

Uma abordagem ausubeliana para o ensino do eletromagnetismo na interpretação causal

An ausubelian approach for teaching electromagnetism in the causal interpretation

Ingrid de Sousa Rodrigues Duarte ¹, Antony Marco Mota Polito ^{2*}

¹ Secretaria de Educação do Distrito Federal - CEMAB, QSA 03/05 AE 01 - CEP 72.015-050 - Taguatinga, DF, Brasil.

² Instituto de Física, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro - CEP 70910-900 - Brasília, DF, Brasil.

*E-mail: antony@unb.br

Recibido el 26 de septiembre de 2023 | Aceptado el 5 de noviembre de 2023

Resumo

Apresentamos as principais ideias associadas com uma proposta de abordagem ausubeliana para o ensino integrado da fenomenologia e das leis do eletromagnetismo, enfatizando sua interpretação causal. Desenvolve-se, progressivamente, os conceitos de eletrostática, de magnetostática, de eletrodinâmica, de campo eletromagnético e de ondas eletromagnéticas, assumindo o papel central do conceito de causalidade. Por hipótese, o princípio de causalidade deve funcionar como uma chave ausubeliana que, atuando como parte de (potenciais) estruturas subsunçoras, supomos ser, nesse contexto, efetiva para alcançar o que Ausubel entendia por aprendizagem significativa. Para tanto, propomos a utilização de um conjunto de instrumentos didáticos, elaborados em torno de quatro experimentos: o gerador de Van de Graaff/eletroscópio, o eletroímã/magnetoscópio, o experimento de Faraday e a bobina de Tesla. Esses experimentos devem estar representados pelos seus respectivos diagramas conceituais experimentais. Esses, por sua vez, devem ser construídos com base em diagramas conceituais teóricos, desenvolvidos para estruturar o eletromagnetismo de acordo com a interpretação causal. Partes específicas desses instrumentos didáticos podem também ser interpretadas como organizadores avançados, a depender dos objetivos e das circunstâncias em que forem utilizados.

Palavras-chave: Teoria ausubeliana; Interpretação causal do eletromagnetismo; Bobina de Tesla; Organizadores avançados.

Abstract

We present the main ideas associated with a proposed Ausubelian approach to teaching of the phenomenology and laws of electromagnetism, emphasizing their causal interpretation. The concepts of electrostatics, magnetostatics, electrodynamics, electromagnetic field and electromagnetic waves are progressively developed, assuming the central role of the concept of causality. By hypothesis, the principle of causality should function as an Ausubelian key which, acting as part of (potential) subsumption structures, we assume to be, in this context, effective in achieving what Ausubel understood as meaningful learning. To this end, we propose the use of a set of teaching instruments based on four experiments: the Van de Graaff generator/electroscope, the electromagnet/magnetoscope, the Faraday's experiment and the Tesla coil. These experiments should be represented by their respective experimental conceptual diagrams. These, in turn, should be constructed based on theoretical conceptual diagrams, developed to structure electromagnetism according to causal interpretation. Specific parts of these teaching instruments can also be interpreted as advance organizers, depending on the objectives and circumstances in which they be used.

Keywords: Ausubelian theory; Causal interpretation of electromagnetism; Tesla coil; Advance organizers.

I. INTRODUÇÃO

Diante das muitas dificuldades que o ensino de ciências enfrenta, professores têm sido cada vez mais instados a desenvolver recursos e estratégias com o objetivo de transformar a prática docente, despertar nos estudantes a curiosidade e o cuidado com a natureza, e incentivá-los a envolver-se com atividades de iniciação à pesquisa. Daí a busca por formas alternativas e/ou diferenciadas de atuação, sejam elas voltadas para a aprendizagem de temas técnicos, seja para auxiliar na formação geral de cidadãos. Uma dessas formas é lançar mão de abordagens prático-experimentais que sejam capazes de articular-se de forma suficientemente significativa com os conceitos científicos mais gerais. Essa maior articulação não é gratuita: o objetivo é precisamente tentar evitar que a experiência de aprendizagem venha a exaurir-se em si mesma e se torne rapidamente obliterada, sem produzir grandes transformações na forma como os estudantes veem o mundo.

É com base nessa ideia geral que apresentamos esse trabalho, voltado para a implementação de uma abordagem ausubeliana para o ensino do eletromagnetismo. A proposta envolve a utilização de experimentos como núcleos para a construção de instrumentos didáticos – o principal deles apresentando grande valor técnico, didático e histórico: a bobina de Tesla¹.

A bobina de Tesla é um conjunto de dois solenoides indutivamente acoplados que funcionam como um transformador ressonante e cuja operação permite gerar campos eletromagnéticos de elevada intensidade. É um dispositivo cuja riqueza conceitual e o potencial didáticos são enormes. Com efeito, é possível estudar, de forma plenamente integrada, todas as leis fundamentais e os fenômenos básicos do eletromagnetismo apenas com a bobina de Tesla – para além da pura pirotecnia de emissão de raios à qual está, na maior parte das vezes, exclusivamente associada.

Os instrumentos didáticos que apresentaremos são, de fato, conjuntos integrados, compostos não apenas pelos experimentos (e os fenômenos que pretendem reproduzir), mas, também, por um conjunto de estruturas conceituais teóricas (diagramas conceituais), por um conjunto de estruturas conceituais de interpretação dos experimentos, à luz da teoria (diagramas experimentais) e por um conjunto de esquemas técnicos de funcionamento dos equipamentos. Por razões de espaço, nesse trabalho, deixaremos de lado qualquer menção a esquemas técnicos para nos concentrarmos na relação entre os experimentos e os diagramas experimentais e conceituais.

A apresentação consistente da teoria eletromagnética clássica envolve a utilização de estruturas matemáticas que só podem estar plenamente à disposição de estudantes de cursos superiores. Porém, acreditamos que isso não é fator de inviabilização do uso dos instrumentos didáticos, porque a maior parte dos experimentos que deles fazem parte apresentam suficiente simplicidade (e flexibilidade) para que possam ser adaptados para o ensino em qualquer nível instrucional. Da mesma forma, os diagramas conceituais que deles fazem parte são suficientemente modulares e estratificados para poderem ser adaptados e simplificados na medida das necessidades didáticas envolvidas. A simplificação pode ir até ao extremo da eliminação das expressões matemáticas, sem o abandono do que consideramos ser o mais essencial, em uma abordagem ausubeliana: a estruturação hierárquica dos objetos conceituais que dão forma e sentido aos fenômenos físicos, por intermédio dos experimentos.

Com instrumentos didáticos estruturados, em torno de experimentos integradores, é possível fazer do ensino do eletromagnetismo algo que forneça real significado aos diversos fenômenos que estão sendo produzidos e observados. Não se supõe, contudo, que se deva contar apenas com experimentos e estruturas conceituais, tomados isoladamente. O que se busca é uma integração de todos eles no sentido de constituir um instrumento de ensino amplo e unificado.

Um instrumento de ensino comum são as sequências de aprendizagem. Elas podem ser utilizadas para articular os instrumentos didáticos entre si. Em particular, no presente caso, uma sequência de aprendizagem típica envolveria uma escalada, em estágios sucessivos, cujo objetivo seria seguir na direção de ganhar cada vez mais amplitude e generalidade conceituais, mas, também, detalhamento e especificidade. Essa escalada pode basear-se na ideia de uma espécie de “*montagem conceitual*” da bobina de Tesla, realizada a partir de três experimentos mais elementares: o gerador de Van de Graaff, o eletroímã e o experimento de Faraday (Duarte, 2019). Por razões de espaço, não nos concentraremos em apresentar uma sequência de aprendizagem específica. Nosso objetivo é, fundamentalmente, apresentar os instrumentos didáticos e mostrar o modo como podem ser articulados entre si.

A literatura sobre a construção, o funcionamento e a aplicação de indutores, em geral, e da bobina de Tesla, em particular, seja no âmbito técnico, seja no pedagógico, é relativamente extensa. Wheeler (1928) e Thompson (1999) apresentam fórmulas teóricas e semiempíricas para o cálculo da indutância e do número de espiras necessárias para sua construção. Tilbury (2008) possui um extenso livro dedicado exclusivamente a técnicas de construção de bobinas de Tesla. Laburú e Arruda (1991) e Villalba, Ferreira, Arriba, Nájera e Beléndez (2015) descrevem a construção de bobinas de Tesla, com fins didáticos. Chiquito e Lanciotti Jr. (2000) propõem o funcionamento e o projeto de uma

¹ O presente trabalho é fruto de aperfeiçoamento e reelaboração de muitas ideias originalmente propostas em um produto educacional, que foi elaborado no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade de Brasília (Duarte, 2019).

bobina de Tesla e, através de seu modelamento matemático, buscam explorar conceitos como a transferência de energia acumulada em capacitores e indutores, e, mais ainda, técnicas matemáticas associadas ao experimento para a geração, a transmissão e a recepção de ondas eletromagnéticas. Bruns (1992) propõe a construção de uma bobina de Tesla (de demonstração) de baixa voltagem, usando um relé fotovoltaico sólido para substituir o centelhador convencional. Skeldon, Grant e Scott (1997) propuseram a construção de uma bobina de Tesla que gerasse altas diferenças de potencial, para demonstrações em aulas e exposições científicas.

