

Uma análise do desenvolvimento do conceito de campo em livros didáticos pela perspectiva da epistemologia de Ludwik Fleck

Aurélio Bianco Pena¹, Cibelle Celestino Silva²

Resumo

Com base na epistemologia do sociólogo polonês Ludwik Fleck, que utiliza diferentes categorias para a comunicação científica (periódicos, manuais, livros didáticos e ciência popular), analisamos como o conceito de campo eletromagnético é apresentado em obras seminais de diferentes períodos desde o *Experimental researches in electricity* (1832), de Michael Faraday, os desdobramentos no *A Treatise on electricity and magnetism* (1873), de James Maxwell, e, finalmente, como a representação ocorre em livros didáticos como *The electromagnetic field* (1929), de Max Mason e Warren Weaver, *The Feynman lectures on physics vol II* (1964), de Richard Feynman, e a última edição de *Introduction to electrodynamics 4ed.* (1981/2017), de David Griffiths. Constatou-se que há elementos de compreensão conceitual que se perdem na comunicação científica, consoante os seus propósitos. Também se discute como tais mudanças afetam a formação de cientistas.

Palavras-chave: História da física. Campo elétrico. Ludwik Fleck. Comunicação científica.

Recebido em: 30/09/2023; Aceito em: 01/12/2024

<https://doi.org/10.5335/rbecm.v7i2.15111>

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

ISSN: 2595-7376

¹ Sou Bacharel em Física (2020) e licenciado em Ciências Exatas com habilitação em física (2023), Mestre em Ciências (2024) pelo Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo (IFSC-USP). Atualmente sou doutorando do Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências (PIEC-USP). E-mail: aurelio.pena@usp.br

² Sou docente do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo, pesquisadora nas áreas de história da ciência e ensino de ciências e bolsista produtividade em pesquisa nível do CNPq, processo #312748/2018-3. E-mail: cibelle@ifsc.usp.br

Introdução

Conceitos presentes em livros e manuais didáticos adquirem, ao longo do processo de consolidação de um campo de conhecimento formulações que geralmente ignoram nuances conceituais, debates e dificuldades de interpretação que ocorreram ao longo do tempo. Além disso, a representação de conceitos científicos toma formas diferentes a depender de diversos fatores tais como os objetivos da comunicação (sejam eles desenvolver um campo do conhecimento, angariar recursos para pesquisa, comunicar resultados ou ensinar); o meio pelo qual ela é publicada (seja um periódico especializado, um manual, livro didático³ ou um artigo de divulgação científica); o público alvo; e o período histórico no qual o material foi produzido.

Mas afinal, como conceitos presentes em livros didáticos mudam com o decorrer do tempo? Qual a influência dos meios de publicação na formulação conceitual, e o que se perde do ponto de vista conceitual nas abordagens de livros didáticos usuais em cursos de formação de futuros cientistas e professores conforme uma área de conhecimento se consolida? A epistemologia do sociólogo polonês Ludwik Fleck (1896 - 1961), presente, principalmente, no livro *Gênese e Desenvolvimento de um Fato Científico* (FLECK, 1935/2010) fornece um referencial teórico útil para responder a essas questões com base em dois conceitos fundamentais: estilo de pensamento, *Denkstil*, que se refere à forma com a qual cientistas de um coletivo entendem e abordam os fenômenos naturais; e coletivo de

³ De acordo com a epistemologia fleckiana, manual é uma obra que sistematiza o conhecimento que está disperso em uma série de artigos, organiza e amplia os saberes dispersos, fundamentando a pesquisa e o ensino posteriores, já o livro didático tem o papel de introduzir um aprendiz em um determinado estilo de pensamento, ou seja, ensinar ao aprendiz uma forma de ver o mundo (*Gestalt*). Na epistemologia de Thomas Kuhn (1922-1996) o manual assume o papel de consolidação de um paradigma, de registro do resultado, já estável, de revoluções passadas. Já o livro didático tem o papel de introduzir o aprendiz dentro do paradigma já consolidado, ou seja, evidencia a tradição corrente da ciência normal e ensina ao aprendiz uma forma de abordar os problemas (KUHN, 1962).

pensamento, *Denkkollektiv*, que é a comunidade de cientistas que troca ideias e compartilha um estilo de pensamento. Fleck também descreve o que ele chama de tráfego de pensamentos e ideias entre os diferentes coletivos, no qual ocorrem mudanças na formulação e representação dos conceitos.

O polonês defende que a consolidação de um novo conceito passa pela formação de novos aprendizes em um estilo de pensamento e isso depende dos materiais formativos, como manuais e livros didáticos. Os conceitos, teorias e práticas compartilhados por especialistas de um coletivo são apresentados à comunidade científica na chamada ciência dos periódicos que é uma expressão provisória, pessoal e fragmentada do conhecimento de uma determinada fronteira. Há também a ciência dos manuais, uma expressão sistemática dos conhecimentos consolidados no coletivo; e a ciência do livro didático no qual o estilo de pensamento, conceitos, teorias e experimentos exemplares são apresentados para os aprendizes com a intenção de iniciá-los em um estilo de pensamento coletivo, normalmente o hegemônico em uma comunidade.

