pseudohistory and pseudoscience. **Science & Education**, v. 13, p. 179-195, 2004.
- ARAÚJO, S. M.; SILVA, F. W. O. A teoria ondulatória de Huygens em livros didáticos para cursos superiores. **Ciência e Educação**, v.15, n. 2, 2009.
- ASTOLFI, J.; DEVELAY, M. **A didática das Ciências**. Campinas: Papirus, 1990.
- ASSIS, A. K. T.; HERNANDES, J. A. **A força elétrica de uma corrente**. São Paulo e Maceió: Edusp e Edufal, 2009.
- BERKSON, W. **Las teorías de los campos de fuerza desde Faraday hasta Einstein**. Madrid: Alianza Editorial, 1981.

BEZERRA, V. A. Maxwell, a teoria do campo e a desmecanização da Física. **Scientiae Studia**, v. 4, n. 2, p. 177-220, 2006.

BORK, A. M. Maxwell and the electromagnetic wave equation. **American Journal of Physics**, v. 35, n. 9, 1967.

BRAGA, M.; GUERRA, A.; REIS, J. C. O papel dos livros didáticos franceses do século XIX na construção de uma concepção dogmático-instrumental do ensino de física. **Caderno Brasileiro de ensino de Física**, v. 25, n. 3, 2008.

CHALMERS, A. Maxwell's methodology and his application of it to electromagnetism. **Studies in History and Philosophy of Science**, v. 4, p. 492, 1973.

CHERVEL, A. História das disciplinas escolares: reflexões sobre um campo de pesquisa. **Teoria e Educação**, v. 2, 1990.

CHEVALLARD, Y. **La transposición didáctica**. Buenos Aires: Aique, 1998.

CHOPPIN, A. História dos livros didáticos e das edições didáticas: sobre o estado da arte. **Educação e Pesquisa**, v. 30, n. 3, 2004.

CUSHING, J. T. **Philosophical concepts in physics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

D'AGOSTINO, S. Maxwell's dimensional approach to the velocity of light. **Centaurus**, v. 29, n. 3, 1986.

D'AGOSTINO, S. Pourquoi Hertz et non pas Maxwell, a-t-il découvert les ondes électriques? **Centaurus**, v. 32, n. 1, 1989.

DUHEM, P. **Les théories électriques de J. Clerk Maxwell**: étude historique et critique. Paris: Hermann, 1902. Disponível em:
<<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k55434315/f2.image.pagination.r=duhem.langPT>>

EVERITT, C. W. F. **James Clerk Maxwell**: Physicist and natural philosopher. New York: Charles Scribner's Sons, 1975.

FANARO, M. de los Á.; OTERO, M. R. Conversaciones de un grupo de profesores de Física acerca de las imágenes de los libros de texto: Un estudio exploratorio. **Investigações em ensino de ciências**, v. 12, n. 1, 2007.

FERREIRA, M. S.; SELLES, S. E. Análise de livros didáticos em Ciências: entre as ciências de referência e as finalidades sociais da escolarização. **Educação em Foco**, v. 8, n. I-II, 2004.

FORATO, T. C. 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, 2011.

FORQUIN, J. Saberes escolares, imperativos didáticos e dinâmicas sociais. **Teoria e Educação**, n. 5, 1992.

GARCÍA, M. M. T.; IZQUIERDO, A. M.; FIEDLER-FERRARA, N.; MATTOS, C. R. Un estudio sobre la evaluación de libros didáticos. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 2, n. 2, p. 36-50, 2002.

GASPAR, A.; MATTOS, C. R. El concepto de impenetrabilidad: de la ciencia producida a la ciencia transmitida. **Enseñanza de las Ciencias**, v. extra, p. 189-190, 2002.

GRUPOGEN, 2010. Disponível em:

<<http://www.grupogen.com.br/ch/prod/6035/0/fundamentos-de-fisica---vol-4-optica-e-fisica-moderna.aspx#D>> Acesso em: 04 mai 2010.

KRAPAS, S. O conceito de capo: polissemia nos manuais, significados na física do passado e da atualidade. **Ciência & Educação**, v. 14, n. 1, 2008a.

KRAPAS, S. El Tratado sobre la Luz de Huygens y su transposición didáctica en la enseñanza introductoria de Óptica. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 21, n. 2, 2008b.