A principal novidade introduzida, aqui, tem a ver com uma mudança de perspectiva, na qual passamos a dar grande ênfase em explicações que partam de uma interpretação explicitamente causal das leis que regem o eletromagnetismo. Há dois motivos para isso. O primeiro motivo tem a ver com o fato de que as explicações causais são exatamente a forma pela qual se descreve os fenômenos naturais que se apresentam como processos. Ou seja, explicações causais são a forma pela qual histórias são narradas, de acordo com as quais eventos se sucedem, no tempo, em uma sequência de causas e de efeitos que vão de uma situação inicial até uma situação final. O segundo motivo tem a ver com o seu valor didático-pedagógico. De fato, o modo causal de se expressar sobre os fenômenos naturais e sociais, em geral, não é apenas um modo científico. Ele é, na verdade, o modo usual e cotidiano. É, portanto, o modo como os estudantes se expressam, e com o qual estão habituados, inclusive, em contextos que vão muito além dos fenômenos da natureza e constituem vários âmbitos da vida social. Daí o fato de acreditarmos que as explicações causais fornecem uma “*chave ausubeliana*” natural para o ensino das ciências, em geral, e do eletromagnetismo, em particular.

O trabalho está dividido em três seções. Na primeira seção, discorreremos sobre os potenciais subsunçores que são requeridos e apresentamos uma breve discussão sobre conceitos que permitem aplicar a interpretação causal, no eletromagnetismo, de modo consistente. Na segunda seção, vamos descrever os instrumentos didáticos que desenvolvemos, aplicando diretamente os conceitos da interpretação causal. Primeiramente, para estruturar a eletromagnetostática e a eletrodinâmica em termos de diagramas conceituais teóricos. Esses diagramas conceituais têm potencial para ser utilizados – a depender dos objetivos e da sequência de aprendizagem do qual fizerem parte – como organizadores avançados ausubelianos. Em segundo lugar, aplicando os diagramas conceituais teóricos para prover esquemas explicativos – na forma de diagramas experimentais – para cada um dos experimentos que constituem a parte nuclear dos instrumentos didáticos. Na terceira e última seção, faremos nossas considerações finais.

II. SUBSUNÇORES E CONCEITOS GERAIS ASSOCIADOS COM A INTERPRETAÇÃO CAUSAL

Os subsunçores requeridos para o ensino do eletromagnetismo clássico diferem em sofisticação, a depender do nível de aprendizagem em que o estudante se encontra. Contudo, seja qual for o nível, os subsunçores devem estar associados com as seguintes ideias e conceitos gerais, todas concernentes à física clássica e, em particular, à mecânica newtoniana e à teoria da gravitação newtoniana:

1. Sistema Físico: qualquer conjunto constituído por distribuições de matéria e por campos de interação.
2. Espaço e Tempo: o espaço geométrico tridimensional é o suporte para a existência dos sistemas físicos. O tempo é a dimensão que parametriza as mudanças de estado dos sistemas físicos e articula o conteúdo do princípio de causalidade.
3. Matéria, Partículas Materiais, Massa Inercial e Cargas: matéria é todo objeto físico que possui, necessariamente, como propriedade intrínseca, a massa inercial. Se a massa inercial se concentra em um ponto, tem-se uma partícula material. A matéria ordinária possui, eventualmente, outras propriedades intrínsecas, como cargas. As cargas devem cumprir duas funções: elas são fontes para os respectivos campos de interação associados e são o que permitem o acoplamento da matéria com esses campos de interação.
4. Campos de Interação: os campos de interação são objetos físicos que podem atuar sobre a matéria, por meio de forças, se a matéria possuir a carga específica que permite o seu mútuo acoplamento.
5. Forças: ações produzidas por um campo de interação sobre a matéria (na condição de acoplamento), de acordo com o postulado dinâmico da mecânica newtoniana.
6. Sistemas de Referência Inerciais: conjunto de coordenadas espaciais cartesianas ortogonais que descrevem os estados de movimento dos sistemas físicos, de acordo com o postulado dinâmico da mecânica newtoniana.
7. Estados de Movimento: o estado de movimento de um sistema físico é uma descrição instantânea de suas variáveis dinâmicas. A variável dinâmica associada com a matéria é o seu momento mecânico. As variáveis dinâmicas associadas aos campos de interação são a intensidade e a direção, em cada ponto do espaço, das acelerações produzidas pelas forças sobre a matéria, em proporção à razão entre massa inercial e carga.
8. Correntes: cargas em movimento em um determinado sistema de referência inercial.
9. Princípio de Causalidade: de acordo com o qual as leis dinâmicas são necessárias e suficientes para produzir uma, e apenas uma, história espaço-temporal, no interior de um sistema de referência inercial pré-fixado.

As ideias gerais expostas são condizentes com o que se considera ser o necessário e o suficiente para abordar o assunto do eletromagnetismo em nível introdutório – sem invocar, explicitamente, o contexto da relatividade especial.

No que se refere a esses potenciais subsunçores, a primeira ideia que queremos enfatizar é a diferenciação conceitual entre massa inercial e massa gravitacional. Essa é uma diferenciação importante, porque, para que os conceitos da mecânica newtoniana sirvam como subsunçores para os conceitos correlatos do eletromagnetismo, é fundamental perceber que massa gravitacional é a carga associada com a interação gravitacional e que massa inercial é um conceito diferente, associado com a lei dinâmica. Além disso, é importante enfatizar que a identidade entre as massas inercial e gravitacional não é uma necessidade lógica, mas, é um fato experimentalmente bem confirmado, com excelente precisão (Weinberg, 1972).

Quanto aos conceitos de espaço, de tempo e de sistemas de referência, é preciso tomar certas precauções. Muito embora a relatividade especial tenha introduzido a ideia de geometrização do tempo, o fato é que tempo e espaço são categorias de naturezas intrinsecamente diferentes. Essa distinção fica clara precisamente quando um sistema de referência é escolhido e o tempo revela-se como a estrutura de ordenação dos eventos que podem estar causalmente conectados (Weinberg, 1972; Maudlin, 2012).

Por outro lado, descrições causais de processos físicos requerem, necessariamente, duas coisas. Primeiramente, que se escolha um único sistema de referência (inercial), no contexto do qual os fenômenos são descritos. Isso é importante porque as descrições variam entre sistemas de referência distintos e, portanto, as histórias causais são sempre relativas aos sistemas de referência. Em segundo lugar, uma descrição causal requer que se interprete as equações dinâmicas – que são matematicamente expressas no interior de cada sistema de referência – como sendo as articuladoras das chamadas condições de suficiência para o princípio de causalidade (Maudlin, 2012; Savage, 2012; Kinsler, 2011, 2015, 2020).

Do ponto de vista da construção sistemática dos elementos de uma teoria que envolva interações entre matéria e campos, é interessante fazer duas distinções, no que se refere aos modos como a carga comparece nas leis da teoria. Essas distinções são importantes para a articulação consistente de uma interpretação causal.

A primeira distinção tem a ver com o fato de que há duas funções distintas e logicamente independentes que as cargas podem desempenhar. Por um lado, as cargas podem cumprir a função que denominaremos de função-fonte. É na função-fonte que ela comparece, por exemplo, nas equações de Maxwell. Por outro lado, as cargas podem cumprir a função que denominaremos de função-acoplamento. É nessa função que elas comparecem, por exemplo, nas equações de força de Coulomb e de Lorentz. A distinção conceitual é de natureza lógica, e não física, já que, evidentemente, no eletromagnetismo, as cargas na função fonte e as cargas na função acoplamento correspondem precisamente ao mesmo objeto físico.

Com isso, fica estabelecido claramente o fato de que estamos lidando com a categoria dos chamados problemas abertos. A rigor, os problemas mais gerais que a teoria eletromagnética pretende tratar são problemas fechados. Por definição, sistemas físicos fechados são aqueles constituídos por matéria carregada e campos eletromagnéticos de tal forma que eles se encontram livres para se autodeterminarem mutuamente, em processos dinâmicos que implicam conservação total de carga, de energia, de momento linear e de momento angular. Em sistemas físicos abertos, contudo, assume-se a existência de mecanismos de controle externo atuantes para produzir vínculos sobre a movimentação da matéria. Esses mecanismos externos implicam fluxo de causalidade entre o sistema e o seu ambiente, de modo que os princípios de conservação são violados, se apenas o sistema físico for considerado. Problemas abertos sempre podem (e são) considerados como aproximações de problemas fechados (Purcell e Morin, 2013; Griffiths, 2013).

A segunda distinção se refere ao que denominaremos por estados de movimento da carga. Seja na função fonte, seja na função acoplamento, é fundamental diferenciar se a densidade de carga, independentemente do movimento dos seus portadores, se encontra em repouso – quando a denominamos de carga estacionária – ou se encontra em movimento – quando a denominamos de corrente. Essas distinções são importantes porque cargas estacionárias e correntes não cumprem papéis homogêneos, enquanto categorias da estrutura da interpretação causal.