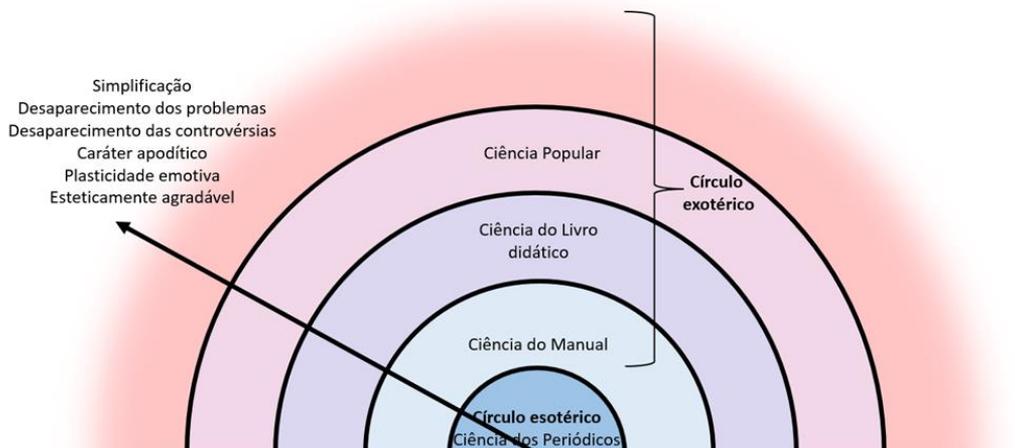
De acordo com Fleck, a formação do aprendiz⁴ tem um papel central na perpetuação de um estilo de pensamento, pois é na formação inicial que o pupilo entra em contato com as nuances de uma forma (*Gestalt*) específica de perceber o mundo; ou seja, aprende a ver a forma estilizada da natureza que é cultivada pelo coletivo de pensamento. A aprendizagem, portanto, é um ato coercitivo do coletivo sobre o aprendiz:

“existe um tempo de aprendizagem durante o qual acontece uma sugestão puramente autoritária de ideias, que não pode ser substituída por uma estrutura ‘universalmente racional’. (...) Qualquer introdução didática, portanto, é literalmente uma ‘condução-para-dentro’, uma suave coação” (FLECK, 1935/2010,

⁴ Aprendiz, nesse contexto, representa o cientista em formação. Em nosso sistema de ensino seria uma pessoa começando a fazer parte de um grupo de pesquisa, encarregando-se de estudar as obras essenciais e passar a integrar o campo de pesquisa, ou seja, a aprender o estilo.

A iniciação de um aprendiz em uma determinada área, isto é, a introdução do pupilo em um estilo de pensamento coletivo, compartilhado por uma comunidade, é função dos manuais e dos livros didáticos, em conjunto com reuniões e conversas com especialistas do campo (seja em grupos de pesquisa, congressos, seminários, etc.). Além destes, Fleck também discute as diferenças entre a ciência dos periódicos e a ciência popular, que ocupariam as extremidades de um espectro, como ilustrado na figura 1.

Figura 1: Expressão do conhecimento científico baseado na estrutura de Fleck.



Fonte:elaborada pelos autores.

A **ciência dos periódicos** é a expressão mais especializada possível que se pode encontrar fora do espaço de trabalho do cientista, é uma expressão provisória, pessoal e fragmentada. Representa o trabalho efetivo da vanguarda, ou seja, as muitas tentativas dos especialistas de avançar em um determinado campo de pesquisa. Fleck compara essa forma de ciência aos batedores (vanguarda) de um exército: eles são errantes, tomam diversas direções diferentes e apontam para uma direção geral, mas não para um caminho específico.

Nessa analogia, o exército principal é a **ciência dos manuais**, uma

expressão sistemática, impessoal e autoritária da vanguarda do pensamento. Especialistas decidem, dentre as muitas sugestões de caminho, para onde o campo do conhecimento deve se desenvolver. Manuais não são compilados de periódicos – há uma organização e sistematização, de conhecimentos, que exibem a hegemonia de um coletivo de pensamento em uma área do saber.

Na tomada de decisão a respeito de qual caminho de vanguarda será escolhido, a ciência dos manuais define métodos, diretrizes de pesquisa, pesquisadores de destaque e retardatários na pesquisa científica:

“O plano, que determina a seleção e a composição [do manual], fornece então as diretrizes para a pesquisa posterior: decide o que deve ser considerado como conceito fundamental, quais métodos são chamados de louváveis, quais os rumos que são apresentados como promissores, quais os pesquisadores que merecem uma posição de destaque e quais deles simplesmente cairão no esquecimento. Tal plano é formado [...] na discussão entre especialistas” (FLECK, 1935/2010, p. 173).

