

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO PARA A CIÊNCIA E A
MATEMÁTICA

HUGO SHIGUEO TANAKA DOS SANTOS

CONTROVÉRSIAS ENTRE A AÇÃO A DISTÂNCIA E A AÇÃO POR
CAMPOS – SUBSÍDIOS PARA O USO DA HISTÓRIA DO
ELETROMAGNETISMO EM SALA DE AULA

MARINGÁ

2018

HUGO SHIGUEO TANAKA DOS SANTOS

**CONTROVÉRSIAS ENTRE A AÇÃO A DISTÂNCIA E A AÇÃO POR
CAMPOS – SUBSÍDIOS PARA O USO DA HISTÓRIA DO
ELETROMAGNETISMO EM SALA DE AULA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática do Centro de Ciências Exatas, da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Educação para a Ciência e a Matemática.

Área de concentração: História, Epistemologia e Ética da Ciência

Orientadora: Prof^ª. Dra. Polônia Altoe Fusinato

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Gardelli

MARINGÁ

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

S237c Santos, Hugo Shiguelo Tanaka dos
Controvérsias entre a ação a distância e a ação por campos - subsídios para o uso da história do eletromagnetismo em sala de aula / Hugo Shiguelo Tanaka dos Santos. -- Maringá, 2018.
91 f. : il. color., figs.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Polônia Altoé Fusinato.
Coorientador: Prof. Dr. Daniel Gardelli.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática, 2018.

1. Física - Ensino de Física. 2. História da Ciência. 3. Eletromagnetismo. 4. Ação a distância - Teoria. 5. Oliver Heaviside (1850-1925). I. Fusinato, Polônia Altoé, orient. II. Gardelli, Daniel, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática. IV. Título.

CDD 21.ed. 530.07

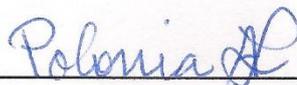
Mariza Nogami - CRB 9/1569

HUGO SHIGUEO TANAKA DOS SANTOS

**Controvérsias entre a ação e a distância e a ação por campos –
subsídios para o uso da História do Eletromagnetismo
em sala de aula**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática do Centro de Ciências Exatas da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em *Ensino de Ciências e Matemática*.

BANCA EXAMINADORA



Profª. Dra. Polônia Altoé Fusinato
Universidade Estadual de Maringá – UEM



Prof. Dr. André Koch Torres de Assis
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP



Prof. Dr. Marcos César Danhoni Neves
Universidade Estadual de Maringá – UEM

Maringá, 20 de Fevereiro de 2018.

[...] e sentira, ao chegar à porta de sua casa, o aroma de missoshiro que obāchan preparava. Tantos dias sem comer shirogohan, tsukemono, legumes temperados com shoyu, tantos dias sem tomar missoshiro... O simples aroma o emocionara. Sentira-se feliz.

(Oscar Nakasato in *Nihonjin*, 2011)

Para meu pai, Valdecir (*in memoriam*) e obāchan, Mioko (*in memoriam*), que viajaram para o infinito.

Para minha mãe, Sônia; meus irmãos, Makoto e Gabriela; e minha companheira, Estela.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu pai, Valdecir (*in memoriam*), por ter me dado suporte, coragem e por sempre ter me incentivado nos estudos, até mesmo nos nossos últimos momentos juntos.

Também gostaria de agradecer à minha mãe, Sônia, por sempre ser um exemplo de força durante todas as adversidades e por sempre me incentivar nos estudos e em tantos outros momentos importantes da minha vida.

Aos meus irmãos, Gabriela e Makoto, agradeço por sempre estarem ao meu lado, por todo apoio quando todos nós ficamos sem chão e por todo o incentivo ao longo da vida acadêmica.

Agradeço à minha companheira, Estela, por ser meu porto seguro, por me fazer acreditar em mim quando eu não acreditava mais, por aguentar e rir (às vezes) das minhas piadas e trocadilhos e por todo amor e afeto, que me dão forças para seguir em frente.

Também tenho de agradecer ao meu cachorro de hábitos felinos, Sfreg, por me fazer rir nos momentos difíceis e por me acompanhar, firme e forte, durante as madrugadas de escrita.

Agradeço, ainda, aos meus tios, Miro San, Oscar, Marcelo e Edson, às minhas tias, Tê, Má e Tomi, e aos meus primos, Igor e Sayuri, que têm me apoiado muito nesses tempos difíceis.

Aos meus irmãos de outras mães, meus *Brothers*, Guilherme, Felipe (Pisco), Eduardo, Brian, Danilo (Carça) e William (Catatau), eu agradeço pelo incentivo, por compreenderem o meu distanciamento e por todos os anos de amizade.

Aos meus amigos, estejam eles mais próximos ou mais distantes, Alisson, Eduardo Volnistem, Renata, Carlos, Ghizoni, Danilo Rosa, Luana Vida Leal e Larissa, agradeço por todas as horas de conversa (virtuais ou não) e por sempre me ajudarem quando eu precisei.

Agradeço à minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Polônia Altoé Fusinato, por me incentivar a seguir em frente, por acreditar nas potencialidades deste projeto de pesquisa (que caiu de paraquedas no seu colo) e, também, por ter me acolhido com tanto carinho e afeto.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Daniel Gardelli, eu agradeço por sempre me incentivar a pensar fora da caixa, por todas as conversas subversivas e por toda a amizade.

Eu agradeço à Sandra, secretária do PCM, por sempre me lembrar dos prazos e por todas as conversas que tivemos.

Deixo meus sinceros agradecimentos aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. André K. T. Assis, pela disponibilidade em ler meu trabalho, pelas contribuições feitas durante o exame de qualificação e durante a defesa e por ser uma das poucas mentes da contracorrente científica; Prof. Dr. Luciano Carvalhais, pelas contribuições feitas durante o exame de qualificação e por todo o conhecimento compartilhado desde 2012,

nos encontros do PIBID; e Prof. Dr. Marcos Cesar Danhoni Neves, pelas contribuições feitas durante a defesa e por sempre incentivar as pesquisas do “invisível” da Ciência.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante a realização desta pesquisa.

Espero não ter esquecido de ninguém ou cometido alguma injustiça. De qualquer modo, gostaria de agradecer a todas as pessoas que me ajudaram de maneira direta ou indireta durante todo o período do mestrado.

A todos vocês, deixo os meus mais sinceros agradecimentos! Muito obrigado!

CONTROVÉRSIAS ENTRE A AÇÃO A DISTÂNCIA A AÇÃO POR CAMPOS – SUBSÍDIOS PARA O USO DA HISTÓRIA DO ELETROMAGNETISMO EM SALA DE AULA

RESUMO

A utilização da História da Ciência no Ensino de Ciências faz parte da discussão de alguns pesquisadores há algum tempo. A fim de que os alunos sejam capazes de compreender melhor a maneira como a Ciência é construída e também para que se sintam capazes de argumentar com o mundo à sua volta, a presente pesquisa propõe discutir o uso de fontes primárias no Ensino de Ciências. Para tanto, consideramos válida a apresentação de teorias que estão fora do padrão científico atual, mas que expliquem os fenômenos físicos com a mesma efetividade. Como objeto de estudo, escolhemos o episódio histórico do desenvolvimento do eletromagnetismo. Desse modo, buscamos fornecer subsídios ao professor que deseja abordar a história do eletromagnetismo em suas aulas, utilizando as controvérsias entre as concepções de ação a distância e a ação por campos. Diante disso, elaboramos uma sequência didática que utiliza textos históricos como meio de discussão. Também procuramos elucidar a influência de Oliver Heaviside (1850-1925) na aceitação da teoria da ação por campos. Para atingir nossos objetivos, realizamos uma pesquisa qualitativa e documental. Com a finalidade de embasar o ensino de teorias que estão fora do padrão científico, discutimos as vantagens e as possibilidades do uso da epistemologia de Paul Feyerabend em sala de aula.

Palavras-chave: Ensino de Física. História da Ciência. Eletromagnetismo. Ação a distância. Oliver Heaviside.

FROM ACTION AT A DISTANCE TO FIELD ACTION - SUBSIDIES FOR THE USE OF THE HISTORY OF ELECTROMAGNETISM IN THE CLASSROOM

ABSTRACT

The use of History of Science on Science Teaching has been part of the discussion of some researchers for some time. In order for students to be able to have a better understanding of the way science is constructed and to feel able to argue with the world around them, this research seeks to discuss the use of primary sources in Science Teaching. Therefore, we consider valid the presentation of theories that are outside the current scientific standard, but explain the physical phenomena with the same effectiveness. As object of study, we chose the historical episode of the development of electromagnetism. In this way, we seek to provide subsidies for the teacher who wishes to discuss the history of electromagnetism in their classes, using the controversies between the conceptions of action at a distance and field action. To do so, we elaborate a didactic sequence that uses historical texts as a means of discussion. We also sought to elucidate the influence of Oliver Heaviside (1850-1925) on the acceptance of field action theory. To achieve our objectives, we conduct a qualitative and documentary research. In order to base the teaching of theories that are outside the scientific standard, we discuss the advantages and the possibilities of using Paul Feyerabend's epistemology in the classroom.

Keywords: Physics teaching. History of Science. Electromagnetism. Action at a distance. Oliver Heaviside.

Sumário

1. Introdução.....	12
1.1. História da Ciência e Ensino.....	15
1.2. Utilização de textos históricos como apoio para o professor.....	19
2. Metodologia.....	22
3. A epistemologia de Feyerabend e as suas implicações no Ensino de Física.....	24
3.1. O anarquismo epistemológico e o Ensino de Ciências.....	30
4. O desenvolvimento da ciência da eletrodinâmica.....	36
4.1. A observação de Ørsted, uma breve contextualização.....	36
4.2. Interpretações do experimento de Ørsted.....	40
5. Da ação a distância à ação por campos.....	50
5.1. Hermann Günther Graßmann.....	55
5.2. James Clerk Maxwell.....	56
5.3. Oliver Heaviside.....	58
6. Sugestão de atividade para a abordagem das controvérsias entre a ação a distância e a ação por campos.....	63
7. Considerações finais.....	67
Referências.....	70
Anexo A – Tradução do texto <i>Action at a Distance versus Intermediate Agency. Contrast of New with Old Views about Electricity</i>, de Oliver Heaviside.....	77
Anexo B – <i>Action at a Distance versus Intermediate Agency. Contrast of New with Old Views about Electricity</i>, de Oliver Heaviside.....	84
Anexo C – Textos complementares para a sequência didática.....	89

1. Introdução

A utilização História da Ciência como parte dos currículos escolares é motivo de discussão entre os pesquisadores de Ensino de Ciências há algum tempo. Juntamente com a inserção da História da Ciência no Ensino, consideramos válida a apresentação de teorias que estão fora do padrão da Ciência, visto que, em uma sociedade livre, todas as tradições científicas devem possuir direitos iguais. Desse modo, é necessário que o aluno seja capaz de argumentar com o mundo ao seu redor e de conseguir analisar criticamente as teorias científicas que lhe são apresentadas.

Este trabalho tem os seguintes objetivos gerais:

- Discutir acerca da utilização de fontes primárias para a abordagem da História da Ciência no Ensino de Ciências.
- Desconstruir uma visão linear e elitista da Ciência.

E como objetivos específicos:

- Fornecer subsídios para o professor que deseja abordar o desenvolvimento do eletromagnetismo em suas aulas.
- Elucidar, por meio de um resgate histórico, quais foram as influências de Oliver Heaviside na aceitação da teoria da ação por campos.

Dessa forma, para alcançar tais objetivos, nossa pesquisa está inserida no campo qualitativo.

A escolha do tema desta pesquisa se deu a partir do intuito de compreender o pensamento de alguns cientistas que fizeram as principais contribuições para que as concepções de interação a distância fossem abandonadas. O interesse neste tema vem desde a pesquisa feita, por mim, para a elaboração do trabalho de conclusão de curso em licenciatura em Física, na Universidade Estadual de Maringá (UEM), por meio do qual foi produzido um artigo publicado no *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, intitulado “Análise da Lei de Biot-Savart em comparação com a força entre elementos de corrente de Ampère” (SANTOS; GARDELLI, 2017). Além disso, com os resultados parciais desta pesquisa, também houve publicações em periódicos da área, como o artigo “O uso da História da Ciência no Ensino: subsídios para uma abordagem histórica do desenvolvimento do eletromagnetismo” (SANTOS; FUSINATO, 2017), além do estudo

“A importância da epistemologia de Feyerabend nas interpretações do experimento de Ørsted” (SANTOS; FUSINATO, 2016), publicado em anais de evento da área de Ensino de Ciências.

Para esta pesquisa, interessamo-nos principalmente em discutir a questão da utilização da História da Ciência no Ensino, sobretudo a relevância das controvérsias entre a ação a distância e a ação por campos, com o objetivo de fornecer subsídios para o professor que deseja trabalhar o tema em sala de aula.

Consideramos que uma abordagem das controvérsias no decorrer da História das Ciências se faz importante para auxiliar na desconstrução de uma visão ingênua e linear do desenvolvimento das Ciências. Desse modo, concordamos com a crítica à chamada “visão consensual da Ciência”, feita por Gürol Irzik e Robert Nola:

1) Essa postura mostra uma visão muito pobre da ciência; por exemplo, quando se afirma que “não existe um método científico universal e atemporal”. Embora esta afirmação seja consensual, ao se limitar a aceitá-la, deixa-se de refletir sobre as diferentes metodologias gerais utilizadas pelos cientistas em sua prática;

2) Mostra uma visão única de ciência, cega às diferenças entre as disciplinas, como entre a cosmologia, uma ciência baseada em observações astronômicas e modelos físicos, e a química e outras ciências empíricas, cujas teorias podem ser testadas em laboratórios;

3) Não ficam claras as relações entre certos itens apresentados nas listas “consensuais”, sendo que existem tensões entre alguns deles. Por exemplo, muitas vezes é apresentada como consensual a tese de que a observação científica é carregada de teoria (“theory-laden”) e que as interpretações de dados experimentais são influenciadas por fatores subjetivos. Mas isso torna a objetividade da ciência impossível? Os desdobramentos filosóficos da relação teoria e realidade não são desenvolvidos, limitando muito o próprio debate sobre a natureza da ciência (IRZIK e NOLA, 2011¹ *apud* BAGDONAS, ZANETIC e GURGEL, 2014, p. 252).

Discutir abertamente sobre as controvérsias da História das Ciências pode contribuir para que os estudantes desenvolvam uma visão mais crítica. Para que isso ocorra, os professores não podem defender a sua própria concepção, evitando que as ideias dos estudantes se tornem iguais às suas (BAGDONAS; ZANETIC; GURGEL,

¹ IRZIK, Gürol; NOLA, Robert. A family resemblance approach to the nature of science for science education, *Science & Education*, v. 20, 2011.

2014). Para que isto ocorra, julgamos que o pensamento do epistemólogo Paul K. Feyerabend (1924-1994) seja o mais adequado para guiar o professor durante as suas aulas. Por conta disso:

[...] gostaríamos de ressaltar que consideramos a realização de discussões sobre aspectos controversos da ciência essenciais para formar cidadãos críticos, conhecedores da riqueza da construção do conhecimento científico e, ao mesmo tempo, conscientes dos limites da autoridade científica, capacitados para contestar de maneira sensata e equilibrada as afirmações emitidas por especialistas sobre que tipo de sociedade queremos no futuro (BAGDONAS; ZANETIC; GURGEL, 2014, p. 257).

Nos próximos capítulos deste trabalho, de maneira inicial, discutiremos acerca da utilização da História da Ciência no Ensino e sobre a utilização de textos históricos pelo professor. Nesta seção, procuramos realizar uma exposição do que julgamos importante dessa metodologia para que o professor utilize.

No capítulo seguinte, exporemos que este trabalho está inserido no campo da pesquisa qualitativa e que a metodologia de pesquisa a ser utilizada no presente trabalho é a pesquisa documental. Além disso, delimitaremos, da maneira mais clara possível, o nosso problema de pesquisa.

No terceiro capítulo, discutiremos como a teoria do anarquismo epistemológico de Feyerabend parece ser a mais adequada para justificar a apresentação e a discussão de teorias que já foram abandonadas pela comunidade científica contemporânea. Nesse mesmo capítulo, discutiremos acerca das possibilidades da utilização de tal pensamento no Ensino de Ciências.

O quarto capítulo, por sua vez, é voltado para uma breve contextualização histórica do desenvolvimento do eletromagnetismo e da eletrodinâmica. Nesse capítulo, exporemos qual era o contexto científico e filosófico no qual Hans Christian Ørsted estava inserido.

No próximo capítulo, realizaremos um resgate histórico do desenvolvimento do eletromagnetismo clássico, em específico, as controvérsias entre as teorias de ação a

distância, defendidas por Ampère, bem como a teoria da ação por campos, defendida por Oliver Heaviside e por outros seguidores de James Clerk Maxwell.

O sexto capítulo será dedicado à proposta de uma sequência didática, utilizando textos originais da História da Ciência em sala de aula. Essa atividade tem como intuito a aplicação em sala de aula, com alunos do Ensino Superior.

O último capítulo é voltado para algumas considerações sobre as potencialidades do uso de documentos originais em sala de aula.

1.1. História da Ciência e Ensino

A utilização de textos históricos de Ciências pode ser um recurso significativo para auxiliar o professor na contextualização, contribuindo para o ensino e aprendizagem de determinados temas de Física.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN's) apontam que o conhecimento físico deve ser mostrado como uma construção histórica e objeto de produção humana (BOSS, 2009). A atual “reforma” do Ensino Médio deixa claro, contudo, que a educação pública deixará de ter como foco a formação do cidadão – além da preparação para a continuidade dos estudos –, para focar na formação de mão de obra técnica e profissionalizante, mas não está claro ainda se a proposta é geral ou se é uma opção de livre escolha. Pelo que conhecemos, entre a comunidade escolar não houve muitos debates e esclarecimentos sobre como será efetuada a aplicação da nova proposta de ensino para a escola básica em nosso país. Se a regra geral não for a formação do cidadão, pode-se entender que isto implica em afastar todos que dependem da educação pública – grande parte da população brasileira – e da universidade (A HORA... 2016). Junto a todas as lutas contra este desmonte na educação pública, acreditamos que o uso da História da Ciência (a partir de agora, HC) no Ensino possa ir contra tais medidas, visto que esta metodologia ajuda os alunos a utilizar a Ciência e suas argumentações para dialogar com o mundo ao seu redor.

Segundo Sergio Luiz Bragatto Boss (2009), o uso da HC no Ensino está apoiado em vários argumentos, como o fato de ser necessária para a compreensão da Natureza da Ciência. Assim, o ensinar Ciências de maneira adequada, desde os anos iniciais da idade escolar, contribui para que o aluno desconstrua a visão estereotipada do que significa

“fazer Ciência”. É necessário situar os alunos em uma visão que desconstrua a figura mitificada que se tem do cientista (DIAS; MARTINS, 2004).

Superar visões deformadas e estereotipadas que há da Ciência e da Tecnologia é extremamente essencial para uma educação científica de qualidade. Infelizmente, existem diversos estudos que mostram como o Ensino Tradicional propaga visões distorcidas da Ciência. Isso se deve ao fato de que o Ensino das Ciências está reduzido apenas aos resultados obtidos pelos cientistas (CACHAPUZ *et al.*, 2011). As visões deformadas da Ciência, ainda segundo Cachapuz *et al.* (2011), podem ser: a) descontextualizada; b) indutivista e elitista; c) empiro-indutivista e atórica; d) rígida, algorítmica e infalível; e) aproblemática e ahistórica; f) exclusivamente analítica; g) acumulativa e linear; ou h) relações entre distintas visões deformadas da atividade científica e tecnológica.

Sobre uma maneira de superar visões deformadas da construção da Ciência, Dias e Martins (2004) defendem o uso da HC, visto que:

Não se trata apenas de se preocupar com novas metodologias, como formas de facilitar a aprendizagem dos conceitos físicos, mas levar ao aluno o conhecimento do processo de fazer Ciência, bem como a compreensão dessa Ciência como uma ferramenta útil para um diálogo com o mundo e com sua possível transformação (DIAS; MARTINS, 2004, p. 517).

A HC pode auxiliar professores a compreenderem as dificuldades dos alunos e auxiliar na escolha de experimentos e atividades que serão trabalhados em sala de aula (BOSS, 2009). Para isso, defendemos a inclusão de relatos, fatos e trechos históricos nas aulas, visto que estes podem ajudar na compreensão do processo de construção das Ciências, porque mostram os cientistas como:

[...] pessoas comuns, falíveis, sujeitos a problemas e a influências do contexto social; a ciência é feita em coletividade, e não por poucos cientistas geniais; o trabalho do cientista não se resume à observação ou a execução de experimentos, envolve também a elaboração criativa de hipóteses, teorias e modelos [...] (BOSS, 2009, p. 14).

Desconstruir os estereótipos inclusos nas visões deformadas do fazer científico pode contribuir para que os alunos deixem de ver a Ciência como um assunto acabado e, desta forma, sintam-se capazes de fazer Ciência (GARDELLI, 2004).

Todos os estudantes, independente do grau de conhecimento formal da Ciência, têm algum conhecimento dos principais episódios do desenvolvimento científico. Tais conquistas se mostram importantes para uma integração da história e filosofia para os currículos de Ciência. Os professores de Ciência precisam saber pelo menos o básico sobre a história e a natureza da sua própria disciplina (MATTHEWS, 1994). Assim, julgamos importante que textos históricos de fontes primárias sejam traduzidos para o português, a fim de democratizar o acesso a episódios da HC, de modo a melhorar o entendimento sobre esse assunto.