Na interpretação causal, é fundamental discernir as categorias de agente causal e de efeito. Agentes causais são todos os objetos físicos que contribuem para a mudança de estado do sistema físico, ou seja, para a variação temporal das variáveis dinâmicas (Savage, 2012; Kinsler, 2011, 2015, 2020). Essas variações temporais são o que denominamos efeitos. Isso posto, cargas estacionárias e correntes, enquanto propriedades de acoplamento, são ambas partes da estrutura da lei de força de Coulomb-Lorentz, porém, nessa lei, elas não são interpretadas como agentes causais.

Por sua vez, na sua função fonte, cargas estacionárias e correntes cumprem papéis completamente distintos. A carga estacionária não é um agente causal, pois ela não comparece nas leis dinâmicas. Por outro lado, o papel da corrente é precisamente o de ser um agente causal na lei de Ampère-Maxwell.

O esquema geral que organiza, classifica e conecta as categorias expostas, já no contexto do eletromagnetismo maxwelliano, pode ser visto na figura 1. (Esse esquema geral pode ser utilizado, a depender do contexto, como um primeiro organizador avançado.)

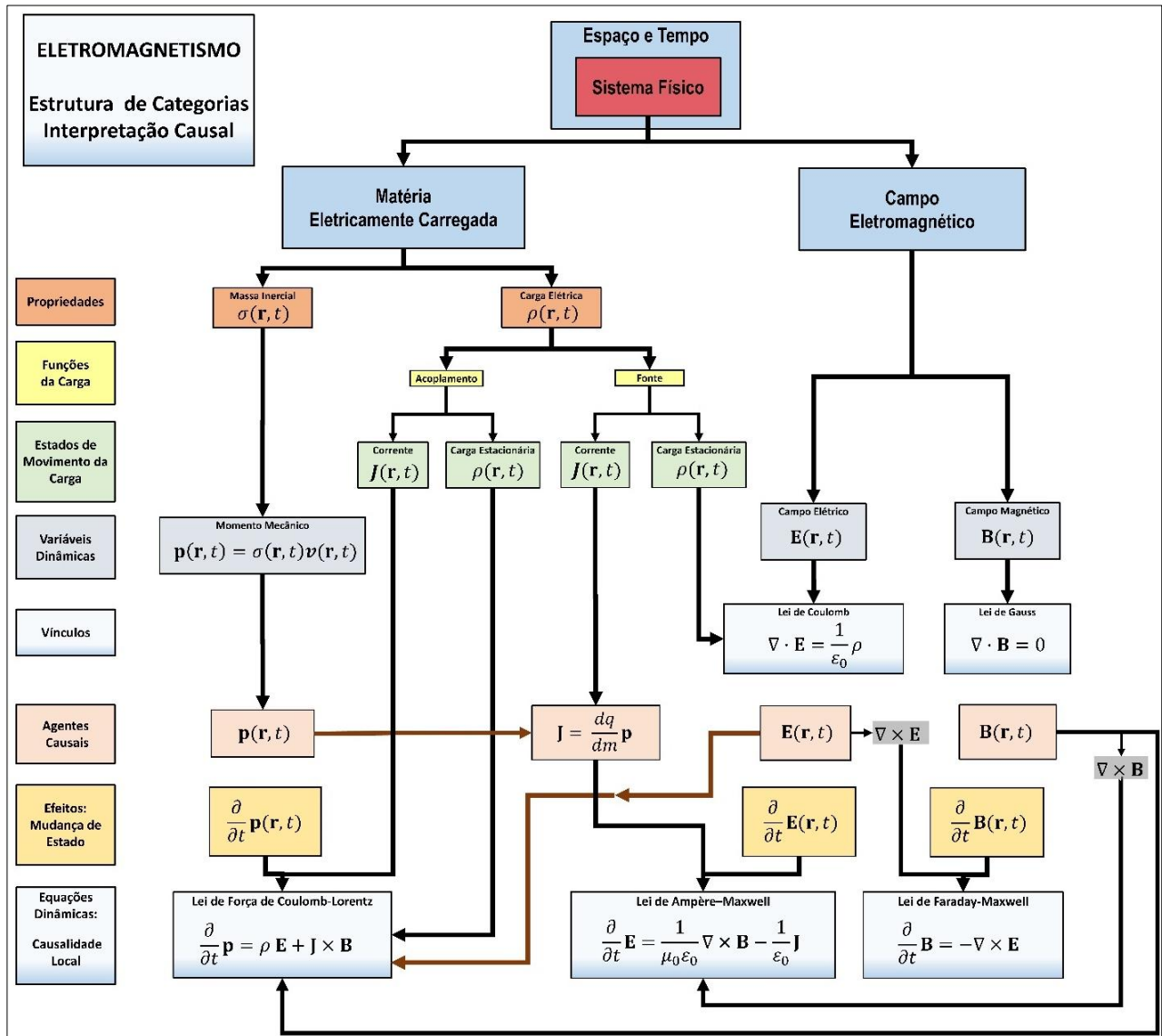


FIGURA 1. Esquema conceitual que estrutura o eletromagnetismo clássico em termos das categorias de objetos que articulam sua interpretação causal. As setas conectoras indicam o modo como se dão as derivações conceituais, a partir das categorias mais gerais de sistema físico (matéria eletricamente carregada e campo eletromagnético) e espaço/tempo. A derivação dos conceitos fundamentais se estabelece em virtude da sucessiva consideração das categorias de propriedades do sistema físico, funções e estado de movimento da carga elétrica e variáveis dinâmicas. As equações relacionadas com as leis de Coulomb e de Gauss emergem como axiomas que determinam vínculos para a dinâmica. O princípio de causalidade é implementado pelas categorias de agentes causais e de efeitos, cuja articulação se dá pelos axiomas que determinam leis dinâmicas – leis de Faraday-Maxwell, Ampère-Maxwell e Coulomb-Lorentz.

III. INSTRUMENTOS DIDÁTICOS PARA O ENSINO DO ELETROMAGNETISMO NA INTERPRETAÇÃO CAUSAL

Descreveremos brevemente a estrutura conceitual dos instrumentos didáticos, com seus diagramas conceituais formulados para articular a interpretação causal do eletromagnetismo. Devemos lembrar que esses instrumentos didáticos são nucleados pelos experimentos já mencionados na introdução e que, portanto, não se esgotam neles, de modo que cada experimento deve ser, necessariamente, acompanhado pelos seus respectivos diagramas de conceitos e pelos diagramas de conceitos que articulam as leis físicas que lhes são pertinentes (além de esquemas técnicos de funcionamento).

Como já mencionado, as partes diagramáticas desses instrumentos didáticos também podem ser utilizadas como organizadores avançados. De fato, em um sentido estritamente ausubeliano, organizadores avançados são recursos introdutórios que devem ser capazes de estabelecer uma conexão entre o conhecimento que, presumivelmente, os aprendizes já detêm, e o conhecimento do qual se requer a aprendizagem (Ausubel, 2000). Ainda segundo Ausubel, a ideia central de um organizador avançado é realizar essa conexão por meio de estruturas mais amplas e gerais. De fato, é exatamente essa função de estruturação em níveis progressivos de maior generalidade que os diagramas conceituais aqui propostos desempenham.

É importante observar que os experimentos em torno dos quais são constituídos os instrumentos são sempre os mesmos, porém, os diagramas conceituais que os acompanham podem variar. De fato, os diagramas conceituais podem possuir vários níveis de sofisticação, de modo que eles podem ser empregados, com as devidas adaptações, em variados níveis de ensino.

A. Eletrostática e magnetostática: gerador de Van de Graaff/eletroscópio e eletroímã/magnetoscópio

Os dois primeiros instrumentos didáticos, utilizados para introduzir os conceitos basilares de eletrostática e de magnetostática, são nucleados pelos experimentos do gerador de Van de Graaff/eletroscópio (no regime estático) e do eletroímã/magnetoscópio (no regime estacionário) (Duarte, 2019).

O gerador de van de Graaff e o eletroímã devem ser interpretados como sistemas de matéria eletricamente carregada que atuam como sistemas-fonte. Como tais, eles são responsáveis pela geração dos campos elétrico e magnético que atuam, localmente, como agentes causais sobre sistemas-teste – quando consideramos o problema como sendo do tipo aberto. Por sua vez, o eletroscópio e o magnetoscópio devem ser interpretados como sistemas de matéria eletricamente carregada que constituem sistemas-teste. Como tais, eles sofrem a ação dos agentes causais locais (campos). Em virtude disso, eles podem funcionar como aparelhos de medida para estudar os sistemas-fonte.

O gerador de van de Graaff é, essencialmente, qualquer dispositivo formado por dois condutores – localizados na base e no topo de uma torre vertical – e um sistema que permite – em geral, por meio de uma correia isolante, que atua por fricção – realizar um processo de separação de cargas. Se o gerador estiver inicialmente neutro e não estiver aterrado, o processo de separação de cargas produz duas distribuições de cargas totais opostas, acumuladas nos condutores. Após carregado, o gerador constitui uma distribuição total de cargas-fonte que gera um campo elétrico estático, em todo o espaço.