A **ciência do livro didático** se afasta do grupo especializado que produz o conhecimento e, portanto, da vanguarda. Os saberes começam a ser simplificados e apresentados para o público geral de forma “esteticamente agradável, viva e ilustrativa; [...] a avaliação apodítica, a simples aprovação ou reprovação de determinados pontos de vista” (FLECK, 1935/2010, p. 166) é também característica desse tipo de expressão científica. O papel do livro didático é introduzir o leigo às características gerais de uma área do conhecimento.

Em um último estágio de simplificação, encontramos a **ciência popular**, o ápice da legitimação de uma área do conhecimento, estado no qual o saber parece óbvio, dado, como se não houvesse outra forma de ver o mundo senão aquela.

“A partir do saber especializado, surge o saber popular. Este se apresenta, graças à simplificação, ao seu caráter ilustrativo e apodítico, de uma forma segura, mais bem acabada e sólida. O

saber popular forma a opinião pública específica e a visão de mundo” (FLECK, 1935/2010, p. 166).

Indo a(o) campo

No presente artigo, trazemos um estudo das transformações do significado do conceito de campo eletromagnético no eletromagnetismo clássico utilizando como referencial teórico elementos da epistemologia de Fleck para analisar como o conceito de campo mudou desde suas versões preliminares, publicadas em periódicos e comunicações especializadas até sua eventual consolidação em grandes compilados e livros didáticos. Embora a palavra utilizada ao longo de cerca de 100 anos seja a mesma, seus significados são bastante distintos. Além disso, há também mudanças nos estilos da escrita científica ao longo do tempo que podem ser notada na análise que segue.

Toda pesquisa histórica exige um recorte⁵. Por isso, visando entender a formulação do conceito de campo elétrico e magnético nos diferentes níveis de comunicação científica propostos por Fleck, selecionamos livros e artigos que abordam as temáticas do eletromagnetismo nas categorias da comunicação científica periódicos, manuais e livros didáticos. No primeiro grupo está o *Experimental researches in electricity* (1832) de Michael Faraday (1791-1867); como manual selecionamos o *A treatise on electricity and magnetism* (1873) de James Maxwell (1831-1879); e como representantes dos livros didáticos no ensino superior, particularmente em cursos de bacharelado em física, as obras *The Electromagnetic Field* (1929) de Max Mason (1877-1961) e Warren Weaver (1894–1978), *The Feynman*

⁵ Não é objetivo deste trabalho estudar a história do conceito de campo eletromagnético. Sobre a história de estudos sobre eletricidade nos séculos XVII e XVIII ver HEILBRON 1979, 1981, COHEN 1994 e ASSIS 2010. Para estudos históricos sobre o conceito de campo ver WHITTAKER 1989, DARRIGOL 2000 e HESSE 2005.

lectures on physics vol II (1964) de Richard Feynman (1918-1988) e a última edição do *Introduction to electrodynamics 4ed.* (1981/2017) de David Griffiths (1942-).

Ciência dos periódicos

A ideia de curvas magnéticas ou linhas de força magnética ocorre nos trabalhos de Faraday pelo menos desde 1831⁶, todavia é apenas em 1845 que ele defende o conceito de campo puro, no qual cargas e correntes são conceitos secundários:

“**Vou definir** o significado que eu associo com alguns termos que utilizarei em algumas ocasiões: por *linha de força magnética*, ou *linha magnética de força*, ou *curva magnética*, **eu quero dizer** o exercício de força magnética que é exercido nas linhas usualmente chamadas de curvas magnéticas, que existem saindo e entrando em polos magnéticos ou formando círculos concêntricos ao redor de uma corrente elétrica. Por *linha de força elétrica* **quero dizer** a força exercida nas linhas conectando dois corpos, agindo entre si pelos princípios da indução eletrostática” (FARADAY, 1832, p. 595, negrito nosso; itálico no original).

Como é característico na ciência dos periódicos, ideias podem ser reformuladas e há incertezas que podem ou não ser expressas explicitamente. Em 1851 Faraday publica uma comunicação lida no ano anterior na *Royal Society* na qual define claramente o que ele entende sobre campo magnético:

“Qualquer porção de espaço atravessado por linhas de poder magnético, pode ser considerada um desses campos, e **provavelmente** não há espaço sem elas. A condição do campo pode variar em intensidade de poder de lugar para lugar, seja nas linhas ou do lado inverso delas” (FARADAY, 1832, p. 690, grifo nosso).

A natureza do campo é continuamente discutida nos trabalhos de

⁶ Artigo publicado junto ao *Experimental Researches in Electricity* (1832) na seção *First Series*, a partir da página 265 (FARADAY, 1832).