Michael R. Matthews (1994) afirma, ainda, que a educação científica é melhorada se os estudantes entendem o significado dos termos que eles estão usando e se estes conseguem pensar criticamente sobre os textos, os relatos e sobre a sua própria atividade científica. Por exemplo, alguns livros didáticos ensinam aos alunos que Hans Christian Ørsted (1777-1851) aproximou um fio com corrente da agulha de uma bússola, a fim de demonstrar a relação entre eletricidade e magnetismo e, a partir daí, encontrou-se a Lei de Biot-Savart. Essa abordagem não leva em conta todo o contexto histórico no qual Ørsted estava inserido e nem as contribuições de outros cientistas. Por incrível que pareça, fazer isso é ensinar da maneira mais difícil. Além disso, tal maneira de ensinar possui diversos erros históricos, os quais serão discutidos nos próximos capítulos desta dissertação.

Atualmente, as pessoas, sobretudo os jovens, estão cada vez menos interessadas em reportagens sobre Ciência e seus desenvolvimentos recentes. Em contrapartida, estão cada vez mais interessadas em artigos sobre astrologia ou outros *hoaxes*² criados por alguma página da internet. Fato este que já era alarmante há mais de vinte anos atrás. Acerca disso, Matthews (1994, p. 5, tradução nossa), afirma que quando “[...] as pessoas em massa abandonam a Ciência, ou a educação em Ciência as abandona, então o mundo está em uma conjuntura crítica”³. Por isso, é de extrema importância que o professor seja

² *Hoax* ou *hoaxes* (no plural) são mentiras criadas com o objetivo de enganar as pessoas. Um bom exemplo de *hoax* é a teoria da conspiração que defende que o ser humano nunca pisou na Lua.

³ “[...] people *en masse* abandon science, or science education abandons them, then the world is at a critical juncture” (MATTHEWS, 1994, p. 5).

capaz de abordar a história e a natureza da Ciência em suas aulas, a fim de que os alunos consigam pensar criticamente sobre o que leem ou assistem.

Além disso, existem outros aspectos positivos da História e Filosofia das Ciências (a partir daqui: HFC). Por exemplo: a HFC é capaz de humanizar as Ciências e fazer com que estas estejam inseridas em um contexto social, pessoal e político; a HFC pode auxiliar no entendimento completo de um assunto científico, isto é, deixar de ser apenas algumas fórmulas e equações sem sentido algum; como dito anteriormente, a HFC pode auxiliar os professores a entender os problemas de aprendizagem dos alunos, visto que o docente pode relacioná-los às dificuldades enfrentadas pelos próprios cientistas (MATTHEWS, 1994).

Mesmo com os elogios feitos ao uso da HFC no ensino, ainda há uma certa resistência sobre o seu emprego. O que faz com que surja a seguinte questão: “Como usar a História da Ciência nas minhas aulas?”.

Respondendo à pergunta, atualmente existem diversos grupos de pesquisa no Brasil que disponibilizam sequências didáticas sobre episódios históricos. Entre estes grupos, vale mencionar o Grupo de História da Ciência e Ensino, da Universidade Estadual da Paraíba (GHCEN – UEPB), o grupo de História da Ciência da PUC-SP e, também, o Grupo de História, Teoria e Ensino de Ciências (antigo Grupo de História e Teoria da Ciência), da Universidade de São Paulo (GHTEC – USP). E mesmo com os trabalhos disponibilizados *online* por estes grupos de estudos, alguns temas necessitam de mais atenção. Como exemplo temos as interações físicas – ação a distância ou ação mediada por campos – e os acontecimentos que fizeram a teoria de Ampère para a interação eletrodinâmica ser praticamente apagada dos livros didáticos atuais.

As interações físicas são apresentadas nos livros didáticos de maneira extremamente confusa e contraditória. Primeiro, é apresentado que força é resultado da interação entre dois corpos, ou seja, só podem surgir aos pares (GARDELLI, 2004). Depois, diz-se que os corpos podem interagir de duas maneiras diferentes:

1ª) Através do contato direto entre eles, caso em que as forças são denominadas *forças de contato*.

2ª) Sem que haja contato entre eles, caso em que um corpo sofre a influência de outro através de um agente transmissor das forças trocadas

entre eles chamado de campo. E por essa razão, *forças de ação a distância são chamadas de forças de campo* [...] (GARDELLI, 2004, p. 7).

Concordamos com Gardelli (2004) quando o autor diz que tratar forças de campo como sinônimo para forças de ação a distância evidencia a total falta de conhecimento do debate que ocorreu entre cientistas e filósofos sobre esse assunto.

Os trabalhos de Ampère que tratam de forças de ação a distância, por exemplo, praticamente não aparecem nos livros didáticos. Quando aparecem, estão totalmente distorcidos e nada condizentes com a realidade. O que é feito, geralmente, é a apresentação de uma linha do tempo da eletrodinâmica, a qual mostra a “evolução” desta área do conhecimento. Esta linha de evolução segue a sequência Ørsted, Biot-Savart, Ampère, Faraday e Maxwell (CHAIB; ASSIS, 2007). Na abordagem dos livros didáticos, é como se cada pensador estivesse acrescentando um degrau em uma escada, cujo topo é a verdade absoluta. Além disso, nessa abordagem de cunho positivista, ignora-se outros cientistas, tais como: Oliver Heaviside e Hermann Günther Graßmann. Ela exclui, também, todo o debate que houve entre os cientistas e passa a impressão de que os pensadores só tiveram acertos durante o desenvolvimento de suas pesquisas.

Todo o desenvolvimento da ciência da Eletrodinâmica, bem com todos os estudos resultantes da primeira apresentação do experimento de Ørsted, foi um dos episódios mais ricos da HC, visto que abriu espaço para uma nova Ciência e também possibilitou a previsão e observação de diversos fenômenos inéditos. Dessa forma, é heresia resumir todos esses acontecimentos aos seus resultados apenas, os quais também são apresentados de maneira distorcida.

Na próxima seção, discutiremos sobre como textos históricos podem auxiliar o professor a tratar do eletromagnetismo e de outros conteúdos.

1.2. Utilização de textos históricos como apoio para o professor

As potencialidades do uso de fontes primárias (textos históricos) pelo professor vêm sendo apontadas por diversos estudos recentes (BATISTA; DRUMMOND; FREITAS, 2015; BOSS, 2009). porém não existem muitas iniciativas que buscam explorá-las. De fato, inserir o uso de fontes primárias da HC no Ensino de Ciências é um

caminho tortuoso e cercado de desafios. Batista, Drummond e Freitas (2015) elencam alguns motivos que dificultam a implementação de fontes primárias pelo professor: “[...] a localização de materiais adequados, a compreensão de trechos originais e a elaboração de atividades pedagógicas interessantes” (p. 666).

Outra dificuldade encontrada para a inserção de fontes primárias no Ensino é a dificuldade da realização da transposição didática da HC. Ao mesmo tempo que o uso de fontes primárias causa entusiasmo e interesse, gera uma grande dificuldade de aplicá-las em propostas plausíveis ao contexto da Educação Básica brasileira. O que acontece é uma compilação de trechos das fontes primárias sem se preocupar com quais elementos podem facilitar ou dificultar a compreensão dos alunos (BATISTA; DRUMMOND; FREITAS, 2015).

O uso de textos históricos no curso de Licenciatura em Física gerou bons resultados para Boss, Souza Filho e Caluzi (2009). O projeto estadunidense *Teaching with Primary Sources*⁴, conforme destacam Batista, Drummond e Freitas (2015, p. 668), é uma iniciativa que busca alternativas para “explorar as potencialidades das fontes primárias”. Os pesquisadores destacam que tais possibilidades seriam: explorar o caminho tortuoso da pesquisa científica; explicitar diferentes metodologias científicas, entre outros (BATISTA; DRUMMOND; FREITAS, 2015). Também vale destacar o trabalho das autoras Ana Paula Bispo da Silva e Andreia Guerra (2015), que organizaram um livro com traduções de fontes primárias e propostas de atividades utilizando textos históricos. O texto original, segundo Dion (1998), é adequado para o diálogo entre concepções (espontâneas ou não) desde que esteja inserido em uma sequência de atividades e de estratégias que consigam fomentar este diálogo.

Fica claro que ainda há diversas dificuldades sobre a inserção de textos históricos pelos professores. Boss, Souza Filho e Caluzi (2011) apontam dificuldades sobre o emprego da HC no Ensino. Entre elas estão a falta de material em português e a existência de diversos materiais que propagam equívocos acerca da natureza da Ciência. Os autores ainda ressaltam que, muitas vezes, os materiais disponíveis para educadores são feitos por pesquisadores sem formação em História da Ciência e que fundamentam os seus trabalhos em obras com informações históricas incorretas, as quais acabam por deturpar a natureza da Ciência.

⁴ *Ensinando com Fontes Primárias*, tradução livre.

Para democratizar o conhecimento de História da Ciência, este trabalho visa produzir um material que sirva como apoio para o professor que deseja trabalhar com a História da Ciência, sem que dependa dos textos que propagam equívocos históricos. Além disso, buscamos apresentar teorias que estão fora do padrão da Ciência contemporânea, mas que foram muito importantes para o desenvolvimento científico.

Para que o professor apresente teorias que estão fora do paradigma científico contemporâneo, é possível fazer uso, por exemplo, do anarquismo epistemológico, uma vez que, para esta linha de pensamento, os discentes são autônomos em suas decisões e o professor deve apresentar a visão científica por meio do convencimento e da argumentação, não pela imposição e pelo autoritarismo.

2. Metodologia

Esta dissertação é caracterizada pela investigação qualitativa de documentos históricos – a saber, fontes primárias e secundárias – sobre o desenvolvimento da eletrodinâmica, no século XIX, bem como os motivos pelos quais as teorias de ação a distância foram substituídas por teorias de ação por campos. Juntamente com esta investigação, buscamos fornecer subsídios para o professor que deseja abordar, historicamente, este episódio da História da Ciência em sala de aula.

A pesquisa qualitativa se preocupa em aprofundar a compreensão de um grupo social, uma organização ou uma trajetória, sem focar apenas na representatividade numérica (GOLDENBERG, 2004). A pesquisa qualitativa tem como características o ambiente natural como fonte direta dos dados; o pesquisador como instrumento fundamental da investigação; o caráter descritivo; o significado que as pessoas dão às coisas e à sua vida são preocupações do investigador; e o enfoque indutivo (GODOY, 1995).

Já o uso de documentos em uma pesquisa deve ser valorizado, uma vez que as informações que podem ser extraídas deles justificam seu uso em diversas áreas. Isso também possibilita ampliar a compreensão da contextualização histórica e sociocultural:

[...] o documento escrito constitui uma fonte extremamente preciosa para todo pesquisador nas ciências sociais. Ele é, evidentemente, insubstituível em qualquer reconstituição referente a um passado relativamente distante, pois não é raro que ele represente a quase totalidade dos vestígios da atividade humana em determinadas épocas. Além disso, muito frequentemente, ele permanece como o único testemunho de atividades particulares ocorridas num passado recente (CELLARD, 2008 *apud* SÁ-SILVA; ALMEIDA; GUINDANI, 2009, p. 2).

O conceito de “documento” está além de apenas textos impressos ou escritos. Um documento pode ser não escrito também, a saber: filmes, vídeos, fotografias, pôsteres ou slides (SÁ-SILVA; ALMEIDA; GUINDANI, 2009). Dessa forma, a pesquisa documental se faz adequada para este trabalho porque os documentos escritos são a base do material a ser investigado, portanto, com a pesquisa documental, procuramos produzir novas

maneiras de compreender fenômenos e dar uma nova forma de como estes fenômenos se desenvolveram.

Diante disso, utilizando a pesquisa documental, procuraremos responder à seguinte questão:

Quais subsídios didáticos para o estudo do eletromagnetismo podem surgir da análise da controvérsia histórica entre a ação a distância, defendida por André-Marie Ampère (1775-1836), e a ação por campos, defendida por Hermann Günther Graßmann⁵ (1809-1877) e Oliver Heaviside (1850-1925)?

Para que a pergunta acima seja respondida, estudaremos as fontes primárias e secundárias.

As fontes primárias são: as obras *Electromagnetic Theory* (1950) e *Electrical Papers* – Volume I e II (1892; 1894), de Oliver Heaviside; a obra *A Treatise on Electricity & Magnetism* (1954), de James Clerk Maxwell (1831-1879); as traduções para o português de toda obra de André-Marie Ampère, feitas por Assis e Chaib (2011). As fontes secundárias, por sua vez, são os comentários acerca da obra de Ampère realizados por Assis e Chaib (2011), bem como textos relacionados ao assunto escritos por E. T. Whittaker (1951); P. J. Nahin (1987); B. J. Hunt (2015); entre outros.

Os resultados dessas investigações estão abordados nos capítulos 4 e 5 deste estudo. Na sequência, abordaremos a epistemologia de Feyerabend e as suas implicações no Ensino de Física, que poderão servir de auxílio ao professor que deseja trabalhar o assunto abordado nesta dissertação.

⁵ Leia-se: Grassmann

3. A Epistemologia de Feyerabend e as suas implicações no Ensino de Física

Quando estudamos a História da Ciência, é possível perceber que esta não é construída apenas por pessoas com mentes brilhantes. Cada um de nós, cientista ou não, possui a própria interpretação de um fato porque tem a sua filosofia espontânea. Isso garante a pluralidade dos pontos de vista (FOUREZ, 1995).

Um dos maiores críticos da velha concepção de Ciência, a qual se trata de um apanhado de enunciados feitos apenas por pessoas geniais, foi Paul Karl Feyerabend (1924-1994). Nesta seção, trataremos de aspectos gerais da epistemologia de Feyerabend, chamada de *anarquismo epistemológico*. Anarquismo aqui não é no sentido de que a pesquisa científica é desgovernada, porém no sentido de oposição a um método – ou princípio – único, racional e absoluto de se fazer Ciência. O anarquista epistemológico não deve se recusar a estudar qualquer concepção, uma vez que, além do mundo descrito pela Ciência, pode haver uma realidade mais profunda. Considerar uma determinada explicação como correta e assumir outra como errada, não corresponde à realidade, bem como a explicação escolhida não será mais racional ou objetiva que outra (REGNER, 1996). Nesse sentido, entendemos que existem padrões no desenvolvimento da Ciência, mas que eles surgem dentro de cada processo de pesquisa, não em visões abstratas da racionalidade (FEYERABEND, 2011a).

Por conta das críticas feitas ao desenvolvimento da Ciência, Regner (1996) mostra que Feyerabend recebeu diversas atribuições como “terrorista epistemológico” e até mesmo de “maior inimigo da ciência”. A fim de desconstruir o preconceito com a epistemologia feyerabendiana, apresentaremos nesta seção alguns aspectos gerais de sua teoria.

Como dito anteriormente, apesar de ser muito fácil simplificar o meio de trabalho de cientistas a seus atores principais, a Ciência não é formada apenas por essas pessoas e nem a sua construção é tão simples quanto é mostrado em certas fontes, sejam livros didáticos de Ensino Médio ou Superior, como apontado por Gardelli (2014), Chaib e Assis (2007) e outros, seja em livros que se propõem a fazer o (des)serviço de “divulgar” a Ciência, como exemplo: o livro *A História da Ciência para quem tem pressa* (2017), de Nicola Chalton e Meredith MacArdle, que apresenta a seguinte passagem:

[...] em 1820, Hans Christian Ørsted (1777-1851), *descobriria*, na Dinamarca, a relação entre eletricidade e magnetismo, observando que a agulha de uma bússola *deixada num lugar qualquer nas proximidades se magnetizava quando ele ligava sua pilha voltaica. Confirmou assim, por acaso, as descobertas* do francês André-Marie Ampère (1775-1836), que demonstrou que a polaridade de um ímã pode diferir dependendo da direção da corrente elétrica [...] (CHALTON; MacARDLE, 2017, p. 78, grifos nossos).

No trecho acima, fica evidente como o trabalho dos cientistas é reduzido apenas a conclusões que são extraídas de observações casuais de fenômenos, confirmando, ao acaso, outras “descobertas” científicas, contudo estudar História da Ciência não é simplesmente narrar os fatos e conclusões extraídas desses fatos (FEYERABEND, 2011b). A exemplo do excerto acima, Martins (1986) deixa claro que a observação de Ørsted não foi acidental e muito menos confirmou descobertas de Ampère, visto que o francês começou seus trabalhos em eletrodinâmica após a divulgação do experimento de Ørsted (ASSIS; CHAIB, 2011; SANTOS; GARDELLI, 2017).

É possível, ainda, com uma análise detalhada, descobrir que a Ciência não conhece de maneira alguma os “fatos nus”, mas todos os “fatos” que conhecemos são, desde sua primeira observação, interpretados com base em experiências prévias e, dessa forma, são ideacionais em sua essência (FEYERABEND, 2011b), isto é, quando observamos um “fato”, essa observação não é desprovida de concepções prévias, logo os “fatos” são vistos de maneira “individual” por cada um. Por exemplo, é comum afirmar “aquela folha de papel é branca” quando estamos em condições ideais de iluminação, mas dizemos “aquela folha de papel aparenta ser branca”, quando alguma coisa afeta a nossa observação. Nessas circunstâncias, podemos compreender que os sentidos podem nos enganar, ou seja “*precisamos de um mundo imaginário para descobrir traços do mundo real*” (MASSONI, 2005, p. 64).

Levar tais afirmações em consideração faz com que a História da Ciência seja menos “objetiva”. Sobre isso, Feyerabend assevera que:

[...] uma pequena lavagem cerebral fará muito no sentido de tornar a história da ciência mais tediosa, mais uniforme, mais “objetiva” e mais facilmente acessível a tratamento por meio de regras estritas e imutáveis (FEYERABEND, 2011b, p. 33).

Desta forma, seria ingênuo assumir regras únicas para se fazer Ciência, cada interpretação é dotada de uma metodologia própria, de uma certa inspiração para prosseguir na pesquisa. Isso implica no fato de que cada parte da Ciência procede de maneira diferente, sendo assim os novos projetos científicos *precisam* ser considerados individualmente (FEYERABEND, 2011b). Desse modo, não há como saber se uma teoria será duradoura ou não. Podemos entender que os cientistas são:

[...] como arquitetos que constroem edifícios de diferentes tamanhos e diferentes formas, que podem ser avaliados somente *depois* do evento, isto é, depois de terem concluído sua estrutura. Talvez ela fique em pé, talvez desabe – ninguém sabe (FEYERABEND, 2011b, p. 21).

É necessário lembrar que a intenção não é substituir um conjunto de regras gerais por outro conjunto de regras gerais. O que se busca com a epistemologia feyerabendiana é convencer que *todas* as metodologias são válidas e que até mesmo as mais óbvias têm suas limitações (FEYERABEND, 2011b). O único princípio que precisamos seguir é o de que *tudo vale*.

Ao se estudar a História da Ciência, é possível perceber que alguns eventos e desenvolvimentos – como a invenção do atomismo na Antiguidade, a Revolução Copernicana, o desenvolvimento da Eletrodinâmica de Ampère, entre outros – só ocorreram porque certos pensadores “*decidiram* não se deixar limitar por certas regras metodológicas ‘óbvias’, ou porque as *violaram inadvertidamente*” (FEYERABEND, 2011b, p. 36).

A violação das regras do racionalismo, o chamado “irracionalismo”, é feita por meio de contrarregras que são opostas às regras do racionalismo (REGNER, 1996). E, de maneira sucinta, são elas:

1. *Desenvolver hipóteses que vão contra as teorias já aceitas.*
2. *Desenvolver hipóteses que não se ajustem aos fatos já estabelecidos.*

Para Feyerabend (2011b), o primeiro caso das contrarregras explicita que a evidência, que poderia refutar uma teoria já estabelecida, só pode surgir se tiver o auxílio de uma alternativa incompatível: “[...] a recomendação de recorrer a alternativas tão só quando refutações já desacreditaram a teoria ortodoxa coloca o carro diante dos bois [...]”

(FEYERABEND, 2011b, p. 44). A fim de aumentar o conteúdo empírico das suas concepções, um cientista deve adotar uma *metodologia pluralista*, portanto, ao conceber o conhecimento desta forma, vemos que este não é “[...] uma série de teorias autoconsistentes que converge para uma concepção ideal; não é uma aproximação gradual à verdade” (FEYERABEND, 2011b, p. 44).

Sobre isso, Feyerabend declara:

Mesmo as histórias mais surpreendentes acerca da maneira em que cientistas chegam a suas teorias não podem excluir a possibilidade de que procedam de maneira inteiramente diferente uma vez que as tenham encontrado. *Mas essa possibilidade jamais é realizada*. Ao inventar teorias e contemplá-las de maneira relaxada e “artística”, os cientistas com frequência empregam procedimentos proibidos por regras metodológicas. Por exemplo, interpretam a evidência de modo que se ajuste a suas ideias extravagantes, eliminam dificuldades mediante procedimentos *ad hoc*, colocam-nas de lado ou simplesmente recusam-se a levá-las a sério (FEYERABEND, 2011b, p. 197).

Apesar dessas afirmações, até hoje, infelizmente, nenhuma teoria é examinada em todas as suas ramificações e possibilidades. Nenhuma concepção recebe todas as oportunidades que deveria. As teorias “[...] são abandonadas e substituídas por explicações que estão mais de acordo com a moda muito antes de terem tido a oportunidade de mostrar suas virtudes” (FEYERABEND, 2011b, p. 62). Isso pode ser confirmado quando estudamos a História da Ciência de maneira mais profunda e vemos casos como: a censura dos trabalhos de Halton Arp sobre a natureza dos *redshifts*; a censura dos trabalhos de André K. T. de Assis sobre a eletrodinâmica de Weber; os valores registrados por Miller para um “vento de éter” que não havia sido registrado pelo experimento de Michelson-Morley; entre outros casos de censura (NEVES, 2002, p. 76-80).