Um eletroscópio é qualquer dispositivo de dimensões reduzidas (com relação ao gerador) que constitua uma distribuição de cargas-teste e possua dinamômetros acoplados, de modo que possa funcionar como um instrumento de medida de forças e/ou torques. Essa distribuição de cargas-teste pode ser fixa, em um dielétrico, ou pode ser gerada por indução eletrostática, em um condutor.

Um eletroímã é, essencialmente, qualquer dispositivo formado por um material condutor no qual se possa instaurar uma distribuição localizada de correntes. A separação de correntes pode ser feita em um condutor neutro, por meio de qualquer mecanismo que seja capaz de produzir movimentação dos portadores de carga livres, no condutor. Uma vez estabelecida uma corrente estacionária, o eletroímã passa funcionar como uma distribuição de correntes-fonte, que geram um campo magnético estático.

Um magnetoscópio é, essencialmente, um eletroímã de dimensões reduzidas (com relação ao eletroímã-fonte) que constitua uma distribuição de correntes-teste e possua dinamômetros acoplados, de modo que possa funcionar como um instrumento de medida de forças e de torques. Essa distribuição de correntes-teste pode ser produzida de modo a ser aproximadamente estacionária.

A situação física geral que esses dispositivos buscam esquematizar é a seguinte: mantidas espacialmente imóveis e temporalmente constantes – por determinados mecanismos de controle externo –, existem, no vácuo, distribuições de cargas e correntes estacionárias que cumprem, exclusivamente, a função fonte – no caso, o gerador de van de Graaff e o eletroímã. Tais distribuições estão associadas com a geração de campos elétricos e magnéticos estáticos. Por sua vez, esses campos produzem forças elétricas e magnéticas sobre outras distribuições de cargas e de correntes estacionárias, que são chamadas de teste, ou seja, que cumprem, exclusivamente, a função acoplamento – no caso, o eletroscópio e o magnetoscópio.

Essa situação física geral é, evidentemente, abstrata e esquemática, pois nenhuma reação das distribuições-teste sobre as distribuições-fonte é considerada, em sua descrição. De fato, trata-se de uma situação em que se assume que as reações estão sendo permanentemente contrabalançadas pelos mecanismos de controle externo. Portanto, estamos diante de protótipos ou esquemas ideias de problemas do tipo aberto.

Outro ponto importante a ser salientado é que a eletromagnetostática não é, ainda, uma teoria de campos, no sentido estrito do termo: de fato, ela é uma teoria de ação à distância disfarçada, uma vez que a propagação de causalidade se dá com velocidade infinita.

Como parte integrante dos instrumentos didáticos, os diagramas de conceitos da eletrostática, da magnetostática e dos seus experimentos – estes, construídos como espelhos dos diagramas de conceitos correspondentes – organizam o conteúdo, tanto na sua generalidade, como em suas especificidades (cf. figuras 2 a 5). Todos os conceitos que aí aparecem se referem, na sua especificidade, aos potenciais subsunçores que, em âmbito genérico, foram previamente assumidos como existentes.

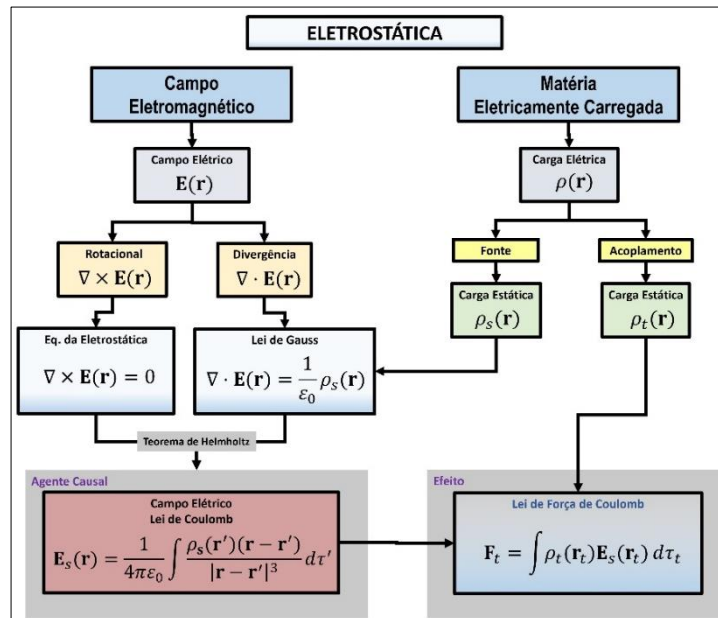


FIGURA 2. Diagrama conceitual da eletrostática, em que se estabelece a estrutura causal para sistemas abertos. O campo elétrico comparece como agente causal local que intermedia a ação causal remota de certas porções de matéria, na sua função fonte, sobre outras porções de matéria, na sua função teste – ambas controladas externamente, para a manutenção do sistema estático. O efeito da ação causal do campo elétrico sobre a matéria-teste é regulado pela lei de força de Coulomb que, na ausência de controle externo sobre a matéria-teste, promoveria sua aceleração, o que violaria as condições de validade da eletrostática.

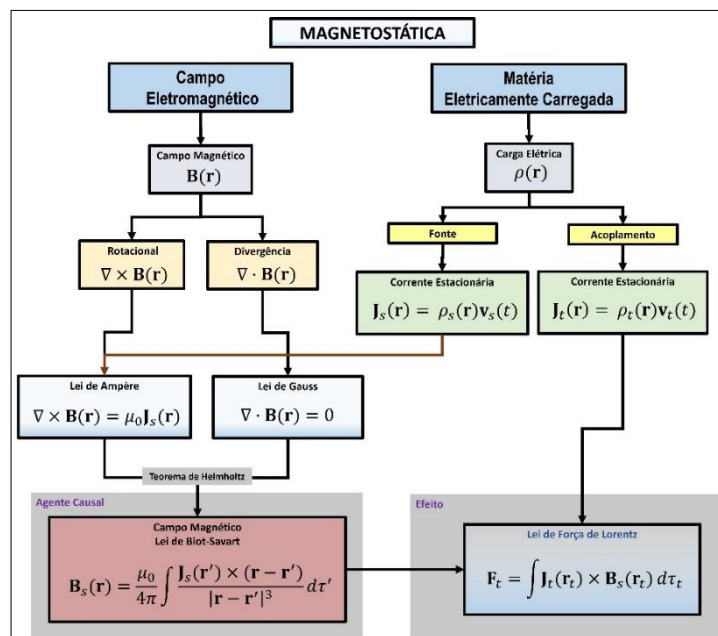


FIGURA 3. Diagrama conceitual para a magnetostática, em que se estabelece a estrutura causal para sistemas abertos. O campo magnético comparece como agente causal local que intermedia a ação causal remota de certas porções de matéria, na sua função fonte, sobre outras porções de matéria, na sua função teste – ambas controladas externamente, para a manutenção do sistema estático. O efeito da ação causal do campo magnético sobre a matéria-teste é regulado pela lei de força de Lorentz que, na ausência de controle externo sobre a matéria-teste, promoveria sua aceleração, o que violaria as condições de validade da magnetostática.

Os diagramas exibem os esquemas de derivação conceitual das soluções integrais para os campos elétrico e magnético estáticos, em termos de distribuições limitadas de cargas e de correntes estacionárias – denominadas lei de Coulomb e lei de Biot-Savart. Essas derivações partem das estruturas geométrico-diferenciais que são consideradas fundamentais, no estudo de campos vetoriais: a divergência e o rotacional. As leis fundamentais são precisamente aquelas que estabelecem a conexão entre os divergentes e os rotacionais dos campos com as densidades de carga estacionária e de corrente elétrica das distribuições-fonte. Se essas distribuições são localizadas, as Leis de Coulomb e de Biot-Savart seguem como consequência do Teorema de Helmholtz (Purcell e Morin, 2013; Griffiths, 2013).

Um ponto importante, que vale ser enfatizado, é que, dentro desse quadro geral da eletromagnetostática, só cabe falar em causalidade (interna ao sistema) no que diz respeito à ação dos campos gerados pelas distribuições-fonte sobre as distribuições-teste. E isso, por razões óbvias: não há nenhuma dinâmica dos campos envolvida, já que eles permanecem estáticos. Portanto, as únicas leis causais são as leis de força, que descrevem o acoplamento entre matéria-teste e campos-fonte. Por outro lado, os mecanismos de controle externo são responsáveis pela causalidade externa, inerente às descrições de problemas envolvendo sistemas abertos.

Os diagramas conceituais (figuras 2 e 3) são a base para a construção dos diagramas dos experimentos (figuras 4 e 5). Observe-se que esses diagramas de experimentos espelham a estrutura dos diagramas conceituais.