Faraday e notamos o reconhecimento de alguns problemas, como a forma com que a ação é transmitida de um corpo a outro:

“Como a força magnética é transferida entre os corpos ou pelo espaço, **nós não sabemos**, o resultado pode ser apenas ação a distância, como é o caso da gravidade; ou, por um agente intermediário, como é o caso da luz, calor, corrente elétrica e **(acredito eu)** ação elétrica estática. A ideia de fluidos magnéticos, aplicada por alguns, ou centros de ação magnética, não incluem aquele do último caso da transmissão [por um agente intermediário], a ideia de linhas de força inclui” (FARADAY, 1832, p. 759, grifo nosso).

Faraday reconhece a natureza tentativa de suas ideias, ao utilizar expressões como “provavelmente”, “nós não sabemos”, “acredito eu”, o que reforça a noção de que a ciência dos periódicos é uma ciência ainda não consolidada, diferente do que ocorre em manuais e livros didáticos. Os conteúdos estão abertos à discussão e à reformulação. No caso de Faraday (DIAS, 2004), não há uma omissão dos problemas e possíveis controvérsias, pelo contrário, o pesquisador as apresenta e se posiciona discutindo-as sem necessariamente adotar uma posição definitiva.

Como a expressão científica mais especializada, a linguagem da ciência dos periódicos, segundo Fleck, tem um caráter provisório, pessoal e fragmentado. Isso é evidente nos escritos de Faraday. Já o conceito de campo é construído em diversas comunicações à *Royal Society* e passa por mudanças na sua formulação evidenciando a efemeridade e a fragmentação do conceito. Por caráter pessoal, Fleck destaca as expressões em primeira pessoa, que eram mais comuns em trabalhos antigos do que na atualidade, quando existe um grande esforço retórico em transmitir a ideia de impessoalidade – e, portanto, de maior credibilidade – à ciência dos periódicos. Além disso, a expressão dos periódicos tem como característica a abertura a problemas e a indicação de possíveis caminhos para a pesquisa futura, ou seja, há o entendimento da expressão provisória do saber e de possíveis ramificações.

Manuais devem ser obras que fazem um mosaico de periódicos, apresentando o estado da ciência de vanguarda e avançando em alguns pontos, principalmente polindo arestas e resolvendo alguns problemas pontuais. Fleck entende que o manual atua na fundamentação de um estilo de pensamento, ou seja, uma obra dessa natureza é essencial para que um estilo particular ganhe abrangência e torne-se o estilo de pensamento hegemônico em um coletivo.

Posteriormente, Thomas Kuhn virá a considerar que o manual é uma obra que atua na consolidação de um paradigma, isto é, na definição de um programa de pesquisa para a ciência normal. No livro *Estrutura das Revoluções Científicas* (KUHN, 1962), Kuhn trata a obra de Maxwell como fundadora de um novo paradigma mecanicista na eletrodinâmica pautado na existência de um éter permeando todo o espaço.

“De início, o sucesso de um paradigma – seja a análise aristotélica do movimento, os cálculos ptolomaicos das posições planetárias, o emprego da balança por Lavoisier ou a matematização do campo eletromagnético por Maxwell – é, em grande parte, uma promessa de sucesso que pode ser descoberta em exemplos selecionados e ainda incompletos. A ciência normal consiste na atualização dessa promessa” (KUHN, 1962, p. 44).

O livro sobre teoria eletromagnética de Maxwell *A treatise on electricity and magnetism*, publicado em 1873, define o campo elétrico de forma simples e direta:

“O campo elétrico é a porção de espaço na vizinhança de corpos eletrizados, considerados com referência a fenômenos elétricos. Ele pode estar ocupado por ar ou outros corpos, ou pelo assim chamado, vácuo [...]. Se um corpo eletrizado for colocado em qualquer parte do campo eletromagnético, será feita nele uma força que vai depender, em geral, do formato do corpo e de sua carga” (MAXWELL, 1873, p.45).

É notável o tom assertivo na definição que não deixa espaço para

questionamentos; a obra tem pouca personalidade e expressa os conceitos de forma sistemática. Nota-se um esforço pela criação de diretrizes para a pesquisa posterior, já que o campo é utilizado como conceito fundamental ao longo da obra. Todavia, nesta ainda há discussões conceituais sobre a natureza do campo.

Como dito anteriormente, Maxwell e Faraday consideram o campo sendo como sendo estados de um éter. Essa forma de entender o campo eletromagnético se enfraquecerá paulatinamente ao longo das primeiras décadas do século XX com abandono do éter⁷. (WHITTAKER, 1989; (DARRIGOL, 2000 e SILVA, 2002).

A definição de Maxwell, apresentada na citação, é sintética e representa uma tentativa de construção de hegemonias dentro de uma comunidade científica. Segundo Fleck, o manual atua na consolidação hegemônica de um estilo de pensamento no coletivo. Nota-se que o estilo dos campos eletromagnéticos que se populariza nos trabalhos de Faraday se consolida no livro de Maxwell, que será utilizado por décadas como diretriz de pesquisa e como fonte de problemas e soluções exemplares (KUHN, 1962).