Mesmo entre as teorias que são aceitas atualmente pela comunidade científica, existem casos nos quais elas falham:

[...] sempre que tivermos um pouco de paciência e selecionarmos nossa evidência de maneira não preconceituosa, descobriremos que as teorias falham em reproduzir de modo adequado certos *resultados quantitativos* e são *qualitativamente inidôneas* em grau surpreendente (FEYERABEND, 2011b, p. 78).

Além disso, atualmente, é comum que se esqueça das dificuldades enfrentadas pelos cientistas no desenvolvimento das teorias. Age-se como se as teorias não tivessem falha alguma e pouco se fala sobre elas (FEYERABEND, 2011b). Isso reforça ainda mais uma visão idealizada, infalível e inacessível da Ciência.

É válido também destacar outro ponto importante da epistemologia de Feyerabend: a *incomensurabilidade*. Segundo Chalmers (1999), neste ponto, esse epistemólogo austríaco se aproxima bastante das ideias de Thomas Kuhn (1922-1996) quando diz que os sentidos e as interpretações de determinados conceitos dependem do contexto teórico em que estão inseridos. Isto é, os princípios fundamentais de duas teorias rivais podem ser tão radicalmente diferentes que é impossível formular os conceitos básicos de uma teoria nos moldes da outra. Dessa forma, as duas teorias não possuem as mesmas premissas observacionais. Em teorias incomensuráveis, não é possível deduzir logicamente as consequências de uma teoria a partir dos princípios da teoria rival.

Com a finalidade de considerar um exemplo de teorias incomensuráveis na HC, temos o caso da eletrodinâmica de Ampère e a teoria eletromagnética de Biot-Savart. As duas teorias têm origens filosóficas completamente diferentes, o que implica em visões totalmente distintas. Entretanto, conforme mostra Tossato (2012), não precisamos entender cada teoria como estando em mundos diferentes, uma vez que só existe um mundo real, mesmo que os cientistas construam diversos modelos para interpretar o mundo. Isso implica no fato de que nem Ampère e nem Biot e Savart tiveram acesso a elementos de corrente infinitesimais ou campos eletromagnéticos durante a realização do experimento de Ørsted; eles observaram o fenômeno do mesmo modo que qualquer um de nós pode observar hoje. Dessa forma, não seremos capazes de decidir entre as duas teorias? De fato, as duas teorias são incomensuráveis, visto que não há uma linguagem idônea que permita o julgamento, mas elas podem ser comparadas porque existem critérios epistemológicos para fazê-lo (TOSSATO, 2012).

É fácil verificar que o pensamento de Feyerabend deixa o indivíduo livre para seguir a tradição que bem entender. Os sujeitos seriam autônomos para escolher qual tradição seguir em uma *sociedade livre*, que seria:

[...] *aquela em que todas as tradições têm os mesmos direitos e acesso igual aos centros de poder* [...]. Uma tradição recebe esses direitos não em virtude da importância que ela tem para pessoas externas a ela, e sim porque dá sentido à vida daqueles que participam dela. (FEYERABEND, 2011a, p. 14).

É importante ressaltar que o fato de que todas as tradições devem ter os mesmos direitos é diferente da situação na qual *indivíduos* têm direitos iguais de acesso a determinadas posições, definidas por uma determinada tradição. Por exemplo, em uma sociedade livre, a medicina dos nativos de determinada região deveria ser tratada com o mesmo respeito que a medicina aceita pela comunidade científica, cabendo aos indivíduos decidirem de qual maneira desejam tratar as suas doenças.

E como é possível que haja uma sociedade que dá direitos iguais a todas e quaisquer tradições? Quais métodos e procedimentos solucionarão os problemas que certamente surgirão nessa sociedade livre? Feyerabend (2011a) diz que perguntas, nesse sentido, são feitas sempre que as pessoas tentam se libertar das restrições impostas por culturas externas. Além disso, essas perguntas demonstram a *necessidade* de se haver teorias para solucionar os problemas que poderão surgir. Também mostram, sutilmente, que é preciso *especialistas* para fornecer tais teorias.

De maneira implícita, podemos concluir que quem faz esse tipo de questionamento, ainda possui uma necessidade da figura de um cientista movido pela razão, elaborando teorias para solução dos problemas da sociedade. Por sua vez, Feyerabend (2011a) se opõe ao fato de que cientistas são sempre movidos pela razão. A principal objeção do autor para esse argumento é a pobreza de seu embasamento: um ou dois exemplos e já se supõe estar lidando com a racionalidade (FEYERABEND, 2011a).

Diante disso, Feyerabend conclui que:

[...] alguns críticos observaram que o fato de a regra [o método único de se fazer Ciência] ser violada em um caso não a torna inútil em outros ou no longo prazo. Uma teoria pode, por exemplo, estar em conflito com fatos ou ser *ad hoc* e, ainda assim, ser mantida – mas *eventualmente* o conflito terá de ser solucionado e as adaptações *ad hoc*, eliminadas (FEYERABEND, 2011a, p. 21).

Por exemplo, uma teoria que pode estar em conflito com os fatos é o eletromagnetismo clássico, em especial a força de Graßmann. Isso acontece devido a um triplo produto vetorial na equação citada, em que a força sobre um elemento de corrente não está ao longo da linha reta que une os dois elementos interagentes, o que mostra que a expressão de Graßmann e, conseqüentemente, o eletromagnetismo clássico, estão em desacordo com o princípio da ação e reação. No entanto, como Griffiths (2010) e Feynmann (2009) mostram, ao considerar que o campo magnético possui momento, a

equação deixa de quebrar a simetria da terceira lei de Newton, ou seja, com uma suposição *ad hoc*, o princípio volta a ser obedecido e a teoria é mantida.

Só é possível compreender que a teoria eletromagnética atualmente aceita pela comunidade científica está em conflito com os fatos e que, para ser mantida, necessita de suposições *ad hoc* quando a estudamos de maneira mais aprofundada. O que pode auxiliar os alunos a entenderem a Natureza das Ciências e a sua construção, bem como fazer com que eles sejam mais autônomos para seguirem uma determinada tradição, é compreender o que levou a comunidade científica a aceitar tal teoria e descartar uma que, aparentemente, não está em conflito com os fatos.

Por conta disso, concordamos com Feyerabend quando o autor fala sobre a necessidade de se avaliar individualmente o desenvolvimento de cada teoria:

Cada projeto, cada teoria, cada procedimento precisa ser avaliado por seus próprios méritos e pelos padrões adaptados aos processos com os quais lida. A ideia de um *método* universal e estável que seja uma medida imutável de adequação e até a ideia de uma nova *racionalidade* universal e estável é tão irreal quanto a ideia de um instrumento de medida universal e estável que meça qualquer magnitude, não importa as circunstâncias [...]. O argumento principal para essa resposta é histórico: não há uma única regra, por mais plausível e por mais firmemente baseada na Lógica e na Filosofia geral, que não seja infringida em um momento ou outro. Tais violações não são eventos acidentais nem resultados da ignorância e desatenção que poderiam ter sido evitados (FEYERABEND, 2011a, p. 123).

Acreditamos, portanto, que a epistemologia feyerabendiana é a mais adequada quando o professor deseja realizar uma abordagem histórica, a fim de que os alunos compreendam melhor a Natureza das Ciências e também para que consigam melhorar o pensamento crítico acerca dos acontecimentos do meio no qual estão inseridos.

3.1. O anarquismo epistemológico e o Ensino de Ciências

A partir daqui, discutiremos as possíveis contribuições do anarquismo epistemológico para o Ensino de Ciências. De fato, as ideias de Paul Feyerabend causam certo desconforto naqueles que defendem a Ciência como um empreendimento racional e linear. Feyerabend foi uma personagem peculiar: ao mesmo tempo que é alvo de atenção, também é tratado com desdém. Segundo Terra (2002, p. 209), Feyerabend é “[...] muito citado, criticado, admirado, odiado, mas não parece ter mais que a fama de criador de frases exóticas”.

É necessário deixar claro, antes de tudo, que apesar de considerarmos extremamente pertinentes os apontamentos feitos por Laburú, Arruda e Nardi (2003) e Laburú e Carvalho (2001) em defesa do uso de um pluralismo epistemológico no Ensino de Ciências, não faremos tal discussão aqui. O que os autores fazem em seus trabalhos é propor que os professores de Ciências sejam pluralistas em suas metodologias didáticas, isto é, que os docentes não sigam apenas uma estratégia didática nas aulas, devido à mutabilidade de todo o processo de ensino-aprendizagem. Segundo Laburú, Arruda e Nardi (2003):

Da mesma forma que esse autor [Paul Feyerabend] defende uma metodologia pluralista para o desenvolvimento científico, denominada de anarquismo epistemológico, paralelamente imaginamos que, em virtude da complexidade das variáveis envolvidas numa sala de aula, o mecanismo de ensino-aprendizagem é capaz de ser convenientemente equacionado quando uma prática instrucional pluralista estiver em jogo (LABURÚ; ARRUDA; NARDI, 2003, p. 251).

Embora também utilizaremos, neste estudo, a obra de Feyerabend como principal referência teórica, o que será discutido aqui serão as possibilidades pedagógicas do pluralismo metodológico e do anarquismo epistemológico enquanto aporte teórico no uso da História da Ciência em sala de aula, a fim de apresentar teorias do passado, mas que são tão efetivas quanto as teorias aceitas pela comunidade científica contemporânea. Uma abordagem nesse sentido facilitaria na compreensão da Ciência como construída por seres humanos, não seguindo regras únicas para se desenvolver.

Desse modo, concordamos com Feyerabend (2011b, p. 44) quando este afirma que “[...] a *história* da Ciência torna-se parte inseparável da própria Ciência – é essencial para seu *desenvolvimento* posterior, bem como para dar *conteúdo* às teorias que contém qualquer momento dado”, ou seja, reconhecer a HC como parte da própria Ciência – não como uma área à parte – e parte essencial do que virá a ser feito pela comunidade científica. Além disso, a HC também serve para embasar as teorias científicas.

Para que os alunos consigam compreender a Natureza da Ciência, é necessário que conheçam a *História* da Ciência e que a reconheçam como parte fundamental e inseparável da Ciência em si. Com isso, será possível que os alunos entendam que os cientistas não estão mais “buscando a verdade absoluta”, “sistematizando as observações”, “comprovando suas hipóteses” ou coisas nesse sentido, o que nos deixa

bem longe de uma ideia da Ciência como um sistema de enunciados que se desenvolvem a partir de experimentos e observações e que seguem padrões racionais (FEYERABEND, 2011b).

A ideia de um método fixo para se fazer Ciência é uma concepção ingênua do homem. Ao se examinar o material histórico, sem empobrecê-lo para agradar àqueles que buscam objetividade e verdade, fica claro que o único princípio que pode ser defendido no desenvolvimento da Ciência é o de que *tudo vale* (FEYERABEND, 2011b). Isso mostra que a Ciência não é construída sob uma regra ou método único, o que pode ser observado com facilidade em muitos episódios da HC. Por exemplo, em *Contra o Método*, Feyerabend (2011b, p. 41), faz uma análise de como Galileu Galilei persistiu no que era uma cosmologia ridícula e acabou criando o material necessário para a defesa contra aquelas pessoas que só aceitam um ponto de vista se “[...] for expresso de certa maneira e só confiam nele se contiver frases mágicas, chamadas ‘relatos observacionais’”.

De maneira análoga, podemos ver o princípio do *tudo vale* também no desenvolvimento da eletrodinâmica de Ampère. Conforme será amplamente discutido nos próximos capítulos deste trabalho, é possível observar que a ideia dos elementos de corrente proposta por Ampère pode ser considerada ridícula por quem preza pelos “relatos observacionais”, mas que a persistência do francês nas suas concepções foi de extrema importância para o desenvolvimento de sua teoria.

É necessário entender, então, que existe uma chamada “contrarregra” ao empirismo, que leva os cientistas a introduzirem hipóteses inconsistentes com as teorias e fatos bem estabelecidos – como os casos de Ampère e Galileu –, ou seja, os pesquisadores agiram *contraindutivamente* (FEYERABEND, 2011b).

Sendo assim, é necessário que os alunos conheçam de que maneira os cientistas agiram, ou seja, que saibam que os pesquisadores agiram *contraindutivamente*, de modo a estimular a criatividade de cada um. A livre criação de ideias é benéfica para a Ciência e para os (futuros) cientistas, ao mesmo tempo em que a uniformidade do pensamento prejudica o pensamento crítico. A Ciência não precisa daqueles que imitam os padrões já estabelecidos. A Ciência precisa das pessoas que sejam adaptáveis e inventivas! Sobre isso, Feyerabend conclui:

[...] a unanimidade de opinião pode ser adequada para uma igreja rígida, para as vítimas assustadas ou ambiciosas de algum mito [...],

ou para os fracos e voluntários seguidores de algum tirano. A variedade de opiniões é necessária para o conhecimento objetivo. E um método que estimula a variedade é também o único método compatível com uma perspectiva humanitarista (FEYERABEND, 2011b, p. 58).

Estimular a variedade de pensamento nos alunos é o oposto do que é feito por alguns professores que usam as notas e o fracasso para moldar a mente dos estudantes, de modo a fazer com que eles não tenham mais nenhum resquício de imaginação. Corrigir esse quadro é muito difícil. Feyerabend (2011b) sugere que devemos separar o processo de aprendizagem da preparação para uma profissão em particular. Além disso, o autor também postula:

A educação geral deve preparar os cidadãos para escolher entre os padrões, ou achar seu caminho em uma sociedade que contém grupos comprometidos com vários padrões, mas não deve em condição alguma subjugar a mente deles de modo que se conformem aos padrões de algum grupo particular (FEYERABEND, 2011b, p. 211).

Isso significa que, para o autor, os alunos não devem ser coagidos a seguir apenas um padrão, isto é, uma teoria ou uma concepção de mundo. Eles devem ser capazes e livres para escolher entre os padrões.

Alexander Sutherland Neill (1984), criador da escola de Summerhill, diz que crianças que recebem uma educação autoritária e opressora crescem infelizes e com medo, e isso pode afetá-las em sua vida adulta. Neill conclui:

Todos os crimes, todos os ódios, todas as guerras, podem relacionar-se com a infelicidade. Este livro [Liberdade sem medo] é uma tentativa para mostrar como surge a infelicidade, como essa infelicidade arruína as vidas humanas, e como as crianças podem ser educadas de forma que tal infelicidade jamais surja (NEILL, 1984, p. XXVI).

Dessa forma, Feyerabend (2011b) mostra, em *Contra o Método*, que as teorias nem sempre podem ser comparadas pelo conteúdo e/ou verossimilhança, mesmo quando se tratam de teorias da mesma área do conhecimento. Por exemplo, mesmo que as teorias de Ampère e de Biot-Savart (e Graßmann) expliquem os mesmos fenômenos, elas possuem desenvolvimentos filosóficos totalmente diferentes. Sendo assim, seria mais

correto ensinar as duas abordagens, de modo que os alunos não sejam impelidos a escolher apenas uma delas.

O autor infere, ainda, que os episódios famosos na Ciência não ocorreram de maneira “racional”, uma vez que os cientistas não eram impulsionados pela “razão”. Além disso, os problemas entre a razão e a prática ocorrem sempre que uma prática bem articulada e familiar entra em confronto com um tipo diferente de prática. As interações e os resultados dependem do contexto histórico e variam a cada caso (FEYERABEND, 2011a).

Ensinar os alunos sobre as condições históricas nos episódios da Ciência é importante para que não se crie uma imagem extremamente racional e linear do que é a Ciência. Além disso, “[...] Física, Astronomia, História *precisam* ser ensinadas; não podem ser substituídas por mágica, Astrologia ou por um estudo de lendas” (FEYERABEND, 2011a, p. 92). Abordar a História da Ciência em sala de aula não é simplesmente apresentar historicamente os fatos. Além de outros motivos, fazer tal tipo de exposição, culmina na criação de alunos que apenas reproduzem padrões já fixados. Sobre isso, Feyerabend exemplifica:

Não dizemos *algumas pessoas acreditam* que a Terra gira ao redor do Sol, enquanto outros acham que a Terra é uma esfera oca que contém o Sol, os planetas e as estrelas fixas. Dizemos: a Terra *gira* ao redor do Sol – dizer qualquer outra coisa é absurdo (FEYERABEND, 2011a, p. 93).

O modo como aceitamos ou rejeitamos ideias científicas não é nada democrático, apesar de algumas propostas da comunidade científica serem, ocasionalmente, discutidas e, a partir disso, sugere-se uma votação – por exemplo, as discussões sobre a energia nuclear (FEYERABEND, 2011a). Entretanto, o que diz respeito às teorias mais gerais e fatos científicos, o que acontece é que a sociedade aceita as decisões da comunidade científica sem que haja questionamento. Parafraseando Feyerabend (2011a), vemos que a sociedade atual não é maxwelliana porque Maxwell foi candidato em uma votação, participou de discussões democráticas e foi eleito por maioria simples. A sociedade é maxwelliana porque os cientistas o são. Aceitamos sua teoria eletromagnética de uma maneira acrítica.

Dessa forma, Feyerabend (2011a) afirma que a Ciência precisa tanto da intolerância, visto que se coloca obstáculos no caminho da curiosidade, quanto da ignorância que desconsidera tais obstáculos, ou simplesmente não os percebe: “A Ciência precisa tanto do especialista quanto do diletante” (FEYERABEND, 2011a, p. 111).

4. O Desenvolvimento da Ciência da Eletrodinâmica

4.1. A observação de Ørsted, uma breve contextualização

Os filósofos da natureza do século XVIII não haviam chegado a um consenso sobre a possibilidade da interação entre eletricidade e magnetismo. Nessa época, havia duas correntes de pensamento que interpretavam a possível interação eletromagnética de maneiras distintas, a saber: o pensamento dos seguidores do *Programme de recherche Laplacienne*⁶ era o de que a eletricidade e o magnetismo não poderiam interagir porque eram de natureza distinta; o pensamento daqueles que eram adeptos da *Naturphilosophie*, os quais acreditavam que os fenômenos de natureza distinta poderiam interagir, inclusive fenômenos elétricos e magnéticos.

Isaac Newton (1642-1727) especulou, em sua obra *Óptica*, sobre a existência de poderes atrativos que agem a distâncias imperceptíveis. Na segunda edição do *Principia (Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, ou Princípios Matemáticos da Filosofia Natural, em português)*, Newton faz considerações sobre uma estranha causa, responsável por diversos fenômenos (GARDELLI, 2004, p. 28).

Gardelli (2004) mostra que, apesar de o *Programme* ter sido fortemente influenciado pelas ideias de Newton, ele leva o nome de Pierre Simon Laplace (1749-1827), que reformulou matematicamente muitas das conjecturas newtonianas. Laplace tentou reduzir todos os fenômenos físicos a um sistema de partículas que exercem forças de atração e repulsão entre si para pequenas distâncias.

No ano de 1823, Laplace apresentou sua concepção de Ciência que foi conhecida como o *Programa de Pesquisa Laplaciano*, que consistia na tentativa de representar matematicamente os fenômenos físicos e químicos. Isto é, de acordo com o pensamento laplaciano, é natural supor forças de atração e repulsão para se explicar fenômenos terrestres (LAPLACE, 1825 *apud* GARDELLI, 2014).

Diversos filósofos experimentais do fim do século XVIII e início do século XIX eram seguidores das ideias newtoniano-laplacianas. Por exemplo, Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), Charles Augustin Coulomb (1736-1806) e os membros da

⁶ Programa de pesquisa laplaciano, em tradução livre.

Sociedade de Arcueil, já na primeira década do século XIX, juntamente com Laplace e o químico Claude Louis Berthollet (1748-1822).

No ano de 1784, Coulomb publicou um trabalho em que determina a proporcionalidade entre a força e o ângulo de torção em um fio metálico, no qual ele propõe uma teoria molecular para explicar o fenômeno. Coulomb também desenvolveu expressões matemáticas que descrevem a ação eletrostática e a magnetostática de maneira análoga à ação gravitacional de Newton (GARDELLI, 2014).

Já os membros da Sociedade de Arcueil buscavam dar prosseguimento às ideias de Newton e Laplace e desenvolver uma linguagem matemática para representar os fenômenos da Física experimental. Para tal feito, eles utilizavam “[...] forças intermoleculares de curto alcance agindo entre as moléculas da matéria ordinária e as moléculas dos então chamados fluidos imponderáveis, concebidos para explicar a constituição da luz, do calor, da eletricidade e do magnetismo” (GARDELLI, 2014, p. 19). Esse programa de pesquisa começou a perder força devido à maneira que Ampère e Faraday interpretaram a interação eletromagnética, entre outras razões apontadas por Gardelli (2014).

Já a escola filosófica da *Naturphilosophie* surgiu nas últimas décadas do século XVIII. Um dos pioneiros desse pensamento foi Immanuel Kant (1724-1804), que questionou a mecânica de Newton. Kant estava preocupado em mostrar que seria impossível ter acesso à natureza das coisas como elas realmente são, isto é, ele queria mostrar que não é possível ter acesso às “coisas-em-si”.

Kant defendia também que deveriam existir somente duas forças, atração e repulsão, na natureza e as outras forças seriam modificações das forças fundamentais. Deste modo, a força de repulsão faria com que a matéria fosse impenetrável, mas se houvesse somente essa força, a matéria se dispersaria até o infinito. Desse modo, deveriam existir também as forças de atração, que definiriam os limites de um corpo, mas se existisse somente esse tipo de força, todas as partes da matéria se atrairiam e seriam apenas um ponto matemático (GARDELLI, 2014). Assim, deveria haver um equilíbrio entre esses dois tipos de forças.

Outro expoente da *Naturphilosophie* foi Friedrich Wilhelm Joseph von Schelling (1775-1854), que procurava entender a totalidade da natureza e determinar os fundamentos das ciências físicas, a partir de polaridades encontradas na natureza

(GARDELLI, 2014). O constante conflito entre estas polaridades daria origem a todos os outros fenômenos naturais:

A polaridade elétrica, a polaridade magnética, o contraste entre substâncias ácidas e básicas e várias outras dualidades eram consideradas pelos filósofos da *Naturphilosophie* como efeitos provenientes da polaridade fundamental da natureza dada pelas forças de atração e repulsão (GARDELLI, 2014, p. 22).