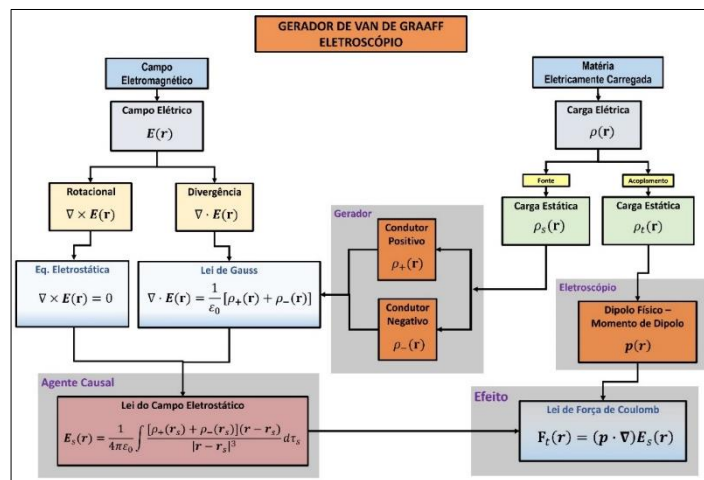


FIGURA 4. Diagrama experimental do gerador de Van de Graaff/eletroscópio. A matéria, na sua função fonte, é representada pelos condutores positiva e negativamente carregados (que constituem o gerador, controlado externamente), enquanto a matéria, na sua função teste, é representada pelo momento de dipolo elétrico do eletroscópio, na aproximação de um dipolo ideal. A ação causal do campo eletrostático das fontes (gerador) é exercida como força e torque sobre o teste (eletroscópio). Na figura, representamos a força resultante de um campo elétrico (não uniforme).

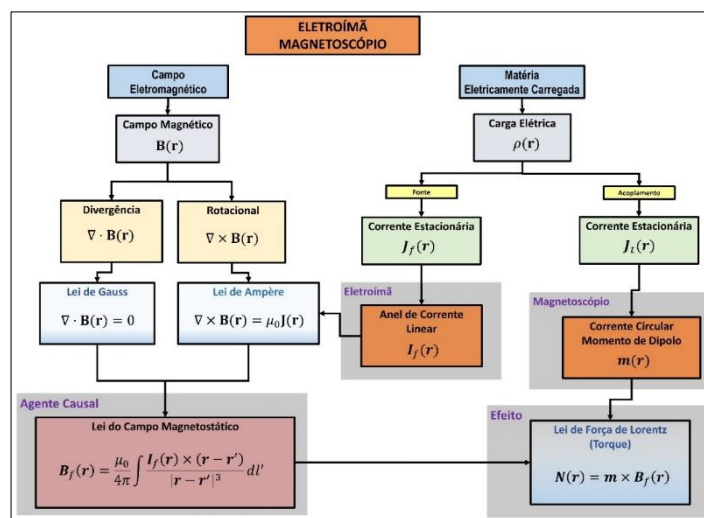


FIGURA 5. Diagrama experimental do eletroímã/magnetoscópio. A matéria, na sua função fonte, é representada por um anel de corrente (que constitui o eletroímã, em que uma corrente estacionária é controlada externamente), enquanto a matéria, na sua função teste, é representada pelo momento de dipolo magnético de um outro anel de corrente, na aproximação de um dipolo ideal. A ação causal do campo magnetostático da fonte (eletroímã) é exercida como força e torque sobre o teste (magnetoscópio). Na figura, representamos o torque resultante de um campo magnético.

Os detalhes das expressões matemáticas nesses diagramas são de menor importância, quando comparados com a importância da forma da estrutura conceitual. Com efeito, enquanto as expressões matemáticas podem até mesmo serem eventualmente eliminadas, em níveis elementares de ensino, a estrutura permanece exatamente a mesma. É precisamente em virtude de sua forma invariante que esses diagramas podem também servir como organizadores avançados.

A propósito, os diagramas mais simplificados poderão conter, no lugar das expressões matemáticas, imagens que busquem transmitir, intuitivamente, o conteúdo daquelas expressões. Em particular, acreditamos que, mesmo não sendo possível, no nível de Ensino Médio, definir os conceitos matemáticos de divergência e de rotacional, é possível fornecer os seus conteúdos intuitivos. Esses conteúdos estão associados com a forma esfericamente simétrica do campo (elétrico) associado de uma fonte infinitesimal (pontual) de carga e com a forma axialmente simétrica do campo (magnético) associado com uma fonte infinitesimal (axial) de corrente.

Para fins ilustrativos, o eletroscópio (cf. figura 4) foi imaginado como um dipolo físico – aproximado por um dipolo ideal, de momento de dipolo $\mathbf{p}(\mathbf{r})$ – que pode sofrer forças e torques, quando submetido a um campo elétrico, em geral, não uniforme. Da mesma forma, o eletroímã e o magnetoscópio (cf. figura 5) foram imaginados como anéis (unidimensionais) circulares de corrente. O magnetoscópio, em particular, foi imaginado como um dipolo magnético – aproximado por um dipolo ideal, de momento de dipolo $\mathbf{m}(\mathbf{r})$ – que pode sofrer forças e torques, quando submetido a um campo magnético, em geral, não uniforme. Vale salientar que as expressões dessas forças e torques, para dipolos ideais, são todas conhecidas (Purcell e Morin, 2013; Griffiths, 2013).

Observe-se que ambos os diagramas experimentais (figuras 4 e 5) deixam claro que os fenômenos – que associamos com os efeitos observados (forças e torques medidos por meio de dinamômetros) – resultam diretamente (e inevitavelmente) das respectivas leis de força, ou seja, das leis causais.

Podemos salientar, ainda, que os instrumentos didáticos reunidos em torno do gerador (carregado, estático) e do eletroímã (regime estacionário) podem funcionar como organizadores avançados não apenas do tipo expositivo, mas também do tipo comparativo (Ausubel, 2000), porque sua comparação com o funcionamento da bobina de Tesla contribui para a introdução dos mesmos conceitos, porém, em contextos mais avançados, em que os campos, no lugar de estáticos, são dinâmicos.

B. Eletromagnetismo e causalidade: o experimento de Faraday

O terceiro instrumento didático serve para introduzir, pela primeira vez, a eletrodinâmica e o conceito de indução eletromagnética. Porém, no presente trabalho, isso é feito de uma perspectiva um pouco mais ampla. Isso significa que pretendemos abordar problemas relacionados com a descrição causal, em diferentes sistemas de referência, e, principalmente, discutir a propagação local de causalidade implicada pela dinâmica dos campos.

Com efeito, para compreender a eletrodinâmica em acordo com a abordagem ausubeliana que estamos utilizando, é fundamental lançar mão dos conceitos de causalidade e de sistema de referência como potenciais subsunçores. É daí que surge o papel precípuo do experimento de Faraday, como instrumento didático. De fato, as diversas facetas apresentadas pelo fenômeno de indução eletromagnética permitem uma introdução progressiva e conceitualmente conectada da eletrodinâmica a partir da eletromagnetostática.

Primeiramente, vamos distinguir dois conceitos: causalidade remota e causalidade local. A causalidade remota é o tipo de relação que se quer estabelecer entre uma causa que está espaço-temporalmente afastada, por uma distância finita, do efeito que lhe é imputado. Por sua vez, causalidade local – que requer a coexistência, em cada ponto do espaço e do tempo, entre agente causal e efeito – é o tipo de relação associada com a descrição do processo de propagação da ação causal, que permite constituir uma cadeia sucessiva e contínua de causas e de efeitos – ou seja, uma história causal determinística para o sistema físico. Toda causalidade remota deve ser, em princípio, redutível à propagação de ações causais locais.

Os experimentos clássicos que ilustram o conceito de indução eletromagnética são de dois tipos básicos. Ambos os tipos envolvem, essencialmente, a interação entre um eletroímã (circuito primário) e um circuito condutor neutro (secundário) – este, eventualmente conectado a um amperímetro, para a medida da corrente elétrica induzida.

O primeiro tipo básico de indução eletromagnética é aquele constituído pelo movimento relativo (em baixas velocidades) entre os circuitos primário e secundário – em que se supõe que mecanismos de controle externo contrabalançam as reações do secundário sobre o primário e mantém uma corrente estacionária no circuito primário. Esse primeiro tipo básico pode ser de dois subtipos básicos: o primeiro subtipo é aquele que aparece no sistema de referência em que o circuito primário está em repouso, enquanto o segundo subtipo é aquele que aparece no sistema de referência em que é o circuito secundário que está em repouso.

O segundo tipo básico de indução eletromagnética é aquele em que não ocorre movimento relativo entre os circuitos primário e secundário – e também se supõe a existência de mecanismos de controle externo que contrabalançam as reações do secundário sobre o primário e mantém uma corrente variável no circuito primário, mas, determinada pelo controle.

Os tipos básicos são, portanto, ambos esquemas abstratos cujo objetivo é tratar problemas do tipo aberto. Esses esquemas abstratos são exatamente aqueles que permitem generalizar e estender os esquemas da eletromagnetostática para o contexto dinâmico. Com relação a esses tipos básicos, os pontos fundamentais para o quais queremos chamar a atenção são os seguintes.

Se o problema da geração de corrente induzida, em particular – e o problema da interação dinâmica entre correntes, em geral – for do tipo básico que envolve apenas movimento relativo, em baixas velocidades, o fenômeno de indução eletromagnética pode levar em consideração apenas a lei de força de Lorentz – no que diz respeito a uma explicação baseada na causalidade. De fato, essa é a única lei responsável pela descrição dos efeitos das forças exercidas sobre os portadores de carga do circuito secundário – uma vez que eles são forçados a se mover em relação ao campo magnético e, portanto, em relação ao circuito primário.