O livro *Treatise on electricity and magnetism* de Maxwell inaugura todo um programa de pesquisa que tem em seu cerne o conceito de campo como modificações do éter, o que está de acordo com a visão de Fleck sobre o papel do manual: estabelecer um mosaico bem articulado capaz de criar diretrizes para a pesquisa posterior, isto é, a consolidação de um estilo de pensamento hegemônico dentro do coletivo de pensamento dos pesquisadores de uma determinada área em um determinado período.

Ciência dos livros didáticos

⁷ O abandono do éter vai resultar em uma polissemia nas definições de campo feitas em livros didáticos publicados desde o final do século XIX (ASSIS, 2009).

Com o objetivo de avaliar a abordagem do conceito de campo em livros didáticos para o ensino superior, partimos da análise do livro *The Electromagnetic Field* de Max Mason e Warren Weaver publicado em 1928, obra que traz os fundamentos do eletromagnetismo em uma linguagem que busca ser introdutória para estudantes de final da graduação. Considerando o ano de publicação, a obra se enquadra em um momento no qual o éter não havia sido completamente abandonado e os autores se posicionam em relação a isso, introduzindo uma abordagem mais matemática, ou nas palavras dos autores: “O presente volume é uma introdução à teoria matemática do campo da eletrodinâmica, escrita com o objetivo de manter clara a relação entre o mecanismo matemático e a realidade física” (MASON, WEAVER, 1928, p. xii/xiii).

É importante apontar que o livro tem um grau de complexidade matemática e física maior do que os demais representantes dos livros didáticos para o mesmo público alvo, principalmente nos capítulos introdutórios. Considerando as características descritas por Fleck para esse nível de comunicação do conhecimento, é importante apontar que, pela proximidade histórica com os trabalhos de Einstein de 1905 e pelo conceito de éter não ter sido completamente abandonado nessa época, há uma contextualização histórica e uma análise conceitual mais profunda do que nos demais livros didáticos, todavia, mantendo algumas características semelhantes.

Na introdução, o livro faz um breve panorama da história da eletricidade até o momento num esforço de esclarecer o significado de campo, discutindo as questões envolvendo o éter e se posiciona ao lado de uma teoria eletromagnética sem o éter, entendendo que é possível construir uma teoria eletromagnética no vácuo, porém, mencionando o caráter histórico do conceito:

“A teoria de Maxwell ficou firmemente fixada na mente de cada

estudante de física. Falava-se tanto em linhas de força, tubos de força, tensões no meio e energia localizada que a fácil familiaridade com os termos começou a trazer consigo um senso de compreensão e realidade, e a curiosidade foi se esvaindo com o passar dos anos. A ideia de um meio cujo estado era expressado pelas equações do campo era fundamental para a teoria, e a ideia de ação à distância parecia manter apenas um interesse histórico” (MASON, WEAVER, 1928, p. xi).

Os autores passam a utilizar uma teoria de campo sem éter:

“Com o resultado negativo de todos os experimentos de arrasto de éter, a prova da covariância das equações de campo sob a transformação de Lorentz e a declaração da teoria da relatividade, o éter, como um conceito mecânico, desapareceu. A ele não foi deixado nem mesmo o papel de determinar um sistema de referência. A ideia do campo permaneceu, no entanto, como seu traço, e a teoria eletromagnética continuou sendo uma teoria de campo, quer o campo fosse pensado em termos de seus componentes com suas densidades de energia ou como um tensor mundial. (MASON, WEAVER, 1928, p. xi, xii).

No capítulo 4, os autores informam que o objetivo é apresentar métodos de solução e aplicações das equações do eletromagnetismo, sem discutir nuances ou mesmo aspectos obscuros dos conceitos da teoria:

“O restante do capítulo contém algumas das mais fundamentais aplicações delas, as equações do campo de Maxwell, e o método de resolver essas equações em termos de potenciais escalares e vetor (...) Os autores não pretendem entender esses conceitos, mas discuti-los da forma mais adequada possível. O mesmo vale para conceitos de tensão de Maxwell e momento eletromagnético” (MASON, WEAVER, 1928, p. 252).

O livro tampouco aborda o conceito de campo eletromagnético em suas duas primeiras partes, se esquivando dele por meio de uma abordagem matemática, apresenta a lei de Coulomb e realiza diversas análises com uma grandeza chama “intensidade eletrostática” no lugar de um campo, não define claramente o que é campo elétrico ou magnético até a terceira seção, na qual utilizada as equações de Maxwell e uma série de aplicações, exemplos e exercícios. A obra traz apenas uma breve discussão sobre a natureza do campo:

“Para uma grande escola de físicos, o estado do ‘campo’ em um dado ponto do espaço tem uma realidade definitiva e passível de descrição (uma realidade auxiliada por certas concepções mecânicas do éter), independentemente da natureza daquilo que está produzindo o ‘campo’. Ou seja, um valor dado de B em um ponto específico é considerado descritivo de alguma condição que ocorre naquele ponto, e a ênfase é tão direcionada para a importância dessa condição e sua descrição por meio de B que não se deve se preocupar particularmente com o que produziu o valor de B” (MASON, WEAVER, 1928, p. 256/7).