Hans Christian Ørsted (1777-1851) foi bastante influenciado pela *Naturphilosophie*. Em um trabalho de 1799, chamado *Fundamentals of the metaphysics of nature*⁷, Ørsted se mostra adepto das ideias de Kant já na Introdução, quando fala de forças básicas da natureza como condições primárias para o tamanho finito da matéria:

A força expansiva evita que a força atrativa reduza a extensão da matéria a zero, e a força atrativa evita que a força expansiva dê à matéria uma extensão infinitamente grande. Elas trabalham em oposição uma à outra e produzem movimentos em direções opostas de modo que uma pode ser considerada como negativa enquanto a outra pode ser considerada como positiva (ØRSTED, 1799 *apud* MARTINS, 2007, p. 33).

Após a invenção da pilha por Alessandro Volta (1745-1827) em 1800, foi possível que se obtivesse correntes contínuas. Volta acreditava que a corrente fluía no circuito como um fluido único em um movimento perpétuo (GARDELLI, 2014). A invenção de Volta foi extremamente importante para as pesquisas que buscavam encontrar a interação, ou não, entre eletricidade e magnetismo.

No ano de 1812, Ørsted começou a especular sobre a forma pela qual as forças de atração e repulsão poderiam se manifestar e, também, passou a imaginar que “as reações químicas, a eletricidade, o magnetismo, a luz e o calor seriam manifestações das mesmas forças” (GARDELLI, 2014, p. 26). Seguindo o pensamento da *Naturphilosophie*, Ørsted acreditava que haveria um conflito permanente entre as forças fundamentais, de modo

⁷ *Fundamentos da metafísica da natureza*, tradução livre.

que, quando a manifestação fosse intensa o suficiente, daria origem a outro fenômeno. Para o caso da eletricidade e do magnetismo, Ørsted entendeu que o conflito elétrico daria origem ao calor, à luz e ao magnetismo. De maneira análoga às manifestações térmicas e luminosas, o efeito magnético se irradiaria em todas as direções. No mesmo ano, então, Ørsted propôs que o magnetismo deveria se manifestar em fios muito finos (GARDELLI, 2014, p. 27).

Ørsted conseguiu observar o efeito causado por uma corrente elétrica sobre uma agulha de uma bússola somente no ano de 1820. Martins (1986) traduziu o trabalho original de Ørsted, que descreveu seu experimento da seguinte forma:

Os terminais opostos do aparelho galvânico são unidos por um fio metálico, que, por concisão, chamaremos de *condutor de conexão* ou *fio de conexão*. Atribuiremos o nome de *conflito elétrico* ao efeito que se manifesta nesse condutor e no espaço que o cerca.

A parte retilínea desse fio é colocada em posição horizontal, suspensa acima da agulha magnética, e paralela a ela. Se for necessário, o fio de conexão pode ser dobrado para que uma parte dele assuma a posição correta necessária à experiência. Nessa situação, a agulha magnética será movida, e a sua extremidade que está sob a parte do fio de conexão mais próxima ao terminal negativo do aparelho galvânico será desviada para oeste.

Se a distância entre o fio de conexão e a agulha magnética não exceder $\frac{3}{4}$ de polegada, o desvio da agulha fará um ângulo de cerca de 45° . Se a distância variar, o ângulo diminuirá à medida que a distância cresça. Além disso, o desvio depende da eficácia do aparelho.

[...] Se o fio de conexão é colocado em um plano horizontal sob a agulha magnética, todos os efeitos são como no plano acima, mas em direção inversa. Pois o polo da agulha magnética sob o qual está a parte do fio de conexão que está próximo ao terminal negativo do aparelho galvânico desvia-se para leste (ØRSTED, 1986, p. 116-120).

O experimento pode ser representado conforme a Figura 1 a seguir. Em (a) e (b) a agulha está alinhada com o meridiano magnético, sendo que não há corrente no fio; em (c), o polo norte da agulha está defletido para a esquerda.

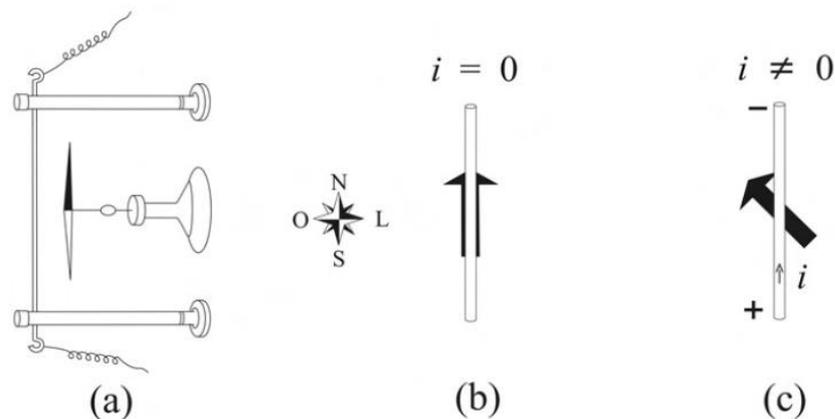


Figura 1 – Representação do experimento de Ørsted

Fonte: Chaib (2009, p. 25).

A seguir, faremos uma breve apresentação das interpretações dadas ao experimento. Além de mostrar como o próprio Ørsted interpretou o fenômeno, também apresentaremos como Faraday, Ampère e a dupla Biot e Savart interpretaram o conflito elétrico. Para mais detalhes sobre a explicação dada ao experimento pelos dois primeiros cientistas, recomendamos a leitura de Gardelli (2014).

4.2. Interpretações do experimento de Ørsted

Para explicar as suas observações, Ørsted supôs que o conflito elétrico seria evidenciado por meio de turbilhões de matéria elétrica, fazendo espiras, em sentidos opostos, nas imediações do fio (SANTOS; FUSINATO, 2016).

Cada turbilhão de matéria elétrica deveria agir sobre um polo da agulha magnética (GARDELLI, 2014). A interpretação dada por Ørsted ao experimento assemelha-se à maneira com que René Descartes (1596-1650) explicava o movimento planetário (ASSIS; CHAIB, 2011).

Doze anos depois da primeira realização do experimento, Ørsted passou a descrever o fenômeno da interação entre eletricidade e magnetismo como sendo círculos

ao redor do fio, não mais espirais. Isso ocorreu devido à influência dos resultados obtidos por Ampère com sua agulha astática⁸. Com isso, Gardelli (2014) conclui:

A natureza da interação eletromagnética era distinta das forças conhecidas até então, já que, aparentemente, não obedecia ao *princípio da ação e reação* na forma forte. Ou seja, ela não parecia ser uma força central, pois não estava orientada segundo uma linha reta unindo os corpos interagentes, como acontece no caso da força gravitacional, da força eletrostática e da força magnetostática conhecidas até então (GARDELLI, 2014, p. 31).

Já Michael Faraday (1791-1867) ficou fascinado ao tomar conhecimento das concepções filosóficas de Ørsted sobre haver a possibilidade de a eletricidade, o magnetismo, a luz e o calor serem manifestações do conflito entre as forças fundamentais da natureza (atração e repulsão).

Por sua vez, Faraday explicou a observação de Ørsted de maneira diferente. Ele acreditava que, se fosse possível isolar um dos polos do ímã, este giraria em torno do fio. Isto não ocorria devido aos dois corpos sofrerem forças opostas, o que impedia a rotação. Com suas concepções de rotação eletromagnética, Faraday desenvolveu o primeiro motor elétrico da história, conforme apontado por Gardelli (2014).

Faraday considerou como um fato elementar a “força circular” entre um polo magnético e um fio com corrente (ASSIS e CHAIB, 2011). Ele acreditava que o experimento é que deveria regular a teoria, não o contrário. Devido a isso, insistia na natureza circular da força eletromagnética, que é uma concepção totalmente oposta à concepção de Ampère, a qual defendia que a força deveria estar ao longo da linha reta que une os elementos de corrente (GARDELLI, 2014).

Para Faraday, as forças eletromagnéticas deveriam obedecer ao princípio da ação e reação, mesmo não estando direcionadas ao longo da linha reta que une um polo do ímã (ou da agulha magnetizada) a um fio retilíneo e com corrente. Esta força deveria ser

⁸Agulha astática é um dispositivo composto por uma agulha imantada que permanece em repouso independentemente da posição que seja solta (ASSIS; CHAIB, 2011, p. 61-63). Isto é, o magnetismo da Terra não influencia na sua posição.

normal a esta reta e ao fio, isto é, forças que provocariam o giro mútuo entre o polo magnético e o fio (ASSIS; CHAIB, 2011). Posteriormente, Faraday:

[...] aceitou a ideia de um efeito magnético giratório em torno do fio condutor, *considerando que a conexão entre os corpos era feita através de linhas de força*. Ele não tinha sido instruído dentro do paradigma newtoniano, e portanto, não havia herdado os “preconceitos” que poderiam impedi-lo de aceitar a “força circular” naturalmente. Estas linhas de força podiam ser evidenciadas por limalhas de ferro espalhadas sobre um plano perpendicular ao fio condutor (GARDELLI, 2014, p. 50, grifo nosso).

A concepção de Faraday está em contraste direto com a interpretação dada por Ampère e, aparentemente, a obra de James Clerk Maxwell (1831-1879), *A Treatise on Electricity and Magnetism* (1954), cuja primeira edição foi publicada em 1873, influenciou muito na sua consolidação, como será discutido posteriormente.

O francês André-Marie Ampère (1775-1836) assistiu às demonstrações do experimento de Ørsted, feitas em 1820, por François Jean Arago (1786-1853). Desde então, começou a trabalhar intensamente no assunto. Para explicar o que ocorre no experimento, Ampère supôs que todos os fenômenos magnéticos conhecidos até então poderiam ser explicados pela interação entre elementos infinitesimais de corrente elétrica. Dessa forma, ele assumiu que a Terra e os ímãs naturais também possuíam correntes elétricas. Partindo de suas hipóteses, Ampère previu e observou diversos fenômenos que eram inéditos até a época, como exemplo: a interação entre dois fios com corrente (ASSIS; CHAIB, 2011).

Ao ter como ponto fundamental de seu pensamento o princípio de que apenas coisas de mesma natureza podem interagir entre si, quando se observa a interação do fio com corrente com a agulha magnética da bússola, não é absurdo conceber que há eletricidade se movimentando dentro da agulha. Tampouco não é absurdo esperar que haja a interação entre dois fios com corrente, o que caracteriza a interação pura de eletricidade em movimento com eletricidade em movimento (GARDELLI, 2014).

Concordamos com Assis e Chaib (2011, p. 59) quando afirmam que a ideia de Ampère foi “original, rica e muito frutífera”, visto que ele foi o primeiro a observar diversos fenômenos e a realizar experimentos que revolucionaram as pesquisas em

eletrodinâmica. Com sua concepção de que todos os fenômenos magnéticos seriam explicados pela interação de elementos de corrente, Ampère conseguiu estudar vários pressupostos teóricos, experimentais e matemáticos. Nas palavras do próprio Ampère:

É esta ação [isto é, a ação de um longo condutor com corrente defletindo um ímã] descoberta pelo Sr. Oersted que me levou a reconhecer a ação de duas correntes elétricas, uma sobre a outra, assim como a ação do globo terrestre sobre uma corrente, e a maneira como a eletricidade produzia todos os fenômenos apresentados pelos ímãs, [como devidos a] uma distribuição semelhante à que ocorre no condutor de uma corrente elétrica, que segue curvas fechadas perpendiculares ao eixo de cada ímã [...] (AMPÈRE, 1820 *apud* ASSIS; CHAIB, 2011, p. 59-60).

A interpretação de Ampère dada ao experimento da deflexão da agulha magnetizada, em função da aproximação de um fio com corrente, abriu as portas para todo um novo programa de pesquisas experimentais e teóricas. Segundo Assis e Chaib (2011), Ampère:

[...] previu a interação entre condutores com corrente [...]. Ampère foi o primeiro a prever e a obter esse fenômeno experimentalmente. Previu também a interação entre a Terra e condutores com corrente, sendo mais uma vez o primeiro a observar esse fenômeno. [...] tentou simular o comportamento magnético de ímãs utilizando apenas condutores com corrente, encontrando para isto condutores elétricos apropriados. Também buscou simular o magnetismo terrestre utilizando apenas correntes elétricas. Além disso, buscou simular a experiência de Ørsted [...] utilizando apenas condutores com corrente. Essa nova concepção teórica levou Ampère a buscar uma expressão matemática para a interação entre correntes elétricas, com a qual se pudessem descrever quantitativamente todos esses fenômenos e prever novos resultados experimentais. [...] E Ampère conseguiu realizar todo esse imenso programa de pesquisas no curto prazo de seis anos (ASSIS; CHAIB, 2011, p. 60).

Como exemplo das conquistas científicas de Ampère, entre outras experiências, temos que ele concluiu que a corrente flui por um circuito fechado; observou que fios com corrente poderiam interagir entre si – sejam fios em espiral ou fios retos e paralelos –; realizou diversas variações do experimento de Ørsted. Ampère também foi o primeiro a observar diversos fenômenos, conforme apontado por Assis e Chaib (2011), como a

força de atração e repulsão exercida por um fio retilíneo com corrente sobre um ímã; interação (atração e repulsão) entre espirais com corrente, entre fios retilíneos com corrente; e descobriu que a corrente também flui no interior de uma pilha. Ainda segundo estes autores, os dois primeiros itens abriram uma nova linha de pesquisa: a interação entre condutores com corrente constante.

Além disso, Ampère passou, então a ter dois objetivos:

[...] o primeiro é o de encontrar uma expressão matemática que explique quantitativamente a interação entre correntes elétricas; o segundo é o de explicar quantitativamente todos os fenômenos magnéticos, assim como todos os fenômenos eletromagnéticos, apenas em termos da interação entre correntes (ASSIS; CHAIB, 2011. p. 77).

Dessa forma, Ampère precisou assumir alguns princípios para iniciar suas pesquisas sobre os condutores finitos e com corrente constante, a saber:

(A) um deles é o de que a força entre os dois condutores pode ser obtida pela integração em cada circuito da suposta força infinitesimal entre dois de seus elementos de corrente; (B) essa força infinitesimal é sempre suposta ao longo da reta que une os elementos, seguindo ainda o princípio de ação e reação; (C) além disso, ele inicialmente supõe, por analogia com outras leis de força conhecidas na gravitação, eletrostática e magnetostática, que essa força infinitesimal diminui com o quadrado da distância entre os elementos de corrente; (D) ele também supõe que ela é proporcional à intensidade das corrente e aos seus comprimentos infinitesimais, embora inicialmente não seja claro, ao expor a distinção entre esses dois últimos conceitos (ASSIS; CHAIB, 2011, p. 79).

Além disso, Ampère também postulou a *lei da adição*, que diz que a força de um elemento de corrente, orientado sobre outro elemento de corrente orientado, é igual a todas as forças que as componentes do elemento infinitesimal do primeiro fio exercem no elemento infinitesimal do segundo fio, em duas ou mais direções, em que cada componente é percorrido por corrente. Nas palavras de Ampère:

Esta lei consiste em que caso se considere uma porção infinitamente [pequena] de corrente elétrica, e que caso se considerem no mesmo ponto do espaço outras porções infinitamente pequenas de correntes elétricas que sejam em relação à primeira [porção], em intensidade e em direção, o mesmo que as componentes de uma força são em grandeza e em direção relativamente a essa força, a reunião dessas porções de correntes elétricas, correspondentes às forças componentes exercerá, em todo caso, precisamente a mesma ação que corresponde à resultante dessas porções (AMPÈRE, 1820 *apud* ASSIS; CHAIB, 2011, p. 89).

Ampère também postulou um teorema que consistia na não existência de interação entre elementos ortogonais. Tal teorema considera nula a interação entre dois elementos de corrente nos casos em que um dos dois esteja ortogonal ao plano em que o outro elemento se encontra. Como justificativa desse teorema, Ampère usou um princípio de simetria:

Considerando então duas pequenas porções de corrente elétrica, uma em um plano e a outra dirigida perpendicularmente a este plano, foi-me fácil perceber em primeiro lugar que, quando esta última porção está acima ou abaixo do plano, os dois sentidos segundo os quais ela pode ser percorrida pela corrente elétrica são distintos um do outro pela circunstância, a saber, de que em um caso essa corrente está se aproximando do plano, e no outro caso está se afastando dele; conseqüentemente, nada se opõe a que exista uma ação, seja atrativa ou seja repulsiva, entre as duas pequenas porções [porções] que se consideram, desde que o sentido da corrente da porção que está no plano também possa ser determinado pelas circunstâncias dependentes da situação respectiva dessas duas pequenas porções, que logo examinarei. Em segundo lugar [foi-me fácil perceber] que se, ao contrário, o centro da porção infinitamente pequena perpendicular ao plano se encontra nesse plano, sendo tudo igual dos dois lados desse plano, não existe mais qualquer diferença entre os dois sentidos de acordo com os quais a corrente elétrica possa percorrer essa porção que dependa de sua situação relativamente àquela [porção] que está no plano, e as duas porções de fios condutores não podem mais exercer qualquer ação uma sobre a outra; resultado que se pode enunciar de forma geral da seguinte maneira: a ação atrativa ou repulsiva entre duas porções infinitamente pequenas de correntes elétricas torna-se necessariamente nula quando a situação relativa delas no espaço é tal que se passarmos pelo centro de uma delas um plano perpendicular à sua direção, a reta que representa a direção da outra porção se encontra totalmente nesse plano (AMPÈRE, 1821 *apud* ASSIS; CHAIB, 2011, p. 96).

Tendo como base esse teorema, a lei de adição e as suas hipóteses, Ampère foi capaz de desenvolver uma expressão matemática de força que dependia somente da intensidade das duas correntes, da distância entre os dois elementos de correntes interagentes e dos ângulos que estes formavam em relação à linha reta que os unia.

No ano de 1822, Ampère conseguiu chegar à sua força entre elementos de corrente, que é da forma:

$$\frac{ii' ds ds'}{r^n} (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + k \cos \alpha \cos \beta) \quad (1)$$

Nesta expressão, $n = 2$ e $k = -1/2$ e são constantes que tiveram seus valores determinados por Ampère. As letras i e i' representam as intensidades das correntes nos dois condutores. As grandezas ds e ds' representam os comprimentos dos elementos de corrente. E r é a distância entre os dois elementos. Por fim, α , β e γ são os ângulos que os elementos de corrente fazem com a reta que os une e entre si.

André K. T. Assis (1995) adaptou a equação de Ampère para uma linguagem contemporânea e com unidades pertencentes ao Sistema Internacional de Unidades. Dessa forma, a força entre elementos de corrente de Ampère fica:

$$d^2 \vec{F}_{21}^A = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i_1 i_2}{r_{12}^2} \left[2(\vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2) - 3(\vec{dl}_1 \cdot \hat{r}_{12})(\vec{dl}_2 \cdot \hat{r}_{12}) \right] \hat{r}_{12} \quad (2)$$

Em que μ_0 é a permeabilidade magnética do meio.

A fim de facilitar a comparação com a força de Graßmann, Daniel Gardelli (2017), reescreveu a força entre elementos de Ampère da seguinte maneira:

$$d^2 \vec{F}_{21}^A = -i_1 \vec{dl}_1 \cdot \left\{ \frac{1}{4\pi \epsilon_0 c^2} \frac{i_2}{r_{12}^2} \left[2\vec{dl}_2 - 3\hat{r}_{12}(\vec{dl}_2 \cdot \hat{r}_{12}) \right] \right\} \hat{r}_{12} \quad (3)$$

Sendo $\frac{1}{\epsilon_0 c^2} = \mu_0$

Representemos o que está entre chaves de $d\vec{C}_2$ e chamemos esse termo de *ação eletrodinâmica*. A sugestão deste nome é porque, assim como o campo magnético, essa ação eletrodinâmica também possui como unidade de medida uma força agindo sobre uma carga em movimento. Isto é, $\frac{N}{C\frac{m}{s}}$, também conhecida como tesla (que é representada por T). Desse modo, ficamos com:

$$d^2\vec{F}_{21}^A = -(i_1 d\vec{l}_1 \cdot d\vec{C}_2) \hat{r}_{12} \quad (4)$$

Por se tratar de um produto escalar, a expressão acima é comutativa e obedece ao princípio da ação e reação na forma forte, visto que está sempre na linha reta que une os dois elementos de corrente. De fato, ao trocar os índices, a fim de provar que esta equação é comutativa, ficamos com:

$$d^2\vec{F}_{12}^A = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i_2 i_1}{r_{21}^2} \left[2(d\vec{l}_2 \cdot d\vec{l}_1) - 3(d\vec{l}_2 \cdot \hat{r}_{21})(d\vec{l}_1 \cdot \hat{r}_{21}) \right] \hat{r}_{21} \quad (5)$$

Sabendo que $\hat{r}_{21} = -\hat{r}_{12}$ e organizando a Equação (5) da mesma maneira que organizamos a Equação (3), obtemos:

$$d^2\vec{F}_{12}^A = i_2 d\vec{l}_2 \cdot \left\{ \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{i_1}{r_{12}^2} \left[2d\vec{l}_1 - 3\hat{r}_{12}(d\vec{l}_1 \cdot \hat{r}_{12}) \right] \right\} \hat{r}_{12} \quad (6)$$

Novamente, chamando o que está entre chaves de *ação eletrodinâmica*, porém agora devido ao elemento de corrente $d\vec{l}_1$, ficamos com:

$$d^2\vec{F}_{12}^A = (i_2 d\vec{l}_2 \cdot d\vec{C}_1) \hat{r}_{12} \quad (7)$$

Para o caso de dois fios paralelos e com corrente, as componentes da força entre elementos de corrente de Ampère ficam da seguinte forma:

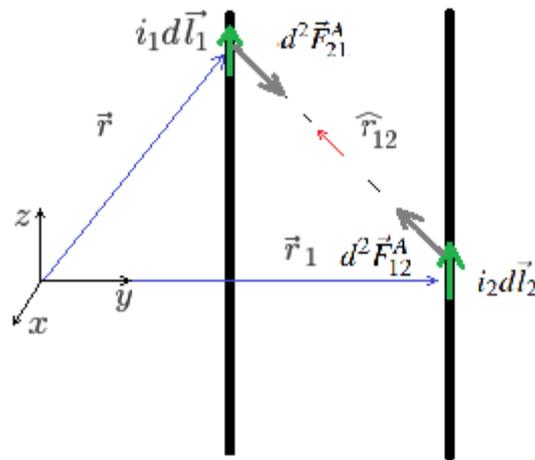


Figura 2 - Ilustração dos termos envolvidos na força entre elementos de corrente de Ampère

Fonte: o autor.