KUHN, T. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo: Perspectiva 1982.

LOPES, A. R. C. **Conhecimento escolar: ciência e cotidiano**. Rio de Janeiro: EDUERJ, 1999.

MARTINS, R. A. Introdução: a história das ciências e seus usos na educação. In: SILVA, C.C. **Estudos de História e Filosofia das Ciências**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

_____ Mechanics and electromagnetism in the late nineteenth century: the dynamics of Maxwell's ether. In: MAMONE CAPRIA, M (Ed.) **Physics before and after Einstein**. Amsterdam: IOS Press, 2005.

_____ Sobre o papel da história da ciência no ensino. **Boletim da SBHC**, n. 9, 1990.

_____ Contribuição do conhecimento histórico ao ensino do eletromagnetismo. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 5, n. Especial, p. 49-57, 1988.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de Ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.

MAXWELL, J. C. On physical lines of force. In: NIVEN, W. D. **The scientific papers of James Clerk Maxwell**. New York: Dover, 1952a. p. 451-513. v. 1.

_____ A dynamical theory of electromagnetic field. In: NIVEN, W. D. **The scientific papers of James Clerk Maxwell**. New York: Dover, 1952b. p. 526-597. v. 1.

_____ On a method of making a direct comparison of electrostatic with electromagnetic force; with a note on the electromagnetic theory of light. In: NIVEN, W. D. **The scientific papers of James Clerk Maxwell**. New York: Dover, 1952c. p. 125-143. v. 2.

_____ **A Treatise on Electricity and Magnetism**. New York: Dover, 1954. v. 2.

MORAES, R. Análise de conteúdo. **Revista Educação**, v. 22, n. 37, p. 7-32, 1999.

NERSESSIAN, N. How do scientists think? Capturing the dynamics of conceptual change in science. In: GIERE, R. N. **Cognitive Models of Science**. Minneapolis: University of Minnesota, 1992.

_____ **Faraday to Einstein: constructing meaning in scientific theories**. Dordrecht: Kluwer, 1984a.

_____ Aether/or: the creation of scientific concept. **Studies in History and Philosophy of Science**, v. 15, n. 3, 1984b.

NICIOLO JUNIOR, R. B.; MATTOS, C. R. A disciplina e o conteúdo de cinemática nos livros didáticos de Física do Brasil (1801 a 1930). **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 13, p. 275-298, 2008.

PAGLIARI, C. **Uma análise da história e filosofia da ciência presente em livros didáticos de física para o ensino médio**. 2007. Dissertação (Mestrado) - USP.

KOHNLEIN, J. F. K.; PEDUZZI, L. O. Q. Uma discussão sobre a natureza da ciência no ensino médio: um exemplo com a teoria da relatividade restrita. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 22, n. 1, p. 36-70, 2005.

PHIPPS, T. E. **Old physics for new: a worldview alternative to Einstein's relativity**. Montreal: Apeiron, 2006.

RIBEIRO, R. M. L.; MARTINS, I. O potencial das narrativas como recurso para o ensino de ciências: uma análise em livros didáticos de Física. **Ciência e Educação**, v. 13, 2007.

SAMPAIO, G. M. D. **A História do Ensino de Física no Colégio Pedro II de 1838 até 1925**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SHAMOS, M. H. **The Myth of Scientific Literacy**. New Brunswick, New Jersey: Rutgers University Press, 1995.

SIEGEL, D. M. **Innovation in Maxwell's Electromagnetic Theory**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

SILVA, C. C. **Da força ao tensor: evolução do conceito físico e da representação matemática de campo**. 2002. Tese (Doutorado) - Unicamp.

_____ The Role of models and analogies in the electromagnetic theory: a historical case study. **Science & Education**, v. 16, p. 835-848, 2007b.

SILVA, C. C. e PIMENTEL, A. C. Uma análise da história da eletricidade presente em livros didáticos: o caso de Benjamin Franklin. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 25, n. 1, 2008.

SILVA, F. W. O. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 29, n. 1, 2007a.

WHITTAKER, E. **A History of Theories of Aether and Electricity**. Edinburgh: Thomas Nelson and Sons, 1958.

WOODRUFF, A.; WEBER, M.; WILHELM, C. In: GILLESPIE, C. O. (Ed.) **Dictionary of Scientific Biography**, v. 14, p. 203-209, New York: Scribner, 1976.