Breves discussões como essa aparecem ao longo da obra voltada para estudantes em estágios mais avançados da formação. A obra prioriza o ensino de aspectos matemáticos consolidados, métodos de solução das equações do eletromagnetismo, aplicação em problemas exemplares, e se exime de discutir profundamente aspectos conceitos como natureza do campo e de outras entidades da teoria. Nota-se, portanto, a intenção de introduzir os pupilos no estilo de pensamento que está se consolidando nas primeiras décadas do século XX, ensinando-os aspectos teóricos e metodológicos estabelecidos pelo coletivo de físicos que adotam a teoria eletromagnética baseada no conceito de campo sem a existência do éter.

Como membro do estilo de pensamento da teoria de campo, Richard Feynman, no segundo volume das *The Feynman lectures on physics* publicado em 1964, adota uma abordagem um pouco diferente dos livros didáticos tradicionais da época ao apresentar alguns aspectos conceituais da teoria eletromagnética como a natureza do campo. O autor define campo de uma forma bastante curiosa, como uma entidade matemática, desconsiderando sua realidade física. Embora não utilize equações para definir campo, Feynman o faz utilizando conceitos matemáticos:

“Queremos falar de campos elétricos e magnéticos em um ponto até quando não há nenhuma carga presente. (...) Seguindo essa ideia, nós associamos cada ponto (X, Y, Z) no espaço com dois vetores E e B , que podem variar no tempo. Os campos elétrico e magnético são, portanto, vistos como funções vetoriais de X, Y, Z e t [...] Há várias invenções para ajudar a mente a visualizar o comportamento dos campos. A mais correta é também a mais abstrata: nós simplesmente consideramos os campos como

funções matemáticas da posição e do tempo” (FEYNMAN, 1964, p. 1-4).

Posteriormente, ele dedica a seção “What are the fields” para discutir a natureza do campo e de suas múltiplas representações, relacionando algumas dificuldades de representações anteriores com argumentos pautados na relatividade. Feynman também comenta vantagens e desvantagens das abordagens mecanicistas ou de linhas do campo, apontando que o melhor caminho seria o de maior abstração:

“O melhor caminho é utilizar a ideia abstrata de campo. Isso é infelizmente abstrato, mas necessário. As tentativas de representar o campo elétrico como o movimento de algum tipo de engrenagem [como fez Maxwell] ou em termos de linhas [como fez Faraday], ou como tensões em algum meio [éter no caso de Maxwell] utilizaram muito mais do esforço dos físicos do que teria sido necessário para simplesmente conseguir as respostas certas sobre a eletrodinâmica” (FEYNMAN, 1964, p.1-9).

A citação acima expressa uma defesa do estilo de pensamento vigente na época que prioriza aplicações e enfoque matemáticos, reforçando implicitamente uma visão instrumentalista da física, em detrimento de busca por visualização ou interpretação mecânica (SILVA 2007) que só seriam possíveis com a manutenção de um meio, como o éter, numa abordagem que poderia ser considerada realista, mas que deixou de ser comum nos coletivos de físicos do século XX.

O livro *Introduction to electrodynamics* de David Griffiths, amplamente utilizado em cursos superiores atualmente, descreve o campo de forma indissociável das cargas e forças como uma sobreposição da lei de Coulomb:

Figura 1: Expressão do conhecimento científico baseado na estrutura de Fleck.

2.1.3 The Electric Field

If we have *several* point charges q_1, q_2, \dots, q_n , at distances r_1, r_2, \dots, r_n from Q , the total force on Q is evidently

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1 Q}{r_1^2} \hat{\mathbf{r}}_1 + \frac{q_2 Q}{r_2^2} \hat{\mathbf{r}}_2 + \dots \right) \\ &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1 \hat{\mathbf{r}}_1}{r_1^2} + \frac{q_2 \hat{\mathbf{r}}_2}{r_2^2} + \frac{q_3 \hat{\mathbf{r}}_3}{r_3^2} + \dots \right), \end{aligned}$$

or

$$\boxed{\mathbf{F} = QE}, \quad (2.3)$$

where

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i. \quad (2.4)$$

\mathbf{E} is called the **electric field** of the source charges.

Fonte:elaborada pelos autores.