Jean-Baptiste Biot (1774-1862) e Félix Savart (1791-1841) interpretaram o experimento da deflexão da agulha de uma bússola devido a um fio com corrente como sendo devido ao torque magnético exercido pelo fio sobre a agulha. Concluíram também que este torque varia com o inverso da distância entre as duas partes. Tal interpretação foi expressa em função da força magnética que o fio exerce sobre as moléculas magnéticas da agulha.

Vale destacar que, ao contrário do que é mostrado nos livros didáticos, Biot e Savart nunca mencionaram a existência de campos magnéticos ao redor dos fios. Para os pesquisadores franceses, a interação sempre foi puramente magnética (ASSIS; CHAIB, 2006). A interpretação do fenômeno foi descrita pelos autores, em 3ª pessoa, da seguinte maneira:

Os Srs. Biot e Savart leram uma memória na seção de 30 de outubro de 1820 da Academia de Ciências cujo tema é a determinação, por medidas precisas, das leis físicas segundo as quais os fios metálicos colocados em contato com dois pólos do aparelho voltaico agem sobre os corpos imantados. As experiências foram feitas suspendendo por fios de seda lâminas retangulares ou fios cilíndricos de aço temperado, imantadas pelo método de duplo contato [...].

Com o auxílio destes procedimentos os Srs. Biot e Savart foram conduzidos ao resultado seguinte que exprime rigorosamente a ação experimentada por uma molécula de magnetismo austral ou boreal colocada a uma distância qualquer de um fio cilíndrico muito fino e indefinido, tornado magnético, pela corrente voltaica. A força que atua sobre a molécula é perpendicular a esta linha e ao eixo do fio. Sua

intensidade é inversamente proporcional a esta distância. A natureza de sua ação é a mesma que a ação de uma agulha imantada que fosse colocada sobre o contorno do fio em um sentido determinado e sempre constante em relação à direção da corrente voltaica; de tal maneira que uma molécula de magnetismo boreal e uma molécula de magnetismo austral seriam assim solicitadas em sentidos contrários, embora sempre seguindo a mesma [linha] reta determinada pela construção precedente. (ASSIS; CHAIB, 2006, p. 307-308⁹).

Biot e Savart não conseguiram encontrar uma distribuição apropriada para as agulhas imantadas colocadas ao redor do fio que reproduzisse as diversas posições assumidas pela agulha em torno do fio com corrente (GARDELLI, 2014). Então, passaram a explicar a interação entre o fio com corrente e a agulha da bússola como sendo devido à interação de cada elemento de corrente do fio com a agulha. Desse modo, as forças individuais de cada elemento de corrente, ou a força resultante do fio sobre a agulha, não estariam mais na linha reta que os une, mas “perpendiculares ao plano formado pela direção do elemento de corrente e pela reta unindo o elemento de corrente ou o fio ao polo magnético” (GARDELLI, 2014, p. 40).

Embora Biot e Savart jamais tenham trabalhado com a ideia de campos magnéticos, utilizamos, atualmente, a chamada lei de Biot-Savart para calcular o campo magnético ao redor de um fio. Em linguagem vetorial moderna, ela é da forma:

$$d\vec{B}_1 = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{r_{12}^2} (i_1 d\vec{l}_1 \times \hat{r}_{12}) \quad (8)$$

Diz-se que essa expressão representa o campo magnético gerado em um ponto do espaço por um elemento de corrente de um fio, à distância r_{12} desse elemento de corrente, em que μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

Vale destacar que o conceito de elemento de corrente foi inventado por Ampère para representar um comprimento infinitesimal de um fio com corrente elétrica e é orientado no sentido da corrente.

⁹ A citação se refere à tradução do artigo intitulado “Nota sobre o eletromagnetismo da pilha de Volta”, de autoria de Biot e Savart.

5. Mudando da Teoria de Ação a Distância à Ação por Campos

A força de Graßmann é fruto de uma proposta teórica feita por Hermann Günther Graßmann¹⁰ (1809-1877), em 1845 (TRICKER, 1965), como tentativa de aplicar o cálculo vetorial, desenvolvido por ele, à Física. Em linguagem vetorial moderna, essa força de Graßmann é da forma:

$$d^2 \vec{F}_{21}^G = i_1 d\vec{l}_1 \times d\vec{B}_2 \quad (9)$$

Em que $d\vec{B}_2$ é o campo magnético gerado pelo elemento de corrente $i_2 d\vec{l}_2$ e é dado pela lei de Biot-Savart. Ao substituir a equação do campo magnético na Equação (9), obtemos um triplo produto vetorial, que não possui propriedade comutativa. Dessa forma, obtemos:

$$d^2 \vec{F}_{12}^G = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{4\pi r_{12}^2} \left[(d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2) \hat{r}_{12} - (d\vec{l}_2 \cdot \hat{r}_{12}) d\vec{l}_1 \right] \quad (10)$$

Invertendo os índices 1 e 2, obtemos:

$$d^2 \vec{F}_{21}^G = -\frac{\mu_0 i_1 i_2}{4\pi r_{12}^2} \left[(d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2) \hat{r}_{12} - (d\vec{l}_1 \cdot \hat{r}_{12}) d\vec{l}_2 \right] \quad (11)$$

Para o caso de dois fios paralelos e com corrente, as forças infinitesimais obtidas a partir da equação de força de Graßmann ficam da seguinte forma:

¹⁰ Optamos pela grafia original do nome, a escrita latinizada e mais comum é Hermann Günther Grassmann.

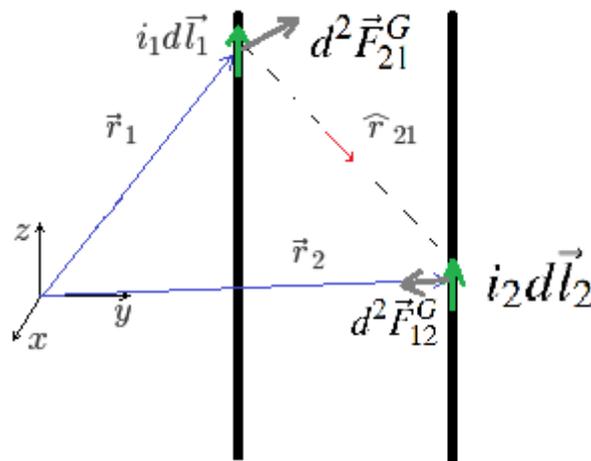


Figura 3 - Ilustração mostrando os termos envolvidos na força de Graßmann

Fonte: o autor.

Erroneamente, alguns livros didáticos apontam a equação de força desenvolvida por Graßman como a Lei de Biot-Savart (BUENO; ASSIS, 2015). A força de Graßmann é compatível com a força de Lorentz e é a equação utilizada na eletrodinâmica clássica (BUENO; ASSIS, 2015). Em geral, quando se calcula a força magnética exercida por um elemento de corrente, a força de Graßmann não obedece ao princípio de ação e reação, o que poderia levar a eletrodinâmica clássica a não conservar o momento linear. No entanto, segundo Feynman (2009), a conservação ocorre devido ao campo magnético armazenar momento linear.

Já a força entre elementos de corrente de Ampère foi obtida a partir de experimentos realizados pelo próprio Ampère, entre 1820 e 1826, e sempre satisfaz à 3ª lei de Newton na forma forte. As duas abordagens são completamente distintas: a primeira trata a interação eletromagnética como intermediada por campos; a segunda trata a interação como sendo a distância e como sendo a interação entre dois elementos de corrente, sem a existência de campos.

Ainda que as duas teorias de interação entre eletricidade e magnetismo sejam distintas, ambas fornecem resultados idênticos (ASSIS, 1995). A razão para isso, segundo Bueno e Assis (2015, p. 99), é devida a uma “diferencial exata que, quando integrada no circuito fechado [...], resulta um valor nulo”.

A teoria de Ampère e, conseqüentemente, a ação a distância, recebe diversas críticas e elogios. Sobre a ação a distância, Assis (1999) conclui que:

[...] existem muitos aspectos positivos relacionados com a ação a distância: sua simplicidade, os poderosos resultados que são obtidos com ela no eletromagnetismo e na gravitação, a implementação do princípio de Mach, o fato de que a primeira equação de onda descrevendo perturbações eletromagnéticas foi obtida a partir da ação a distância antes de Maxwell etc¹¹ (ASSIS, 1999, p. 55, tradução nossa).

A teoria de Ampère recebeu elogios de E. T. Whittaker (1951), em seu livro *History of the Theories of Aether and Electricity*, no qual o autor disse que:

Durante os próximos três anos [após a primeira realização do experimento de Orsted] Ampère continuou a prosseguir com as pesquisas assim inauguradas, e em 1825 publicou os resultados por ele coletados em uma das *mais célebres memórias*¹² da história da filosofia natural¹³ (WHITTAKER, 1951, p. 83, grifo nosso, tradução nossa).

Já uma das críticas feitas por ele ao trabalho de Ampère está relacionada à suposição da força apontar ao longo da linha reta que une os dois elementos de corrente:

A fraqueza do trabalho de Ampère evidentemente situa-se no pressuposto de que a força está direcionada na linha reta que une os dois elementos [de corrente]; para o caso análogo da ação entre duas moléculas magnéticas, nós sabemos que a força *não* está direcionada na linha reta que une as moléculas¹⁴ (WHITTAKER, 1951, p. 86, tradução nossa).

É válido ressaltar que as teorias de Ampère e de Graßmann eram conhecidas no século XIX. E mesmo não sendo utilizada hoje em dia, a expressão matemática de

¹¹ No original, “[...] that are many positive aspects related to action at a distance: its simplicity, the powerful results which are obtained with it in electromagnetism and gravitation, the implementation of Mach’s principle, the fact that the first wave equation describing the propagation of electromagnetic disturbances was obtained with action at a distance laws prior to Maxwell etc” (ASSIS, 1999, p. 55).

¹² Podemos entender *memoirs* (memórias) como uma compilação de ideias, um ensaio.

¹³ No original, “[...] During the next three years Ampère continued to prosecute the researches thus inaugurated, and in 1825 published his collected results in one of the most celebrated memoirs in the history of natural philosophy” (WHITTAKER, 1951, p. 83).

¹⁴ No original, “The weakness of Ampère’s work evidently lies in the assumption that the force is directed along the line joining the two elements; for in the analogous case of the action between two magnetic molecules, we know that the force is *not* directed along the line joining the molecules.” (WHITTAKER, 1951, p. 86. Grifo do autor).

Ampère foi amplamente aceita por seus contemporâneos (ASSIS; BUENO, 2015). Além disso, Maxwell conhecia não só a força de Ampère, mas também a equação de Graßmann, visto que faz referência a ela em seu *Tratado* (MAXWELL, 1954a; 1954b). Tal referência é vista quando Maxwell compara as expressões matemáticas de Ampère e Graßmann, além de outras duas sugeridas pelo próprio Maxwell. Após comparar as quatro equações, Maxwell conclui que, entre as quatro hipóteses “[...] a de Ampère é sem dúvidas a melhor, visto que ela é a única que faz com que a força entre dois elementos [de corrente] seja não apenas igual e oposta, mas ao longo da linha reta que os une”¹⁵ (MAXWELL, 1954b, p. 174, tradução nossa).

Os trabalhos de Ampère também foram valiosos para Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), que partiu da força de Ampère para obter sua equação de força entre cargas elétricas. A força de Weber prevê todos os fenômenos eletrostáticos e eletrodinâmicos conhecidos (ASSIS, 1995). Durante 25 anos, pensou-se que o trabalho de Weber fosse incompatível com o princípio da conservação de energia, devido a uma observação feita por Hermann von Helmholtz (1821-1894).

O trabalho de Helmholtz teve forte influência sobre Maxwell, que o fez descartar a teoria de Weber (ASSIS, 1992). Ainda assim, no prefácio à primeira edição do livro *Treatise on Electricity & Magnetism*¹⁶ (1954), publicado originalmente em 1873, Maxwell tece elogios aos trabalhos relacionados aos modelos do eletromagnetismo baseados na ação a distância:

Tem sido feito um grande progresso na ciência elétrica, principalmente na Alemanha, pelos cultivadores da teoria de ação a distância. As valiosas medições elétricas de W. Weber são interpretadas por ele, de acordo com sua teoria, e a especulação eletromagnética que foi originada por Gauss, e continuada por Weber, Riemann, J. e C. Neumann, Lorenz, etc., está baseada na teoria de ação a distância, mas dependendo ou diretamente da velocidade relativa das partículas, ou da propagação gradual de alguma coisa, seja potencial ou força, de uma partícula a outra. O grande sucesso que esses célebres homens alcançaram na aplicação da matemática aos fenômenos elétricos, fornece, como é natural, peso adicional às suas especulações teóricas, de tal forma que aqueles que, como estudantes da eletricidade, se voltam em direção a eles como as maiores autoridades em eletricidade

¹⁵ That of Ampère is undoubtedly the best, since it is the only one which makes the forces on the two elements not only equal and opposite but in the straight line which joins them (MAXWELL, 1954a, Artigo 527, p. 174).

¹⁶ *Um tratado em eletricidade e magnetismo*, em tradução livre.

matemática, provavelmente assimilariam, junto com seus métodos matemáticos, suas hipóteses físicas¹⁷ (MAXWELL, 1954a, p. x-xi, tradução nossa).

Apesar dos elogios e argumentos em favor da ação a distância, as pesquisas de Ampère sofreram diversas críticas. A título de curiosidade, ao se observar como a obra de Ampère é tratada em alguns dos livros didáticos mais representativos para o Ensino Superior, vemos que, atualmente, a obra de Ampère praticamente não aparece em nenhum livro didático e, quando aparece, está distorcida (CHAIB; ASSIS, 2007). De fato, ficam explícitas diversas contradições históricas. Por exemplo, um dos livros mais utilizados nas disciplinas de Física para o Nível Superior, a obra *Fundamentos de Física* (HALLIDAY; WALKER; RESNICK, 2012), não menciona nada acerca das controvérsias históricas. Contudo, quando se trata do campo eletromagnético devido a uma corrente, os autores introduzem a lei circuital magnética, que é chamada, por eles, de “lei de Ampère”:

Embora a lei, que pode ser demonstrada a partir da lei de Biot-Savart, tenha recebido o nome do físico francês André Marie Ampere (1775-1836), foi na realidade proposta pelo físico inglês James Clerk Maxwell (1831-1879) (HALLIDAY; WALKER; RESNICK, 2012, p. 226).

Vemos que em momento algum foi mencionado o contraste entre a teoria amperiana e a teoria eletromagnética clássica. Uma análise detalhada desta e de outras passagens nos outros livros didáticos de Física Geral para o Ensino Superior, foge do escopo desta pesquisa.

Infelizmente, não é possível inferir exatamente os motivos para que tal injustiça tenha acontecido com o que pode ser considerado um dos mais importantes

¹⁷ No original, “Great progress has been made in electrical science, chiefly in Germany, by cultivators of the theory of action at a distance. The valuable electrical measurements of W. Weber are interpreted by him according to this theory, and the electromagnetic speculation -which was originated by Gauss, and carried on by Weber, Riemann, J. and C. Neumann, Lorenz, &c., is founded on the theory of action at a distance, but depending either directly on the relative velocity of the particles, or on the gradual propagation of something, whether potential or force, from the one particle to the other. The great success which these eminent men have attained in the application of mathematics to electrical phenomena, gives, as is natural, additional weight to their theoretical speculations, so that those who, as students of electricity, turn to them as the greatest authorities in mathematical electricity, would probably imbibe, along with their mathematical methods, their physical hypotheses.” (MAXWELL, 1954. p. x-xi).

acontecimentos da História da Ciência. Entretanto, podemos analisar algumas passagens e excertos que ajudam a elucidar o que pode ter influenciado o abandono da força de Ampère. Aparentemente, foi o *Tratado* de Maxwell que fez com que as teorias de ação a distância, para a interação entre eletricidade e magnetismo, fossem abandonadas, mas o trabalho de Maxwell não convenceu imediatamente a comunidade científica uma vez que:

Os conceitos nele contidos eram estranhos e a matemática, desajeitada e envolvente; muito da sua base experimental foi retirada das pesquisas de Michael Faraday, cujos resultados eram inegáveis, mas cujas ideias pareciam bizarras ao físico ortodoxo (HUNT, 2015, p. 9).

Maxwell faleceu em 1879, antes da publicação da segunda edição do seu *Tratado*, até esse ano ele só havia convencido poucos cientistas. Quem ficou encarregado da tarefa de descomplicar e reformular a teoria de Maxwell foram os seus discípulos, a saber: Oliver Heaviside, G. F. FitzGerald (1851-1901), Oliver Lodge (1851-1940) e outros (HUNT, 2015).

A partir daqui, traremos das opiniões de alguns filósofos naturais do século XIX, como Hermann Günther Graßmann, James Clerk Maxwell e Oliver Heaviside. Os escritos de Heaviside foram escolhidos porque ele é considerado o mais influente estudante da teoria maxwelliana e, também, porque foi ele quem moldou as 13 equações propostas por Maxwell no que conhecemos hoje por “as quatro equações de Maxwell” (HUNT, 2015). Vale ressaltar que todos estes autores escreveram seus trabalhos posteriormente aos trabalhos de Ampère.

5.1. Hermann Günther Graßmann

Em 1845 e 1862, Hermann Günther Graßmann (1809-1877) publicou seus trabalhos principais sobre cálculo vetorial. E em pouco tempo, matemáticos e físicos começaram a usar o novo cálculo desenvolvido por ele. Até mesmo Ernst Mach (1838-1916) fez elogios a essa nova abordagem, a qual permitia aos estudiosos da mecânica usarem uma linguagem matemática mais próxima da geometria (REICH, 1996).

Em 1845, Graßmann tentou aplicar seu novo cálculo à eletrodinâmica em seu trabalho chamado *Neue Theorie der Elektrodynamik*¹⁸ (em tradução livre, *Uma nova teoria da eletrodinâmica*). Tudo indica que ele nunca realizou qualquer experimento em Física ou eletromagnetismo (ASSIS, 2011). No artigo, Graßmann faz críticas aos trabalhos de Ampère e propõe, como o próprio nome diz, uma nova teoria para a eletrodinâmica.

Graßmann reconhece que sua nova abordagem para a análise dos fenômenos eletrodinâmicos fornece os mesmos resultados que a análise de Ampère, mas salienta que há uma série de fenômenos para os quais as duas explicações dão resultados opostos. Tais fenômenos seriam decisivos para decidir qual das duas explicações, amperiana e grassmaniana, deveria ser considerada a correta (TRICKER, 1965).

Assis e Bueno (1996) mostram os experimentos realizados com a finalidade de decidir qual das teorias é a correta. Os experimentos relatados pelos pesquisadores mostram resultados favoráveis à teoria de Ampère.

Peter Graneau (1982) mostra a controvérsia entre as expressões de Ampère e Graßmann, na qual os efeitos observados em dois experimentos parecem estar em conformidade com a teoria de Ampère e não com outra teoria de interação eletrodinâmica.

A inserção da análise vetorial em Física influenciou Oliver Heaviside que, apesar de ter sido influenciado pelo cálculo hamiltoniano, mostra-se favorável à abordagem, usando o novo cálculo vetorial também nos estudos da eletricidade e do magnetismo.

5.2. James Clerk Maxwell

James Clerk Maxwell (1831-1879) figura entre os cientistas mais importantes do século XIX. Sua obra mais conhecida, *A Treatise on Electricity & Magnetism*, cuja primeira edição é de 1873, expõe suas ideias sobre eletromagnetismo, baseadas na existência de um éter (ASSIS, 1992).

¹⁸ Existe uma tradução para a língua inglesa deste trabalho de Graßmann, feita por Tricker (1965), intitulada *A New theory of electrodynamics*.

O trabalho de Maxwell é bastante valioso, visto que realiza uma análise crítica sobre os pressupostos ontológicos e epistêmicos da concepção eletrodinâmica de Ampère e da concepção eletromagnética de Faraday:

Frente aos sucessos da tradição continental [isto é, a eletrodinâmica de Ampère] – que Maxwell reconhece – sua atitude é a de defender as virtudes do pluralismo metodológico, e de mostrar que a abordagem proposta por Faraday, além de explicar igualmente bem os fenômenos, também pode ser traduzida em linguagem matemática (ABRANTES, 1988, p. 60).

No *Tratado*, Maxwell coroa sua teoria eletromagnética. Nessa obra, ele faz uma “hipótese dinâmica” sobre a natureza da corrente elétrica, na qual se mostra favorável à ideia de que a corrente elétrica seria um fenômeno cinético, que não se restringiria somente ao interior do condutor (ABRANTES, 1988). Tal hipótese dinâmica “abre uma via completamente diferente da seguida pela eletrodinâmica continental, de Ampère a Weber” (ABRANTES, 1988, p. 73).