Além disso, no caso de movimentos em baixas velocidades e correntes lentas, a indução eletromagnética é um fenômeno que pode ser tratado como ação instantânea à distância. Portanto, esse primeiro tipo básico é justamente aquele que realiza uma imediata generalização da situação descrita na magnetostática (cf. fig. 3) para um contexto dinâmico. A generalização é mais evidente no caso do subtipo em que o circuito primário está em repouso e o secundário em movimento lento (cf. fig. 6). A geração de corrente induzida no circuito secundário é resultado da combinação de uma ação causal local do campo magnético estático (gerado pelo circuito primário) e de ações causais remotas.

Essas ações remotas são exercidas pelos mecanismos de controle externo que, além de atuarem mecanicamente – mantendo o circuito primário em repouso e o circuito secundário em um movimento predeterminado –, atuam também eletromagneticamente, mantendo uma corrente estacionária no circuito primário. Essas ações externas são tais que contrabalançam os efeitos de reação – necessariamente presentes em uma descrição completa, envolvendo um problema fechado.

No caso do subtipo em que o circuito primário está em movimento e o secundário em repouso, a explicação é mais sutil, mas, também pode-se demonstrar que é resultado da combinação de uma ação causal local do campo magnético móvel (gerado pelo primário, em movimento lento) sobre os portadores de carga do circuito secundário e de ações causais remotas, exercidas pelos mecanismos que garantem o controle sobre os circuitos e, em particular, forçam o circuito primário a se mover carregando rigidamente o seu campo magnético, no espaço (aproximação de baixas velocidades). O diagrama experimental associado com esse segundo subtipo é bastante similar ao apresentado na figura 6.

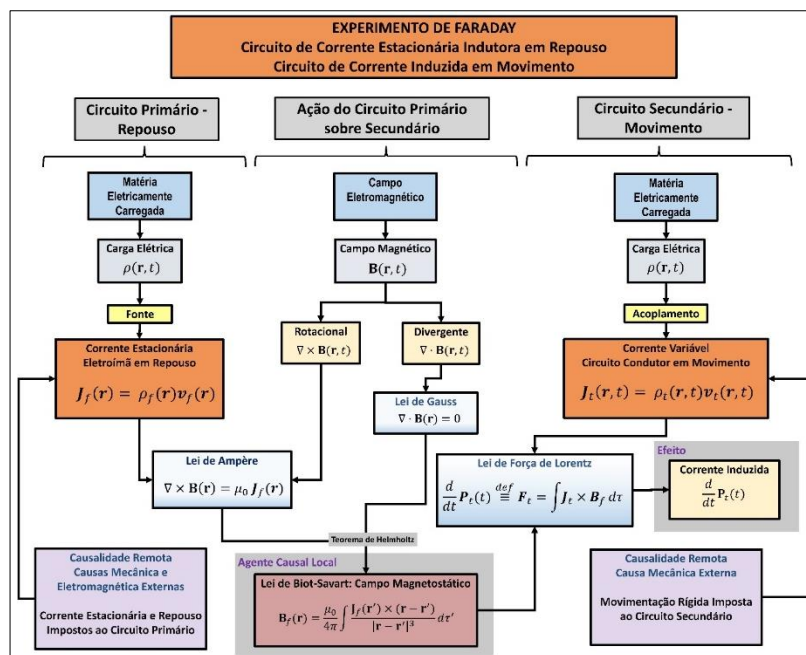


FIGURA 6. Diagrama experimental do experimento de Faraday associado com movimentação relativa entre um eletroímã (sistema-fonte) e um circuito condutor (sistema-teste), descrito em um referencial em que o eletroímã está em repouso e o circuito condutor movimenta-se em baixas velocidades. O diagrama estabelece a estrutura das ações causais em um sistema aberto. A ação causal do campo magnetostático da fonte sobre o teste é regulada pela lei de força de Lorentz.

O segundo tipo básico de experimento clássico, porém, vai além de uma simples generalização da magnetostática. Quando não há movimentação relativa entre os circuitos primário e secundário, o efeito de corrente induzida não pode ser explicado pela ação combinada da lei de Biot-Savart – estendida, no caso da movimentação rígida do campo magnético – e da lei de força de Lorentz.

O fato é que, nesse caso, é necessário ir além de mera generalização e estender o eletromagnetismo na direção de sua descrição completa, ou seja, na direção das equações de Maxwell. Com efeito, o fenômeno, tratado rigorosamente, ocorre em virtude da lei de força de Coulomb e da combinação das leis de Faraday-Maxwell e de Ampère-Maxwell. De fato, sem o acoplamento de ambas as equações dinâmicas para os campos elétrico e magnético, não existe a possibilidade de propagação local de causalidade, com velocidade finita (Savage, 2012).

O diagrama de conceitos que esquematiza o eletromagnetismo, na sua versão completa, é mostrado na figura 7. Novamente, esse diagrama conceitual pode funcionar como um organizador avançado, uma vez que se suponha que sua estrutura deva ser eminentemente representativa da interpretação causal a ser ensinada.

Em particular, essa interpretação enfatiza o fato de que as equações de Maxwell que se referem aos divergentes dos campos elétrico e magnético não são consideradas causais, pois não são equações dinâmicas, mas, sim, vínculos sobre os campos e sobre a densidade de carga estacionária. Esses vínculos não envolvem produção de efeitos – pois não estão associados com variações temporais das variáveis dinâmicas dos campos ou da matéria (cf. figura 1) –, mas, sim, relações que devem ser mantidas, em todos os instantes de tempo. As equações causais, por sua vez, são as equações dinâmicas que representam as leis de Faraday-Maxwell e de Ampère-Maxwell. O diagrama da figura 7 procura enfatizar, ainda, o modo como o campo eletromagnético e a matéria eletricamente carregada determinam-se mutuamente, seja por meio dos vínculos, seja por meio de relações causais.

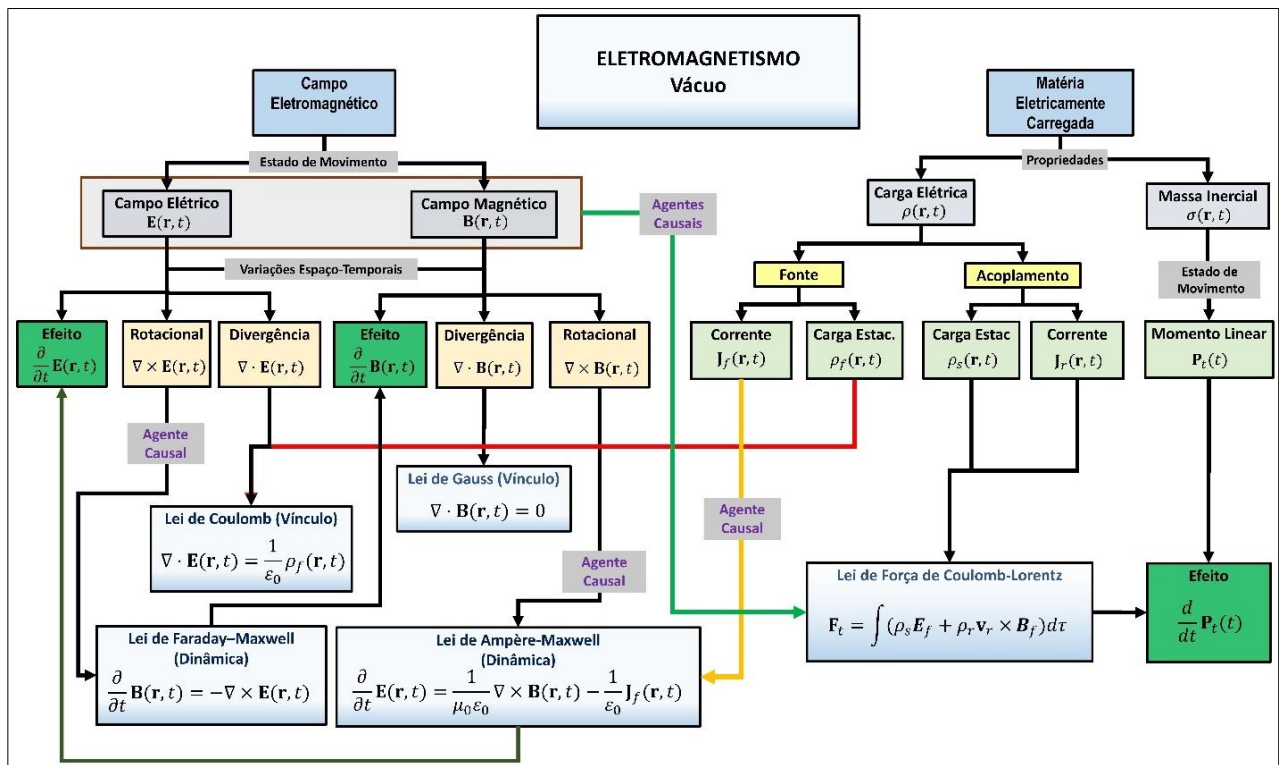


FIGURA 7. Diagrama conceitual para o eletromagnetismo na interpretação causal. A estruturação do diagrama é realizada em acordo com a estruturação categorial estabelecida na figura 1 e supõe que a descrição se dará após a fixação de um sistema de referência inercial. Em sistemas abertos, a matéria eletricamente carregada (controlada externamente), na sua função fonte, contribui para o vínculo da lei de Coulomb (por meio da densidade de carga) e como agente causal, a lei de Ampère-Maxwell (por meio da densidade de correntes dependente do tempo). Por sua vez, os rotacionais dos campos elétrico e magnético são interpretados como agentes causais, nas leis de Faraday-Maxwell e Ampère-Maxwell. Juntamente com a densidade de correntes, eles promovem, como efeito, as variações temporais dos campos. Ainda em sistemas abertos, os campos eletromagnéticos são agentes causais para o efeito dinâmico produzido sobre a matéria eletricamente carregada (na sua função teste), cuja regulação cabe à lei de força de Coulomb-Lorentz.