Em um parágrafo posterior, Griffiths discorre sobre a natureza do campo:

“O que exatamente é o campo elétrico? Eu deliberadamente comecei com o que você pode chamar de interpretação mínima de \mathbf{E} , como um passo intermediário no cálculo de forças elétricas. Mas eu o encorajo a pensar no campo como uma entidade física ‘real’, preenchendo o espaço na vizinhança de uma carga elétrica. O próprio Maxwell passou a acreditar que o campo elétrico e magnético representavam tensões e deformações em um invisível éter gelatinoso primordial” (GRIFFITHS,1981/2017, p. 61).

Griffiths adota uma postura dúbia, ao associar o campo à força e carga ao mesmo tempo em que induz o considera como uma entidade real no espaço. Ao supostamente simplificar e instrumentalizar o conceito de campo, focando na análise matemática para que seja possível fazer cálculos, os autores dos livros didáticos para o nível superior deixam de considerar aspectos conceituais fundamentais da teoria eletromagnética. Entendemos que a matemática não é um elemento simplificador, pelo contrário, ela normalmente causa uma maior dificuldade para grande

parte dos pupilos em física. Todavia, entendemos que a matemática é um elemento estruturante da física (PIETROCOLA 2002), sendo, portanto, inerente às teorias físicas e deve estar presente na formação de cientistas e engenheiros que estudam a teoria eletromagnética.

É notável, nas abordagens dos três livros didáticos analisados acima, a ausência de uma discussão contextualizada a respeito da natureza do campo eletromagnético e à natureza do campo eletromagnético. Em todos há uma ênfase excessiva na discussão de relações matemáticas em detrimento de uma discussão conceitual. Isso não significa que a matemática não carregue significados físicos embutidos em seus entes⁸, mas que tais significados deveriam ser enfatizados para que os novos pupilos não tenham que significá-los por conta própria (quando o fazem).

No entanto, considerando elementos da epistemologia de Fleck na análise, é natural que seja assim, visto o papel dos livros didáticos em introduzir os novatos em um determinado estilo de pensamento compartilhado por uma comunidade. Neste caso específico, trata-se da comunidade de físicos que se estruturou desde meados do século XIX na Grã-Bretanha preocupada em matematizar e compreender os fenômenos eletromagnéticos pautada na noção do éter. Ao longo do século XX, a teoria eletromagnética se estabeleceu, porém, sendo transformada conceitualmente - com o abandono do éter - e também matematicamente - com a invenção e popularização do cálculo vetorial (SILVA 2002). O estabelecimento da teoria eletromagnética deu-se ao longo mais de meio século, tendo a contribuição de coletivos de pensamento formados em épocas distintas, mas que compartilham entre si a noção de ação eletromagnética como sendo intermediada por um campo, cujo significado

⁸ A matemática tem muitos papéis na física, entre eles estruturar as teorias e instrumentalizá-las, tem papéis heurísticos e outros. Para uma discussão contextualizada a respeito do papel da matemática na eletroestática consulte NARDI 2021.

mudou ao longo do tempo.

Considerações finais

A análise dos livros e artigos investigados mostra que, à medida que passamos da ciência dos periódicos para os manuais e posteriormente para os livros didáticos, algumas discussões de conceitos se perdem. Os manuais apresentam uma visão consolidada de um estilo de pensamento, e os conceitos tornam-se mais especializados e matematicamente orientados. O livro didático continua com essa tendência e adiciona o desaparecimento gradual de controvérsias e problemas; a formulação de livros de formação tende a ser ilustrativa e assertiva em relação ao que está certo ou errado, há pouco espaço para controvérsias e problemas da teoria.

Isso suscita a questão do que é perdido e quais discussões raramente chegam à sala de aula. A investigação mostra que aspectos e discussões importantes sobre a natureza do campo são suprimidas em prol de uma abordagem matemática e pouco discursiva dos conceitos, o que atua como um obstáculo a estudantes com menos afinidade matemática.

As obras de cunho didático para estudantes do nível superior analisadas evitam discussões conceituais aprofundadas e se limitam à abordagem matemática. Por exemplo, a aproximação contínua entre o conceito de campo com as cargas elétricas é uma constante, enquanto que o conceito de carga elétrica não era utilizado nas definições de manuais e periódicos especializados e é secundária na análise do *The electromagnetic field*, sendo um elemento da abordagem moderna do campo, como construído por Feynman e Griffiths.

Entendemos assim que a apresentação do conceito de campo nos livros didáticos modernos segue a caracterização de Fleck, ao reduzir e simplificar as discussões a respeito da natureza do conceito, considerado,

essencialmente, como um artifício matemático. Nas palavras de Griffiths “Eu não posso lhe dizer o que o campo elétrico é – apenas como o calcular e o que fazer com ele depois que o tiver [calculado]” (GRIFFITHS, 1981/2017, p. 61).

Como os livros analisados são frequentemente utilizados na formação de cientistas em cursos superiores, ou seja, na iniciação dos pupilos como diria Fleck, suas abordagens têm consequências na formação desses estudantes. A excessiva matematização funciona como uma via de mão dupla, por mais que simplifique o conceito físico ao reduzi-lo a um artefato matemático, também atua como uma barreira ao aprendizado, pois a matematização pode afastar pupilos que gostariam de entender os conceitos do eletromagnetismo e não apenas fazer cálculos.