Um trabalho de Helmholtz, que dizia que a força de Weber – o qual, por sua vez, foi influenciado pelos trabalhos de Ampère – violaria ao princípio de conservação da energia, aparentemente, influenciou Maxwell e fez com que, em seu primeiro trabalho sobre o magnetismo, elogiasse a eletrodinâmica de Weber e, ainda assim, a criticasse. Possivelmente, esse trabalho de Helmholtz fez Maxwell descartar a teoria de Weber tão precocemente (ASSIS, 1992).

Apesar do trabalho eletromagnético de Maxwell ter, aparentemente, influenciado muito na consolidação das hipóteses de Faraday e ter feito com que houvesse uma redução na velocidade do desenvolvimento da eletrodinâmica continental (ABRANTES, 1988) – a saber, a eletrodinâmica amperiana –, Maxwell discute, no segundo volume de seu *Tratado*, as teorias de ação a distância.

No capítulo XXIII, do segundo volume do *Tratado*, Maxwell se mostra contrário a uma propagação de alguma ação elétrica no tempo, a não ser quando haja um meio entre as duas partículas interagentes. E conclui:

Portanto, todas essas teorias levam à concepção de um meio no qual acontece a propagação, e se admitimos esse meio como uma hipótese, penso que ele tem de ocupar um lugar proeminente em nossas pesquisas e que temos que nos esforçar em construir uma representação mental de todos os detalhes de sua ação, e esse foi meu objetivo constante neste tratado (MAXWELL, 1954 *apud* ASSIS, 1992, p. 65).

Vale ressaltar, assim como foi muito bem apontado por Assis (1992), que com os experimentos de Michelson-Morley, a partir de 1887, e da teoria da relatividade restrita de Einstein, em 1905, o éter foi abandonado, porém as equações de Maxwell prevalecem. Como o próprio Maxwell afirma, ele “desenvolveu suas teorias e equações supondo a existência física do éter e sua inter-relação com as cargas e a matéria em geral” (ASSIS, 1992, p. 76).

5.3. Oliver Heaviside

Oliver Heaviside (1850-1925) foi um cientista inglês, nascido em 18 de maio de 1850, durante o período vitoriano, em uma família de baixo poder aquisitivo. Por conta disso, não possuiu educação formal após os dezesseis anos. Além disso:

[...] Oliver Heaviside era um homem muito complexo, difícil de lidar. Ele era um indivíduo inseguro, insensível e grosseiro. Mas, também era muito mais. Era um físico-matemático de primeira, um engenheiro elétrico com incríveis habilidades analíticas e inspiração física [...] ¹⁹ (NAHIN, 1987, p. 1-2, tradução nossa).

Nunca ocupou um cargo acadêmico e, na maior parte da vida, não teve emprego. Por trabalhar de forma independente e, na maior parte do tempo, sem salário, Heaviside é considerado o último cientista amador (HUNT, 2015).

A tia, por parte de mãe de Heaviside, casou-se com Charles Wheatstone (1802-1875), um dos inventores do telégrafo, que já era um cientista conhecido naquela época. Atualmente, conhecemos Wheatstone por conta da “ponte de Wheatstone”, que, na

¹⁹ No original, “[...] Oliver Heaviside was a highly complex man, with some rather rough edges. He often was an uncivil, insensitive boorish individual. But he was much more, too. He was a mathematical physicist of the first rank, as electrical engineer with amazing powers of analytic and physical insight [...]” (NAHIN, 1987, p. 1-2).

verdade, foi inventada por outra pessoa (NAHIN, 1987). A influência e a proximidade com Wheatstone teve grande influência na vida da família Heaviside, principalmente em Oliver. Por causa de seu tio, Oliver acabou trabalhando como operador de telégrafo na Dinamarca, o que corroborou em suas pesquisas (NAHIN, 1987).

Em 1872, Heaviside publicou seu primeiro artigo, “Comparing electromotive forces”²⁰ (HEAVISIDE, 1892, 1-2), no qual ele descrevia um método simples de comparar forças eletromotrizes que havia sido concebido por ele em 1870. Em 1873, publicou seu segundo artigo, intitulado “On the Best Arrangement of Wheatstone’s Bridge for Measuring a Given Resistance with a Given Galvanometer and Battery”²¹ (HEAVISIDE, 1892, p. 3-8), no qual usa cálculo diferencial para discutir uma nova configuração da ponte de Wheatstone. Devido a um conselho de William Thomson (1824-1907) – mais tarde, Lorde Kelvin –, Heaviside enviou uma cópia de seu artigo para Maxwell, que o citou a partir da segunda edição do *Tratado*, no ano de 1881 (MAXWELL, 1954b).

Não se sabe ao certo qual era o grau de conhecimento físico e matemático de Heaviside ao ler pela primeira vez a obra de Maxwell, em 1873, logo após sua primeira publicação, mas é certo que esta obra o influenciou. A partir de 1885, Heaviside começou a publicar trabalhos tentando reformular a teoria de Maxwell. Nesse período, alguns conceitos novos surgiam, depois eram esquecidos e reapareciam anos depois (BUCHWALD, 1985). Após 1900, o trabalho de Heaviside teve um forte declínio devido, principalmente, a problemas de saúde. Lentamente, até sua morte, em 1925, ele se tornou mais recluso e excêntrico (HUNT, 2015).

Heaviside compartilhou com os outros seguidores de Maxwell a concepção de que os fenômenos magnéticos deveriam ser explicados por uma interação por campos, porém divergia dos outros adeptos das ideias maxwellianas em relação à definição de carga:

Em particular, ele sempre considerou ‘carga’ como sendo devida a processos que ocorrem em regiões onde a razão entre capacidade indutiva específica e condutividade variam de ponto a ponto. [...].

²⁰ Em tradução livre: “Comparando forças eletromotrizes”.

²¹ Em tradução livre: “O melhor arranjo da ponte de Wheatstone para a medição de uma dada resistência com um dado galvanômetro e bateria”.

Mesmo no seu tratamento de ‘carga’ Heaviside divergia de seus contemporâneos [...]”²² (BUCHWALD, 1985, p. 295, tradução nossa).

Heaviside reformulou as equações de Maxwell baseado em um conceito de força impressa, que foi o centro dos seus trabalhos. Tal conceito fez com que a teoria maxwelliana se aproximasse de uma teoria que dependia, basicamente, de energia. Para tanto, ele introduziu quatro campos vetoriais, \vec{e} , \vec{E} , como sendo a força elétrica impressa e o campo elétrico, respectivamente; e também \vec{b} , \vec{B} , como sendo a força magnética impressa e o campo magnético, respectivamente (BUCHWALD, 1985).

Aparentemente, Heaviside, que já havia reconhecido os méritos do trabalho de Ampère (NAHIN, 1987), escreveu em um artigo de dezembro de 1888, o qual foi reproduzido no segundo volume de *Electrical papers*:

Foi afirmado, em não menor autoridade do que o grande Maxwell, que a lei de força entre um par de elementos de corrente de Ampère é a fórmula cardinal da eletrodinâmica. Se é assim, não deveríamos usá-la sempre? Nós *alguma vez* a usamos? Maxwell a utilizou no seu Tratado [*A Treatise on Electricity & Magnetism*]? Certamente há algum erro. Isto não significa que eu quero roubar de Ampère o crédito por ser o pai da eletrodinâmica. Eu só transferiria o nome de fórmula cardinal para outra [fórmula], devido a ele [Ampère], expressando a força mecânica sobre um elemento [de corrente] de um condutor suportando [no sentido de conter] a corrente em qualquer campo magnético: o produto vetorial entre corrente e indução. Há algo real sobre isso. Não é como sua força [Força de Ampère] entre um par de elementos abertos; isso é fundamental; e, como todos sabem, ainda está em uso, efetivamente ou virtualmente (por meio da força eletromotriz) por teóricos ou experimentais²³ (HEAVISIDE, 1894. p. 501-502, tradução nossa).

²² No original, “In particular, he always considered charge to be due to processes occurring in regions where the ratio of specific inductive capacity to conductivity varies from point to point [...] Yet even in his treatment of ‘charge’ Heaviside diverged from his contemporaries [...]” (BUCHWALD, 1985, p. 295).”

²³ No original, “It has been stated, on no less authority than that of the great Maxwell, that Ampere's law of force between a pair of current-elements is the cardinal formula of electrodynamics. If so, should we not be always using it? Do we *ever* use it? Did Maxwell, in his treatise? Surely there is some mistake. I do not in the least mean to rob Ampere of the credit of being the father of electrodynamics; I would only transfer the name of cardinal formula to another due to him, expressing the mechanical force on an element of a conductor supporting current in any magnetic field; the vector product of current and induction. There is something real about it; it is not like his force between a pair of unclosed elements ; it is fundamental ; and, as everybody knows, it is in continual use, either actually or virtually (through electromotive force) both by theorists and practitioners (HEAVISIDE, 1894. p. 501-502).

O trecho acima indica que Heaviside acreditava que a força de Ampère não seria usual, bem como mostra que ele era contrário a dar o título de “fórmula cardeal” da eletrodinâmica para a equação amperiana. Aparentemente, ele gostaria que o título fosse dado a uma expressão que tivesse o produto vetorial entre corrente e indução (HEAVISIDE, 1894). O que pode ser entendido como sendo a força de Graßmann.

Anos antes, em 1886, Heaviside escreveu uma carta para o periódico *The Electrician*, que foi reproduzida em 1894, em *Electrical papers*. Nela, o estudioso questiona a nomenclatura de algumas unidades de medidas na eletricidade. Em um trecho, Heaviside diz:

[...] consideremos os nomes das unidades [de medida] elétricas.

Um nome realmente prático deve ser curto, preferencialmente monossílabo, pronunciado quase do mesmo jeito por todas as pessoas civilizadas, e não confundida com outra unidade [de medida] científica. Se, além do mais, for o nome, ou parte do nome, de algum cientista eminente, melhor ainda. Isso é uma questão sentimental, mas se não prejudica, é inútil se opor. Mas não devemos colocar o sentimento em primeiro lugar e dar um nome impraticável para uma unidade por causa do sentimento

[As unidades] Ohm e volt são admiráveis; farad é quase bom (mas certamente não foi prático fazê-lo um milhão de vezes maior – o atual microfarad deveria ser o farad); erg e dyna por favor; watt não era tão bom, mas tolerável. Mas e sobre aqueles resultados notáveis do Congresso de Paris, o ampère e o coulomb? Falando somente por mim, eles são totalmente impraticáveis. Coulomb pode ser transformado em coul, e então é suportável; essa unidade é, contudo, pouco usada. Mas ampère encurtado para am ou amp não é bom. Melhor chama-lo de père; então dará certo. Agora um pouco de sentimento vem nos apoiar. Ampère não foi pai da eletrodinâmica?²⁴ (HEAVISIDE, 1894, p. 26, tradução nossa).

²⁴ No original, “[...] let us consider the names of the electrical units.

A really practical name should be short, preferably monosyllabic, pronounced in nearly the same way by all civilised peoples, and not mistakable for any other scientific unit. If, in addition, it be the name, or a part of the name, of an eminent scientist, so much the better. This is quite a sentimental matter; but if it does no harm, it is needless to object to it. But we should never put the sentiment in the first place, and give an unpractical name to a unit on account of the sentiment.

Ohm and volt are admirable; farad is nearly as good (but surely it was unpractical to make it a million times too big the present microfarad should be the farad); erg and dyne please me; watt is not quite so good, but is tolerable. But what about those remarkable results of the Paris Congress, the ampere and the coulomb? Speaking entirely for myself, they are very unpractical. Coulomb may be turned into coul, and is then enduring; this unit is, however, little used. But ampere shortened to am or amp is not nice. Better make it pere; then it will do. Now an additional bit of sentiment comes in to support us. Was not Ampere the father of electro-dynamics?” (HEAVISIDE, 1894, p. 26)

Essas passagens nos ajudam a compreender que Heaviside, de sua maneira única, opunha-se a Ampère. Ainda assim, reconhece Ampère como o pai da eletrodinâmica, o que, para Heaviside, dificulta a mudança do nome da unidade de medida de corrente.

Em um capítulo de seu livro *Electromagnetic Theory*, Heaviside discute conceitos de teorias de ação a distância e ação intermediada, no texto intitulado “Action at a Distance versus Intermediate Agency. Contrast of New with Old Views about Electricity” (em tradução livre, “Ação a Distância versus Ação Intermediada. Contraste da Nova e da Velha Visão sobre Eletricidade”). Para a discussão, o autor faz analogia com a propagação de ondas sonoras. Heaviside se mostra favorável à ideia de interação elétrica por meio de um agente entre os corpos:

Mas a prova experimental da velocidade finita estava próxima, e a influência muito lenta do pensamento teórico dos conservadores foi reforçada pelo apelo do senso comum aos fatos. Agora é um fato que as ondas eletromagnéticas se propagam fora dos condutores assim como as ondas sonoras se propagam fora de corpos vibrantes. É uma inferência científica legítima que há um meio para fazê-lo tanto em um caso como no outro, e há evidências independentes a favor de ambos os meios, ar para o som e éter para as perturbações elétricas²⁵ (HEAVISIDE, 1950, p. 308-309, tradução nossa).

Além desses apontamentos, Heaviside acreditava que a eletricidade e a corrente elétrica deveriam se mover de maneira parecida com o fluxo de calor (DARRIGOL, 2000), diferentemente de Ampère, o qual acreditava que dentro de um fio com corrente existiriam dois fluxos de cargas elétricas, positivo e negativo, e que estes se moveriam com velocidades contrárias em relação ao condutor (ASSIS; CHAIB, 2011).

²⁵ No original, “But the experimental proof of the finite speed of transmission was forthcoming, and the very slow influence of theoretical reasoning of conservative minds was enforced by the common-sense appeal to facts. It is now as much a fact that electromagnetic waves propagated outside conductors as the sound waves are propagated outside vibrating bodies. It is as legitimate a scientific inference that there is a medium to do it in one case as in the other, and there is independent evidence in favour of both media, air for sound and ether for electrical disturbances” (HEAVISIDE, p. 308-309).

6. Sugestão de Atividade para a Abordagem das Controvérsias entre a Ação a Distância e a Ação por Campos

De modo a fornecer subsídios para o professor que deseja abordar o tema deste trabalho em sala de aula, elaboramos uma sequência didática, voltada para o Ensino Superior, que se baseia no uso de documentos originais para o desenvolvimento da atividade. Dessa forma, baseamo-nos na atividade elaborada por Dion (1997).

Uma sequência didática é uma proposta metodológica determinada por diversas atividades ordenadas e articuladas de uma unidade didática (RESQUETTI, 2013). Para que uma sequência didática seja válida, é preciso observar se são contempladas atividades:

- que permitam determinar os *conhecimentos prévios* dos estudantes em relação aos conteúdos de aprendizagem;
- cujos conteúdos sejam *significativos* e funcionais para os alunos;
- que representem um *desafio alcançável* para os estudantes, que os faça avançar com a ajuda necessária;
- que provoquem *conflito cognitivo*, de forma a estabelecer relações entre os novos conteúdos e os conhecimentos intuitivos dos estudantes;
- que promovam uma *atitude favorável* do aluno, de modo que fiquem motivados para o estudo dos conteúdos propostos;
- que estimulem a *autoestima* do estudante, para que ele sinta que em certo grau aprendeu e que seu esforço valeu a pena;
- que ajudem o aluno a adquirir habilidades como o *aprender a aprender* e que lhe permitam tornar-se autônomo (RESQUETTI, 2013, p. 120).

Desta maneira, o *papel do professor* é fundamental para o sucesso da sequência didática. Sua postura em sala de aula “[...] deve proporcionar a autonomia do aluno, a cooperação entre os grupos, a interação professor-aluno e o debate” (RESQUETTI, 2013, p. 120). Por meio da discussão, será possível que o professor reconheça o caminho a ser tomado com relação aos conteúdos que serão ensinados, levando sempre em consideração a liberdade intelectual dos alunos.

O *público alvo* desta sequência didática são alunos do Ensino Superior. Os *discentes também possuem papel fundamental* no êxito da sequência, uma vez que suas participações nas discussões são de extrema importância. Para tanto, o educando não pode ter receio de “[...] perguntar, formular hipóteses ou expor suas ideias” (RESQUETTI, 2013, p. 121).

A *avaliação* durante essa sequência didática será feita de maneira contínua e deverá ser aplicada durante todo o desenvolvimento das atividades. Concordamos com Resquetti (2013, p. 122) quando a pesquisadora afirma que:

[...] as atividades desenvolvidas em sala de aula devem proporcionar situações que permitam ao professor verificar se os alunos estão compreendendo os conteúdos e, sobretudo, se os objetivos de ensino estão sendo atingidos.

De maneira geral, os *objetivos* da sequência didática aqui proposta são:

- Tratar das controvérsias históricas entre as teorias de ação a distância e as teorias de ação por campos.
- Promover a interação entre professor e alunos.
- Motivar os discentes para o estudo da História da Física, que deve ir muito além de pequenos quadros nos cantos das páginas dos livros didáticos.
- Debater sobre a construção da Ciência.
- Explicitar que a teoria atualmente aceita pela comunidade científica não é a verdade absoluta nem tampouco se aproxima dela.

Após o que foi exposto aqui, organizamos as atividades propostas para a sequência didática elaborada, a fim de abordar as controvérsias entre eletricidade e magnetismo no Nível Superior. O número previsto é de quatro encontros, podendo variar conforme a necessidade.

Ressaltamos que a elaboração de uma sequência didática não é o foco principal deste trabalho. Para uma leitura mais profunda sobre o assunto, recomendamos a leitura de Dion (1997) e Resquetti (2013).

A proposta de sequência didática tem como ponto de partida a interação entre eletricidade e magnetismo. Para isso, no primeiro encontro, o professor realiza ou

apresenta um vídeo de um experimento, com o intuito de levantar hipóteses dos alunos sobre o fenômeno observado²⁶. Depois disso, o professor e a turma lerão o texto (Texto Complementar I) de Oliver Heaviside (1950), intitulado “Action at a Distance versus Intermediate Agency. Contrast of New with Old Views about Electricity” (tradução para o português no Anexo A e versão original em inglês no Anexo B). O texto será retomado duas vezes durante o desenvolvimento das atividades, visto que será usado como fonte de reflexão acerca das controvérsias entre ação a distância e ação por campos.

No segundo encontro, será retomada a discussão iniciada a partir da leitura do Texto Complementar I. A partir disso, o professor resolverá um problema proposto em que fique explícito que tanto a teoria de Ampère quanto a teoria do eletromagnetismo de Maxwell fornecem os mesmos resultados. O caso a ser analisado pode ser o mesmo que foi trabalhado por Santos e Gardelli (2017)²⁷. A partir de então, deverá ser realizada a leitura dos textos complementares, cujos trechos selecionados estão disponíveis no Anexo C, que foram escolhidos com o objetivo de trabalhar visões diferentes para a interação física, buscando permitir a identificação de prós e contras em cada interação. Além disso, com o uso dos excertos do Anexo C, juntamente com o texto do Anexo A, buscamos elucidar que não há um caminho para a verdade absoluta. A saber, os textos complementares foram selecionados a fim de mostrar ideias que considerem as duas concepções de interação física (Texto Complementar I), que assumam a interação eletromagnética como sendo realizada por linhas de campo (Texto Complementar II), que sejam contra a ideia da ação a distância postulada por Ampère (Texto Complementar III) e que sejam pró-ação a distância (Texto Complementar IV). A ordem com que os textos serão trabalhados fica a cargo do professor.

No terceiro encontro, será realizada a releitura do Texto Complementar I, no intuito de promover um contraste entre as discussões feitas no primeiro encontro, que foram levantadas antes da leitura dos textos complementares. Dessa maneira, serão levantadas novas questões acerca da interação entre eletricidade e magnetismo. Com isso,

²⁶ Para isso, sugerimos o vídeo: “MIT Physics Demo -- Jumping Wire”, disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=tUCtCYty-ns>>. Acesso em: 10 jan. 2018. E o vídeo: “Experimento de Oersted”, disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=NwEJBIneNE>>. Acesso em: 10 de jan. 2018.

²⁷ Uma análise mais detalhada do caso pode ser vista em Santos (2016), disponível em: <<http://site.dfi.uem.br/wp-content/uploads/2016/12/Hugo-S.-Tanaka-dos-Santos.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

é esperado que as reflexões acerca do entendimento do texto sejam diferentes daquelas reflexões referentes à primeira leitura.

No último encontro, serão retomadas as reflexões realizadas no encontro anterior e, então, com a releitura dos textos complementares, inicia-se a discussão final da sequência didática. Nessa última discussão, espera-se que fique claro que, mesmo quando uma teoria parece obsoleta, se analisada a partir do que é aceito pela comunidade científica contemporânea, não significa que esta é errada ou que estamos mais próximos da verdade absoluta.

O Quadro 1 é um esquema da organização da sequência didática:

ENCONTRO	ATIVIDADES
Encontro I	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamento de questões acerca da interação entre eletricidade e magnetismo; • Apresentação e discussão de um experimento; • Leitura do Texto I
Encontro II	<ul style="list-style-type: none"> • Retomar a discussão do encontro anterior; • Resolução do problema proposto; • Leitura dos textos complementares.
Encontro III	<ul style="list-style-type: none"> • Releitura do Texto I; • Discussão das hipóteses levantadas durante a primeira e a segunda leituras do texto;
Encontro IV	<ul style="list-style-type: none"> • Discussão de questões levantadas a partir da releitura dos textos complementares; • Discussão final.

Quadro 1 - Esquema de organização das atividades da sequência didática

Fonte: o autor.