A explicação causal do processo indutivo (unidirecional, sistema aberto) envolvido no experimento de Faraday (segundo tipo básico) está representada pelo diagrama da figura 8. Quando a corrente no eletroímã (circuito primário) é variada, em virtude de algum mecanismo de controle (causa externa), a lei de Ampère-Maxwell implica como efeito

a variação temporal local do campo elétrico. Mas, sendo a variação local, automaticamente o campo elétrico se desenvolve, localmente, no sentido de gerar um rotacional não nulo, o que, pela lei de Faraday-Maxwell, causa a variação temporal local do campo magnético. Essa variação temporal do campo magnético vem acompanhada pelo desenvolvimento de rotacional não nulo do campo magnético, retroalimentando causalmente a variação temporal de campo elétrico, a partir da lei de Ampère-Maxwell. Isso dá sequência ao processo, retroalimentando causalmente a variação temporal do campo magnético, a partir da lei de Faraday-Maxwell, e assim sucessivamente, ponto a ponto, no espaço, ao longo do tempo (Savage, 2012; Kinsler, 2011, 2020).

Esse processo de propagação local da causalidade está esquematizado, na figura 8 e pode ser acompanhado pelo ciclo formado pelas setas vermelhas (com fundo destacado). A propagação causal conjunta de variações temporais nos campos elétrico e magnético (mutuamente induzidos) no espaço alcança, finalmente, o circuito condutor secundário, onde o campo elétrico induzido, pela lei de força de Coulomb, promove, finalmente, uma corrente elétrica induzida no circuito secundário (Savage, 2012; Kinsler, 2011, 2020).

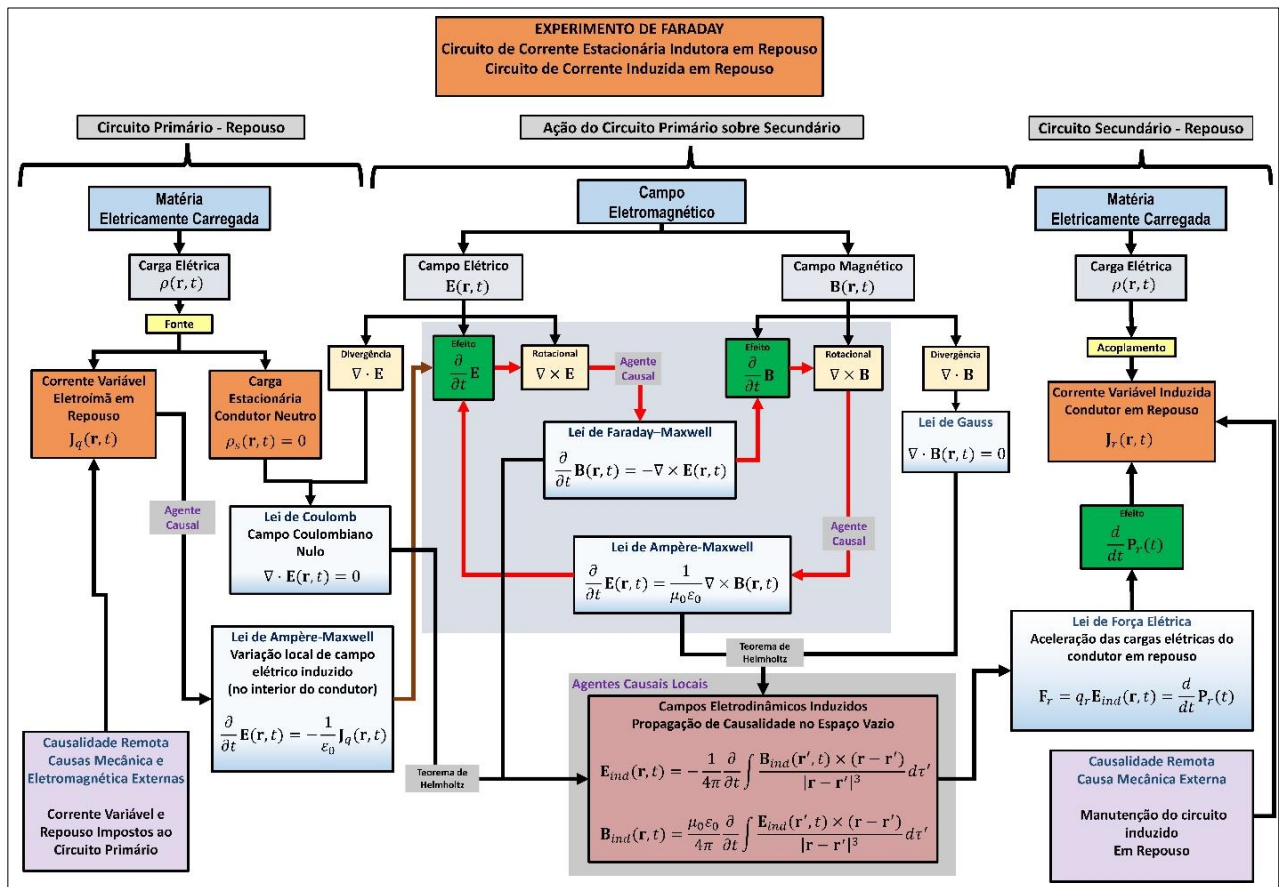


FIGURA 8. Diagrama do experimento de Faraday associado com a indução de correntes entre porções de matéria eletricamente carregada em repouso relativo, tratada como problema aberto. O controle externo (causa remota) exercido sobre as correntes em um eletroímã neutro (matéria na sua função fonte, circuito primário), promove (como efeito) a propagação, ponto a ponto no espaço, ao longo do tempo, de variações temporais acopladas entre os campos elétrico e magnético mutuamente induzidos, reguladas pelas leis de Faraday-Maxwell e Ampère-Maxwell (onda eletromagnética). A ação causal local exercida sobre a matéria, na sua função teste, ocorre, após um tempo de propagação finito, produzindo como efeito a corrente induzida no circuito secundário (aceleração dos portadores de carga), de acordo com a lei de força de Coulomb.

Observe-se que, a explicação causal do processo indutivo, nesse segundo tipo básico, faz menção, pela primeira vez, ao processo de propagação local de causalidade, que se dá, no espaço e no tempo, por meio dos campos eletromagnéticos, com velocidade finita. Evidentemente, é possível simplificar consideravelmente a explicação do segundo tipo básico de experimento se assumirmos, como aproximação, a ação instantânea à distância entre os circuitos primário e secundário. Nesse caso, apenas as leis de Coulomb e de Faraday-Maxwell seriam explicitamente invocadas, como soe ser o caso em livros-texto (Purcell e Morin, 2013; Griffiths, 2013).

C. Acoplamento indutivo na bobina de Tesla: ondas eletromagnéticas

O segundo tipo básico de indução eletromagnética é precisamente o que está envolvido na operação da bobina de Tesla, onde a variação nas densidades de correntes e de cargas estacionárias são produzidas não pela movimentação relativa dos circuitos primário e secundário (bobinas), mas, sim, pela aplicação de potência externa ao circuito primário.

Observe-se que, no acoplamento indutivo entre as bobinas, a explicação causal completa até pode ser evitada, em favor de uma descrição aproximada, envolvendo apenas ação instantânea à distância. Porém, isso já não será mais possível no caso da explicação da geração de ondas eletromagnéticas, a longas distâncias, pela oscilação da bobina de Tesla – ou seja, o que podemos chamar de efeitos remotos do acoplamento indutivo.

Em qualquer caso, a bobina de Tesla é o quarto instrumento didático da sequência e serve para introduzir, pela primeira vez, os conceitos de produção de campos eletromagnéticos variáveis no tempo, associados com a propagação local de causalidade, através do fenômeno de propagação ondulatória de campos eletromagnéticos (irradiados para o infinito). Todas as especificações técnicas para a construção da bobina de Tesla são fornecidas em Duarte (2019) e nas demais referências já citadas na introdução.

O experimento da bobina de Tesla pode ser compreendido, conceitualmente, como sendo dividido em quatro partes, para cujo entendimento é necessário invocar todas as leis do eletromagnetismo.