Além disso a redução do conceito de campo a uma relação matemática entre força e carga, descaracterizando sua historicidade e sua formação gera lacunas na formação de futuros cientistas e professores, afinal, poucos alunos seriam capazes de discutir a natureza do campo após estudar as obras aqui consideradas como livros didáticos. Estas poderiam enfatizar o caráter profundo do conceito de campo, discutindo algumas das nuances teóricas que permeiam o próprio significado de campo e não simplesmente apontar uma forma correta de ver um conceito que é essencialmente polissêmico.

Analyzing the development of the field concept in textbooks according to the epistemology of Ludwik Fleck

Abstract

Based on the epistemology of the Polish sociologist Ludwik Fleck, who uses different categories for scientific communication (journals, manuals, textbooks, and popular science), we analyze how the concept of the electromagnetic field is presented in seminal works from

different periods, starting with Michael Faraday's *Experimental researches in electricity* (1832), the developments in James Maxwell's *A treatise on electricity and magnetism* (1873), and, finally how it is presented in textbooks such as *The Electromagnetic field* (1929) by Max Mason and Warren Weaver, *The Feynman lectures on physics vol II* (1964) by Richard Feynman, and the latest edition of *Introduction to electrodynamics 4ed.* (1981/2017) by David Griffiths. It is noted that elements of conceptual understanding are lost in scientific communication, depending on the purpose. It also discusses the implications of these changes for the training of scientists.

Keywords: History of physics. Electric field. Ludwik Fleck. Scientific communication.

Referências

ASSIS, André Koch Torres; RIBEIRO, J. E. A.; VANNUCCI, Álvaro. The field concepts of Faraday and Maxwell. ***Trends in Physics***, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 15-25, 2009.

ASSIS, André Koch Torres. ***Os fundamentos experimentais e históricos da eletricidade***. Montreal: C. Roy Keys Inc, 2010.

COHEN, Hendrik Floris. ***The scientific revolution: a historiographical inquiry***. Chicago: University of Chicago Press, 1994.

DARRIGOL, Olivier. ***Electrodynamics from Ampere to Einstein***. Oxford: Oxford University Press, 2003.

DIAS, Valéria Silva. ***Michael Faraday: subsídios para metodologia de trabalho experimental***. 2004. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Faculdade de Educação e Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.

FARADAY, Michael. ***Experimental researches in electricity***. In: GREAT BOOKS OF THE WESTERN WORLD. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952. v. 45, p. 257-866.

FEYNMAN, Richard Phillips; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. ***The Feynman lectures on physics***. Reading, MA: Addison-Wesley, 1971.

FLECK, Ludwik. ***Gênese e desenvolvimento de um fato científico: introdução à doutrina do estilo de pensamento e do coletivo de pensamento***. Trad. Georg Otte, Mariana Camilo de Oliveira. Belo Horizonte: Fabrefactum Editora, 2010.

GRIFFITHS, David Jeffrey. ***Introduction to electrodynamics***. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

HEILBRON, John Lewis. ***Electricity in the 17th and 18th centuries***. Los Angeles: University of California Press, 1979.

HEILBRON, John Lewis. The electrical field before Faraday. In: CANTOR, G. N.; HODGE, M. J. S. (ed.). ***Conceptions of ether: studies in the history of ether theories 1740-1900***. Cambridge: Cambridge University Press, 1981. p. 187-213.

HESSE, Mary. ***Forces and fields: the concept of action at a distance in the history of physics***. New York: Courier Corporation, 2005.

MAXWELL, James Clerk. *A treatise on electricity and magnetism*. 3. ed. Oxford: Clarendon Press, 1873.

NARDI, Lucas Marcelo Cavalari. ***A matematização da eletrostática no século XVIII: de rupturas epistemológicas a estilos de matematização***. 2021. Tese (Doutorado em Física) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

OLIVEIRA, Bernardo Jefferson de. Os circuitos de Fleck e a questão da popularização da ciência. In: CONDÊ, Mauro Lúcio Leitão (org.). ***Ludwik Fleck: estilos de pensamento na ciência***. Belo Horizonte: Fino Traço, 2012. p. 248-250.

SILVA, Cibelle Celestino. ***Da força ao tensor***: evolução do conceito físico e da representação matemática do campo eletromagnético. 2002. Tese (Doutorado em História da Ciência) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SILVA, Cibelle Celestino. The role of models and analogies in the electromagnetic theory: a historical case study. ***Science & Education***, Dordrecht, v. 16, n. 4, p. 835-848, 2007.

WHITTAKER, Edmund. ***A history of the theories of aether and electricity: vol. I: the classical theories; vol. II: the modern theories, 1900-1926***. New York: Courier Dover Publications, 1989.