7. Considerações finais

Após a realização de um estudo sobre os aparentes motivos que levaram a comunidade científica a abandonar as teorias de ação a distância, é possível observar que o *Tratado* de Maxwell, bem como as obras de seus seguidores, teve forte influência na estagnação das pesquisas em eletrodinâmica, de modo a fazer com que o eletromagnetismo de Maxwell passasse a constituir o paradigma atual da comunidade científica.

O seguidor de Maxwell que mais pode ter contribuído para a consolidação das ideias de seu mentor foi Oliver Heaviside que, com sua maneira única – e até mesmo ácida –, escreveu em seus artigos citados anteriormente os motivos pelos quais se opunha fortemente a chamar a força entre elementos de corrente de Ampère como sendo a lei mais importante da eletrodinâmica. Principalmente porque o próprio Maxwell, apesar dos elogios, não utilizou a força entre elementos de corrente de Ampère para desenvolver suas ideias sobre eletromagnetismo.

Esse episódio da História da Ciência, isto é, o desenvolvimento do eletromagnetismo, é extremamente rico e não deve ser reduzido a uma simples linha de evolução da eletrodinâmica, como é mostrado nos livros didáticos (ASSIS; CHAIB, 2007). Desse modo, acreditamos ser útil discuti-lo em sala de aula, a fim de melhorar a compreensão da Natureza da Ciência e contribuir para a desconstrução de uma visão linear e positivista da Ciência.

Concordamos com Zanetic (1989) sobre o ensino da História e Filosofia das Ciências ir muito além de uma simples motivação para o estudo. Ao deixar esta simplificação de lado, pode-se contribuir muito para a construção conceitual e cultural da Física. Além disso, as teorias do passado não devem ser apenas apresentadas como curiosidade:

Um sistema obsoleto de pensamento científico, que pode parecer muito estranho a nós olhando para trás a partir do século XX, torna-se inteligível quando entendemos as questões a que ele foi designado para responder. As questões fazem sentido às respostas, e um sistema tem dado lugar a outro, não porque simplesmente novos fatos foram descobertos que falsearam o velho sistema, mas mais

significativamente por alguma razão, algumas vezes o resultado de novas observações, cientistas começaram a repensar suas posições, a fazer novas hipóteses, a formular novos questionamentos, a olhar uma evidência há muito familiar de uma nova maneira (CROMBIE, 1952²⁸ *apud* GARDELLI, 2004, p. 110).

Para que o ensino de teorias que já foram abandonadas, mas que explicam os fenômenos físicos de maneira igualmente efetiva, seja realizado, é necessário ir contra a ideia de que a Ciência é construída apenas por mentes brilhantes. Acreditamos que o anarquismo epistemológico de Paul Feyerabend seja o aporte teórico mais adequado para tal abordagem, visto que a História da Ciência é parte indissociável da Ciência, sendo a História estritamente necessária para o desenvolvimento posterior da própria Ciência.

Ao se estudar a HC, fica mais evidente que conceber um método único e fixo para se fazer Ciência é um pensamento ingênuo. O estudo do material histórico das Ciências, sem reduzi-lo a seus principais agentes, mostra que o único princípio que pode ser defendido no desenvolvimento científico é o de que *tudo vale*. Desse modo, os alunos precisam conhecer a maneira com que os cientistas agiram, às vezes, inclusive, *contraindutivamente*, estimulando, assim, a criatividade dos alunos e encorajando-os a desenvolver suas próprias ideias, pois necessário estimular a livre criação de ideias. A Ciência necessita de pessoas que sejam capazes de ir além da simples reprodução de padrões já existentes, uma vez que ela precisa de pessoas que sejam inventivas de modo a agirem de maneira contraindutiva.

Concordamos com Feyerabend (2011b) quando ele afirma que as teorias nem sempre podem ser comparadas pelo seu conteúdo, nem mesmo quando são da mesma área de conhecimento. Além disso, ressaltamos o pensamento de Bagdonas, Zanetic e Gurgel (2014), que explicita a importância de discussões sobre as controvérsias do desenvolvimento da Ciência, de modo a formar cidadãos críticos e que conheçam a riqueza da construção das Ciências e que sejam capazes de contestar de maneira sensata as afirmações feitas por especialistas. Por isso, acreditamos que o processo de ensino e aprendizagem será mais efetivo se, ao abordar o desenvolvimento histórico do

²⁸ CROMBIE, Alistair Cameron. **Augustine to Galileo** – The History of Science A.D. 400-1650. 1ª ed. Melbourne: William Heinemann, 1952.

eletromagnetismo, for realizada a apresentação tanto da concepção eletrodinâmica quanto da concepção eletromagnética.

A sequência didática que foi proposta nesta dissertação foi elaborada visando uma abordagem que utilizasse textos históricos que contrastassem a teoria da ação por campos e a teoria da ação a distância para a interação entre eletricidade e magnetismo. Ressaltamos, ainda, que essa abordagem pode ser adaptada para outros acontecimentos da História da Ciência.

Nosso objetivo terá sido alcançado se conseguirmos passar para o leitor a ideia de que não há um caminho para a verdade absoluta e que teorias consideradas obsoletas para a sociedade atual podem ser tão efetivas quanto as teorias contemporâneas.

Finalizando, esperamos que este trabalho possa contribuir para a discussão sobre o uso da História da Ciência no Ensino de Ciências e, também, desejamos que o resgate histórico, realizado nesta pesquisa, sirva como auxílio para elucidar alguns motivos pelos quais as concepções de interação a distância acabaram sendo abandonadas. Desse modo, consideramos que este trabalho será útil como material de apoio para uma possível aplicação em sala de aula por professores.

Diante disso, deixamos para o leitor como sugestões de novas pesquisas: a aplicação prática da sequência didática proposta nesta dissertação e, também, uma análise detalhada de como os livros didáticos de Física abordam as controvérsias entre a teoria de ação a distância e a teoria de ação por campos.

Referências

A HORA do Ensino Médio, mais uma vez! **Revista Pensar a Educação em pauta**, ano 4, n. 132, 2016. Disponível em: <<https://www.pensaraeducacaoempauta.com/editorial-19-8-16>>. Acesso em: 24 abr. 2017.

ABRANTES, Paulo César Coelho. A metodologia de J. C. Maxwell e o desenvolvimento da teoria eletromagnética. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, n. 5, p. 58-75, jun., 1988.

ASSIS, André Koch Torres. Arguments in Favour of Action at a Distance. In: CHUBYKALO, Andrew E. *et al.* (Orgs.). **Instantaneous Action at a Distance: “Pro” and “Contra”**. Commack: Nova Science Publishers, 1999, p. 45-56.

ASSIS, André Koch Torres. **Eletrodinâmica de Weber** - Teoria Aplicações e Exercícios. Campinas: Unicamp, 1995.

ASSIS, André Koch Torres. Teorias de ação a distância – Uma tradução comentada de um texto de James Clerk Maxwell. **Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência**, n.7, p. 53-76, 1992.

ASSIS, André Koch Torres.; BUENO, Marcelo de Almeida. Equivalence Between Ampère and Grassmann’s Forces. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 32, n. 16, p. 431-436, 1996.

ASSIS, André Koch Torres; CHAIB, João Paulo Martins de Castro. **Eletrodinâmica de Ampère** – Análise do significado e da evolução da força de Ampère, juntamente com a tradução comentada de sua principal obra sobre eletrodinâmica. Campinas: Unicamp, 2011.

ASSIS, André Koch Torres; CHAIB, João Paulo Martins de Castro. Nota sobre o Magnetismo da Pilha de Volta – Tradução Comentada do Primeiro Artigo de Biot e Savart sobre Eletromagnetismo. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 16, n. 2, p. 303-309, jul./dez., 2006.

BAGDONAS, Alexandre; ZANETIC, João; GURGEL, Ivã. Controvérsias sobre a natureza da ciência como enfoque curricular para o ensino da física: o ensino de história da cosmologia por meio de um jogo didático. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 7, n. 2, p. 242-260, jul./dez., 2014.

BATISTA, Giovanninni Leite de Freitas; DRUMMOND, Juliana Mesquita Hidalgo Ferreira; FREITAS, Daniel Brito de. Fontes primárias no ensino de física: considerações e exemplos de propostas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 663-702, dez., 2015.

BOSS, Sergio Luiz Bragatto. **Ensino de Eletrostática** – História da Ciência Contribuindo para a Aquisição de Subsunçores. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências, Bauru, 2009.

BOSS, Sergio Luiz Bragatto.; SOUZA FILHO, Moacir Pereira de; CALUZI, João José. Traduções de fonte primária – algumas dificuldades quanto à leitura e o entendimento. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 8, 2011, Campinas, SP. **Anais...** Campinas: ABRAPEC, 2011. Disponível em: <<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/viiienpec/resumos/R0441-1.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

BOSS, Sergio Luiz Bragatto; SOUZA FILHO, Moacir Pereira de; CALUZI, João José. Fontes Primárias e Aprendizagem Significativa: Aquisição de subsunçores para aprendizagem do conceito de carga elétrica. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 7, 2009, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: ABRAPEC, 2009. Disponível em: <<http://posgrad.fae.ufmg.br/posgrad/viiienpec/pdfs/1717.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

BUCHWALD, Jed Z. Oliver Heaviside, Maxwell's Apostle and Maxwellian Apostate. **Centaurus**, v. 28, p. 288-330, 1985.

BUENO, Marcelo; ASSIS, André Koch Torres. **Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos**. 2ª ed. Montreal: Apeiron, 2015. Disponível em: <<https://www.ifi.unicamp.br/~assis/Calculo-de-Indutancia-e-de-Forca-em-Circuitos-Eletricos-2a-edicao.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2018

CACHAPUZ, António *et al.* Superação das visões deformadas da ciência e da tecnologia: um requisito essencial para a renovação da educação científica. In: CACHAPUZ, António *et al.* (Orgs.). **A Necessária renovação do Ensino de Ciências**. São Paulo: Cortez, 3ª ed., 2011, p. 35-68.

CHAIB, João Paulo Martins de Castro. **Análise do Significado e da Evolução da Força de Ampère, juntamente com a Tradução Comentada de sua Principal Obra Sobre Eletrodinâmica**. 2009. 386 f. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin, 2009.

CHAIB, João Paulo Martins de Castro; ASSIS, André Koch Torres de. Distorção da obra eletromagnética de Ampère nos livros didáticos. **Revista Brasileira de Ensino Física**, v. 29, n. 1, p. 65-70, 2007.

CHALMERS, Alan Francis. **O que é ciência, afinal?** 1ª ed. São Paulo: Brasiliense, 1999.

CHALTON, Nicola; MacARDLE, Meredith. **A História da Ciência para quem tem pressa**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Valentina, 2017.

DARRIGOL, Olivier. **Electrodynamics from Ampère to Einstein**. New York: Oxford, 2000.

DIAS, Valéria Silva; MARTINS, Roberto de Andrade. Michael Faraday: O caminho da livraria à descoberta da indução eletromagnética. **Ciência & Educação**, v. 10. n. 3. p. 517-530, 2004.

DION, Sonia Maria. **O diálogo com documentos originais da Ciência em sala de aula: uma proposta**. 1997. 173 f. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade de São Paulo, Faculdade de Educação, 1998.

FEYERABEND, Paul Karl. **Ciência em Uma Sociedade Livre**. 1ª ed. São Paulo: UNESP, 2011a.

FEYERABEND, Paul Karl. **Contra o Método**. 2ª ed. São Paulo: UNESP, 2011b.

FEYNMAN, Richard P. **Lições de Física**. Volume II. Porto Alegre: Bookman, 2009.

FOUREZ, Gérard. **A construção das ciências:** introdução à filosofia e à ética das ciências. São Paulo: UNESP, 1995.

GARDELLI, Daniel. **AULA 28** - A mecânica relacional de André Koch Torres Assis. Maringá: Núcleo de Ensino A Distância (NEAD-UEM), 2017. 71 min., son., color. Disponível em: <<http://midias.nead.uem.br/repositorio/web/midia/player/5035133041817130510397>>. Acesso em: 24 ago. 2017.

GARDELLI, Daniel. **Concepções de Interação Física:** Subsídios para uma Abordagem Histórica do Assunto no Ensino Médio. 2004. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

GARDELLI, Daniel. **Experimento de Ørsted:** Subsídios para uma Abordagem Histórica do Assunto no Ensino Médio. 2014. 208 f. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Estadual de Maringá, 2014.

GODOY, Arlida Schmidt. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. **Revista de Administração de Empresas**, v. 35, n. 2, p. 57-63, mar./abr., 1995.

GOLDENBERG, Mirian. **A arte de pesquisar:** como fazer pesquisa qualitativa em ciências sociais. Rio de Janeiro: Record, 2004.

GRANEAU, Peter. Electromagnetic jet-propulsion in the direction of current flow. **Nature**, v. 295, p. 311–312, 1982.

GRIFFITHS, David Jeffrey. **Eletrodinâmica.** 3ª ed. São Paulo: Pearson, 2010.

HALLIDAY, David; WALKER, Jearl; RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física.** Volume 3. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HEAVISIDE, Oliver. **Electrical Papers.** Volume I. New York: MacMillan and Co. 1892.

HEAVISIDE, Oliver. **Electrical Papers.** Volume II. New York: MacMillan and Co. 1894.

HEAVISIDE, Oliver. **Electromagnetic theory**: Complete and unabridged edition of Volume I, Volume II, and Volume III with a critical and historical introduction by Ernst Weber. 1ª ed. New York: Dover, 1950.

HUNT, Bruce J. **Os Seguidores de Maxwell**. 1ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2015.

LABURÚ, Carlos Eduardo; ARRUDA, Sérgio de Mello; NARDI, Roberto. Pluralismo metodológico no ensino de ciências. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 9, n. 2, p. 247-260, 2003. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/26453>>. Acesso em: 28 jul. 2017.

LABURÚ, Carlos Eduardo; CARVALHO, Marcelo Alves de. Controvérsias do construtivismo e pluralismo epistemológico no Ensino de Ciências Naturais. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 1. n. 1, 2001. Disponível em: <<https://seer.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/2387/1787>>. Acesso em: 28 jul. 2017.

MARTINS, Roberto de Andrade. Ørsted e descoberta do eletromagnetismo. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 10, p. 89-114, 1986.

MARTINS, Roberto de Andrade. Ørsted, Ritter and Magnetochemistry. In: BRAIN, R. M.; COHEN, R. S.; KNUDSEN, O (Eds.). **Hans Christian Ørsted and the Romantic Legacy in Science: Ideas, Disciplines, Practices**. New York: Springer, 2007, p. 339-385.

MASSONI, Neusa Teresinha. **Epistemologias do século XX**. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

MATTHEWS, Michael R. **Science Teaching: the role of history and philosophy of science**. New York: Routledge, 1994.

MAXWELL, James Clerk. **A Treatise on Electricity & Magnetism (1873)**. Volume One. New York: Dover, 1954a.

MAXWELL, James Clerk. **A Treatise on Electricity & Magnetism (1873)**. Volume Two. New York: Dover, 1954b.

NAHIN, Paul J. **Oliver Heaviside: Sage in Solitude: The Life, Work, and Times of an Electrical Genius of the Victorian Age**. 1ª ed. London: IEEE Press, 1987.

NEILL, Alexander Sutherland. **Liberdade sem medo** – Summerhill. 23ª ed. São Paulo: IBRASA, 1984.

NEVES, Marcos Cesar Danhoni. **Lições da escuridão ou revisitando velhos fantasmas do fazer e do ensinar Ciências**. Campinas: Mercado de Letras, 2002.

ØRSTED, Hans Christian. Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 10, p. 115-122, 1986.

REGNER, Ana Carolina Krebs Pereira. Feyerabend e o pluralismo epistemológico. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 13, n. 3, p. 231-247, dez., 1996.

REICH, Karin. Emergence of vector calculus in physics: the early decades. In: SCHUBRING, Gert. **Hermann Günther Graßmann (1809-1877): Visionary Mathematician, Scientist and Neohumanist Scholar**. Boston: Springer Science, 1996, p. 197-210.

RESQUETTI, Silvia Oliveira **Uma sequência didática para o ensino da radioatividade no nível médio com enfoque na História e Filosofia da Ciência e no movimento CTS**. 2013. 281 f. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Estadual de Maringá, 2013.

SANTOS, Hugo Shigueo Tanaka dos. **Análise da Lei de Biot-Savart em comparação com a força entre elementos de corrente de Ampère**. 2016. 40f. Monografia (Licenciatura em Física) – Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Física, 2016.

SANTOS, Hugo Shigueo Tanaka dos; FUSINATO, Polônia Altoe. A importância da epistemologia de Feyerabend nas interpretações do experimento de Ørsted. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. 5., Ponta Grossa, PR. **Anais...** Ponta Grossa, 2016.

SANTOS, Hugo Shigueo Tanaka dos; FUSINATO, Polônia Altoe. O uso da História da Ciência no Ensino: subsídios para uma abordagem histórica do desenvolvimento do eletromagnetismo. **Arquivos do MUDI**, v. 21, n. 3, p. 79-89. 2017.

SANTOS, Hugo Shiguel Tanaka dos; GARDELLI, Daniel. Análise da Lei de Biot-Savart em comparação com a força entre elementos de corrente de Ampère. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 864-879, dez., 2017.

SÁ-SILVA, Jackson Ronie; ALMEIDA, Cristóvão Domingos de; GUINDANI, Joel Felipe. Pesquisa documental: pistas teóricas e metodológicas. **Revista Brasileira de História & Ciências Sociais**, v. 1, n. 1, p. 1-15, 2009.

SILVA, Ana Paula Bispo da; GUERRA, Andreia (Orgs.). **História da Ciência e Ensino: Fontes primárias e propostas para a sala de Aula**. São Paulo: Livraria da Física, 2015.

TERRA, Paulo S. O Ensino de Ciências e o Professor Anarquista Epistemológico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. 12, p. 208-218, ago., 2002.

TOSSATO, Claudemir Roque. Incomensurabilidade, comparabilidade e objetividade. **Scientiæ Studia: Revista Latino-Americana de Filosofia e História da Ciência**, São Paulo, v. 10, n. 3, p. 489-504, 2012.

TRICKER, Robert Alfred Ranson. **Early Electrodynamics** – The first law of circulation. London: Pergamon Press, 1965

WHITTAKER, Edmund T. **A History of the Theories of Aether and Electricity**. Vol. 1: The Classical Theories. New York: Tomash Publishers, 1951.

ZANETIC, João. **Física também é cultura**. 1989. 252 f. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade de São Paulo, Faculdade de Educação, São Paulo, 1989.

Anexo A – Tradução do texto “Action at a Distance versus Intermediate Agency. Contrast of New with Old Views about Electricity”, de Oliver Heaviside

Introdução

Conforme dito anteriormente, o texto a seguir é parte da proposta de atividade. Esse texto será lido duas vezes no decorrer da atividade, visto que será utilizado como ferramenta de reflexão acerca dos problemas propostos e sobre a interação entre eletricidade e magnetismo.

O texto de Oliver Heaviside (1850-1925), intitulado “Action at a Distance versus Intermediate Agency. Contrast of New with Old Views about Electricity”, reproduzido no anexo B, foi publicado pela primeira vez em 1893, no primeiro volume do livro *Electromagnetic Theory* (HEAVISIDE, 1950). O texto é a introdução de um capítulo no qual Heaviside discute a teoria das ondas eletromagnéticas planas. A versão que é apresentada aqui é a que está disponível na edição de 1950 da obra citada.

Em *Electromagnetic Theory*, Oliver Heaviside “removeu os obstáculos para a criação de um ‘Novo eletromagnetismo’, em que os princípios fundamentais da teoria de Maxwell seriam expostos com clareza e percepção sem precedentes” (HUNT, 2015, p. 250).

Os trechos que estão entre colchetes são de nossa autoria, inseridos a fim de facilitar a compreensão de algumas passagens. Já as notas de rodapé são nossos comentários e notas de tradução.

A seguir, apresentamos a tradução integral e inédita para a Língua Portuguesa deste texto de Oliver Heaviside.

In: HEAVISIDE, Oliver. **Electromagnetic Theory** – Complete and unabridged edition of Volume I, Volume II, and Volume III with a critical and historical introduction by Ernst Weber. New York: Dover Publications, 1950.

{306}¹

Teoria das ondas eletromagnéticas planas

Ação a Distância *versus* Ação Intermediada. Contraste entre Nova e a Velha Visão sobre Eletricidade

Muitas vezes foi observado que o universo está em uma condição instável. Nada está imóvel. Nem podemos manter o movimento, uma vez produzido, para uma determinada quantidade de matéria. É difuso ou de outra forma transferido para outra matéria, seja imediatamente ou eventualmente. O mesmo fato é observado nos mundos moral e intelectual assim como no material, isso somente nos diz respeito para falar que ele está subjacente à comunicação do conhecimento aos outros quando o espírito se move, embora a tarefa seja de uma natureza ingrata.

As leis pelas quais os movimentos, ou fenômenos que dependem em última instância do movimento, são transferidos, formam naturalmente um importante objeto de estudo dos físicos. Existem duas visões principais extremas sobre o processo. Há a teoria da ação a distância instantânea entre corpos diferentes sem um meio intermediário²; e, por outro lado, há a teoria da propagação no tempo através de um meio intermediário. No último caso, os corpos distantes não atuam realmente um sobre o outro, mas apenas parecem fazê-lo. Na verdade, eles agem diretamente sobre um meio, e entre os dois há a ação entre partes contíguas do próprio meio. Mas, no primeiro caso, a ideia de um meio não é levada em consideração. Podemos, entretanto, de alguma forma, modificar a visão para que a ação, embora aparente ser instantânea e direta, ocorra através de um meio intermediário, sendo a velocidade de transmissão tão grande que está além da compreensão. Assim, as duas

¹ Os números entre chaves ({}) representam a paginação original do primeiro capítulo do *Electromagnetic Theory*, assim como mostrado em Heaviside (1950).