A primeira parte refere-se ao fenômeno de acoplamento indutivo entre as bobinas primária e secundária. Todo o fenômeno é dirigido pelo circuito primário, responsável pela geração de uma corrente induzida variável (alternada) no circuito secundário. No experimento, tudo começa com a geração de um campo elétrico, pela acumulação de cargas nos capacitores que estão conectados com a bobina primária, em um circuito aberto. Esse campo elétrico, quando suficientemente intenso, quebra a rigidez dielétrica do ar, fechando momentaneamente o circuito primário e produzindo uma corrente variável no tempo, na forma de um pulso de elevada intensidade, a cada ciclo de descarga.

A corrente variável, ao percorrer a bobina primária, inicia uma sucessão de eventos de causas e de efeitos que propagam a ação causal, até atingir a bobina secundária. Em linhas gerais, a explicação é idêntica àquela para o experimento de Faraday (segundo tipo básico, figura 8). Novamente, devemos enfatizar que, em ambos os experimentos, as ações indutivas do circuito primário sobre o circuito secundário são conceitualmente equivalentes. O acoplamento indutivo, por sua vez, ocorre porque a geração de corrente induzida na bobina secundária dá início a uma reação, cuja propagação (local) atinge a bobina primária, reiniciando todo o processo e, desse modo, promovendo a sua oscilação eletromagnética conjunta. Nesse processo, estamos, pela primeira vez, diante de uma situação em que uma parte das reações está sendo (e deve ser, necessariamente) considerada. Não estamos diante de um sistema fechado, obviamente, porque ainda existem mecanismos de controle externo intervindo no funcionamento do sistema.

A segunda parte da estrutura conceitual do experimento da bobina de Tesla só depende, na sua maior parte, do comportamento da bobina secundária. O efeito da corrente induzida (alternada) é uma acumulação alternada de cargas, no topo da bobina secundária (capacitor), o que gera, em todo o espaço, um campo elétrico variável no tempo, oscilante, cujo formato é aproximadamente “*monopolar*” – se a bobina secundária estiver aterrada – ou “*dipolar*” – se estiver isolada.

Nesse ponto, é importante salientar que a bobina secundária é um análogo dinâmico do gerador de Van de Graaff. Isso mostra que a bobina de Tesla pode ser compreendida, conceitualmente, como um sistema composto pelos demais experimentos, integrando todo o conteúdo fundamental do eletromagnetismo em uma só estrutura.

A terceira parte da estrutura do experimento também só depende, na sua maior parte, do comportamento da bobina secundária. Ela tem a ver com a propagação local de causalidade, no campo eletromagnético, por meio de mútuas induções – explicadas conjuntamente pelas leis de Faraday-Maxwell e Ampère-Maxwell. O fenômeno é observado, no infinito, como uma onda irradiada.

Por fim, a quarta parte da estrutura do experimento envolve a detecção das ondas eletromagnéticas. Essa detecção é o termo final da sucessão de causas e efeitos localmente propagados. Ela pode ser feita com antenas conectadas com amperímetros (Duarte, 2019). As antenas funcionam, conceitualmente, segundo a mesma estrutura que o experimento de Faraday de segundo tipo (cf. figura 8), ou seja, envolvendo, como efeito, a geração de correntes induzidas que podem ser medidas e associadas com os campos eletromagnéticos como agentes causais.

O diagrama experimental que esquematiza a bobina de Tesla foi elaborado, porém, ele é demasiado complicado para ser apresentado na sua versão completa, nesse artigo, pois a visualização de seus detalhes se tornaria inviável².

² O leitor interessado pode acessar o diagrama experimental da bobina de Tesla pelo endereço [Figura 14. Bobina de Tesla - AMM Polito e ISR Duarte.png](#), ou, ainda, contactar diretamente os autores.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, apresentamos um conjunto de instrumentos didáticos para o ensino dos elementos mais fundamentais do eletromagnetismo clássico, segundo uma abordagem ausubeliana. Em particular, destacamos o papel da bobina de Tesla como núcleo de um instrumento didático que permite exibir todos os conceitos e os fenômenos do eletromagnetismo, de modo perfeitamente integrado.

Todo o trabalho está consubstanciado na ideia, também ausubeliana, de que o conhecimento prévio dos estudantes, quando significativo, está estruturado de modo que partes dele sirvam como potenciais estruturas assimiladoras para novos conhecimentos (subsunçores). Contudo, se essas estruturas não existem ou estão pouco desenvolvidas, é fundamental apresentar o novo conhecimento de forma externamente estruturada, em conjunção com os subsunçores requeridos. E, mesmo que os subsunçores existam, o papel dos instrumentos didáticos – quando utilizados na função de organizadores avançados – ainda é de grande importância, pois eles têm o poder de requisitá-los explicitamente, para cumprir sua função assimiladora.

Em todo o trabalho, a chave ausubeliana para a estruturação da teoria é o conceito de causalidade, que julgamos ser o modo habitual e cotidiano de se pensar e interpretar os fenômenos naturais. E, para tanto, é essencial entender que as histórias causais – que são o modo como os fenômenos se desdobram, quando são exibidos por experimentos – são sempre relativas e, portanto, dependem dos sistemas de referência a partir dos quais elas são espaço-temporalmente descritas. A estrutura de invariância da teoria é quem garante que todas as descrições causais, embora distintas, possam ser mutuamente traduzidas, preservando algumas noções fundamentais relacionadas ao princípio de causalidade, tal como a invariância dos papéis das causas e dos efeitos.

Em virtude disso, os instrumentos didáticos foram construídos para exibir o que se conhece como interpretação causal da eletrodinâmica. Ela requer que uma série de discernimentos conceituais sejam realizados de modo claro, pois deles depende a consistência e o poder de organização desses instrumentos.

É importante ressaltar que os diagramas conceituais que desenvolvemos são esquemas que permitem analisar, compreender e explicar quaisquer outros experimentos no âmbito do eletromagnetismo clássico, para além daqueles que consideramos, explicitamente. Esses diagramas conceituais podem funcionar como padrões (ou gabaritos), com grande valor pedagógico agregado. De fato, na medida em que são repetidamente utilizados para estruturar novas situações experimentais – referentes às mesmas categorias de fenômenos –, têm o poder de tornar gradativamente mais sólidas as estruturas cognitivas internas que foram construídas para representar o conhecimento recém adquirido.

REFERÊNCIAS

Ausubel, D. P. (2000). *The acquisition and retention of knowledge: a cognitive view*. Dordrecht, The Netherlands: Springer Science+Business Media.

Bruns, D. G. (1992). A solid-state low voltage Tesla coil demonstrator. *Am. J. Phys*, 60(9), 797-803.

Chiquito, A. J., Lanciotti, F. (2000). Bobina de Tesla: dos Circuitos Ressonantes LC aos Princípios das Telecomunicações. *Rev. Bras. Ens. Fís.*, 22(1), 69-77.

Duarte, I. S. R. (2019). Geração e Detecção de Campos Eletromagnéticos por meio da Bobina de Tesla: uma Proposta de Ensino a Partir de Organizadores Avançados Ausubelianos. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/37448>.

Griffiths, D. J. (2013). *Introduction to Electrodynamics* (4^o ed.). London: Pearson Education.

Kinsler, P. (2011). How to be causal: time, spacetime, and spectra. *Eur. J. Phys*, 32(6), 1687-1700.

Kinsler, P. (2015). Causal diagrams for physical models. arXiv: 1509.01491v1.

Kinsler, P. (2020). Faraday's Law and magnetic induction: cause and effect, experiment and theory. *Physics*, 2(2), 150-163.

Laburu, C. E., Arruda, S. M. (1991). A construção de uma bobina de Tesla para uso em demonstrações na sala de aula. *Cad. Cat. Ens. Fís.*, 8(1), 217-226.

- Maudlin, T. (2012). *Philosophy of Physics: Space and Time*. Princeton, USA: Princeton University Press.
- Purcell, E. M., Morin, D. J. (2013). *Electricity and Magnetism* (3rd ed). New York, USA: Cambridge University Press.
- Savage, C. (2012). Causality in Classical Electrodynamics. *Phys. Teacher*, 50, 22-228.
- Skeldon, K. D., Grant, A. I., Scott, S. A. (1997). A high potential Tesla coil impulse generator for lecture demonstrations and science exhibitions. *Am. J. Phys.*, 65(8),744-754.
- Thompson, M. T. (1999). Inductance calculation techniques part II: approximations and handbook methods power control and intelligent motion. *Power Control and Intelligent Motion*, 25(12), 44-45.
- Tilbury, M. (2008). *The ultimate Tesla Coil design and construction guide*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Villalba, J. M., Ferreira, L., Arribas, H., Nájera, A, Beléndez, A. (2015). Estudio experimental de la inducción electromagnética entre dos bobinas: dependencia con la corriente eléctrica. *Rev. Bras. Ens. Fís.*, 37(1), 1313-1-7.
- Weinberg, S. (1972). *Gravitation and Cosmology: principles and applications of the general theory of relativity*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Wheeler, H. A. (1928). Simple Inductance Formulas for Radio Coils. *Proc. Inst. Radio Engineers*, 16(10), 1398-1400.