² A fim de facilitar a compreensão do texto, optamos por traduzir “intervening medium” como meio intermediário.

ideias de ação direta, e por um agente intermediário, podem ser de alguma forma conciliadas, sendo feitos casos extremos de uma teoria. Por exemplo, se nós sabemos que *há* um agente intermediário e uma velocidade finita, mas em um certo caso em análise a influência desse agente não é sentida, então nós praticamente podemos assumir que a velocidade é infinita. Mas, embora isso seja a mesma coisa que a ação a distância, nós não precisamos ir além e acabar com a ideia de um agente intermediário.

Há outra maneira de considerar o assunto. Nós podemos explicar a propagação no tempo através de um meio por ações a distância. Mas isso é inútil como explicação, sendo, na melhor das hipóteses, meramente a expressão de uma equivalência matemática.

Agora considere a transmissão do som. Isso consiste, fisicamente, de movimentos vibratórios da matéria, e é transmitido por ondas no ar e nos corpos imersos nele. A velocidade [do som] no ar é bem pequena, tão pequena que nem sequer pôde deixar de ser notada pelos antigos, que eram, em geral, decididamente não-científicos nas suas atitudes mentais em relação aos fenômenos naturais. Suponha, no entanto, que a velocidade de transmissão do som no ar seja muitas vezes maior do que realmente é, de modo que uma ideia de velocidade infinita, ou de uma velocidade por si só, não esteja presente. Devemos então ter os fatos principais diante de nós, que os corpos materiais podem vibrar de acordo com certas leis, e que eles podem, além disso, colocar corpos distantes em vibração. Isso pode ser a introdução de vibrações, e poderia ser explicado, na ausência de um conhecimento melhor, por meio da ação a distância de matéria agindo sobre matéria, em última análise solucionável em alguma forma da lei do inverso do quadrado³, não porque há alguma coisa essencialmente acústica sobre isso, mas por causa das propriedades do espaço. Além disso, nós sempre deveríamos, naturalmente, associar som com os corpos limitados pelo ar, mas não com o próprio ar, que não entraria na teoria. Um filósofo muito inteligente⁴, que devesse explicar as questões em termos de um meio intermediário, talvez não visse suas ideias serem rapidamente aceitas, embora apontasse evidências independentes para a existência do meio – fisiológica e mecânica – e que

³ A lei do inverso do quadrado, a saber, é uma relação de proporcionalidade que é da forma: $F \propto 1/r^2$, isto é, a “força” irá diminuir com o quadrado da distância entre os dois corpos interagentes. Um exemplo conhecido desta relação de proporcionalidade é a lei da gravitação universal de Newton.

⁴ N.T.: “deepminded philosopher”

houvesse uma harmonia de propriedades essenciais envolvidas⁵. Nada menos que a prova real da velocidade finita do som convenceria os preconceituosos.

{308}

Agora, embora exista, indubitavelmente, uma grande diferença entre a transmissão do som e distúrbios elétricos, há uma semelhança suficientemente ampla para se fazer com que o caso suposto acima seja análogo ao que realmente acontece na ciência do eletromagnetismo. Há condutores e não-condutores, ou isolantes, e como a velocidade finita de propagação nos espaços não-condutores fora dos condutores era desconhecida, a atenção era quase toda concentrada nos condutores e num suposto fluido que deveria residir neles ou sobre eles, e se mover sobre eles. E a influência sobre condutores distantes era atribuída à ação a distância instantânea, ignorando a ação intermediada. Novamente, um filósofo muito inteligente elaborou uma teoria para explicar estas ações por ação intermediada de um meio transmitindo a uma velocidade finita⁶. Mas, ao fazê-lo, ele utilizou o mesmo meio cuja existência já havia evidência, isto é, o éter luminífero⁷, e apontou as consistências das propriedades essenciais requeridas nos dois casos, e que sua teoria eletromagnética fez até uma teoria da luz muito melhor do que a antiga, ainda que suas visões não se espalharam rapidamente. As antigas visões persistiram apesar da probabilidade intrínseca da nova, e apesar da grande quantidade de evidências em apoio à visão de algum meio fora dos condutores, e que podem estar dentro também, mas não particularmente conduzindo a matéria propriamente dita, estava essencialmente relacionado aos fenômenos elétricos⁸. O valor e a validade das evidências variam de acordo com o estado da mente do julgador. Para aqueles que levavam a teoria de Maxwell a sério, os [argumentos] a favor eram esmagadores; outros não acreditavam nela nem um pouco. Estou, no entanto, inclinado a pensar que teria prevalecido antes, por muito tempo, mesmo sem evidência direta de velocidade finita por perto. Era simplesmente uma

⁵ Provavelmente, Heaviside está fazendo uma analogia com o fato de que a teoria de Maxwell demorou a ser aceita. Na época, os conceitos maxwellianos eram considerados desajeitados e confusos. (HUNT, 2015).

⁶ Aqui Heaviside se refere, de fato, a Maxwell. Além do que foi dito na nota anterior, vale destacar também, que em 1879, quando Maxwell morreu, apenas poucos de seus contemporâneos haviam sido convencidos de sua teoria (HUNT, 2015).

⁷ Maxwell desenvolveu toda a sua teoria levando em consideração o éter luminífero como agente intermediário da interação, porém, hoje em dia, as interações são estudadas como se o vácuo fosse o meio de interação física, conforme apontado por Gardelli (2004).

⁸ O princípio que norteou a revisão da teoria maxwelliana foi o conceito do fluxo de energia. A ideia de energia se movendo através do campo eletromagnético foi formulada primeiramente por John Henry Poynting (1852-1914), no fim de 1883. Heaviside, de maneira independente, também postulou este princípio meses mais tarde (HUNT, 2015).

questão de tempo. Mas a prova experimental da velocidade finita de transmissão estava próxima, e a influência muito lenta do pensamento teórico dos conservadores foi reforçada pelo apelo do senso comum dos fatos⁹. Agora é um fato que as ondas eletromagnéticas se propagam fora dos condutores assim como as ondas sonoras se propagam fora de corpos vibrantes. É uma inferência científica legítima que há um meio

{309}

para fazê-lo tanto em um caso como no outro, e há evidência independente a favor de ambos os meios, ar para o som e éter para as perturbações elétricas. Também é muito provável agora que as vibrações da luz nada mais são que vibrações eletromagnéticas muito rápidas, que eu penso que essa visão prevalecerá inteiramente, mesmo que a lacuna que existe entre as vibrações hertzianas e as vibrações da luz não seja preenchida experimentalmente pela falta de aparelhos adequados – desde que alguma descoberta completamente nova de caráter imprevisto não seja feita que vá refutar a possibilidade da identidade assumida.

Agora, a questão imediata é como propagar um conhecimento sobre a teoria das ondas eletromagnéticas¹⁰. Se pudéssemos assumir que o leitor tivesse tido um bom treinamento matemático, isso facilitaria muito o assunto. Por outro lado, dificilmente será útil tentar fazê-lo para aqueles que não tenham conhecimento matemático – menos ainda para aqueles agressores anti-matemáticos da teoria da propagação de ondas de perturbações elétricas que mostram claramente que eles sequer sabem de forma inteligível o que uma onda significa, e o que sua existência implica. Mas entre os dois, eu acho que é possível fazer um bom acordo no modo de propagação por meio de uma exposição detalhada da teoria das ondas planas, especialmente nos dielétricos. Com o uso de ondas planas, a complexidade matemática das ondas em geral desaparece em grande medida, e a álgebra comum pode ser substituída largamente pela análise que ocorre em casos mais avançados. A maioria das propriedades essenciais e ideias podem ser assimiladas por um

⁹ Aqui, por “conservadores” Heaviside se refere àqueles cientistas que custavam a aceitar a ideia de que as interações físicas na eletricidade e no magnetismo fossem resultado direto da interação através de um meio material entre os corpos. Isto é, para Heaviside, acreditar em uma ação a distância na eletricidade e no magnetismo seria uma ideia conservadora.

¹⁰ O objetivo de Heaviside era, declaradamente, ensinar os princípios do eletromagnetismo de Maxwell da maneira mais clara e simples que fosse capaz. Hoje em dia o tratamento vetorial é utilizado quando se estuda eletromagnetismo. Este tratamento é devido, principalmente, aos esforços de Heaviside (HUNT, 2015). Esta preocupação em facilitar a compreensão da teoria eletromagnética pode ser notada em seus artigos, compilados na obra *Electrical Papers* (HEAVISIDE, 1892) e no terceiro capítulo do livro *Electromagnetic Theory* (HEAVISIDE, 1950).

leitor pensante que não é avançado em sua matemática, e o que está além dele, ele pode pular. Além disso, o próprio tratamento das ondas planas é a melhor preliminar para casos mais gerais.

Os problemas que se apresentam por limitação artificial às ondas planas são muitas vezes de natureza abstrata. Há, entretanto, algumas exceções importantes; sendo a mais notável aquela da propagação ao longo de fios retos, cuja a teoria é essencialmente a das ondas planas, modificadas pela resistência dos fios. Antes, entretanto, de proceder para os detalhes das ondas planas, que constituirão o tema deste capítulo (embora seja desnecessário excluir completamente os assuntos conexos), será desejável preparar a mente para um esboço de algumas noções gerais sobre ondas

{310}

eletromagnéticas, independente do tipo preciso dela.

**Anexo B – *Action at a Distance* versus *Intermediate Agency*.
Contrast of New with Old Views about Electricity, de Oliver
Heaviside**

In: HEAVISIDE, Oliver. **Electromagnetic Theory** – Complete and unabridged edition of Volume I, Volume II, and Volume III with a critical and historical introduction by Ernst Weber. New York: Dover Publications, 1950.

{306}¹

Theory of the electromagnetic plane waves

Action at a Distance *versus* Intermediate Agency. Contrast of New with Old Views about Electricity

It has often been observed that the universe is in an unstable condition. Nothing is still. Nor can we keep motion, once produced, to a particular quantity of matter. It is diffused or otherwise transferred to other matter, either immediately or eventually. The same fact is observed in the moral and intellectual worlds as in the material, this only concerns us so far as to say that it underlies the communication of knowledge to others when the spirit moves, even though the task be of a thankless nature.

The laws by which motions, or phenomena which ultimately depend upon motion are transferred, naturally form an important subject of study by physicists. There are two extreme main views concerning the process. There is the theory of instantaneous action at a distance between different bodies without an intervening medium; and on the other hand there is the theory of propagation in time through and by means of an intervening medium. In the latter case the distant bodies do not really act upon on another, but only seem to do so. They really act on the medium directly, and between the two are action between contiguous parts of the medium itself. But in the former case the idea of a medium does not enter at all. We may, however, somewhat, modify the view so that action, though seemingly instantaneous and direct, does take place through an intervening medium, the speed of transmission bring so great as to be beyond recognition. Thus, the two

{307}

ideas of direct action, and through a yielding medium, may be somewhat [sic] harmonised, by being made extreme cases of one theory. For example, if we know that

¹ Os números entre chaves ({}) representam a paginação original do primeiro capítulo do *Electromagnetic Theory*, assim como mostrado em Heaviside (1950).

there *is* a yielding medium and a finite speed, but that in a certain case under examination the influence of the yielding is insensible, then we may practically assume the speed to be infinite. But although this comes to the same thing as action at a distance, we need not go further and do away with the medium altogether.

There is another way of regarding the matter. We may explain the propagation in time through a medium by actions at a distance. But this is useless as an explanation, being at best merely the expression of a mathematical equivalence.

Now consider the transmission of sound. This consists, physically, of vibratory motions of matter, and is transmitted by waves in the air and in the bodies immersed in it. The speed through air is quite small, so small that it could not even escape the notice of the ancients, who were, on the whole, decidedly unscientific in their mental attitude towards natural phenomena. Suppose, however that the speed of transmission of sound through air was a large multiple of what it is, so that the idea of a finite speed, or of speed at all, did not present itself. We should then have the main facts before us, that material bodies could vibrate according to certain laws, and that they could, moreover, set distant bodies vibrating. This would be the introduction of vibrations, and it might be explained, in the absence of better knowledge, by means of action at a distance of matter upon matter, ultimately resolvable into some form of the inverse square law, not because there is anything essentially acoustical about it, but because of the properties of space. Furthermore, we should naturally be always associating sound with the bodies bounded by the air, but never with the air itself, which would not come into the theory. A deep-minded philosopher, who should explain matters in terms of an intervening medium, might not find his views be readily accepted, even though he pointed out independent evidence for the existence of his medium – physiological and mechanical – and that there was a harmony of essential properties entailed. Nothing short of actual proof of the finite speed of sound would convince the prejudiced.

{308}

Now, although there is undoubtedly great difference in detail between the transmission of sound and of electrical disturbances, yet there is sufficient resemblance broadly to make the above suppositional case analogous to what has actually happened in the science of electromagnetism. There were conductors and non-conductors, or insulators, and since the finite speed of propagation in the non-conducting space outside

conductors was unknown, attention was almost entirely concentrated upon the conductors and a suppositional fluid which was supposed to reside upon or in them, and to move about upon. And the influence on distant conductors was attributed to instantaneous action at a distance, ignoring an intermediate agency. Again, a very deep-minded philosopher elaborated a theory to explain these action by intermediate agency of a yielding medium transmitting at finite speed. But although in doing so he utilized the same medium for whose existence there was already independent evidence, viz., the luminiferous ether, and pointed out the consistency of the essential properties required in the two cases, and that his electromagnetic theory made even a far better theory of light than the old, yet his views did not spread very rapidly. The old views persisted in spite of the intrinsic probability of the new, and in spite of the large amount of evidence in support of the view that some medium outside conductors, and it may be also inside them as well, but not particularly conducting matter itself, was essentially concerned in the electrical phenomena. The value and validity of evidence varies according to the state of mind of the judge. To some who had seriously Maxwell's theory the in its favour was overwhelming; others did not believe in it a bit. I am, nevertheless, inclined to think that it would have prevailed before very long, even had no direct evidence of finite velocity been forthcoming. It was simply a question of time. But the experimental proof of the finite speed of transmission was forthcoming, and the very slow influence of theoretical reasoning of conservative minds was enforced by the common-sense appeal to facts. It is now as much a fact that electromagnetic waves propagated outside conductors as the sound waves are propagated outside vibrating bodies. It is as legitimate a scientific inference that there is a medium

{309}

to do it in one case as in the other, and there is independent evidence in favour of both media, air for sound and ether for electrical disturbances. It is also so excessively probable now that light vibrations are themselves nothing more than very rapid electromagnetic vibrations, that I think this view will fully prevail, even if the gap that exists between Hertzian and light vibrations is not filled up experimentally through want of proper appliances – provided some quite new discovery of an unanticipated character is not made that will disprove the possibility of the assumed identity.

Now, the immediate question here is how to propagate a knowledge of the theory of electromagnetic waves. If we could assume the reader to have had a good mathematical

training, that would be greatly ease matters. On the other hand, it is hardly any use trying to do it for those who have no mathematical knowledge – least of all for those anti-mathematical attackers of the theory of the wave propagation of electrical disturbances who show plainly that they do not even know intelligibly what a wave means, and what is implied by its existence. But, between the two, I think it is possible to do a good deal in the way of propagation by means of a detailed exposition of the theory of plane waves, especially in dielectrics. By the use of plane waves, the mathematical complexity of waves in general in a great measure disappears, and common algebra may be largely substituted for the analysis which occurs in more advanced cases. Most of the essential properties and ideas may be assimilated by a thinking reader who is not advanced in his mathematics, and what is beyond him he can skip. Besides this, the treatment of plane waves is itself the best preliminary to more general cases.

The problems that present themselves by artificial limitation to plane waves are often of an abstract nature. There are, however, some important exceptions; the most notable being that of propagation along straight wires, of which the theory is essentially that of plane waves, modified by the resistance of the wires. Before, however, proceeding to the details of plane waves, which will form the subject of this chapter (although it will be needless to altogether exclude connected matters), it will be desirable to prepare the mind by an outline of some general notions concerning electromagnetic

{310}

waves, irrespective of their precise type.

Anexo C – Textos complementares para a sequência didática

James Clerk Maxwell:

Texto Complementar I:

Tem sido feito um grande progresso na ciência elétrica, principalmente na Alemanha, pelos cultivadores da teoria de ação a distância. As valiosas medições elétricas de W. Weber são interpretadas por ele de acordo com sua teoria, e a especulação eletromagnética que foi originada por Gauss, e continuada por Weber, Riemann, J. e C. Neumann, Lorenz, etc., está baseada na teoria de ação a distância, mas dependendo ou diretamente da velocidade relativa das partículas, ou da propagação gradual de alguma coisa, seja potencial ou força, de uma partícula a outra. O grande sucesso que esses célebres homens alcançaram na aplicação da matemática aos fenômenos elétricos, fornece, como é natural, peso adicional às suas especulações teóricas, de tal forma que aqueles que, como estudantes da eletricidade, se voltam em direção a eles como as maiores autoridades em eletricidade matemática, provavelmente assimilariam, junto com seus métodos matemáticos, suas hipóteses físicas.

[...]

De um ponto de vista filosófico, além disso, é extremamente importante que os dois métodos sejam comparados, ambos os quais tiveram sucesso na explicação dos principais fenômenos eletromagnéticos, ambos os quais tentaram explicar a propagação da luz como um fenômeno eletromagnético e de fato calcularam sua velocidade, enquanto que ao mesmo tempo as concepções fundamentais sobre o que acontece, assim como a maioria das concepções secundárias das quantidades envolvidas, são radicalmente diferentes¹ (MAXWELL, 1954a, p. x-xi, tradução nossa).

Michael Faraday:

¹ No original, "Great progress has been made in electrical science, chiefly in Germany, by cultivators of the theory of action at a distance. The valuable electrical measurements of W. Weber are interpreted by him according to this theory, and the electromagnetic speculation -which was originated by Gauss, and carried on by Weber, Riemann, J. and C. Neumann, Lorenz, &c., is founded on the theory of action at a distance, but depending either directly on the relative velocity of the particles, or on the gradual propagation of something, whether potential or force, from the one particle to the other. The great success which these eminent men have attained in the application of mathematics to electrical phenomena, gives, as is natural, additional weight to their theoretical speculations, so that those who, as students of electricity, turn to them as the greatest authorities in mathematical electricity, would probably imbibe, along with their mathematical methods, their physical hypotheses.

[...]

In a philosophical point of view, moreover, it is exceedingly important that two methods should be compared, both of which have succeeded in explaining the principal electromagnetic phenomena, and both of which have attempted to explain the propagation of light as an electromagnetic phenomenon and have actually calculated its velocity, while at the same time the fundamental conceptions of what actually takes place, as well as most of the secondary conceptions of the quantities concerned, are radically different." (MAXWELL, 1954a, p. x-xi).

Texto Complementar II:

Ao dispor numerosos fios [isto é, agulhas] em círculos, e outras direções em torno e ao redor do fio de descarga, encontrou-se depois da descarga que tudo estava magnetizado, e os polos [estavam] exatamente como expressos anteriormente²; de modo que o polo norte de uma agulha estava apontando para o polo sul da seguinte, e em uma relação constante ao longo da descarga (FARADAY, 1821, p. 284 *apud* GARDELLI, 2014, p. 126).

Oliver Heaviside:

Texto complementar III

Foi afirmado, em não menor autoridade do que o grande Maxwell, que a lei de força entre um par de elementos de corrente de Ampère é a fórmula cardinal da eletrodinâmica. Se é assim, não deveríamos usá-la sempre? Nós *alguma vez* a usamos? Maxwell a utilizou no seu Tratado [*A Treatise on Electricity & Magnetism*]? Certamente há algum erro. Isto não significa que eu quero roubar de Ampère o crédito por ser o pai da eletrodinâmica. Eu só transferiria o nome de fórmula

cardinal para outra [fórmula], devido a ele [Ampère], expressando a força mecânica sobre um elemento [de corrente] de um condutor suportando [no sentido de conter] a corrente em qualquer campo magnético: o produto vetorial entre corrente e indução. Há algo real sobre isso. Não é como sua força [Força de Ampère] entre um par de elementos abertos; isso é fundamental; e, como todos sabem, ainda está em uso, efetivamente ou virtualmente (por meio da força eletromotriz) por teóricos ou experimentais³ (HEAVISIDE, 1894, p. 501-502, tradução nossa).

André Koch Torres de Assis:

² Aqui Faraday se refere a experimentos realizados com agulhas de bússolas e fios ligados a pilhas.

³ No original, "It has been stated, on no less authority than that of the great Maxwell, that Ampere's law of force between a pair of current-elements is the cardinal formula of electrodynamics. If so, should we not be always using it? Do we *ever* use it? Did Maxwell, in his treatise? Surely there is some mistake. I do not in the least mean to rob Ampere of the credit of being the father of electrodynamics ; I would only transfer the name of cardinal formula to another due to him, expressing the mechanical force on an element of a conductor supporting current in any magnetic field; the vector product of current and induction. There is something real about it; it is not like his force between a pair of unclosed elements; it is fundamental ; and, as everybody knows, it is in continual use, either actually or virtually (through electromotive force) both by theorists and practitioners. (HEAVISIDE, 1894. p. 501-502)

Texto complementar IV

[...] existem muitos aspectos positivos relacionados com a ação a distância: sua simplicidade, os poderosos resultados que são obtidos com ela no eletromagnetismo e na gravitação, a implementação do princípio de Mach, o fato de que a primeira equação de onda descrevendo perturbações eletromagnéticas foi obtida a partir da ação a distância antes de Maxwell etc⁴ (ASSIS, 1999, p. 55, tradução nossa).

⁴ No original, “[...] that are many positive aspects related to action at a distance: its simplicity, the powerful results which are obtained with it in electromagnetism and gravitation, the implementation of Mach’s principle, the fact that the first wave equation describing the propagation of electromagnetic disturbances was obtained with action at a distance laws prior to Maxwell etc” (ASSIS, 1999, p. 55).